

CONSULTORÍA
CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE CAUCES DE LOS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA
REGIÓN DE ANTOFAGASTA

ÍNDICE DE CONTENIDOS
RESUMEN EJECUTIVO

Acápite	Descripción	Página
1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	ASPECTOS GENERALES	1
1.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA Y ÁREA DE ESTUDIO	1
1.3.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
1.4.	SECTORIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
2.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	4
3.	TRABAJOS DE TERRENO	4
3.1.	RECONOCIMIENTO DE TERRENO	4
3.2.	TRABAJOS TOPOGRÁFICOS Y LEVANTAMIENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO	6
3.3.	MECÁNICA DE SUELOS PARA CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS	7
3.3.1.	Mecánica de Suelos	7
3.3.2.	Zona de Botaderos y Canteras	8
3.4.	CATASTRO DE ELEMENTOS E INTERÉS Y USOS DEL ESPACIO FLUVIAL	11
4.	ESTUDIOS BÁSICOS	12
4.1.	ESTUDIO DE DINÁMICA FLUVIAL	12
4.2.	ESTUDIO HIDROLÓGICO	15
4.3.	MODELACIÓN NUMÉRICA DE CRECIDAS	17
4.4.	ANÁLISIS MECÁNICO FLUVIAL DEL CAUCE	18
4.4.1.	Socavación en el Cauce	18
4.4.2.	Transporte de Sedimentos y Depositación	19
5.	DIAGNÓSTICO	20
5.1.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	20
5.2.	DIAGNÓSTICO HIDRÁULICO DEL CAUCE Y DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE	24
5.3.	IDENTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA Y VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS DAÑOS DEL EVENTO DE FEBRERO DE 2019	33
6.	PLAN DE MANEJO DE CAUCE	35
6.1.	OBJETIVOS PROPUESTOS PARA EL PLAN DE MANEJO DE CAUCES	35
6.2.	MEDIDAS ESTRUCTURALES	37

CONSULTORÍA
CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE CAUCES DE LOS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA
REGIÓN DE ANTOFAGASTA

ÍNDICE DE CONTENIDOS
RESUMEN EJECUTIVO

Acápite	Descripción	Página
6.3.	EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE LAS MEDIDAS ESTRUCTURALES	47
6.4.	MEDIDAS NO ESTRUCTURALES	49
6.5.	PRIORIZACIÓN DE LAS MEDIDAS PROPUESTAS POR EL PLAN	50
6.5.1.	Medidas No Estructurales	50
6.5.2.	Medidas Estructurales	50
6.5.3.	Programa de Ejecución Dirección de Obras Hidráulicas	59
7.	ANÁLISIS AMBIENTAL	61
8.	PARTICIPACIÓN CIUDADANA	62
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

0	15-11-2021	Aprobado	WLN	DMP	SPA
A	13-11-2021	Emitido para Revisión Interna	SPA	DMP	SPA
REV	FECHA	REVISIÓN PARA	POR	CHECK	JDP
		CÓDIGO DOCUMENTO			
		ARR104-ET5-C01 0			

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos Generales

El presente informe corresponde al estudio “Caracterización y Manejo de Cauce de los Ríos San Pedro y Vilama, Región de Antofagasta”, adjudicado a la Consultora Arrau Ingeniería SpA, mediante Resolución (Exenta) D.O.H. N°3438, del 11 de noviembre de 2020.

El origen de la citada consultoría corresponde a la necesidad por parte de la Dirección de Obras Hidráulicas de desarrollar un estudio de la cuenca del Salar de Atacama, de la región de Antofagasta que permita “caracterizar” el fenómeno que originó el evento de crecida ocurrida durante los meses de enero y febrero de 2019, recopilando información de daños en la infraestructura y a la población dentro del área de influencia del estudio. Este Estudio también busca definir un Plan de Manejo de Cauce a partir de un detallado diagnóstico del funcionamiento hidráulico de los cauces de los Ríos San Pedro y Vilama.

Los principales beneficiarios de este Estudio, será la población que habita la ribera de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama, así como también el resto país; esto último, entendiendo de que se trata de un poblado de alto valor patrimonial.

La información proporcionada por el estudio permitirá a la DOH contar con información detallada del estado de las obras que están relacionadas con el cauce, así como también el cauce mismo, y en base a su resultado desarrollar con posterioridad, la correspondiente planificación necesaria ante posibles obras de reparación, reposición y/o mantención que se requieran.

Con ello el Servicio podrá programar y proyectar de manera eficiente los recursos tendientes al mejoramiento de los cauces antes citados, así como también permitirá optimizar y validar la priorización de obras contenidas en el Programa de Conservación de Riberas de la Región de Antofagasta.

1.2. Características de la Cuenca y Área de Estudio

El área de estudio, se ubica en la comuna de San Pedro de Atacama, Provincia del Loa, II Región, cerca del extremo norte del salar de Atacama y a aproximadamente a 100 km al suroeste de la ciudad de Calama. Geográficamente se encuentra entre los 22°22' S y los 24°21' S de latitud y entre los 67°00' O y los 68°40' O de longitud, a 2.438 metros sobre el nivel del mar.

La localidad de San Pedro se encuentra emplazada al norte del salar de Atacama dentro de una cuenca endorreica que se encuentra protegida por el oeste por la cordillera de la sal y por el este por la cordillera de Los Andes.

La provincia de El Loa, se caracteriza por poseer dos estaciones: una estación fría entre los meses de mayo a septiembre, donde los meses de junio y julio son los que presentan menores temperaturas; y una estación calurosa entre los meses de octubre a abril, donde los meses de mayor temperatura son enero y febrero. Es durante los meses calurosos que el comportamiento hidrológico en la región se ve caracterizado principalmente por las temporadas de intensas lluvias estivales, denominadas Invierno Altiplánico.

Estas lluvias estivales son producidas por grandes evaporaciones que se producen en la selva tropical del Amazonas que avanzan por Bolivia y que cruzan la cordillera hasta Chile. Estas precipitaciones de gran volumen ocurren en la cordillera y precordillera principalmente haciendo que los cauces en las distintas cuencas aumenten sus caudales considerablemente.

En la presente consultoría se estudian específicamente los ríos San Pedro y Vilama. La Figura 1-1 presenta el área de estudio.

El río Vilama se forma de diversas vertientes termales y salobres en la quebrada de Turipe y aguas abajo, en el sector de Guatín, recibe como afluente al río Purifica. El cauce natural del río Vilama entregaba sus aguas al llano de Vilama, pero actualmente el río corre encauzado en los canales que riegan los ayllus de Vilama, Alambrado, Poconche, Beter y Alto Beter y Tolor. Los Ayllus son unidades socio territoriales de familias, que se caracterizan por ser agrupaciones de tierras aisladas con bosques, que en su interior contienen estructuras prediales en las que se practica la agricultura. Estas “islas” de bosques y tierras fértiles constituyen pequeños oasis, en los que, tradicionalmente, familias atacameñas vinculadas por relaciones de parentesco han desarrollado sus actividades agrícolas.

Por su parte, el río San Pedro nace por encima de los 4.000 msnm. Su curso inicial es el ojo Putana, desde donde comienza su descenso bajo el nombre de río Putana, recibiendo aportaciones de ríos como el Jauna o el Chuschul. Desde su encuentro con este último, toma el nombre de río San Pedro, cuyo cauce natural ingresa en los Ayllus de Cuchabrache-Catarpe, continua por Quitar y luego bordea los Ayllus de Conde Duque, Yaye y Séquitur, Coyo y Beter, para después verter sus aguas al Salar de Atacama. Las comunidades atacameñas han regado tradicionalmente con sus aguas, captando las aguas en el Ayllu de Cuchabrache, desde donde se inicia una extensa canalización que conduce las aguas hacia los Ayllus de Tambillo, Suchor, Guachar, Bellavista, Catarpe, Quitar, Conde Duque, Solcor, Larache, Checar, Yaye, Séquitur, Coyo, Solor y Cúcuter. Al igual que otros ríos de la región, las aguas del río San Pedro presentan valores químicos elevados de arsénico y boro, así como una alta conductividad eléctrica. Por ello, la agricultura local se ha basado en una serie de cultivos y frutales adaptados a tales condiciones. Otra de las problemáticas que aqueja a los usuarios tiene que ver con la constante disminución de los caudales del río que ha existido desde mediados del siglo XX, situación atribuible a su dependencia de las precipitaciones que ocurren en la puna (donde nace el río) y a la constante presión de distintos usos sobre el recurso.

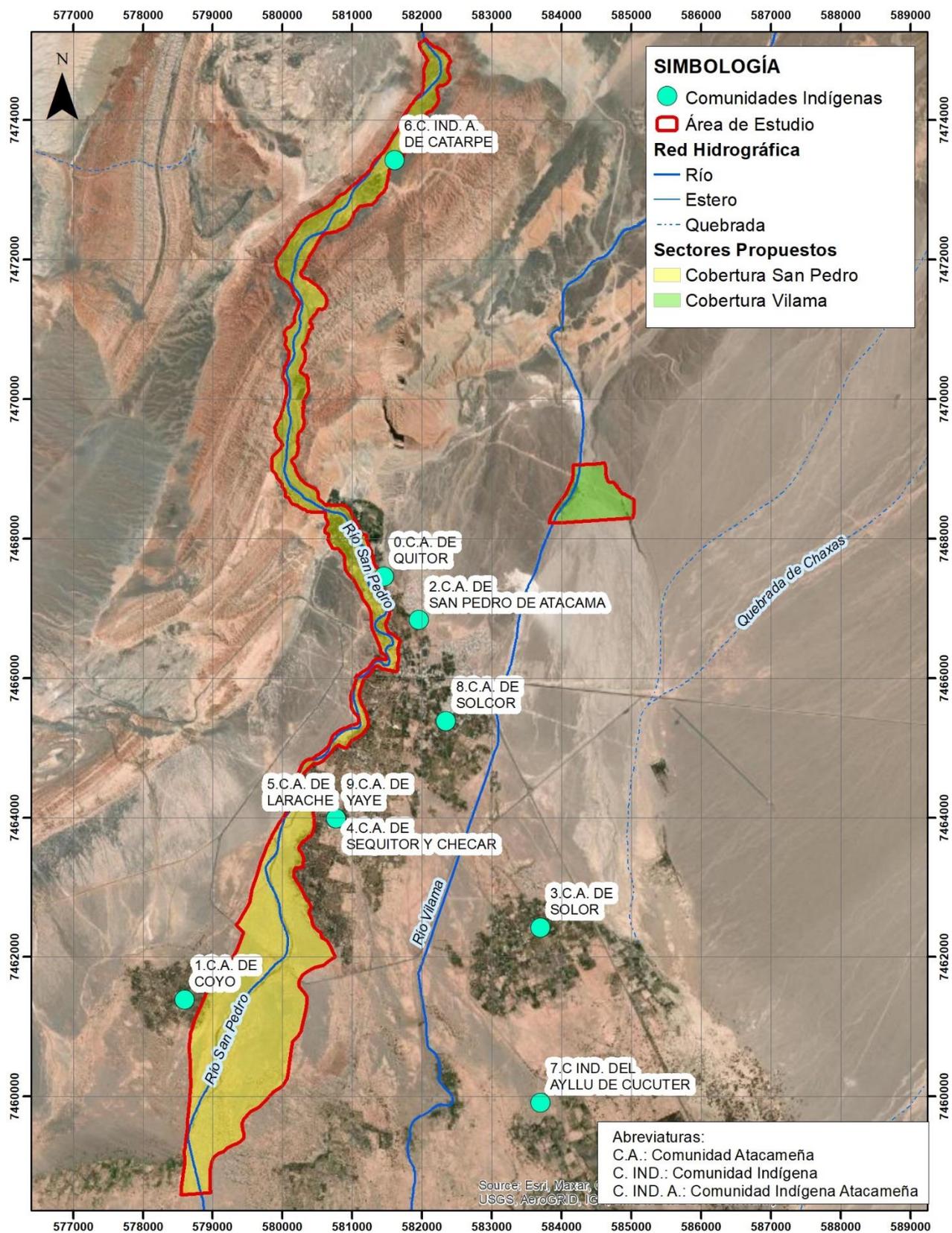


FIGURA 1-1: ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración propia.

1.3. Objetivos y Alcances del Estudio

1.3.1. Objetivos Generales

El presente Estudio tienen los siguientes objetivos Generales:

- Caracterizar el evento de crecida de enero y febrero de 2019, así como también formular un diagnóstico actualizado de los ríos San Pedro y Vilama y de sus afluentes en tramos específicos, que exponga la condición existente de dichos cauces.
- Elaborar un Plan de Manejo del cauce de los Ríos San Pedro y Vilama, que proponga las medidas necesarias para programar el mejoramiento de los cauces antes citados, así como también permita optimizar y validar la priorización de obras contenidas en el Programa de Conservación de Riberas de la Región de Antofagasta.

1.3.2. Objetivos Específicos

El presente estudio tiene los siguientes objetivos específicos:

I. Diagnóstico del Cauce

- Recopilar y analizar críticamente toda la estadística hidrológica existente en la cuenca o zona aledaña (control fluviométrico y pluviométrico), tanto de entidades públicas como privadas (DGA; DMC, universidades, empresas mineras, etc.).
- Realizar catastros de las siguientes actividades y elementos que se encuentran en el cauce y sus sectores adyacentes, indicando: infraestructura, extracciones de áridos, propiedades, actores relevantes de la cuenca, zonas con problemas de inundación y/o erosión o remoción en masa, zonas de desborde, zonas de canteras. Identificar las interferencias y elaborar un plano de catastro, estimando como valor proforma el costo de la modificación de las interferencias.
- Definir áreas vulnerables del área de estudio, por problemas de inundabilidad, erosión o remoción en masa de las cuencas.
- Desarrollar un análisis hidrológico, particularmente, un análisis de frecuencia para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 150 y 200 años, además del caudal formativo para transporte de sedimento y la crecida máxima registrada, además del evento ocurrido en febrero de 2019, con el fin de determinar caudales de crecidas, líquidos y detríticos. En caso que corresponda, se tendrá especial consideración sobre la estimación de la línea de nieve. Para ello, se consultarán y aplicarán las metodologías utilizadas en los estudios de diseño del “Plan Atacama”, desarrollados con ocasión de los aluviones de marzo de 2015 en dicha región.

- Efectuar un completo análisis de la dinámica fluvial, en al menos los últimos 30 años, que muestre la evolución geomorfológica del cauce, de sus riberas, las alteraciones antrópicas en este período, así como también la ocupación de estas con fines diversos.
 - A partir del análisis de la dinámica fluvial del cauce y los antecedentes que se hayan recopilado, se requiere detectar sectores del cauce con necesidad de fijación de deslindes. Para dichos sectores, deberá proponerse técnicamente la línea de deslinde en un nivel preliminar.
 - Realizar el diagnóstico hidráulico de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama.
 - También, haciendo uso del análisis de dinámica fluvial y los antecedentes recogidos por este, se requiere de una evaluación experta y actualizada del cauce y sus condiciones hidráulicas actuales, de su capacidad, de sus características de escurrimiento y cualquier alteración que el desarrollo de esta consultoría detecte.
 - A partir del modelo hidráulico, se requiere que el consultor haga un diagnóstico de la infraestructura existente, así como también de las obras de emergencia construidas por la DROH de Antofagasta, en lo que se refiere a emplazamiento, tipología, perfil tipo, materialidad y revancha de seguridad, con el fin de repararlas, potenciarlas, modificarlas o reemplazarlas, según sea el resultado obtenido.
 - Identificar los sectores con actividades o componentes sensibles desde el punto de vista ambiental. Establecer todas aquellas áreas que sean parte de sitios oficiales de resguardo ambiental, como así también identificar sectores que se encuentren en tramitación para ser parte de sitios oficiales de protección ambiental.
 - Se deberá verificar la seguridad a las solicitaciones por socavación. En caso de detectarse problemas de funcionamiento hidráulico, deberán proponerse medidas correctivas. Se requiere una memoria de cálculo de socavaciones y de arrastre de sedimentos, con el fin de realizar la evaluación de la infraestructura existente, así como proponer niveles mínimos de niveles de socavación y determinar sectores de depositación.
 - Generar un presupuesto estimativo de las medidas estructurales propuestas en la situación con proyecto.
 - Ejecutar Topografía definitiva, según especificaciones técnicas y normas de presentación de la DOH -2011.
 - Mecánica de suelos definitiva y prospecciones correspondientes (en la caja del río), incluyendo las debidas muestras sobre las que se determinarán los diámetros característicos requeridos para fines de estimación de socavación general y local.
- II. Objetivos Específicos Relativos al Plan de Manejo
- Definir sectores de botaderos autorizados y sectores potenciales de botaderos.

- Identificar canteras existentes y zonas potenciales de canteras
- Definir una sectorización de los cauces. Es decir, definir tramos de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama, según su aptitud para la extracción de áridos como apto o no apto, y según su estado en el momento del estudio como sub explotado o sobre explotado.
- Proponer, en los tramos aptos para la explotación de áridos: tasas anuales, tipos de material explotable y plazos de extracción de áridos.
- Proponer medidas no estructurales tendientes a fomentar el apropiado uso del suelo en aquellos sectores vulnerables por erosión y/o remoción en masa.
- A partir de la evaluación de la infraestructura existentes se requiere proponer las alternativas de solución a nivel conceptual de las medidas estructurales, determinando tipo, forma, emplazamiento y materialidad para las obras fluviales y período de retorno más acorde al objeto de protección, que en conjunto único o combinado permitan controlar y/o proteger de desbordamientos, en el sector de análisis.
- Simular las medidas estructurales propuestas en modelo numérico, para conocer sus resultados preliminares y así definir en conjunto y con el visto bueno de la Inspección Fiscal, la alternativa final a modelar, la cual será denominada “Situación con Plan de Manejo de Cauce”.
- Realizar la evaluación económica de cada alternativa de solución de acuerdo con la normativa vigente establecida por el MIDESO.
- Preparar planos de riesgo o amenaza asociados a la inundación por flujos detríticos, por periodo de retorno y caudal de evento histórico de mayor relevancia.
- Proponer medidas estructurales acordes al objeto de protección y valor patrimonial de la zona que se analiza.
- Debido a que se trata de un sector de alto valor patrimonial, se deberá identificar y cuantificar los elementos ambientalmente sensibles.
- Desarrollar un proceso de participación ciudadana, destinado a recoger la sensibilidad de la comunidad respecto de las obras de emergencia ejecutadas por la DOH en febrero de 2019, así como también de las propuestas como medidas estructurales en esta consultoría.

1.4. Contenidos del Informe Final del Estudio

El informe final comprende los siguientes volúmenes:

Volumen I Resumen Ejecutivo

Volumen II Informe Final Consultoría - Ingeniería

Volumen III Informe Final Consultoría - Planos

Volumen IV Informe Final de Participación Ciudadana

Volumen V Informe Final de Análisis Ambiental

Volumen VI Modelación Audiovisual del Proyecto

CAPÍTULO 2

RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

0	15-11-2021	Aprobado	CG/LE/DMM	WLN	SPA
A	12-11-2021	Emitido para Revisión Interna	CG/LE/DMM	WLN	SPA
REV	FECHA	REVISIÓN PARA	POR	CHECK	JDP
		CÓDIGO DOCUMENTO			
		ARR104-IF-C02 0			

2. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

2.1. Revisión y Recopilación de Antecedentes Hidrológicos e Hidráulicos

2.1.1. Generalidades

A continuación, se presenta el reconocimiento detallado del área de interés y la de los antecedentes que tengan relación con los objetivos de este estudio.

Se realizó una recopilación de los antecedentes hidrológicos e hidráulicos con el fin de contar con información detallada, tanto técnica como normativa, sobre el estado actual del cauce y de las obras relacionadas con él, considerada imprescindible para la planificación realista de posibles obras de reparación, reposición y/o mantención que se requieran y se planteen como parte de la consultoría. A partir de lo anterior se tiene como objetivo:

- Elaborar un detallado diagnóstico del funcionamiento hidráulico de los cauces de los Ríos San Pedro y Vilama, a partir del cual poder definir un Plan de Manejo de Cauce.
- Caracterizar el fenómeno que originó el evento de crecida ocurrido a comienzos de 2019, recopilando información de daños en la infraestructura y a la población dentro del área de influencia del estudio.
- Obtener una visión clara del marco normativo necesaria para que cualquier actuación propuesta se encuentre de acuerdo con las leyes y reglamentos vigentes.

Se presenta a continuación la recopilación y revisión de la información existente. La información se obtuvo de diversas fuentes cuyas solicitudes de información se adjuntan en Anexo 2-1, entre las que destacan:

- Ministerio de Obras Públicas a Nivel Central y Regional
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y Dirección General de Aguas (DGA)
- Dirección de Vialidad (DV)
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU)
- Municipalidad
- Ministerios de Bienes Nacionales y del Medio Ambiente
- Servicio de Evaluación Ambiental (SEA)
- ONEMI
- Intendencia Regional, Gobernación Provincial

- SERNAGEOMIN
- CONAF

También se revisaron algunos antecedentes generados por Universidades, entrevistas a la población y se consultó información de prensa e informes de actividades de Participación Ciudadana.

Los principales estudios analizados son:

- “Mejoramiento del regadío de San Pedro de Atacama”, 1959.
- “Aprovechamiento Integral de los Recursos de Agua de San Pedro de Atacama”, 1960
- Manejo experimental de la Cuenca del Río San Pedro de Atacama, II Región, 1995.
- Estudio de alternativas de Manejo del Río San Pedro II Región, 2000.
- Diseño definitivo Construcción Embalse Coyil, Comuna de San Pedro de Atacama, Provincia de El Loa, año 2001.
- Estudio de Prefactibilidad “Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta”, ARRAU, 2014.
- Conservación y mejoramiento conexión vial San Pedro - El Tatio (Rutas B-245 - 235), Región de Antofagasta: anexo 2. Informe medio físico. HUM0867-CONAMA, <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/6907>. Ministerio de Obras Públicas (2015).
- Estudio “Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama”. Cade Idepe (2004).

Cabe destacar que, de los estudios más antiguos, previos al año 2000 solo se disponía de información sobre su contenido, pero no de los informes originales, por lo tanto, su aporte es cualitativo del área de interés y los procesos hidráulicos que actúan o actuaron en la zona.

Todos los contenidos de estos estudios son de interés para la ejecución del presente proyecto y de ellos serán considerados, previa validación, los datos y análisis de laboratorio y de gabinete respecto de los diferentes temas. Las obras propuestas serán consideradas como referencia solamente, por cuanto se analizará directamente en terreno todo lo que en el presente estudio se proponga.

2.1.2. Análisis de Estudios Anteriores

En el presente capítulo se entrega una revisión de los antecedentes recopilados sobre estudios anteriores sobre el área de estudio y vinculada a aspectos hidrológicos e hidráulicos.

El listado de los antecedentes que estuvieron disponibles para el presente análisis se presenta a continuación:

- Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta". Comisión Nacional de Riego, ARRAU Ingeniería E.I.R.L., 2014.
- Diseño Definitivo Construcción Embalse Coyil, Comuna San Pedro de Atacama. DOH, Luis San Martín, 2001.
- Estudio Factibilidad Alternativas y Manejo del Río San Pedro II Región. DOH, Arrau, 2000.
- Manejo Experimental de la Cuenca del Río San Pedro de Atacama, II Región. MOP, Dirección de Riego, R&Q Ingeniería Ltda., noviembre 1995.
- Aprovechamiento Integral de los Recursos de Agua de San Pedro de Atacama, Fernando Dávila, Dirección de Riego, 1960.
- Mejoramiento del Regadío de San Pedro de Atacama. Fernando Dávila I., Ambrosio G. Huidobro E., Emilio Donoso D. Dirección de Riego, 1959.
- Diseño Obras Fluviales Río Copiapó en Sector Urbano y Manejo de Cauce en Sector Rural, Comuna de Copiapó, Región de Atacama. DOH, GSI Ingeniería, marzo 2019.

2.1.2.1. Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta". Comisión Nacional de Riego, ARRAU Ingeniería E.I.R.L., 2014.

Este estudio, promovido por la Comisión Nacional de Riego (CNR), comprendió estudios a nivel de prefactibilidad con el objetivo general de proponer y evaluar las alternativas de mejoramiento para el sistema de riego de la comuna de San Pedro de Atacama y el control de crecidas, proponiendo alternativas como: un embalse que tenga uso múltiple (de riego, regulación de crecidas y generación hidroeléctrica) y el mejoramiento de la red de conducción y distribución de agua, asociada a la zona beneficiada por el futuro embalse u otras obras que cumplan la misma función.

El informe final del estudio se estructuró en los siguientes capítulos:

- Capítulo1 : Introducción, Objetivos, Área de Estudio y Contenido del Estudio
- Capítulo2 : Recopilación y Análisis de Antecedentes
- Capítulo3 : Diagnóstico
- Capítulo4 : Trabajos de Terreno

- Capítulo5 : Definición Alternativas
- Capítulo6 : Estudios Básicos
- Capítulo7 : Modelo de Operación
- Capítulo8 : Estudio Agroeconómico
- Capítulo9 : Calidad de Aguas
- Capítulo10 : Dimensionamiento General y Cálculo Hidráulico
- Capítulo11 : Expropiaciones
- Capítulo12 : Presupuestos
- Capítulo13 : Estudio de Análisis Ambiental
- Capítulo14 : Evaluación Económica
- Capítulo15 : Participación Ciudadana
- Capítulo16 : Conclusiones y Recomendaciones

El estudio expone en su fase inicial una revisión de antecedentes y una completa descripción del área del proyecto, de sus características agroclimáticas, antecedentes productivos; aspectos técnicos, legales y ambientales asociados, y una descripción de antecedentes históricos de daños producidos por crecidas, con registros de prensa desde 1971 a 2012. También, se expone un diagnóstico de los sitios de embalse y de la infraestructura de riego, así como también se identifican potencialidades y limitaciones del desarrollo productivo. En cuanto a la disponibilidad de agua para riego, se destaca que los terrenos agrícolas son regados mayoritariamente por el río San Pedro, y en menor medida por el río Vilama.

Se describe que la agricultura en el valle de San Pedro de Atacama se encuentra muy deprimida por la escasez de agua y por su mala calidad, lo que motivó el estudio de un embalse regulador de las aguas para riego, obra ansiada por varios años por parte de los agricultores. En los aspectos demográficos, se destaca que las generaciones más jóvenes se han ido dedicando fundamentalmente al turismo y a la minería, quedando solamente las generaciones mayores cultivando la tierra, lo que hace prever que, con el tiempo, la superficie de riego seguiría disminuyendo, e incluso podría desaparecer.

En el estudio se desarrollaron trabajos en terreno y estudios básicos. Los trabajos de terreno correspondieron a una restitución aerofotogramétrica, topografía, prospecciones y ensayos en los sitios de embalse 1 y 2 inicialmente previstos (sondajes y perfiles de refracción sísmico) y en zonas de canales y yacimientos (pozos de exploración). Los estudios básicos correspondieron a estudios de geología, geotecnia, hidrología, sedimentología, además de los siguientes estudios específicos:

- Evaluación de crecidas en canales;
- Estudios básicos del mejoramiento de la infraestructura de riego;
- Estudio de optimización del trasvase de aguas desde el río Salado al río Grande (túnel San Bartolo);
- Estudios de canalización de las aguas del río Grande;
- Estudio red de canales de distribución;
- Estudio hidráulico del cauce de los ríos Grande y San Pedro para control de crecidas (situación sin embalse);
- Estudio hidráulico de los cauces de los ríos Grande, Salado y San Pedro (situación con embalse);
- Determinación de la relación daños provocados v/s niveles de inundación;
- Estudio legal de los derechos de agua.

El estudio también incluyó un modelo de simulación operacional del río San Pedro, estudios agroeconómicos y de calidad de aguas, memorias de cálculo de alternativas y obras propuestas, estudio de expropiaciones, presupuestos, estudios de evaluación ambiental, evaluación económica y un programa de participación ciudadana.

En el diagnóstico y proposición de alternativas, en el estudio se plantea que, con respecto al aumento del recurso, la idea de embalse prevista en la licitación correspondía a dos sitios frontales ubicados en el río Grande, u otro que el Consultor pudiese proponer después de analizar las posibilidades que ofrece la cuenca. Al respecto, se conocía de dos sitios previamente analizados, o postulados, uno en la quebrada de Coyil, o Abra Pampa, y el otro en la confluencia de los ríos Jauna y Putana. Ambos sitios fueron descartados, Coyil por razones geotécnicas y Jauna-Putana por razones ambientales. No existen en el río Grande otros afluentes que puedan postularse como embalses laterales en la zona baja, ni frontales en la zona alta.

También, se descartaron los sitios 1 y 2 frontales en el río Grande, aguas abajo de la confluencia con la quebrada Coyil, por cuanto almacenarían aguas de crecidas que son de pésima calidad, al extremo que los regantes no riegan con estas aguas, tanto por su salinidad como por el arrastre de sólidos que acarrear. Así, se concluye que los sitios 1 y 2 podrían ser de utilidad solamente para plantear eventuales obras de control de crecidas. Las prospecciones geotécnicas previstas para el estudio se concentraron en estos sitios.

De esta forma, se descartó cualquier sitio frontal en la zona baja, quedando solamente la posibilidad de un sitio lateral, o un sitio frontal en la zona alta, donde las crecidas no son de tan mala calidad. Revisadas las alternativas en la cuenca, apareció como única posibilidad plantear un embalse en el río Salado a la altura de San Bartolo, que almacenaría aguas que serían trasvasadas desde el río

Grande y las propias del río Salado en esa zona. Ambas aguas son de muy buena calidad relativa. Además, el embalse, lateral al río Grande, sería frontal en el río Salado, por lo que almacenaría las crecidas de este río, que en la zona alta de la cuenca no son de tan mala calidad. Esta obra, así concebida, mejoraría tanto la cantidad de agua disponible para riego, como su calidad. Eso sí, la obra tiene mayor sentido en la medida que las aguas que entregue no se contaminen en su paso por la cordillera de la sal.

Todo el análisis de esta alternativa de ubicación de embalse se realizó sobre la base de los conocimientos de la zona, sin prospecciones de por medio, salvo las inspecciones visuales de los diferentes especialistas. En consecuencia, el sitio propuesto fue analizado a nivel de perfil y debe prospectarse por completo en una próxima etapa del estudio, e incluso debe incluirse un análisis de eventuales sitios alternativos en su entorno.

En cuanto al trasvase de aguas al embalse, se definieron diferentes alternativas de entrega al riego, incluyéndose también otras alternativas sin embalse, que serían más bien con fines de mejoramiento de la calidad del agua. En forma separada, se analiza la conveniencia de aumentar el recurso vía disminución de las pérdidas de agua.

El control de crecidas quedó supeditado de esta forma a las obras que puedan postularse en el río Grande, más la regulación propia del embalse de riego en el río Salado.

En relación a la calidad de las aguas, se plantea que existe un caudal pequeño, pero de muy mala calidad, proveniente de recuperaciones y aportes intermedios al río Salado en el sector Cordillera de la Sal, que no deben mezclarse con el resto de las aguas de riego. Toda alternativa que considere captación de las aguas del río Salado en la zona de San Bartolo y conducción directa al canal San Pedro por tubería, o trasvase al río Grande, se encuentra en esta situación. Para evitar que este pequeño caudal se incorpore al riego al mezclarse con las aguas que vienen por el río Grande, se consideró el diseño de una tubería que capte las aguas en el río Salado justo antes de su confluencia con el río Grande, y las transporte al río San Pedro aguas abajo de la última bocatoma de los canales de riego. Se trataría de una pequeña tubería, de una longitud aproximada 13 km si se mantienen las actuales tomas en el río, y de unos 9 km si se unifican todas las tomas, que significaría un costo secundario para el proyecto, que permite mejorar la calidad de las aguas de riego significativamente. Cabe destacar que estas aguas incluirían el caudal ecológico que es necesario dejar pasar por el río Salado, quedando en el río San Pedro como caudal ecológico las aguas que provienen del río Grande. Por tanto, se considera muy conveniente el by pass a las tomas de riego de estas aguas salinas, toda vez que el costo de la obra se abarata si hay control de crecidas en ambos ríos.

En la definición de alternativas del estudio se plantearon cinco alternativas, cada una con las sub-alternativas de variación dependiendo de si se considera, o no, una obra reguladora de crecidas en el río Grande. La Alternativa N° 3, la cual finalmente fue seleccionada y analizada como única alternativa de embalse para riego en el estudio, consideró la captación y trasvase de las aguas del Río Grande a través del Túnel 1 para almacenar las aguas en el Embalse Río Salado. La entrega se realiza a través de una conducción en canal revestido y entubado en zonas de cruce de quebrada hasta la

bocatoma del Canal San Pedro por el río Salado y luego por el río San Pedro. En la siguientes Figuras se presenta un esquema de la Alternativa N°3 e imagen satelital con las obras contempladas.

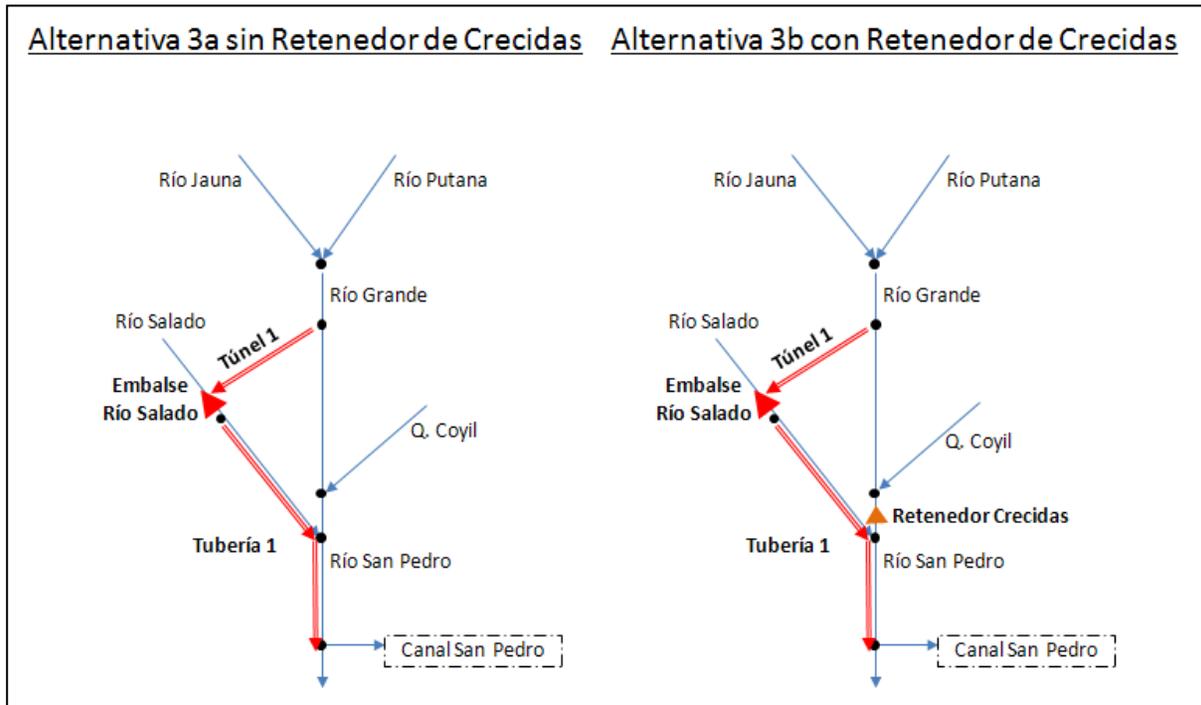


FIGURA 2-1 ESQUEMA DE ALTERNATIVA N° 3

Fuente: Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. CNR, Arrau, 2014.

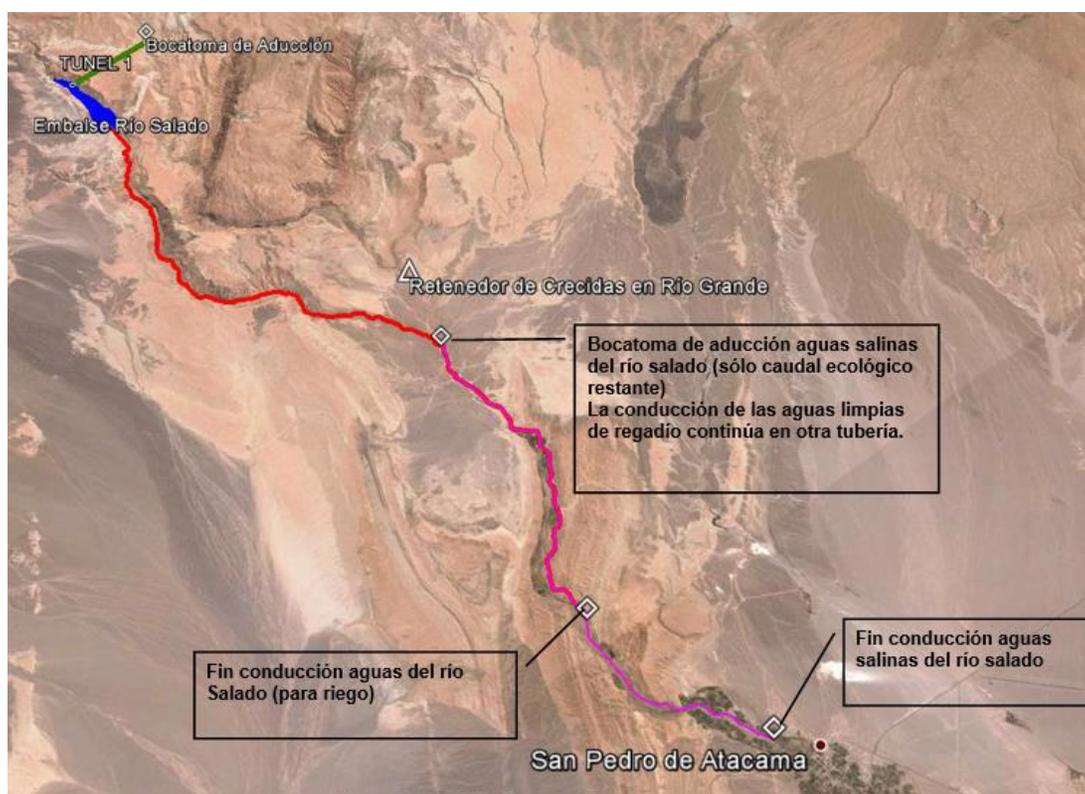


FIGURA 2-2: ALTERNATIVA N°3

Fuente: Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. CNR, Arrau, 2014.

En cuanto a los sondeos y otras prospecciones realizadas en el sitio 1 y sitio 2 del río Grande, mostraron que no existe roca en la fundación ni estribos. Sin embargo, se destaca que los ensayos realizados demuestran que el estrato es altamente cementado e impermeable, y sería suficiente para fundar una presa controladora de crecidas, sin necesidad de tratamiento complejo de la fundación.

Para la presa de riego seleccionada como más adecuada en el río Salado, considerando la disponibilidad de materiales para la construcción del muro y las visitas realizadas, corresponde a una del tipo CFRD, es decir, una presa de enrocado con pantalla de hormigón.

El estudio hidrológico realizado permitió determinar los caudales de diseño para el túnel de desviación de la presa de riego en río Salado ($58 \text{ m}^3/\text{s}$) y para el vertedero, caudal de diseño de $520 \text{ m}^3/\text{s}$ y verificación para $1.353 \text{ m}^3/\text{s}$. De igual forma, el estudio sedimentológico permitió definir un volumen muerto del embalse de $3,00 \text{ hm}^3$.

La calidad de aguas presenta restricciones en los niveles de conductividad eléctrica, que sobrepasa la norma chilena de calidad de agua para riego, lo que limita la productividad de los cultivos del área de estudio. Esto hace imprescindible considerar obras que eviten una mayor contaminación de las aguas en los tramos más salados del río, especialmente su paso por la cordillera de la sal.

Con la aplicación del modelo de simulación de escala mensual que se desarrolló en el estudio, se evaluaron tamaños de embalse entre 0,8 y 6,1 hm³ de volumen útil, concluyendo que es posible regar hasta 709 ha con 85% de seguridad de riego.

En relación con la generación hidroeléctrica a pie de embalse, se determinó que esta no es factible por la necesidad de construir una línea de transmisión muy larga, además de la baja potencia disponible. Por otra parte, la instalación de una Mini Central Hidroeléctrica (MCH) aguas abajo del embalse y antes de la zona de canales permite generar hasta 550 kW, con un factor de planta superior a 80%, y presenta la ventaja de una mayor cercanía a la zona de consumo, que sería el pueblo de San Pedro de Atacama.

En base a la evaluación económica aplicada, la mayoría de las alternativas analizadas y asociadas a control de crecidas en el Río Grande, no resultaron rentables, tanto a precios sociales como privados, lo que se explica principalmente por el alto costo de las obras. Sin embargo, la Alternativa N° 3, con un volumen útil de 6,1 hm³ destinado a riego, que considera el uso múltiple de la obra, mejorando la calidad de las aguas de riego, e incluyendo el control de crecidas del propio embalse de riego en Río Salado, una ampliación del río San Pedro y generación hidroeléctrica, además de agua potable rural, sí resultó rentable a precios sociales.

Estudio Hidrológico

En el estudio hidrológico desarrollado se realizó un análisis de las estadísticas existentes y de todos aquellos antecedentes relacionados con los aportes hídricos en las crecidas del Río San Pedro y sus principales afluentes.

El comportamiento hidrológico está directamente relacionado con las precipitaciones de origen estival características del invierno altiplánico. Las precipitaciones y los caudales se comportan como valores extremos, con una alta variabilidad anual. Gran parte de las precipitaciones se concentra entre los meses de diciembre-marzo, lo que genera que la escorrentía directa se concentre también durante estos meses.

En el estudio se abordaron los siguientes aspectos:

- Caracterización de las precipitaciones en la zona de estudio, tanto desde el punto de vista de distribución espacial como temporal en las cuencas delimitadas por los sitios de interés, en el que se incluye la precipitación máxima de diseño asociada a distintos periodos de retorno.
- Determinación de caudales medios mensuales y de crecida asociado a las diferentes alternativas, con tal de cuantificar tanto la disponibilidad media del recurso, así como los caudales máximos instantáneos. Como resultado de este análisis fue posible obtener los caudales medios mensuales y los hidrogramas de crecida asociados a distintos periodos de retorno en todos los puntos de interés.

- Determinación del gasto sólido producido, en el que se consideran los gastos producto del lavado de cuenca, conocido como gasto sólido suspendido, y el gasto producto de la erosión del cauce, conocido como gasto sólido de fondo.

Para estimar la precipitación media espacial de cada cuenca se consideraron las estaciones meteorológicas de El Tatio, Río Grande, San Pedro y Caspana, de la DGA, sobre las cuales se determinaron los porcentajes de influencia, aplicando el método de polígonos de Thiessen, en las cuencas de interés para el proyecto:

- Cuenca San Pedro en Cuchabrachi
- Sitio de embalse 1 y 2
- Túnel de toma en Río Grande
- Túnel de descarga en Río Salado

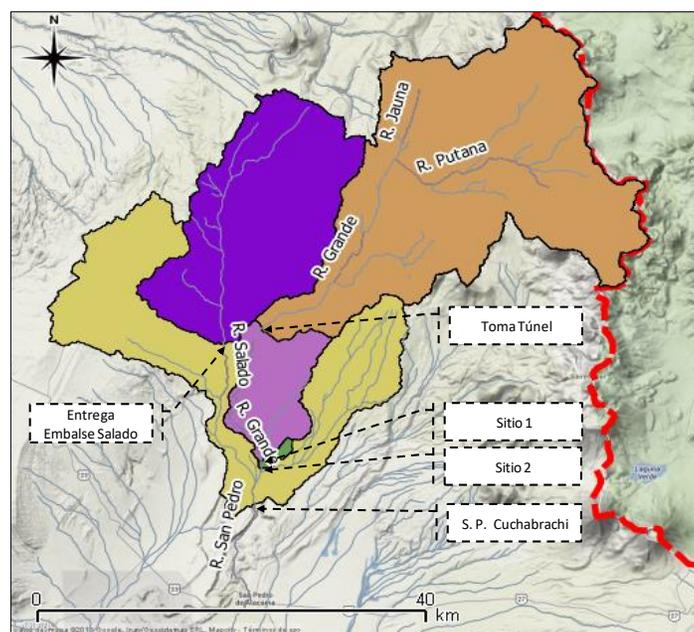


FIGURA 2-3: CUENCAS Y CAUCES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. CNR, Arrau, 2014.

CUADRO 2-1: PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS (MM)

Sitio de Interés	5	10	20	50	100	200	1.000	10.000
S.P. Cuchabrachi	27	36	44	54	62	69	87	113
Sitio 1	25	33	41	51	58	65	82	107
Sitio 2	25	33	41	51	58	65	82	107
Toma Río Grande	25	33	40	50	57	65	82	106
Embalse Río Salado	31	41	50	62	72	81	101	131

Fuente: Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. CNR, Arrau, 2014.

En cuanto a la estimación de caudales máximos, se aplicaron los métodos de análisis de frecuencia, Formula Racional, Verni-King e Hidrograma Unitario Sintético; aplicando coeficientes empíricos sobre los métodos Racional y Verni King para permitir su aplicación en la zona de estudio. Como resultado, los valores obtenidos de la Formula Racional ajustado fueron seleccionados como los más adecuados para el diseño, por presentar un mayor rango de seguridad para los distintos puntos de estudio.

CUADRO 2-2: CAUDALES MÁXIMOS POR ALTERNATIVA (M³/S)

Sitio de Interés	5	10	20	50	100	200	1.000	10.000
S.P. Cuchabrachi	23	45	79	146	221	323	706	1.834
Sitio 1 / 2	17	34	59	110	167	244	534	1.391
Toma Río Grande	17	34	59	109	166	242	530	1.381
Embalse Río Salado	13	25	43	80	122	178	390	1015

Fuente: Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. CNR, Arrau, 2014.

Este estudio es de gran utilidad para el desarrollo de la presente Consultoría, tanto por el aporte en sus estudios básicos como también de los antecedentes correspondientes a prospecciones y ensayos, así también por las alternativas de obras propuestas como obras de regulación de crecidas en el río Grande.

2.1.2.2. Estudio de Alternativas de Manejo del Río San Pedro, II Región. DOH, Luis Arrau del Canto Ingenieros Consultores, 2000.

Por Resolución D.G.O.P. N° 509 de 11 de julio de 1997, se contrató a Arrau Ingenieros Consultores la Consultoría "Construcción Embalse Coyil, II Región" con el propósito de desarrollar a nivel de proyecto definitivo el embalse Coyil, ubicado en la Quebrada de Abra Pampa o de Coyil, afluente del río Grande, cuenca del río San Pedro de Atacama, II Región. Este embalse estaría destinado a asegurar el regadío de unas 700 a 800 ha, correspondientes a los Ayllus de San Pedro de Atacama.

El contrató incluyó en principal el estudio y diseño de la presa y de su canal alimentador, así como el estudio de la red principal de riego y diseño de las obras necesarias para su mejoramiento y adaptación al nuevo embalse. También, se consideró el análisis y eventual diseño de todas aquellas obras que resultasen necesarias para mejorar la calidad del agua, que tiene fundamentalmente problemas de salinidad que limitan la producción agrícola. Finalmente, se incluyó el análisis de una alternativa propuesta por los regantes, que consistía en captar las aguas en la confluencia de los ríos Jauna y Putama, para conducir las a la zona de riego mediante un trasvase a la quebrada de Pelón, donde se embalsarían y se utilizarían también en generación hidroeléctrica.

En pleno desarrollo de las prospecciones y de los análisis correspondientes, después de los recorridos por el terreno, el Consultor visualizó otras alternativas que podrían ser más atractivas que la propuesta por los regantes, como por ejemplo una captación de las aguas en el río Salado y conducción cerrada para "by-pasear" una zona de infiltración y de contaminación, o bien algo similar en el río Grande. Ante esta situación, se resolvió modificar el contrato, reduciéndose los alcances de diseño definitivo del embalse, a fin de desarrollar un estudio comparativo de todas las alternativas

identificadas. Es así como se contrató el “Estudio de Alternativas de Manejo del Río San Pedro, II Región” mediante Convenio Ad Referéndum de fecha 16 de diciembre de 1997, aprobado por Resolución D.G.O.P. N° 3085 de 29 de diciembre de 1997.

El informe final de este estudio comprende el desarrollo a nivel de anteproyecto de la presa y a nivel de diseño definitivo de su canal alimentador y las obras de mejoramiento del sistema de canales, además del estudio y evaluación de las alternativas.

Este estudio de factibilidad del proyecto del embalse Coyil, presenta la alternativa de embalse ubicada en la quebrada de Abra Pampa o de Coyil, afluente del río Grande, la cual presenta escurrimiento solamente durante las épocas de precipitaciones, permaneciendo seca durante gran parte del año. En consecuencia, el embalse se llenaría fundamentalmente con los recursos del río Grande, que deberían ser captados y conducidos mediante un canal alimentador.

Las situaciones modeladas en este estudio fueron son las siguientes:

- 1) Situación Actual
- 2) Situación Actual Mejorado
- 3) Embalse Coyil
- 4) Captación en confluencia Río Jauna - Río Putana y Trasvase
- 5) Captación en confluencia Río Jauna - Río Putana y Conducción Directa
- 6) By-Pass Río Salado
- 7) By-Pass Río Salado y Embalse Coyil

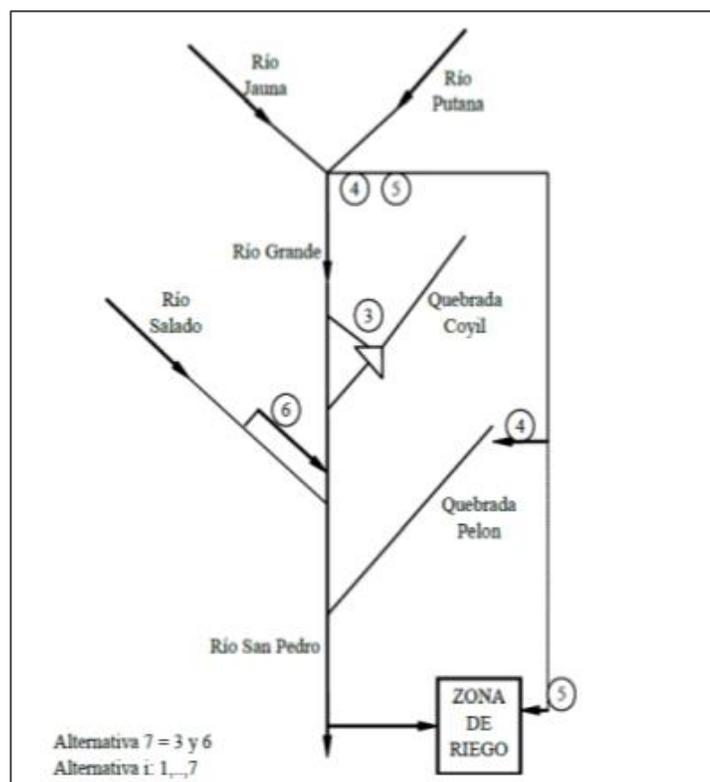


FIGURA 2-4: ESQUEMA DE ALTERNATIVAS.

Fuente: Estudio de Alternativas de Manejo del Río San Pedro, II Región.
DOH, Luis Arrau del Canto Ingenieros Consultores, 2000.

El diseño del embalse Coyil fue definido en base a la configuración de dos presas, una principal de 20 m de altura y una secundaria de 7 m de altura. Su emplazamiento se ubica a 14,5 km al norte de la localidad de San Pedro de Atacama, siguiendo el cauce del río San Pedro - Río Grande, hacia aguas arriba.

Considerando las características de los materiales de fundación del sitio de la presa, y la disponibilidad de materiales en la cercanía, el estudio de factibilidad recomendó la construcción de una presa zonificada con núcleo de arcilla y/o limo, filtro de arena y espaldones de grava arenosa. La altura de la presa principal es de 20 m de altura y taludes 2,5:1 (H/V) para el talud de aguas arriba y 2:1 (H/V) para el talud de aguas abajo. El volumen de la presa es de 0,131 hm³ para una capacidad de almacenamiento de 5,8 hm³, con lo cual se obtuvo una relación agua muro de 44.

El estudio de factibilidad proyectó una obra de evacuación constituida por una torre de captación de 2,0 m de diámetro, descargando por el portezuelo hacia el río Grande mediante una tubería de acero de 1,0 m de diámetro y 50 m de longitud aproximadamente, para continuar a través de un canal revestido en una longitud de 200 m.

La obra de entrega está constituida por una cámara de captación con rejillas, una tubería de entrega de acero de 1,0 m de diámetro y 70 m de longitud. Se agrega a ello una cámara de válvulas, una cámara de impacto y una estructura de aforo.

De este estudio, además de la información básica, resulta de utilidad los antecedentes correspondientes a prospecciones y ensayos desarrollados.

2.1.2.3. Diseño Definitivo Construcción Embalse Coyil, Comuna San Pedro de Atacama. DOH, Luis San Martin, 2001.

Este estudio se desarrolló a continuación del “Estudio de Alternativas de Manejo del Río San Pedro, II Región”. Se desarrollaron trabajos topográficos, estudios de geología y geotecnia para el sitio del embalse Coyil y se realizó un análisis de alternativas de conducción del río Salado y diseño de Obras. A continuación, se exponen sus principales resultados.

Embalse Coyil

a) Trabajos Topográficos

Para el estudio del embalse fue necesario realizar una serie de trabajos topográficos según se indica:

Traslado de Coordenadas a la Zona del Proyecto	El traslado de coordenadas a la zona del proyecto se efectuó a través de los puntos IGM "Mal Paso" y "Camino del Cajón".
Traslado de Cota a la Zona del Proyecto	El traslado de cotas se efectuó desde el punto denominado PN 69-4-B, que se encuentra al pie del edificio de Carabineros de Chile en San Pedro de Atacama. Para efectuar el levantamiento de la zona del embalse, se realizó un vuelo sobre la zona del proyecto, de acuerdo a lo especificado en los Términos de Referencia: vuelo escala 1:10.000 para restituir a escala 1:2.500. Originalmente, el proyecto consideraba el vuelo de 660 ha aproximadamente, correspondiente a la zona del proyecto de la presa. Sin embargo, con el mismo vuelo se logró obtener fotografías aéreas del área del proyecto que incluye los sectores de los ríos Grande y Salado y la zona del túnel de trasvase. Esto significa alrededor de 1.400 ha adicionales, que en parte fueron utilizadas en etapas posteriores de la Consultoría.
Levantamiento Aerofotogramétrico de la Zona del Embalse	También se ejecutó en terreno una poligonal que servirá de apoyo a la realización de trabajos topográficos relacionados con el proyecto.
Poligonal de Apoyo	Se realizó un levantamiento escala 1:500 tanto de la presa principal, como de la secundaria. Este levantamiento cubrió, en el caso de la presa principal 20 ha, llegando hasta la zona del río Grande, y en el caso de la presa secundaria 15 ha, llegando también hasta la zona del río Grande.
Levantamiento Zona de Presa a Escala 1:500	

b) Estudios de Geología

El alcance de este estudio fue entregar las características de la geología del área y la aptitud de los elementos geológicos para proceder a ejecutar un embalse en el sector.

Plano geológico	Se preparó un plano geológico de planta a escala 1:2.000 con un perfil interpretativo por el eje del muro principal a escala 1:500.
------------------------	---

Geología General del Área

En el área destaca, a grandes rasgos, la presencia de rocas de la Formación San Pedro. La edad de la formación San Pedro se estima entre 20 y 25 millones de años, lo cual lleva a pensar que debería tratarse de una secuencia de rocas duras "normales" para una edad como la indicada. Sin embargo, el carácter sedimentario continental de su origen y el medio donde se encuentran hace que estas rocas presenten un bajo grado de litificación, resultando en sedimentos con pobre cementación, de fácil erodabilidad, salinos, desintegrables bajo acción de agua.

Se destaca que en el área se efectuaron prospecciones tanto durante la etapa de anterior de factibilidad como durante esta Consultoría.

- Prospecciones en la etapa de Factibilidad

Durante el desarrollo de la etapa de factibilidad se efectuaron calicatas básicamente en toda el área externa de la zona del embalse orientadas a la búsqueda de empréstitos. Los sondeos de reconocimiento efectuados fueron dos, los que se ubican en el eje del muro principal del embalse.

- Prospecciones realizadas en el transcurso de la presente Consultoría

Se efectuaron 7 sondeos que totalizaron 205 ml de perforación, relacionados tanto con la presa principal como la secundaria.

Prospecciones Efectuadas

- Exploraciones geotécnicas

Para las presas principal y secundaria, inicialmente se estableció una exploración geotécnica del terreno, consistente en perfiles geosísmicos, sondeos y calicatas. Esta campaña de exploración cubría tanto el terreno de fundación, como zonas de estribos y materiales de empréstito. Sin embargo, a la luz de los resultados preliminares que indican la presencia de una roca sedimentaria que se altera significativamente con la presencia de agua, se optó por reducir la campaña de exploración inicial, en espera de los resultados de resistencia y deformabilidad del material. Luego de efectuados los ensayos indicados y su evaluación se optó por no continuar con el resto de las exploraciones programadas.

Geología Local

El sector de presa, incluidas ambas presas, es decir la principal y la denominada secundaria, así como toda el área de cubeta, se encuentran inmersas en rocas de la denominada Formación San Pedro, la cual ha sido descrita en el acápite anterior.

Basado en el estudio efectuado puede concluirse lo siguiente:

- El área de muros y cubeta quedará íntegramente en rocas de la Formación San Pedro del tipo arcillolitas, limolitas, areniscas y brechas. Sobre estas rocas se emplaza un horizonte de rocas ignimbríticas.
- Las rocas de la Formación San Pedro son de muy baja competencia geotécnica, blandas, con estratos salinos, desintegrables en agua.
- Las laderas al quedar expuesta a agua y oleaje tenderán a desintegrarse adquiriendo ángulos de reposo muy tendidos que afectan la estabilidad del horizonte ignimbrítico superior.
- La roca de la Formación San Pedro no tiene capacidad de resistencia, lo que queda de manifiesto por el hidrofracturamiento que se produjo en un alto porcentaje de las pruebas Lugeon efectuados en sondeos.
- No hay estructuras mayores que comprometan el sector.
- Los espesores de suelos en el sector de los muros son nulos a muy reducidos.

Conclusiones del Estudio de Geología

Conclusiones del Estudio de Geología

- En general se aprecia que las rocas tenderán a una extrema y rápida degradación en contacto con agua lo que obligaría a sistemas especiales y onerosos de impermeabilización.

- En resumen, se concluye que el sitio no tiene condiciones geológicas adecuadas para un proyecto de embalse para almacenamiento de agua a costos y seguridad razonables.

c) Estudio de Geotecnia

Este estudio se orientó básicamente a caracterizar geotécnicamente el material del sitio de la presa bajo una condición de saturación completa y a establecer la factibilidad técnica real de construir un embalse en el sector seleccionado.

Para estos fines se realizaron una serie de ensayos en muestras provenientes de sondajes y posterior análisis de sus resultados. Estos ensayos y análisis corresponden a los que se indican:

- Ensayos**
- Ensayos Lugeon.
 - Ensayos de clasificación consistentes en granulometría, plasticidad, peso específico y límites de Atterberg.
 - Evaluación de la resistencia mecánica del terreno.
 - Ensayos de compresión no-confinada, en un intento de tener mayor información sobre el efecto del agua en la resistencia.
 - Ensayos de depresión de hinchamiento y de hinchamiento libre, al observar en laboratorio un importante hinchamiento de las muestras.
 - Ensayos de medición de sales solubles.
 - Análisis de estabilidad de taludes.
 - Análisis de la estabilidad de la presa.

El sitio proyectado para el emplazamiento de la presa Coyil, tanto en el sector del muro primario como secundario, se considera que no es adecuado, por presentarse un terreno natural de propiedades geotécnicas prácticamente incompatibles con la construcción de un embalse.

Los resultados de las prospecciones y ensayos indican las siguientes características del terreno natural:

Conclusiones del estudio de Geotecnia

- El material sufre una drástica degradación de resistencia y rigidez con el cambio de humedad. Se transforma visiblemente de roca a suelo al entrar en contacto con agua; esta situación se produce en el lapso de horas.
- El material presenta un elevado potencial de hinchamiento. Responde con un significativo aumento de volumen al entrar en contacto con agua, llegándose a una muy alta presión de hinchamiento, de 3,1 kg/cm². La menor presión de hinchamiento es de 0,57 kg/cm², valor que se considera también elevado.

Conclusiones del estudio de Geotecnia

- El sector del estribo derecho presenta un importante contenido de sales solubles (hasta un 3%), lo que necesariamente afectará la deformabilidad y permeabilidad de este sector en la medida que se disuelvan las sales.

Lo anterior implica la ocurrencia de derrumbes en toda la cubeta del sector al llenarse el embalse de agua, incluyendo los sectores aledaños a la presa. A esto se sumarán las deformaciones por hinchamiento del terreno, las que podrían agrietar completamente la presa. La solución a estos problemas pasa por impermeabilizar, lo cual es excesivamente caro y se estaría siempre en una condición extremadamente sensible a una eventual filtración.

A la luz de los resultados expuestos, es opinión del consultor cambiar de ubicación el proyecto a un sitio adecuado, que garantice apropiadamente la estabilidad de la obra.

d) Estimación del Valor de las Obras

Se procedió a efectuar una evaluación del costo de construcción de las obras, con el fin de cuantificar la significancia de las medidas de protección que deben adoptarse, para garantizar la estabilidad de la obra. Estas medidas se refieren fundamentalmente a la protección del vaso de la presa a través de algún elemento impermeabilizante y la consideración de taludes más bien conservadores en el diseño de las obras.

Considerando las características geológicas - geotécnicas, y la disponibilidad de materiales existentes en la zona de la presa, es posible considerar la construcción de una presa zonificada con núcleo de arcilla y/o limo, filtro de arena y espaldones. Una presa de grava fluvial gruesa con pantalla de hormigón ha sido descartada a raíz del inusual comportamiento del material de fundación, en relación a su gran capacidad de hinchamiento, lo que no permite considerar la construcción de una pantalla rígida.

La impermeabilización se lograría mediante la colocación de un geotextil impermeable, en todo el vaso de la presa y los taludes de éste, hasta el nivel máximo de la presa.

El presupuesto resultante para el Embalse en estas condiciones fue el siguiente: \$US 11.792.554 (moneda diciembre de 2001).

e) Conclusiones en Relación con la Construcción del Embalse Coyil

El valor obtenido para la construcción de las obras de la presa Coyil bordean los US\$11.800.000, siendo una componente importante aquella asociada a la impermeabilización del vaso de la presa.

El área a ser regada a través del embalse es de 800 ha y si se considera que el costo de la obra es de US\$ 11.800.000, resulta un valor indicador de US\$ 17.750 por ha. Este valor es en extremo alto, no siendo compatible con estándares normales de inversión en obras de riego.

Ante esta situación, fue opinión de la empresa Consultora no recomendar la construcción de la presa Coyil en el emplazamiento propuesto originalmente. Para ello, se ha tenido en consideración lo siguiente:

- Los resultados de los ensayos de geotecnia en especial aquellos referidos a la baja capacidad de soportación que posee el terreno una vez saturado y al nivel de hinchamiento que este desarrolla bajo este mismo ambiente.
- El informe geológico que es concordante con lo expresado en el estudio de geotecnia, y que indica que la zona del proyecto se encuentra en la formación denominada San Pedro,

caracterizada por la presencia de sedimentos terrígenos que resultan ser deleznales, blandos y con baja cohesión. Al contacto con agua, y sin estar comprimido se desintegran generando un suelo de color ocre-rojizo.

- Ante los problemas detallados anteriormente, sería posible considerar soluciones tales como la impermeabilización total del vaso, incluidos los estribos de la presa. Sin embargo, ante la rotura eventual de esta membrana, en cualquiera de sus partes el sistema se hace vulnerable frente a la presencia de agua, objetivo central del proyecto. Se suma a ello el alto costo de esta alternativa, que lo hace tal vez comparable a otros proyectos en la zona, también de alto costo, pero que poseen un mayor grado de seguridad en sus resultados y en su operación en el largo plazo.

Análisis de Alternativas de Conducción del Río Salado y Diseño de Obras

En su nacimiento el río Salado, presenta aguas con bajo contenido de sal, pero a través de su recorrido se va contaminando, llegando a presentar conductividades del orden de 5.600 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Microhmos/cm).

El agua salada es transportada por el río hasta su confluencia con el río Grande, para formar ambos el río San Pedro. Desde este último nace una red de canales de regadío que abastece a la localidad de San Pedro de Atacama. La contribución de agua salada proveniente del río Salado desmejora la calidad del agua del río San Pedro, motivo por el cual los regantes han solicitado la materialización de un proyecto que evite la contaminación salina de las aguas del río Salado, lo que fue considerado entre los objetivos de estudio.

Dentro de este marco, se solicitó el estudio de dos tipos de obra, o alternativas: Tubería o canal by-pass del Río Salado y Túnel de trasvase del Río Salado a la cuenca del río Grande.

En lo que sigue se indican y describen las principales alternativas del trazado del túnel de trasvase del río Salado al río Grande. La siguiente Figura se muestra las 3 alternativas.

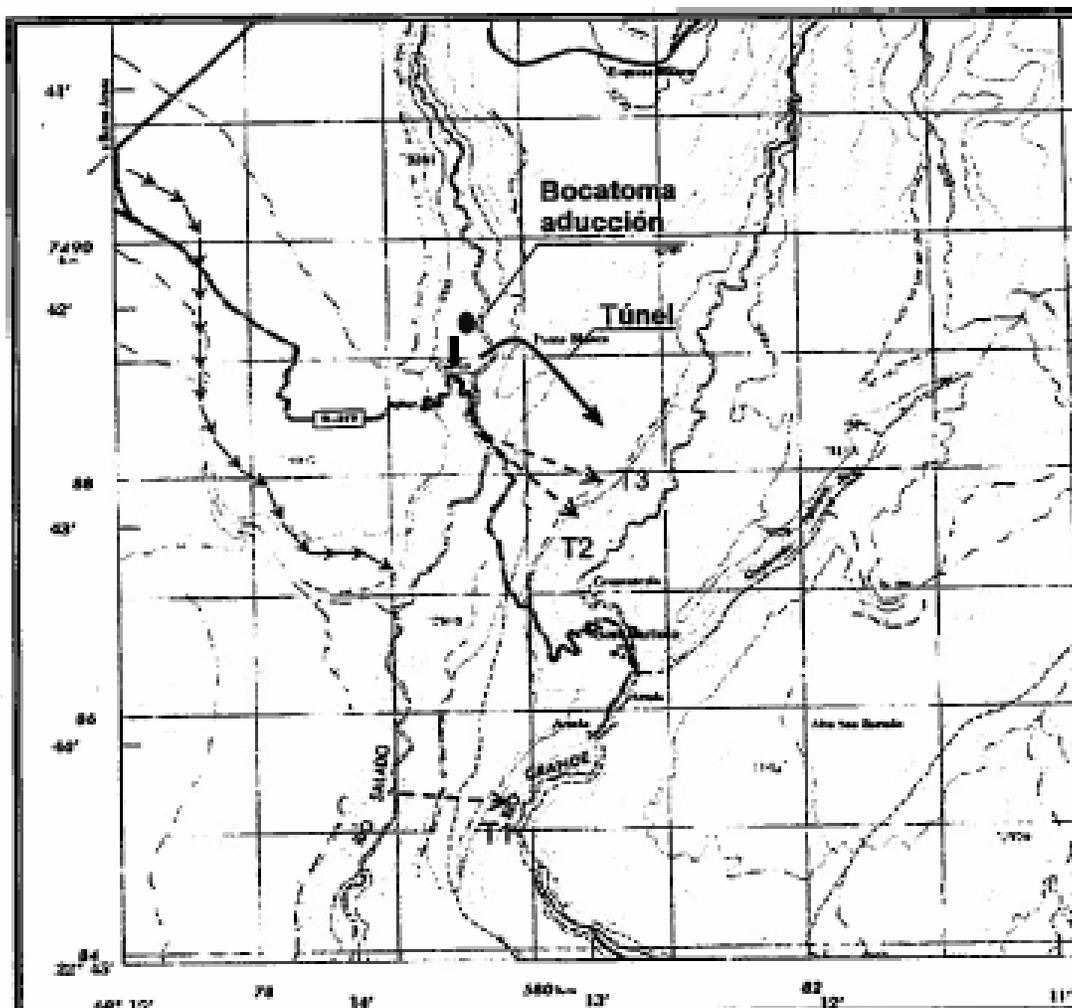


FIGURA 2-5: ESQUEMA DE TRASVASE RÍO SALADO A RÍO SAN PEDRO.

Fuente: DOH, Luis San Martín, 2001.

**Alternativa tubería o canal
by-pass del río Salado**

Este proyecto consiste en captar las aguas del río Salado, a la altura del cruce con el camino al Establecimiento San Bartolo, donde todavía sus aguas presentan índices de salinidad aceptables y llevarlas hasta su confluencia con el río Grande, donde se origina el río San Pedro.

De acuerdo a los estudios realizados en la etapa de factibilidad se considera la instalación de un tubo Spíropecc enterrado 2 m, cuyo trazado deberá irse adecuando al cauce, con cámaras de inspección cada 50 m. Se estima que el trazado tendrá una longitud total de 13 km. Esta alternativa con conducción por tubería tiene un costo de US\$ 2.880.917.

Si la conducción se hace por un canal revestido el costo asciende a US\$ 1.540.266.

Alternativa túnel de trasvase

Como una alternativa al by-pass del río Salado se encuentra la opción de construir un túnel para conducir las aguas del río Salado hacia la cuenca del río Grande, con lo que se evita el trayecto de aproximadamente 13 km por la caja del río Salado. El trazado propuesto tiene una longitud aproximada de 1200 m y su costo es de US\$1.005.600.

Comparación económica de alternativas

Lo indicado anteriormente muestra que la alternativa túnel resulta ser más económica. Se agrega a ello el gran nivel de seguridad que ésta presenta, en relación a la conducción en by-pass por tubería o canal, que por presentar un largo trazado deben considerar la construcción y mantención de una gran cantidad de obras de arte. El proyecto prosiguió entonces considerando la opción de construcción de un túnel de trasvase desde el río Salado hacia el río Grande.

Se estudiaron tres alternativas de trazado del túnel, T1, T2, y T3, las que fueron desechadas por haberse detectado la presencia de un deslizamiento activo orientado hacia la zona de los portales de entrada, que se prolonga aproximadamente hasta los primeros 400 m de cada túnel. Bajo estas condiciones, no se consideró factible la ejecución de un túnel en el área con lo que se generó la necesidad de buscar un nuevo punto para la ejecución del túnel, teniendo presente en primer lugar la condición geológica del sector.

Análisis de alternativas de Trazado de Túnel

Después de analizar la zona en torno al cruce del camino al Establecimiento San Bartolo, se estimó que la posición del trazado que permite evitar la zona de deslizamiento y que presenta además condiciones adecuadas para la materialización del portal de entrada, corresponde a aquella que se presenta esquemáticamente en la siguiente Figura. El portal de entrada se ubica aproximadamente 250 m aguas bajo del cruce del río Salado con el camino a San Bartolo, encontrándose la obra de toma 50 m aguas arriba de este mismo punto. El trazado se inicia con dirección noreste, para luego, mediante una curva en el trazado tomar la dirección sureste, para salir finalmente en la cuenca del río Grande, en la zona de San Bartolo. Esta configuración permite evadir la zona del deslizamiento existente, obteniéndose un trazado de una longitud de 1.257 m que no resulta ser significativamente mayor que los anteriormente considerados.

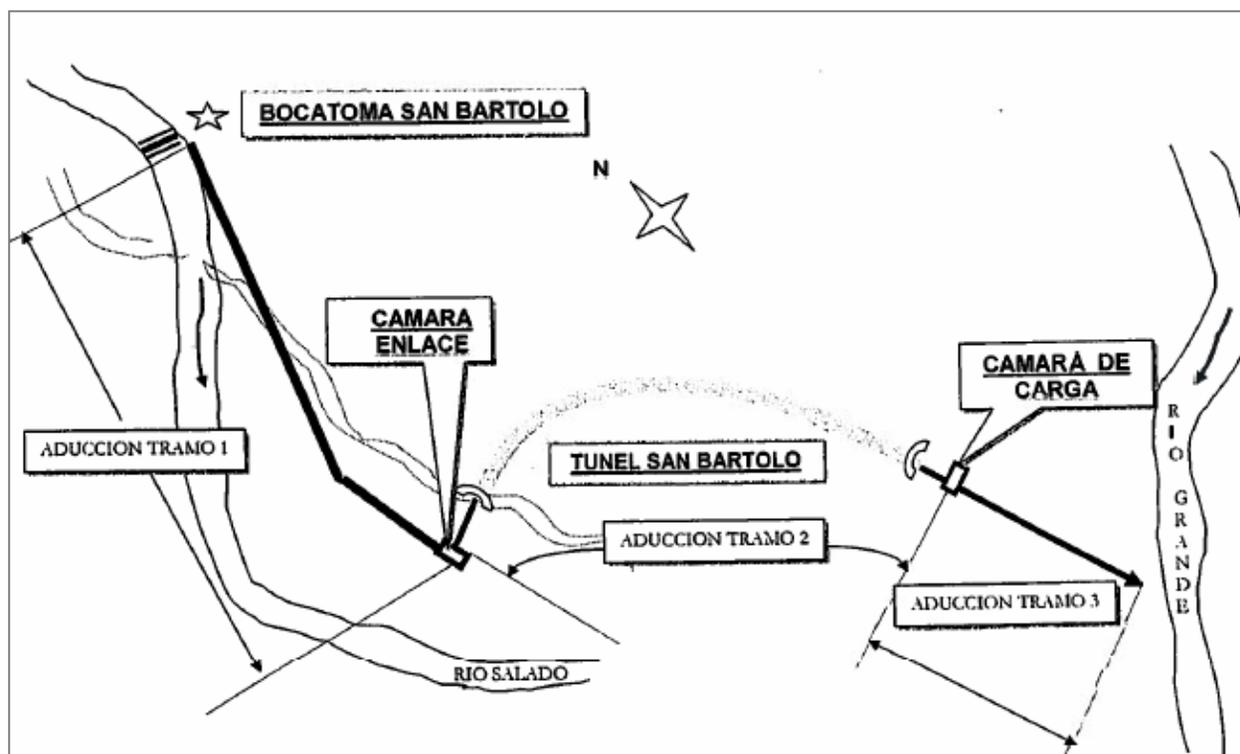


FIGURA 2-6: OBRAS DEL TRASVASE RÍO SALADO A RÍO GRANDE.

Fuente: DOH, Luis San Martín, 2001.

A continuación, se indican y describen las principales obras que conforman el trasvase del río Salado al río Grande.

Bocatoma San Bartolo

La obra de toma se ubica en el río Salado, aproximadamente 50 m aguas arriba del cruce del río con el camino a San Bartolo.

La obra de toma consiste en una barrera frontal sobre el lecho del río de 26,2 m de largo aproximadamente. Sobre el eje de la barrera, en su parte más alta, se genera una canaleta que permite captar el caudal proveniente del río y conducirlo hacia una cámara que alimenta una tubería de conducción. Se cuenta además con un vertedero lateral que permite la evacuación de 0,02 m³/s, correspondiente al caudal ecológico.

La bocatoma frontal de una longitud de 26,2 m capta sus aguas por el costado derecho y cruza entubada hacia el costado izquierdo del río, esto con los siguientes propósitos:

- Protección de las obras, ya que se encuentra por el lado interior de la curva existente aguas arriba en el río Salado.
- El costado izquierdo posee fuerte pendiente lo que es motivo de frecuentes desprendimientos de material rocoso hacia el río
- Se facilita el acceso al sector de emplazamiento de las obras.

Bocatoma San Bartolo

La obra ha sido diseñada considerando un caudal en el río de 50 m³/s, que corresponde aproximadamente a un período de retorno de 100 años. En el verano del año 2001 se registraron crecidas en el río del orden de 50 m³/s que dejaron evidentes marcas en los bordes del cauce. Estas fueron consideradas

	al efectuar los trabajos de topografía, con lo cual fue posible diseñar las obras, en especial el trazado de la tubería y la ubicación del portal de entrada del túnel, sobre estos niveles.
Aducción Tramo 1, desde Bocatoma hasta la entrada del túnel de trasvase	A través del borde izquierdo del río se desarrolla el trazado de una tubería PECC de diámetro nominal $e = 355$ mm, enterrada y de 325 m de longitud, que conduce las aguas hacia la entrada del túnel. Se consideró un caudal de diseño de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal máximo admisible de $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$.
Aducción Tramo 2 por el interior del túnel de trasvase (San Bartolo)	La sección transversal del túnel es del tipo arco de medio punto, con un ancho de 3,2 m y alto de 2,9 m. En la zona de entrada, como de salida, que suman una longitud aproximada de 80 m la sección excavada es de 3,8 m ancho y 3,2 m alto, con el objetivo de incorporar los correspondientes soportes. El portal de salida del túnel se ubica en el borde derecho del río Grande, sobre una antigua faena minera actualmente sin uso. El desnivel existente entre la salida del túnel y el río es de 53 m aproximadamente. Ello, ha obligado al diseño de una obra de caída y posterior disipación antes de ingresar al río Grande.
Aducción Tramo 3 y entrega al río Grande	

De este estudio se destacan la utilidad de los antecedentes de estudios geológicos y geotécnicos entorno al sitio a la alternativa del embalse Coyil, así como las alternativas propuestas de trasvase, las que fueron de referencia para el replanteamiento de alternativas en el estudio "Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta".

2.1.2.4. Mejoramiento del Regadío de San Pedro de Atacama. Fernando Dávila I., Ambrosio G. Huidobro E., Emilio Donoso D. Dirección de Riego, 1959.

Entre los estudios anteriores sobre el área de estudio, este estudio, realizado en 1959, corresponde al antecedente más antiguo. En este estudio se analizó el sistema de regadío de San Pedro de Atacama desde diversos aspectos, revisando previamente los antecedentes geomorfológicos, de suelos, cultivos, sistemas de riego, etc., tanto para los Ayllus regados por el río San Pedro, como para los del río Vilama.

En el estudio se destaca que el río San Pedro se saliniza en dos sectores: Frente a Lagunita en 300 metros y frente a San Bartolo en unos 7 km. Además, indica que el río se forma por la confluencia de los ríos Jauna y Putana, siendo el Machuca y el Salado afluentes de más abajo. Hoy en día se le conoce como a partir de la confluencia de los ríos Grande y Salado, naciendo el Grande en la confluencia del Jauna y Putana. Por su parte, indica que el río Vilama se contamina en su nacimiento, por lo que no cuenta con las posibilidades de mejorar su calidad del agua de riego que cuenta el río San Pedro.

Como antecedente histórico, se destaca el siguiente extracto, que da cuenta del invierno altiplánico y la salinidad de las crecidas: "El río San Pedro presenta crecidas en Verano ("Invierno Altiplánico"), debido al escurrimiento superficial de las precipitaciones cordilleranas. Estas lluvias, que duran generalmente 2 a 3 días arrastran grandes cantidades de sal, lo que hace imposible el aprovechamiento de dichas crecidas mediante la construcción de un embalse. El resto del año el río presenta una sorprendente invariabilidad."

Además del problema de la salinidad, el estudio plantea como principales problemas del riego las pérdidas de agua por conducción, tanto en el río como en los canales, que en la época eran en su mayoría no revestidos. Es así como se proponen a nivel de idea varias soluciones para disminuir la salinidad y las pérdidas de agua, entre las cuales se pueden citar:

- Defensas en el río San Pedro en el sector lagunitas.
- Túnel en roca en el sector San Bartolo y Cuchabrachi – San Pedro.
- Canal de albañilería en los sectores San Bartolo y Cuchabrachi – San Pedro.
- Entubación en los sectores San Bartolo y Cuchabrachi – San Pedro.
- Revestimiento de Canales.
- Regulación Nocturna.
- Bocatomas y Marcos Partidores.
- Regulación estacional (embalse Coyil para río San Pedro y embalse Guatín para río Vilama).
- Revestimiento del río Salado

El estudio realiza a continuación un costeo de estas soluciones, a nivel de idea, y un plan de estudios para llevarlas a diseños previos, anteproyectos y proyectos. También, recomienda la formación de una Asociación de Canalistas, la Canalización del río San Pedro, el estudio de la napa freática, la realización de un catastro de propiedades, la creación de una escuela agrícola y una colonización con gente de la zona. Termina concluyendo una estimación de los beneficios que podrían obtenerse con cada proyecto.

Si bien el estudio hace énfasis en el sistema de regadío, se consideran rescatable de este estudio algunas ideas y conceptos acerca del origen de las aguas y su calidad, y en particular las obras de defensas fluviales y obras de regulación estacional planteadas en los ríos San Pedro y Vilama; no obstante, estos temas deben ser abordados con la situación actual de la zona de estudio.

2.1.2.5. Aprovechamiento Integral de los Recursos de Agua de San Pedro de Atacama, Fernando Dávila, Dirección de Riego, 1960.

Este estudio surge como consecuencia de las conclusiones y recomendaciones efectuadas en el estudio “Mejoramiento del Regadío de San Pedro de Atacama”, Informe preliminar, octubre de 1959, realizado por los ingenieros Fernando Dávila I., Ambrosio G. Huidobro E., y Emilio Donoso D.

Los requerimientos de este contrato correspondieron al estudio de las obras necesarias para lograr los siguientes fines:

- a) Saneamiento de las aguas del río San Pedro y eliminación de las pérdidas por filtración.
- b) Saneamiento de las aguas del río Vilama y eliminación de las pérdidas por filtración.
- c) Embalses de regulación estacional para almacenar las aguas sobrantes de invierno en los ríos San Pedro y Vilama.
- d) Sistema de impermeabilización de los canales de distribución para eliminar las pérdidas por filtraciones.
- e) Plano general de la zona regada y susceptible de regar, a escala 1:5.000 con curvas de nivel cada metro y catastro de las propiedades
- f) Informe general, con recomendaciones y conclusiones.

En su capítulo 1, el estudio expone una recopilación de antecedentes, una descripción general sobre la ubicación, el clima, la geología y la historia. En el capítulo 2, se refiere a los recursos de agua, incluyendo el agua subterránea, y en el capítulo 3 a la agricultura, incluyéndose los suelos, los cultivos y el riego. En el capítulo 4, se efectúa un programa de los estudios a efectuar en la segunda parte.

Con respecto a la geología, en el estudio se plantea una descripción de la evolución de las formaciones geológicas de la zona de estudio, indicando lo siguiente: “a unos 10 km al sur comienza el desierto de Atacama, donde desembocan los ríos San Pedro y Vilama. La formación San Pedro, que es del Terciario Inferior, es la principal en la zona, es sedimentaria y metamórfica de varios centenares de metros de espesor. La formación tiene plegamientos bastante intensos y con sedimentación lacustre impregnada de sal. Esta cordillera separó una parte del lago, lo que hoy se denomina “Llano de la Paciencia”, el que posiblemente formó primero un brazo y más tarde quedó en seco”.

Posteriormente, vino la época de la gran actividad volcánica de fines del terciario y comienzos del cuaternario, durante la cual se formó la cadena montañosa por la que corre la frontera actual entre Chile y Bolivia.

Al comienzo de esta formación volcánica se mantuvieron los antiguos cauces naturales de escurrimiento, algo modificado por las alteraciones tectónicas. Luego, el torrente de basalto y liparita obstruyó esos cauces, dejando la región sin desagüe aparente. Sin embargo, se supone que esos diques no son totalmente impermeables, debido a las numerosas fisuras que se forman en ese tipo de rocas. De este modo, el antiguo escurrimiento continuaría hasta hoy en forma de filtraciones subterráneas que serían las que alimentan los ríos actuales del lado chileno.

Esta teoría permitiría explicar la constancia de los gastos de estos ríos, cuyos valores no guardan ninguna relación con las superficies de las hoyas hidrográficas de donde provienen. Las precipitaciones ocasionales del invierno altiplánico escurren de inmediato en forma de grandes avenidas. Por otra parte, la nieve caída en la alta cordillera no alcanza a fundirse debido a los fuertes

vientos y a la sequedad del aire, lo que provoca su evaporación directa, tomando la conocida forma de “Penitentes”, en tanto el terreno bajo ella se mantiene seco.

Por otra parte, el largo trayecto subterráneo actuaría a modo de estanque regulador de varios años, dando por resultado un gasto normal sensiblemente constante, lo que se observa en los ríos Loa, San Pedro, Vilama y demás de la Región.

Tal fue la conclusión a que llegaron el señor William E. Rudolf, ex ingeniero Jefe de la Chile Exploration Company y sus colaboradores, después de un extenso estudio de las fuentes de abastecimiento de agua para Chuquicamata.

Los primeros agricultores de la región, que posiblemente datan de varios miles de años atrás, debieron luchar contra la alta salinidad del suelo que dejaba descubierto el lago en su descenso. Por otra parte, dada la aridez del clima, el riego era indispensable, disponiendo para ello de los ríos San Pedro y Vilama, cuyas aguas tienen un contenido salino apreciable. Sin embargo, lograron descubrir el sistema que los permitía lavar los suelos y mantener su grado de salinidad dentro de un cierto límite mediante la inundación del campo en cada riego. Así, con el exceso de agua que aplicaban, conseguían hacer penetrar al sub suelo, en los sectores en que la permeabilidad lo permitía, la sal acumulada anteriormente, lo que se incorporaba a la napa freática y, por medio de ella, al salar. Este sistema de riego lo empleaban los Atacameños a la llegada de los españoles y es el que en líneas generales emplean los habitantes actuales, aunque con muchos defectos.

Para analizar los recursos de agua, el estudio divide al río en 5 sectores, a saber:

- Sector Lagunita, aprox. 6 km
- Sector Río Grande, aprox. 21 km
- Sector San Bartolo, aprox. 9 km
- Sector Confluencia, aprox. 10 km
- Sector Inferior, aprox. 12 km

El estudio indica que el río San Pedro tiene su primer contacto con sectores salados frente a Lagunita, en un punto llamado “Ojo Salado”, y luego las principales contaminaciones son en el sector desde el establecimiento San Bartolo hasta el Ayllu del mismo nombre y en la junta con el río Salado.

Con respecto a la napa subterránea, se indica que la salinidad es bastante alta y el contenido de Boro está muy por encima de los valores aceptables para los cultivos. Cabe destacar que el Salar de Atacama, incluida la cordillera de la sal, abarca todo el sector de cultivos, o de Ayllus.

Con respecto a los cultivos, los principales son la alfalfa, el maíz y el trigo, los cuales se dan en condiciones bastante deficientes.

Con respecto al riego, se plantea la necesidad de regar permanentemente con tasas altas, que permitan lavar los suelos y mantener un relativo equilibrio del contenido salino, lográndose un cultivo estable. De lo contrario, los suelos se irán salinizando cada vez más. El estudio estima que de una necesidad de dotación del orden de 17.000 m³/ha/año, debe regarse con una dotación del orden de 25.000 m³/ha/año.

Finalmente, con respecto a los canales, se plantea que adolecen de graves defectos, como pendientes excesivas, largos tramos por trayectos de gran permeabilidad, y canales que siguen cursos paralelos pudiendo fácilmente reunirse en uno solo.

Para el saneamiento de las aguas del río San Pedro, se diseñaron defensas en 150 m del sector Lagunita, un canal de 6 km en el sector San Bartolo y una tubería de rocalit enterrada, con una bocatoma en el río Salado, para desviar el río de la zona contaminante.

Para la regulación estacional del río San Pedro, se diseñó el embalse Coyil, de 8 hm³ de capacidad, al cual se le calculó un 3,34% de pérdidas por evaporación. El muro es del tipo mixto, con un núcleo de tierra impermeable y espaldones de enrocado, construidos con la roca liparítica existente en la zona.

Para la impermeabilización, cuarto punto del contrato, se propone un acueducto entubado en hormigón armado, por la caja del río y protegido de las crecidas, que entregará el agua a los canales troncales a la entrada del pueblo, así como también a los Ayllus intermedios por medio de válvulas con medidores de caudales. Para los canales, se propone revestir con albañilería de piedras o con membranas plásticas. Un análisis económico permite concluir al autor que lo mejor es la membrana.

Como conclusiones y recomendaciones, el estudio incluye un análisis de los costos y beneficios que producirían cada una de las obras propuestas, así como recomendaciones relativas a otros temas, como traslado de Ayllus, distribución de las aguas, formación de una Asociación de Canalistas, Dotación de agua potable al pueblo, generación de energía hidroeléctrica, creación de un establecimiento destinado a la investigación y educación, y confección de un plano regulador de la zona urbana.

Se considera que este estudio es bastante interesante en los análisis que realiza, y aporta información de utilidad, pero las obras que plantea deben volver a analizarse bajo la situación actual de información. De igual forma que el estudio del año 1959, lo más interesante es el análisis conceptual de los orígenes de las aguas y de su calidad, y el precedente histórico respecto a la necesidad de obras de defensas fluviales y obras de regulación estacional planteadas en los ríos San Pedro y Vilama.

2.1.2.6. Manejo Experimental de la Cuenca del Río San Pedro de Atacama, II Región. MOP, Dirección de Riego, R&Q Ingeniería Ltda., noviembre 1995.

Este estudio tuvo como objetivo definir un programa de desarrollo agropecuario y priorizar inversiones, en una zona de gran interés socioeconómico, cuyas posibilidades de desarrollo están muy

limitadas por la contaminación salina de las aguas de riego y de los suelos, y por los deterioros generados por las crecidas de los ríos durante el “invierno altiplánico”.

El estudio se ejecutó en las 8 etapas siguientes:

- 1) Recopilación y Análisis de Antecedentes
- 2) Estudios Hidrológicos
- 3) Confección de Catastros y Estudio Agronómico
- 4) Análisis del Problema de Contaminación
- 5) Diagnóstico y Proposición de Soluciones
- 6) Desarrollo de Alternativas de Solución
- 7) Evaluación Económica y de Impacto Ambiental
- 8) Informe Final

En la Memoria y Resumen del Estudio, que es el Volumen 1, se incluyen las características socioeconómicas del área, un estudio hidrológico que entrega para el río San Pedro un caudal medio de entre 720 L/s y 860 L/s. Para un año 85% varían entre 620 L/s y 780 L/s. Hay bastante “pulsación” del caudal durante las 24 horas, debido al congelamiento y posterior derretimiento de las aguas en lagunas y vegas, especialmente en los meses de invierno, en los cuales las variaciones son superiores al 100%, en tanto que en el resto de los meses es del orden del 7%.

En lo que respecta a las aguas subterráneas, existe un buen caudal, entre 40 L/s y 150 L/s en pozos perforados por CORFO, pero con mala calidad química, especialmente por el alto contenido de Boro, 15 mg/L en promedio.

Se entrega un estudio agroclimático y de suelos, con Capacidad de Uso, Clases de Drenaje, Categorías de Riego, Aptitud Frutal y Grupos de Manejo. Se incluye también estudios de infiltrometría y de calidad de las aguas.

Un tema de gran interés para el presente estudio es el catastro de las áreas de riego, que incluye Rol del propietario, Área total del Rol, área actualmente bajo riego, área potencialmente regable, distribución de los cultivos de cada Rol y distribución de los cultivos del área.

También, se entregan los resultados de encuestas y un estudio de mercado, que revela lo frágil de la agricultura.

El estudio también incluye un capítulo de Catastro, Reparación y Modificación de la Infraestructura de riego existente y un Catastro de Pozos y Norias y Eventual Explotación del Agua Subterránea.

El estudio continúa con un análisis de la Contaminación de las Aguas, sus Causas y Soluciones Propuestas para Mejorar su Calidad, una descripción de la Situación Actual del Riego y Soluciones propuestas, una descripción de los Embalses de Temporada identificados, entre los cuales está el embalse Coyil para regular el río San Pedro y el embalse Guatín para regular el río Vilama.

Finalmente, el estudio concluye con un Programa de Desarrollo Agropecuario, una Evaluación Económica de las Soluciones Propuestas, y un Estudio de Impacto Ambiental.

Las Conclusiones y Recomendaciones finales, se refieren a los recursos naturales de agua, clima y suelos, al Uso y Manejo de los Recursos Hídricos, a las Obras Propuestas, a la Comercialización, al programa de Desarrollo Agropecuario, a la Evaluación Económica, al Impacto Ambiental, y Recomendaciones Generales.

El Volumen 2 corresponde a los estudios básicos, el Volumen 3 a los Estudios Catastrales y de Mercado, el Volumen 4 al “Análisis del Problema de Contaminación” y el Volumen 5 a la “Regulación y Distribución de Aguas de Riego”.

Si bien el estudio hace énfasis en el sistema de regadío, se destaca la necesidad de obras de regulación estacional planteadas en los ríos San Pedro y Vilama.

2.1.2.7. Diseño Obras Fluviales Río Copiapó en Sector Urbano y Manejo de Cauce en Sector Rural, Comuna de Copiapó, Región de Atacama. DOH, GSI Ingeniería, marzo 2019.

Este estudio tuvo como objetivo general, en su primera parte, el diseñar a nivel de detalle las obras fluviales para el sector del río Copiapó comprendido entre quebrada Paipote y el fin de la zona urbana de la ciudad, y proponer las medidas necesarias para que este cauce pudiese conducir una crecida menor o igual a la del evento extremo ocurrida el 25 de marzo de 2015, evento aluvional y de inundaciones que causaron daños en una vasta zona del norte de Chile, y en particular en la comuna de Copiapó. En su segunda parte, el estudio comprendió el estudio del manejo del cauce del río Copiapó en el sector rural, comprendido entre el término de la zona urbana y la ruta C-370. Cabe señalar que, de acuerdo con los resultados del estudio hidrológico de este estudio, el caudal de crecida de diseño se ajustó a un periodo de retorno de 100 años, cuyo valor es muy superior a la crecida ocurrida el 25/5/2015.

Tal como lo señalan los Términos de Referencia de la presente Consultoría, este estudio aplicó metodologías que se utilizaron en los estudios de diseño del “Plan Atacama”, plan promovido por el MOP con ocasión de los aluviones del marzo de 2015; razón por la resulta de interés como precedente para abordar la caracterización de las crecidas ocurridas en enero y febrero del 2019 en San Pedro de Atacama. Por tal motivo, este estudio resulta de gran interés en lo que concierne el estudio hidrológico.

Cabe señalar que, en particular, tal como se describe en este estudio, la caracterización el fenómeno ocurrido en la zona para el evento del 25/5/2015 se abordó en el estudio “CARACTERIZACIÓN Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DEBIDO A LAS CRECIDAS ALUVIONALES EN LA CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ, REGIÓN DE ATACAMA PARA EL TEMPORAL DEL 25 Y 26 DE MARZO DE 2015. EIC, 2015” en términos de caudales, arrastre de sedimentos, y otros. Se destaca de este estudio que, para la caracterización del evento, la línea de nieves para el evento se estimó mediante registros de temperatura durante la tormenta, resultando en torno a los 3.500 m.s.n.m., siendo esta información consistente con la información de temperaturas de estaciones ubicadas en altura.

Como metodología del estudio hidrológico, para obtener los caudales líquidos y detríticos para los distintos periodos de retorno ($T=2,5,10,25, 50, 100$ y 200 años) y la caracterización del evento del 25/5/2015, se utilizó la secuencia de la que da cuenta el siguiente diagrama de flujos.

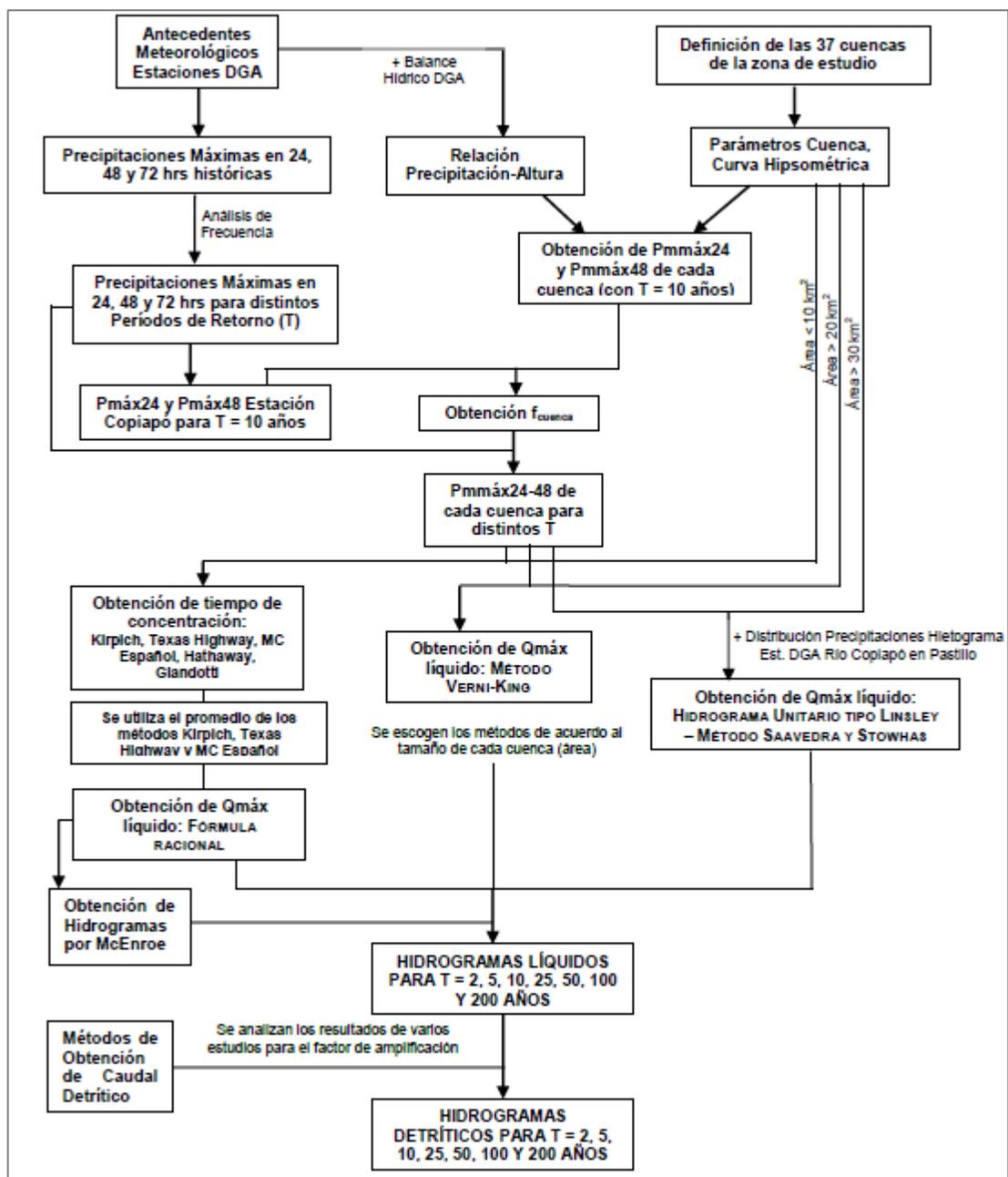


FIGURA 2-7: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA PARA OBTENER CAUDALES LÍQUIDOS Y DETRÍTICOS PARA LOS DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO APLICADA EN EL ESTUDIO DE GSI, 2019.

Fuente: Diseño Obras Fluviales Río Copiapó en Sector Urbano y Manejo de Cauce en Sector Rural, Comuna de Copiapó, Región de Atacama. DOH, GSI Ingeniería, 2019.

En su metodología, al inicio se realizó un estudio de precipitaciones mediante los registros de las estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías de la zona estudiada. Luego del correspondiente relleno de los registros, sobre las series precipitaciones máximas en 24, 48 y 72 horas identificadas para cada una de las estaciones, se aplicó un análisis de frecuencia, obteniendo finalmente las precipitaciones en 24, 48 y 72 horas para los periodos de retorno T=2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años.

En las subcuencas en la zona de estudio, se obtuvieron sus parámetros morfológicos y su curva hipsométrica. Mediante una relación precipitación–altura obtenida a partir de los resultados del estudio “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días” de la Dirección General de Aguas, y la curva hipsométrica, se estimó la precipitación media máxima en 24 y 48 horas para un periodo de retorno de 10 años para cada subcuenca. Luego, para obtener las precipitaciones para distintos periodos de retorno en cada subcuenca, se procedió a elegir una estación pluviométrica representativa de la zona estudiada y que funcionara como base para el cálculo. Con esto se determinó el factor de precipitación para cada subcuenca, mediante el cual se obtienen posteriormente las precipitaciones en 24 y 48 horas para distintos periodos de retorno.

En su análisis de la ubicación de la línea de nieves, en el estudio se aplicaron los resultados de la memoria de título “VARIABILIDAD DE LA LÍNEA DE NIEVES DURANTE EVENTOS DE TORMENTA UTILIZANDO MODELACIÓN PROBABILÍSTICA” (Covián, UTFSM, 2012), en donde se exponen expresiones para estimar las líneas de nieve en el país en función de la latitud del centro de gravedad de la cuenca a analizar, para las probabilidades de excedencia más representativas, diferenciando a su vez las expresiones para las épocas de invierno, otoño-primavera y verano. Como resultado de su aplicación, se concluyó que la totalidad de las cuencas de la zona estudio presentaban una cota máxima menor a las distintas líneas de nieves obtenidas, y por lo tanto, todas sus subcuencas resultaron ser de tipo pluvial.

Para la determinación de los caudales líquidos de crecida para cada cuenca estudiada, se aplicaron los métodos de Fórmula Racional, Verni y King Modificado, y el Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley–Método Saavedra y Stowhas. En este último método, comprende el método Hidrograma Unitario Sintético (HUS) tipo Linsley, descrito en el “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica” DGA (1995), con la modificación introducida por Saavedra y Stowhas, para la Infiltración Inicial I_0 , detallado en la publicación “Cálculo y Análisis Crítico del Método de La Curva Número para Cuencas del País” (2003).

Los valores obtenidos mediante Fórmula Racional fueron aplicados para cuencas con áreas menores a 10 km², mientras que el Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley–Método Saavedra y Stowhas fue adoptado para las cuencas con área mayores a 30 km². Para las cuencas con áreas entre 10 y 30 km², se aplicó el promedio de ambos métodos.

Para obtener los caudales detríticos de cada cuenca y para cada periodo de retorno, se evaluaron los métodos de Yablonskiy, Oficina de Planificación Municipal de Pekín y Takahashi, junto a coeficientes de amplificación obtenidos en otros estudios del Plan Atacama en la zona de estudio.

En la caracterización de la crecida del 25 de marzo de 2015 (25M) se aplicó la misma metodología, con la excepción de que se consideró el registro de precipitaciones del mismo evento en lugar del registro histórico de precipitaciones. Sobre la precipitación en 24 y 48 horas del evento del 25M, se aplicaron los factores de precipitación de cada subcuenca, y se obtuvo la precipitación media máxima en 24 y 48 horas en el evento del 25M para cada subcuenca. Luego, se determinaron los caudales líquidos de crecida por subcuenca. El método a utilizar para la obtención de éstos para cada cuenca depende del área de ésta, utilizando el método de Hidrograma Unitario Sintético tipo Linsley -

Método Saavedra y Stowhas o Fórmula Racional, según corresponda. Finalmente, los caudales detríticos fueron determinados mediante factores de amplificación, utilizando los mismos factores aplicados para eventos de distintos periodos de retorno.

Este estudio resulta de gran utilidad, tanto por su metodología general como en casos específicos, como lo es la aplicación del análisis de la variabilidad de la línea de nieves, y su análisis sobre los coeficientes de amplificación para determinación de los caudales detríticos, en los cuales compararon resultados de otros estudios desarrollados en el Plan Atacama.

2.1.3. Antecedentes Hidrológicos

2.1.3.1. Estadística Hidrometeorológica

g) Pluviometría

En la cercanía al área de estudio se dispone de varias estaciones pluviométricas, cuyas entidades propietarias corresponden a la Dirección General de Aguas (DGA), Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y el Instituto de Investigación Agropecuaria (INIA). En la siguiente Tabla y Figura se presenta la características y ubicación de estas estaciones.

CUADRO 2-3: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA CERCANÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Código	Nombre Estación	Propietario	Fechas		Altura m.s.n.m.	Coordenadas UTM	
			Instalación	Supresión		Norte (m)	Este (m)
02105016-4	LINZOR	DGA	01/11/1973		4.100	7.541.388	600.714
02105021-0	CASPANA	DGA	01/01/1971	31/12/2008	3.260	7.529.664	581.126
02105022-9	EL TATIO	DGA	01/06/1977		4.370	7.525.730	601.585
02500015-3	TOCONAO RETEN	DGA	01/01/1975	31/01/1991	2.460	7.434.668	601.376
02500016-1	TOCONAO EXPERIMENTAL	DGA	01/11/1975		2.500	7.435.152	602.573
02510006-9	SAN PEDRO DE ATACAMA	DGA	01/09/1958	31/03/1989	2.450	7.466.710	582.019
02510007-7	RIO GRANDE	DGA	01/01/1977		3.250	7.494.705	585.709
02500027-7	TOCONAO PUEBLO	DGA	01/04/2016		2.698	7.435.956	601.953
02500025-0	TOCONAO QUEBRADA 1	DGA	01/04/2016		3.979	7.432.239	621.742
02500026-9	TOCONAO QUEBRADA 4	DGA	01/04/2016		3.465	7.439.076	612.782
220001	EL TATIO	DMC	1968		4.320	7.528.072	597.761
220005	SAN PEDRO DE ATACAMA, ESCUELA	DMC	1959		2.443	7.465.859	582.294
220022	CASPANA	INIA	2019		3.245	7.529.891	580.923
220024	SAN PEDRO DE ATACAMA INIA	INIA	2019		2.416	7.463.716	580.602
230004	TOCONAO (DMC)	DMC	2019		2.495	7.435.478	601.716
230019	TOCONAO (INIA)	INIA	2019		2.478	7.434.988	601.543

Fuente: DGA y DMC.



FIGURA 2-8: ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA EN LA CERCANÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente Tabla se presenta el diagrama de barras de las estaciones pluviométricas, en donde se distinguen los meses con información original.

Se destaca que la DGA posee la mayor cantidad de estaciones en la zona de interés, y estas estaciones son las que poseen registros más continuos en el periodo 1959-2018. No obstante, cabe destacar que en los años 2019 y 2020 las estaciones de la DMC e INIA poseen registros completos; y en particular, dan cuenta de las precipitaciones ocurridas en enero y febrero de 2019. De estas estaciones, se destaca la estación Toconao (DMC), que corresponde a una estación automática con registro minutal.

Cabe señalar que debido a la situación de la pandemia por la enfermedad de Covid-19, la DMC no se encuentra atendiendo de manera presencial, y en consecuencia, actualmente, y mientras se encuentren operando en modalidad a distancia, no es posible acceder a los registros en papel de sus estaciones El Tatio y San Pedro de Atacama – Escuela. No obstante, se facilitaron los meses con registro, los que dan cuenta de la falta de regularidad de mediciones.

CUADRO 2-5: ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA CERCANÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Código	Nombre Estación	Propietario	Fechas		Altura m.s.n.m.	Coordenadas UTM	
			Instalación	Supresión		Norte (m)	Este (m)
02510001-8	RIO SAN PEDRO EN CUCHABRACHI	DGA	01/06/1947		2.585	7.475.873	582.268
02500001-3	RIO VILAMA EN VILAMA	DGA	01/01/71	03/02/1972	2.550	7.470.975	583.780
02500004-8	CANAL VILAMA EN VILAMA	DGA	01/04/1976		2.550	7.470.634	584.206

Fuente: DGA.

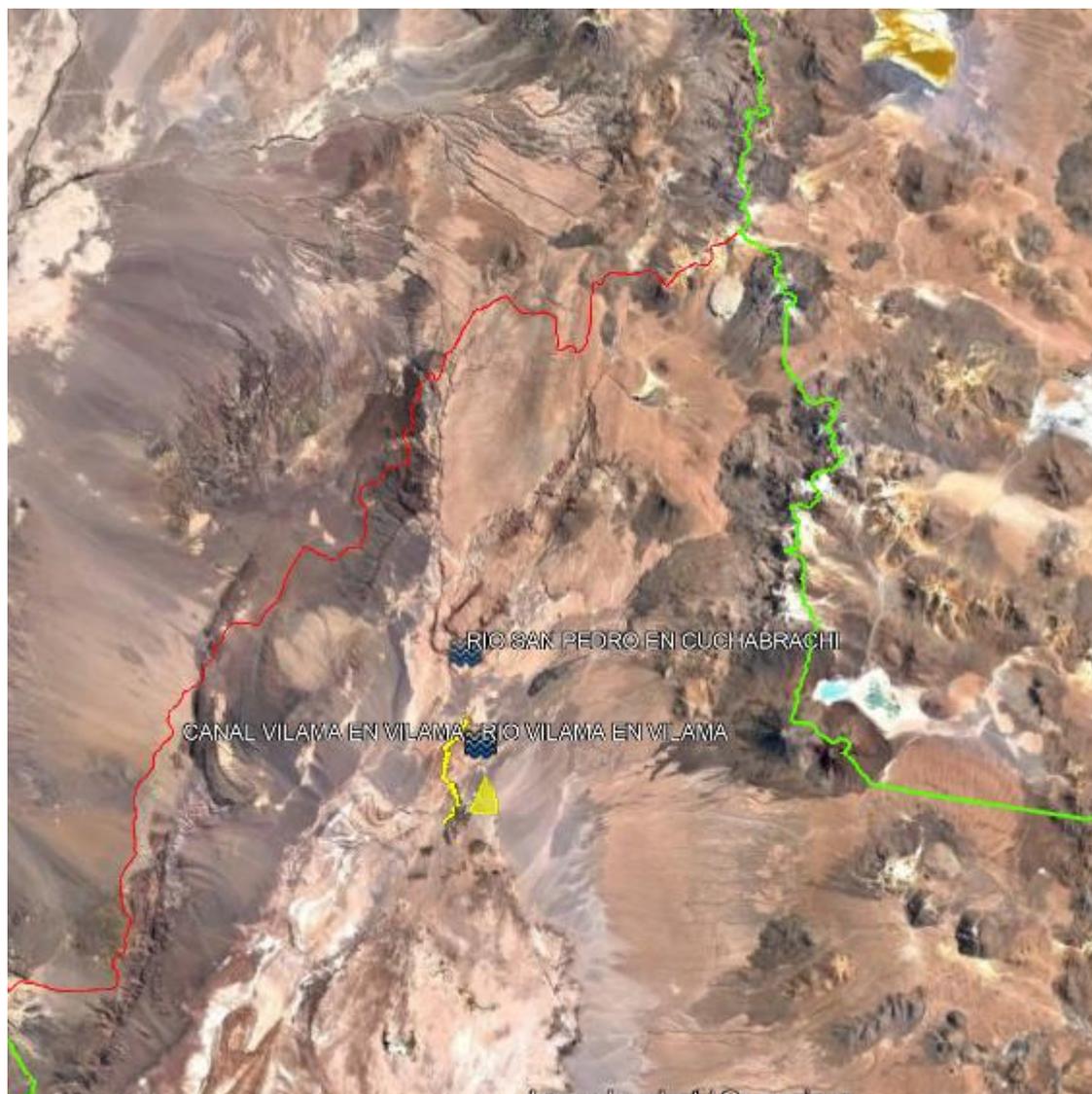


FIGURA 2-9: ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA CERCANÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente Tabla se presenta el diagrama de barras, que da cuenta de la cantidad de meses con información disponible. De esta, se destaca principalmente la estación San Pedro de

Cuchabrachi, que cuenta con un registro desde 1947 a 2015, con algunas discontinuidades, y que resultó destruida por los aluviones de enero de 2019.

CUADRO 2-6: DIAGRAMA DE BARRAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS, MESES CON INFORMACIÓN ORIGINAL

ESTACIÓN	Propietario	'40s			'50s					'60s					'70s					'80s																														
		7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																
RIO SAN PEDRO EN CUCHABRACHI	DGA	7	a	a	a	a	a	a	a	b	a	a	a	b	a	a	a	c	6	a	a	9	5	6	9	a	3	2	0	0	0	b	1	a	a	a	b	4	b	a	a	9	a	a	b					
RIO VILAMA EN VILAMA	DGA																										a	2																						
CANAL VILAMA EN VILAMA	DGA																																				8	8	a	c	7	a	6	b	a	a	b	a	a	a

ESTACIÓN	Propietario	'90s					'00s					'10s					'20s															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0										
RIO SAN PEDRO EN CUCHABRACHI	DGA	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a	c	a	a	b	b	a	b	4	a	a	7	6	6	4	3						
RIO VILAMA EN VILAMA	DGA																															
CANAL VILAMA EN VILAMA	DGA	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	c	b	a	a	a	b					

(*) Meses con información: a=12, b=11, c=10, n=0,1,2,...,9.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.4. Antecedentes Hidráulicos

2.1.4.1. Geomorfología

En términos generales, el sector analizado corresponde al área Precordillerana y Cordillera Andina de la Región de Antofagasta.

El sistema hídrico está establecido entre la divisoria de aguas de la Cordillera de Los Andes (frontera con Bolivia), con cotas que sobrepasan los 5.800 m.s.n.m.; y el nivel de base del Salar de Atacama (2.300 m.s.n.m.).

Las principales hoyas hidrográficas son las de los ríos San Pedro y Vilama, de carácter endorreico, que fluyen desde el norte hasta el Salar de Atacama, pasando por la localidad de San Pedro de Atacama, constituyéndose ambos en los principales aportes de aguas superficiales.

- El sistema San Pedro lo constituyen las subcuencas Salado, Río Grande, Machuca, Putana, Incahuasi, Tocopuri y Jauna, y
- el sistema Vilama las subcuencas Puritama, Puripicar, Turipite y Jorquencial.

Geomorfológicamente en el área de estudio se reconocen las siguientes unidades:

- El Piedemonte Andino es un gran plano inclinado, con alturas entre 2.500 y 3.800 m.s.n.m. en su parte oriental. Constituye una unidad notable con numerosas quebradas que la disectan, algunas poco encajonadas y otras muy encajonadas. Se constituye por una acumulación de rocas volcánicas (andesitas de piroxeno, ignimbritas y rocas detríticas) de varios centenares de metros, se encuentran en alternancia constituyendo acumulaciones mixtas.
- La Cordillera de Los Andes es una cordillera antigua del Mioceno, producto de un solevamiento a comienzos de ese periodo. Los depósitos de sedimentos formaron conos de deyección que entraron en coalescencia y luego fueron “cepillados”,

dejando una forma plana de glacis. Al alterarse el perfil de equilibrio los ríos no depositaron produciéndose este “cepillado”.

- Las terrazas y el modelado actual son Cuaternario, existiendo en el altiplano una morfología periglacial. En el pedimento se producen aluviones y lavas torrenciales que afectan las quebradas.

En cuanto a la morfodinámica, el área está asociada a la acción erosiva del agua superficial en los cauces, pero estacionalmente en aquellos períodos del año donde aumenta el caudal e incluso en aquellos lechos secos que se activan, tanto en los meses de invierno como en los de verano por las lluvias altiplánicas.

Este carácter estacional anual de los torrentes se suma a las mayores crecidas que se registran con períodos de retorno que van de seis a ocho años, según lo expresado por lugareños, con eventos aluvionales que han dejado huellas en el relieve y han afectado la alta cordillera, la precordillera y el nivel de base del Salar de Atacama.

En el año 2001, las grandes lluvias y crecidas cortaron los caminos del interior de San Pedro de Atacama (enero y febrero), borrando parte del actual camino en su cruce con el río Putana, construyéndose el badén - puente y sus gaviones después de este evento. Otro lugar que fue afectado por aluviones fue el sector de Puripica-Guatín, donde la gran crecida del río Puripica arrasó con campos de cultivo y vegas.

Por otra parte, la morfodinámica local también se ve influida por agentes subaéreos como viento, nieve y cambios de temperatura, provocando la degradación de las rocas y su posterior fragmentación como un fenómeno físico-mecánico, provocando la acción conjunta de procesos de gelifracción, termoclastismo y exfoliación. Estas áreas constituyen zonas de alimentación de materiales, las que al superar rangos mínimos de pendiente y disponer de energía (escurrimientos torrenciales, viento o gravedad) se ponen en movimiento hasta formar taludes y conos. Procesos químicos de degradación de rocas sólo se observaron en el campo geotérmico de El Tatio y en sus inmediaciones, especialmente en la quebrada al sur-oriente de éste. En la parte oriental del área de estudio son importantes los modelados glaciales y volcánicos, retrabajados por procesos erosivos actuales.

En general, la geomorfología del área evoluciona lentamente en la actualidad, a excepción de eventos climáticos extremos que estacionalmente activan procesos de menor o mayor escala. Sin embargo, el actual relieve está fuertemente influido por procesos erosivos del Cuaternario, donde importantes fenómenos de transporte y deposición de materiales, excavación de profundas quebradas y un volcanismo aún entonces activo modeló fuertemente el paisaje, mostrando ahora grandes unidades y formas heredadas del pasado reciente.

La geología del área se compone principalmente de rocas volcánicas del Cenozoico Superior. Estas rocas se disponen mediante discordancia angular y de erosión, sobre secuencias mesozoicas y cenozoicas, que emergen como cerros islas de entre la cubierta de ignimbritas o afloran en el fondo de las quebradas correspondiendo principalmente a flujos de tobas. Las glaciaciones del Pleistoceno producen una fuerte erosión en algunos centros volcánicos y dan lugar a depósitos morrénicos y periglaciales que se distribuyen por sobre los 4.000 m.s.n.m. Durante el Cuaternario se terminó de

configurar la actual red de drenaje, con la excavación de profundas quebradas, principalmente en el sector oriental del área.

Las unidades de análisis que se identificaron fueron las subcuencas que conforman la red hídrica del área de estudio, constituyendo las unidades geográficas que se muestran en la Figura 2-10.

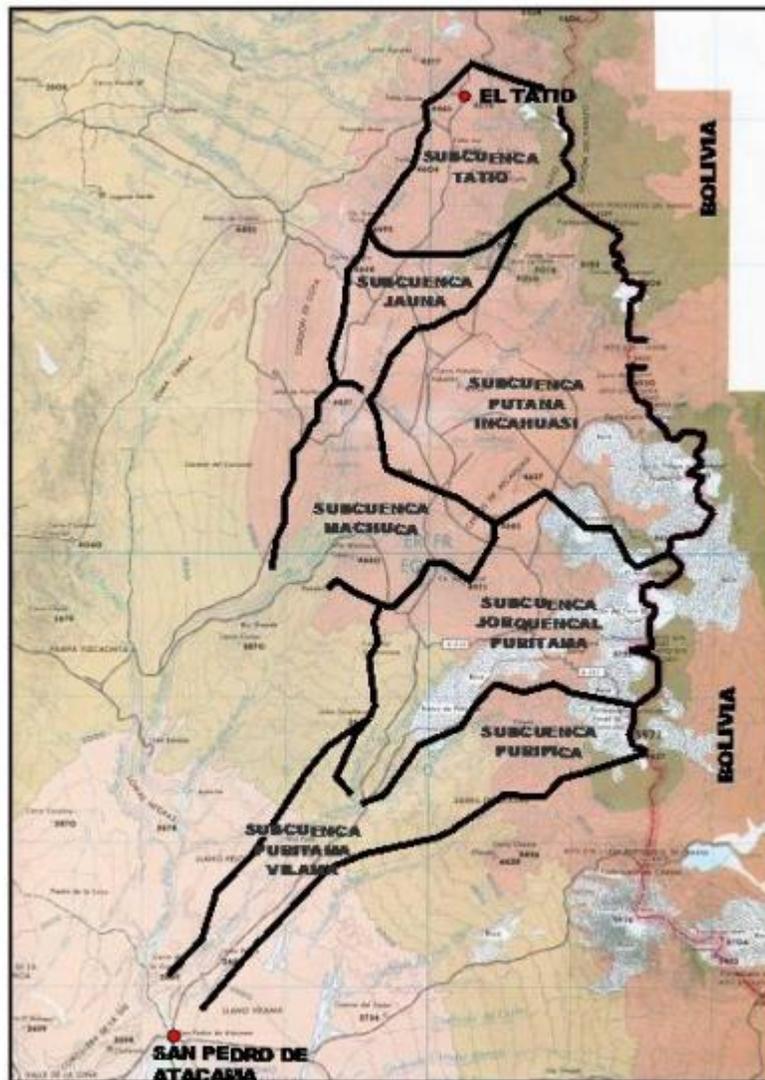


FIGURA 2-10: UNIDADES GEOGRÁFICAS: SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS EN TORNO DEL ÁREA DE ESTUDIO

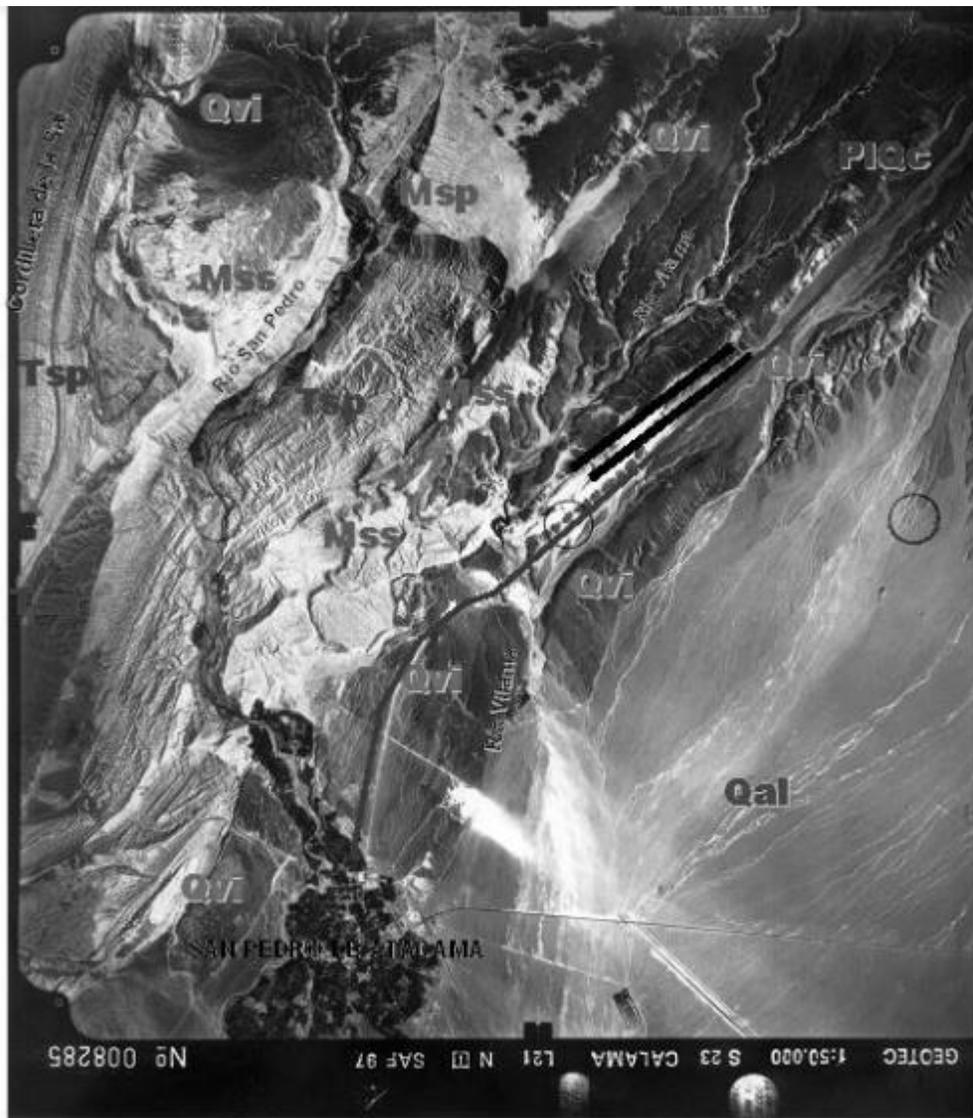
La Subcuenca Puripica – Puritama – Vilama, donde se localiza el área de estudio, recibe todo el aporte de la subcuenca Jorquencal- Turipite- Puritama.

El río Puripica realiza su aporte de aguas superficiales al río Puritama en el sector de Guatín, naciendo éste en los faldeos del volcán Sairecabur (5.971 m). Según lo observado en terreno, en el Km. 27 del actual camino, en unas curvas cerradas antes de llegar a las termas, existe una profunda quebrada de casi 50 m de profundidad que tiene su nacimiento unos pocos kilómetros al NE, la que

probablemente era el lecho del antiguo río Puripicar que venía desde el oriente, pero su curso fue modificado por la extensa colada de lava que bajó desde la cordillera, constituyendo también este cañón una forma heredada del pasado.

El río Puritama después de su confluencia con el río Puripica en el sector de Guatín (3.200 m.s.n.m.), se interna en un cañón menos profundo que el de su curso superior, cruzando desde un sustrato aluvial que sobreyace a ignimbritas, a una unidad volcánica reciente, que es la misma colada de lava que se desprende desde su curso superior. Luego de siete kilómetros llega a una extensa área de materiales aluviales de gravas, arcillolitas y areniscas de edad pleistocénica que constituyen la formación Vilama. En este sector el río Puritama pasa a llamarse Vilama, cruza en el kilómetro 5 al actual camino y su lecho se orienta hacia el sur, pasando por costado oriente de la localidad de San Pedro de Atacama, llegando finalmente a su nivel de base en el salar.

Saliendo desde San Pedro de Atacama el actual camino asciende suavemente por extensos depósitos aluviales del Cuaternario, para en los kilómetros 11-12 internarse en un sustrato de origen volcánico del Pleistoceno y Plioceno: las tobas dacíticas de color gris claro, débilmente soldadas, que constituyen las ignimbritas de la formación Chaxas. En el Km. 21, luego de una zona de curvas en que el camino está trazado sobre una suave línea de cumbres, éste baja a los sedimentos aluviales recientes del cruce Guatín, para volver a subir por un sustrato de ignimbritas Chaxas y después de las termas de Puritama, en el inicio de la cuesta El Diablo, recorrer una zona volcánica de coladas de lava hasta el Km. 46. Este sector entre San Pedro de Atacama y Puritama corresponde morfológicamente al gran plano inclinado que asciende hasta los 4.000 m.s.n.m., una meseta precordillerana entre la cadena volcánica de Los Andes y la depresión del salar de Atacama, con pendientes débiles a moderadas y cortada por numerosas quebradas, muchas de ellas muy profundas y que en varios casos quedaron como huellas de las sucesivas e intensas fases erosivas y de deposición que se alternaban con eventos volcánicos de coladas de lavas y flujos de cenizas a lo largo del tiempo, entre el Oligoceno y el Holoceno, hasta la actualidad.



FOTOGRAFÍA 2-1: FOTOGRAFÍA AÉREA DEL SECTOR DE SAN PEDRO DE ATACAMA, CON UNIDADES GEOLÓGICAS.

Fuente: Informe Conama (2015).

2.1.4.2. Hidromorfología

En el área de San Pedro de Atacama se distinguen formas de control estructural y formas generadas por acciones dinámicas. Aquellas de control estructural se manifiestan en el borde norte y occidental de la cuenca del Salar de Atacama.

En el borde norte, estas formas consisten en un plano inclinado estructural que aparece formando un amplio glacis de acumulación sobre el que predomina una cubierta de rodados oscuros. Este glacis se desarrolla aguas arriba de la desembocadura de los ríos San Pedro y Vilama (Cuchabrachi, Llano Pelón y Lomas Pintadas).

Las formas generadas por las acciones dinámicas se localizan en la depresión del Salar. Distinguiéndose en el área de estudio: el abanico del río San Pedro, el abanico del río Vilama y el abanico del Llano Vilama, compuesto por la coalescencia de varios abanicos de quebradas que descienden por el plano inclinado.

Este último también se distingue entre las formas originadas por acciones dinámicas y su desarrollo se observa aproximadamente entre las cotas 3.500 y 4.700. Sobre esta altiplanicie toman posición un gran número de estrato-volcanes jóvenes del Pleistoceno y Holoceno. A estos períodos también corresponden formas de deposición localizadas en las cuencas Alto Puneñas.

Respecto a los mecanismos morfogenéticos que han dirigido la evolución de esta altiplanicie, Börgel indica que el sector ubicado entre las cotas 2.500 y 3.000, constituye un claro pedimento en el cual el plano inclinado descansa directamente sobre la roca fundamental (ignimbrita) en franco estado de meteorización. En su tramo inferior, este plano está formado por una cubierta de arenas gruesas y finas en tránsito de transporte hacia la playa de sedimentación del Salar de Atacama.

Para el área de influencia del estudio, es posible distinguir las siguientes unidades hidromorfológicas:

- **A. Plano inclinado - Ignimbrita Chaxas:** En esta unidad el plano inclinado ignimbrítico que caracteriza la cordillera andina de la región está cubierto por un flujo volcánico posterior compuesto por tobas pobres en matriz y débilmente soldadas, denominado ignimbrita Chaxas. Esta unidad se desarrolla entre el Km. 15 y Km 30 del trazado.

La baja cohesión de la roca volcánica de esta unidad indica que los procesos erosivos actúan con mayor eficacia, situación que se puede observar en la trama de drenaje que distingue a la unidad. Aquí los escurrimientos que disectan a la ignimbrita tienen una forma dendrítica incipiente y los cursos que ellos describen, adquieren un aspecto más divagante en relación al drenaje que se desarrolla al norte de la quebrada Jorquencal.

- **B. Plano Inclinado - Ignimbrita Puripicar:** Esta unidad descrita como Ignimbrita Puripicar, se caracteriza por ser un flujo volcánico que dio como resultado una roca bien soldada y con abundante contenido de cristales. Se desarrolla entre el Km. 35 y 70 del trazado, donde en un principio subyace a la Formación Conjunto de Volcanes III, para luego abarcar una extensa zona entre la quebrada Jorquencal, el Río Grande y río Incahuasi, dando lugar a la Pampa Incahuasi.

La alta cohesión de esta ignimbrita se advierte en una ausencia de trama de drenaje, a excepción de las nacientes de quebradas que se desarrollan hacia el sur, y la disección en sentido E-W, realizada por el río Incahuasi, favorecida por la homogeneidad de la roca. Los procesos de meteorización mecánica han generado sobre ella una película discontinua de material detrítico compuesto por fragmentos angulosos de forma laminar y mantos arenosos.

En la zona poniente de esta unidad, se observan las secciones superiores de las quebradas Cueva Blanca, quebrada Turitipe y quebrada Jorquencial. Todas nacen por sobre los 4.000 m.s.n.m., y confluyen, ya sea al río San Pedro o al río Vilama.

- **C. Abanicos Aluviales:** Esta unidad corresponde al nivel de base de todo el escurrimiento superficial y subterráneo de la cuenca del Salar de Atacama. Está compuesta por depósitos aluviales provenientes de las quebradas del E y NE de la Carta y por aquellos de los ríos San Pedro y Vilama.

El lecho del río San Pedro, a diferencia del resto de los escurrimientos de la unidad presenta un lecho divagante que se extiende hasta el Salar de Atacama. Si bien sus aguas son captadas en Cuchabrachi para su uso en regadío, existe un escurrimiento subterráneo que se verifica en esta unidad, representándose como cauce insumido.

Esta situación cambia radicalmente con motivo de las lluvias esporádicas, siendo los recursos recolectados por sus tributarios, aguas arriba, lo suficiente para colmatar el lecho, produciéndose grandes desbordes que pueden alcanzar incluso los flancos de la Cordillera de La Sal.

El abanico del río San Pedro se observa en el inicio del trazado y en la zona poniente del mismo, hasta el Km. 5,0. Los depósitos consisten en arenas aluviales estratificadas, predominantemente de color gris. En cambio, las arenas aluviales del Vilama son de color café claro, y no presentan estructura.

El río Vilama presenta un lecho anastomosado formado por numerosos canales de escurrimiento, visibles en imágenes aéreas. El abanico de este río se desarrolla al oriente del camino en estudio. Tiene una acumulación superficial de gravas y arenas. El área de influencia del abanico del río Vilama se encuentra restringido en su parte distal o sur por los depósitos del río San Pedro y hacia él E, por los abanicos de las quebradas de Purifica y de Chaxas.

2.1.4.3. Hidrogeológica

La cuenca hidrogeológica de la cuenca del Salar de Atacama se extiende desde la latitud 22°20' hasta la latitud 24°10' sur.

La litología asociada a la cuenca es principalmente de dos tipos, uno de ellos corresponde a rocas volcánicas, fracturadas, constituidas por coladas, tobas y brechas con intercambio de sedimentos clásticos continentales, de los períodos terciarios y cuaternarios caracterizados por una permeabilidad media. Otro tipo corresponde a aquellos depósitos no consolidados, rellenos, conformado por sedimentos fluviales, glaciales, aluviales y lacustres del período cuaternario de permeabilidad alta.

En el sector que ocupa actualmente el Salar de Atacama existe un vasto embalse de agua subterránea que es abastecido desde el norte por un acuífero procedente de un curso paralelo al río San Pedro, por el nororiente, que nace de las estribaciones occidentales del volcán Licancabur y por el sur de las faldas del cerro Pular.

En el sector oriente de este embalse existen pozos de la DGA con alta productividad (>10m³/h/m) a niveles freáticos que varían desde los 18 a 71 metros.

Los principales aportes al acuífero del Salar de Atacama provienen del extremo este, específicamente, de la infiltración de la precipitación que se produce en el altiplano. Como la cuenca corresponde a un sistema cerrado la descarga se produce por evaporación en el área del salar y en lagunas ubicadas en sus márgenes. La Figura 2-11: obtenida desde el Mapa Hidrogeológico de Chile representa las características hidrogeológicas generales de la cuenca de Salar de Atacama.

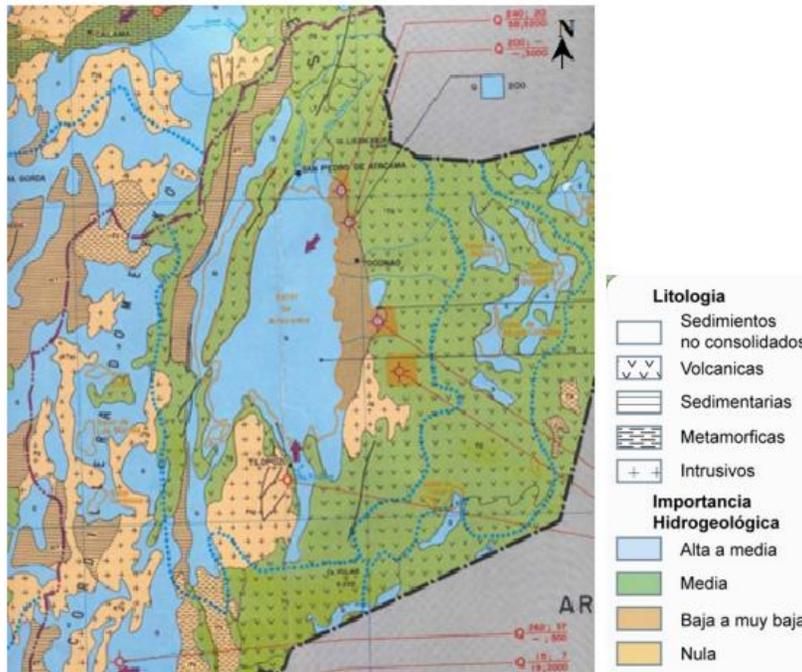


FIGURA 2-11: CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA (ESCALA 1:1.000.000).

Fuente: MOP, Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. Mapa Hidrogeológico de Chile.

2.1.4.4. Áreas de Riesgo Natural

a) Actividad volcánica

Toda el área donde se localiza el actual camino es de origen volcánico, con grupos de volcanes en el lado oriente y depósitos ignimbríticos subyaciendo a éstos al poniente, al norte y al sur. Los volcanes, según la carta geológica, se agrupan en tres grandes grupos, de acuerdo a su edad: los miocénicos, los pliocénicos y los pleisto-holocénicos, todos constituidos principalmente por andesitas, dacitas y biotitas. Asociados a este último grupo, los más recientes, se encuentran algunos depósitos piroclásticos, en la confluencia de los ríos Putana e Incahuasi, encontrándose gravas y arenas finas, intercaladas con cenizas, lapilli, pómez, escorias y bombas volcánicas, los que se depositaron en forma subaérea como lluvia de piroclásticos (depósitos no consolidados).

El resto de la zona estudiada está constituido por antiguos flujos ignimbríticos de tobas, asociados a estos centros volcánicos y que aparecen en la actualidad como grandes depósitos consolidados retrabajados por corrientes de agua en el pasado reciente, atravesados en algunos sectores por extensas coladas de lavas andesíticas, como por ejemplo el sector de Puritama. Algunos conjuntos de volcanes se ubican cercanos al trazado del camino, como por ejemplo el volcán Tatio, cuyo cráter está a sólo 4 Km. del paso Vizcachas. Otros volcanes están a 5 km (Colorado), 8 Km. (Sairecabur) y a 15 Km. (Putana), este último con fumarolas visibles desde el camino, pero aun cuando es evidente el origen volcánico del paisaje, en la actualidad no existen registros recientes de actividad volcánica; sólo existe actividad hidrotermal permanente en el sector El Tatio y deposición de azufre en el volcán Putana, pero sin emisión de materiales sólidos. Con esto, el riesgo natural asociado a volcanismo es muy bajo, sólo latente en una escala de tiempo muchísimo mayor e igualmente aplicable a todos los centros volcánicos activos del país.

b) Procesos de inundación y torrencialidad

Conviene señalar que, en situación de crecidas, los flujos torrenciales originados en ambientes altiplánicos incrementan substancialmente sus aptitudes o capacidades de erosión. Las “cargas” incorporadas a los flujos aumentan los riesgos impuestos sobre obras o estructuras públicas y privadas.

Existen zonas de alimentación de materiales que pueden activarse al disponer de la energía suficiente y sobrepasar unos umbrales mínimos de pendiente, pero sólo en eventos de grandes lluvias.

Históricamente, las crecidas del río San Pedro son gatilladas por episodios pluviales de intensidad extrema, concentrados en las cabeceras francamente altiplánicas de su hoya hidrográfica, en conexión con el denominado “invierno altiplánico” (meses de diciembre a marzo).

En este siglo se han registrado desastrosas crecidas e inundaciones ocurridas en marzo del 2010, fines de enero y comienzos de febrero de 2019.



Calle Licancabur esquina Calle Calama



Calle Licancabur esquina Calle Domingo Atienza

FOTOGRAFÍA 2-2: CALLE LICANCABUR DE LA LOXALIDAD DE SAN PEDRO DE ATACAMA DURANTE LOS INUNDACIONES DE ENERO-FEBREO DE 2019

En períodos normales de precipitación, como los de enero-febrero y junio-julio, la escorrentía por lluvia provoca una arroyada, que, de acuerdo a la cantidad de agua precipitada, sólo afecta la superficie de la plataforma y las bermas del camino.

Por otra parte, sobre los 4.000 msnm la nieve caída también puede afectar la estabilidad de la plataforma, pero sólo localmente y hasta que maquinaria especializada la despeje. Las grandes lluvias, que pueden tener un período de retorno de varios años, son las potencialmente riesgosas, pudiendo tener la energía necesaria para generar fenómenos de remoción en masa, como coladas de barro o flujos de detritos. Sin embargo, estos movimientos en masa necesitan rangos altos de pendiente para producirse, lo que no se da en la mayoría de los puntos sensibles identificados, que son los siguientes:

- Cruce río Vilama (Km 5,0)
- Cruce río Puripica (Km 22)
- Cruce quebrada sector Puritama (Km 27)
- Fondo quebrada Jorquencal (Km 45)
- Cruce río Incahuasi (Km 49,1)
- Cruce río Putana (Km 51)

- Cruce quebrada Tatio Sur (Km 74)

Por otra parte, estos siete puntos igualmente son los más vulnerables de todo el trazado ante la eventualidad de crecidas, con la posibilidad cierta que el camino se corte y desaparezca parte de la plataforma, interrumpiéndose el tránsito de vehículos. En algunos de estos puntos se aprecian evidencias de deslizamiento de materiales, así como la existencia de conos o abanicos que indican zonas de acumulación de sedimentos debido a la crecida de los cauces, pero no necesariamente por el tipo de fenómenos comúnmente llamados aluviones, pues el camino generalmente cruza alejado de las zonas de pendiente como salidas de cañones y gargantas que concentran mayor energía; todos estos puntos son sensibles por crecidas y activación de los cauces, las que igualmente dejan su carga sedimentaria como huella, pero no al nivel de los movimientos en masa como coladas de barro o lavas torrenciales.

c) Remoción en masa

En el área de influencia del proyecto no se observaron fenómenos de remoción en masa, especialmente en algunos puntos más sensibles como algunos sectores de la cuesta El Diablo, el Km 20 y el Km 45 del trazado actual, en los cuales hay cortes muy altos o pendientes muy elevadas al costado de la berma. Como ya se indicó, los periodos de retorno de las grandes lluvias, potencialmente peligrosas, pueden activar este tipo de procesos, sin embargo, en rasgos generales, los rangos de pendiente asociados al área no son muy altos para desencadenarlos, por lo que no debe considerarse un riesgo potencial alto.

Por otra parte, según la carta geológica, en el sector de Vilama, entre los kilómetros 5 y 15 existen dos fallas normales que indican bloques hundidos, y se ubican en forma paralela al camino, las que están cubiertas por depósitos de gravas y areniscas de la Formación Vilama y tobas de la Formación Puripicar en su parte oriente. En los kilómetros 18 y 19 existe un sector de lineamientos o fallas inferidas y en el sector de El Tatio existe una pequeña falla inversa, indicándose la inclinación del plano de falla hacia el noreste (Km 90-91). Estos componentes estructurales del basamento muestran el origen tectónico o las tensiones que se produjeron durante el enfriamiento de los flujos de ignimbritas en el plioceno y pleistoceno, no constituyendo evidencia de actividad tectónica reciente en el área.

2.2. Instrumentos de Ordenamiento Territorial

2.2.1. Estrategia Regional de Desarrollo

La Estrategia Regional de Desarrollo (ERD) Región de Antofagasta (Gobierno Regional, 2009) es un instrumento rector del Desarrollo Regional ligado a la creación de los Gobiernos Regionales, y que corresponde a un marco orientador que guía la gestión del Gobierno Regional para avanzar hacia el desarrollo de la Región. La revisión de este documento es de utilidad, especialmente, para la Etapa 2C de la presente consultoría donde se definen los objetivos particulares del Plan de Manejo, los cuales deben ser coherentes con las políticas públicas existentes.

La ERD de la Región de Antofagasta (2009-2020) ha priorizado en la presentación de lineamientos y objetivos de desarrollo de la Región de Antofagasta, aquellos ámbitos que buscan

fortalecer el desarrollo sustentable, velando que los beneficios del crecimiento económico de la región lleguen a todos sus habitantes.

El documento presenta, en primer lugar, la evaluación de la ERD 2001-2006 donde se presentan las conclusiones generales para cada lineamiento y el nivel de cumplimiento según encuesta de evaluación; luego, incluye el diagnóstico que presenta los principales hallazgos de la situación de la Región al año 2009; a continuación se refiere a los principales desafíos propuestos por los territorios, es decir, lo que se espera por cada comuna de la región; en el siguiente Capítulo se establecen las condiciones para el desarrollo de la ERD 2009 – 2020, que corresponden a una mirada de lo construido y de lo que queda por construir, incluyendo posteriormente la Visión de la Región de Antofagasta al año 2020; continuando con los lineamientos estratégicos, objetivos generales y líneas de acción que dan cuenta del diagnóstico de la realidad actual y que guiarán el desarrollo regional hasta el año 2020; se incluye la propuesta de gestión, evaluación y seguimiento de la aplicación de la ERD.

Dentro de los lineamientos que se presentan y que resultan de relevancia para los objetivos del Plan, se encuentra el Lineamiento 3 *“Región Sustentable”*, el cual busca *“Asegurar la sustentabilidad ambiental y territorial a través de un sistema regional de planificación de los recursos hídricos y energéticos y de protección de la biodiversidad, acorde con el marco geográfico, socioeconómico y cultural de la región de Antofagasta”*. En dicho lineamiento se presentan los siguientes objetivos que pueden ser de interés: 1. *“Proteger el recurso hídrico a través de una eficiente administración, en concordancia con las condiciones regionales y extrema aridez y atendiendo a las presiones que se ejercen sobre su oferta limitada y poco conocida”*, en el cual se indica como línea de acción identificar conflictos y problemáticas sobre los usos actuales y demandas futuras de recursos hídricos; 2. *“Promover la protección efectiva y eficiente de las áreas prioritarias para la biodiversidad regional (diversidad de flora, fauna y ecosistemas), considerando los distintos usos del territorio y la actividad productiva desde un enfoque de sustentabilidad”*, en el cual se indica como línea de acción actualizar un catastro de recursos y fenómenos naturales (agua, suelo, catástrofes naturales, flora y fauna, etc.), además de fortalecer las áreas prioritarias para la biodiversidad de la Región.

2.2.2. Plan Regional de Gobierno

Este plan es un instrumento de gestión para el período 2018-2022 y se elabora a partir de: a) el Programa de Gobierno de la Presidencia, es decir, es la expresión en el territorio de las iniciativas que se consideraron para el país y; b) la Estrategia Regional de Desarrollo al 2020.

El documento enuncia cada compromiso asociado a las prioridades regionales, señalando fecha y monto de la iniciativa.

Como una de sus prioridades regionales se establece la Seguridad Ciudadana y la Protección Civil, la que busca *“Implementar un plan de seguridad ciudadana que permita prevenir, combatir y asegurar en el largo plazo la seguridad de los habitantes de la región”*, cuyo foco de trabajo considera la prevención de desastres naturales. Sin embargo, no se presentan iniciativas directamente vinculadas al presente Plan de Manejo de Cauce.

2.2.3. Plan Regional de Desarrollo Urbano

El Plan Regional de Desarrollo Urbano (PRDU), promulgado el año 2005 por el Gobierno Regional de Antofagasta¹, corresponde a una actualización del PRDU de 1999, como se indica en su Memoria Explicativa. El PRDU es un complemento espacial fundamental para la materialización de los lineamientos de la Estrategia Regional de Desarrollo, relacionándose fuertemente con la imagen objetivo que se le quiere dar a la Región, siendo concordante en relación con la localización de los asentamientos humanos y a la intensidad de ocupación del territorio.

Este Plan constituye una orientación para los Instrumentos de Planificación Territorial de escala inferior, siendo el instrumento de mayor jerarquía en la región. Entrega los lineamientos para el desarrollo regional, a partir de los roles del territorio y sus centros poblados, así como la relación entre éstos y el territorio que los sustenta.

En primer lugar, el documento presenta un Diagnóstico Actualizado de la región, en el que se analizan aspectos geográficos y físicos ambientales, antecedentes socioeconómicos, centros poblados, áreas especiales y antecedentes ambientales. Al respecto, se concluye que los siguientes aspectos han cobrado mayor relevancia desde el PRDU anterior: la planificación ecológica cobra un peso mayor en la Estrategia; se detecta una creciente Vocación Turística; mayor presencia de las comunidades indígenas; se desarrolla una creciente infraestructura vial y de servicios.

El Plan recoge los lineamientos de la Estrategia Regional de Desarrollo 2001-2006 y los lineamientos específicos propuestos por el PRDU anterior, desarrollándose a partir de una imagen objetivo en que se prevé un crecimiento y desarrollo tendencial de la Región. A partir de esto el Plan propone una Zonificación del territorio regional; un Reglamento para orientar la ocupación del territorio; y un marco para la Gestión del Ordenamiento Territorial compuesto por Unidades de Gestión Territorial (UGT) y Áreas de Programa, con una identificación de su estructuración y de los programas de desarrollo urbano y ordenamiento territorial correspondiente, considerando los siguientes aspectos: UGT o áreas homogéneas de intereses compartidos; Ejes de Integración, relacionados a la conectividad del territorio; Centros de Articulación o centros poblados; identificación de Áreas Programa de Intervención Prioritaria.

Así, en base a los atributos geográficos y ambientales, los recursos naturales, las actividades asociadas a ellos, y los roles y nivel de desarrollo de los centros existentes, se identificaron UGT como marco para la programación y gestión de inversiones en desarrollo urbano, ubicando a la comuna de San Pedro de Atacama en la UGT 3, específicamente en la Sub-zona 3B, siendo esta comuna el Centro Articulador del Área Programa. Por su parte, los Ejes de Integración de dicha zona, en su sentido transversal, se integra por las rutas (corredor Bioceánico) que une al Océano Pacífico con el territorio argentino, a través del Paso Jama, conectando a las ciudades de Antofagasta, Calama y San Pedro de

¹ Resolución N°7 de 2005 de Gobierno Regional de Antofagasta. Disponible en: <<http://bcn.cl/2mfvp>>

Atacama, y por la ruta desde Ollagüe hasta Tocopilla, pasando por Calama; y en su sentido longitudinal, se integra su territorio a través de la ruta Arco Andino.

En cuanto a las acciones en el Área Programa de la Sub-zona 3B, se indica que *“deberán orientarse a la compatibilización de los impactos generados por el auge turístico, las actividades de la minería no metálicas, y los crecientes flujos previsibles por habilitación del Corredor Bioceánico y Paso Jama”*. En cuanto a los proyectos, se indica que el proyecto de mayor incidencia es la conexión internacional por el Paso Jama. Además, SERNATUR ha formulado un Plan de Desarrollo Turístico, que busca potenciar los atractivos de la comuna junto con preservar sus recursos, anticipando los incrementos de flujos turísticos.

Por otra parte, el Plan establece un Reglamento, dentro del que se definen grados de habitabilidad del territorio regional distinguiendo los siguientes tipos de áreas: Áreas Urbanas, Áreas de Desarrollo Condicionado y las Áreas de Restricción. Cabe señalar que dentro de las Áreas de Desarrollo Condicionado se encuentran las siguientes Sub-Áreas de Desarrollo Condicionado: Áreas de Protección por Conservación (APPC), Áreas de Preservación por Uso Sustentable (APUS), Áreas de Uso Múltiple Condicionado (AUMC), Áreas de Intervención Prioritaria (APT). En relación con las dos primeras zonas mencionadas anteriormente (APPC y APUS), se ha considerado el listado de Sitios Priorizados para la Conservación de la Biodiversidad en la II Región de Antofagasta que forman parte de la Estrategia Regional para la Biodiversidad II Región.

En el Anexo 2-3 se presentan los planos del PRDU: Resumen del Diagnóstico, Área de Protección por Conservación, Áreas de Uso Múltiple Condicionado, Zonificación Ambiental, UGT, Ejes de Integración y Centros Poblados y Áreas Programa.

2.2.4. Plan Regulador Intercomunal

Según se identificó en la plataforma en línea Seguimiento de Instrumentos de Planificación Territorial del MINVU², el Plan Regulador Intercomunal (PRI) Oasis Andino, unidad territorial a la que pertenece la comuna de San Pedro de Atacama, se encuentra en formulación, sin encontrarse un PRI previo vigente asociado a la comuna. Sin embargo, dicha información fue solicitada al Gobierno Regional de Antofagasta, por lo que una vez entregada la respuesta se podrá corroborar la información.

2.2.5. Plan Regulador Comunal

El Plan Regulador Comunal (PRC) de San Pedro de Atacama se encuentra vigente desde el año 1998³. En específico, la Ordenanza Local del PRC da cuenta de la adecuación normativa que comprende las localidades de San Pedro de Atacama, Toconao y Peine, indicando las normas referentes

² Disponible en: <http://seguimientopt.minvu.cl>

³ Disponible en: http://observatoriourbano.minvu.cl/lpt/wp_resultado_decreto.asp?r=2&c=228&i=25

al límite urbano, zonificación, usos de suelo, condiciones de subdivisión predial, edificación y urbanización, y viabilidad.

De la revisión de la zonificación del PRC (Anexo 2-4), es posible identificar que la localidad de San Pedro de Atacama (su zona urbana consolidada y su área de expansión urbana) se ubica entre los cauces San Pedro y Vilama de la presente consultoría, presentando las siguientes zonas:

- Zonas Habitacionales
 - Zona de Extensión (H-1)
 - Casco Antiguo (H-2, H-3)
 - Equipamiento (H-4)
 - Extensión Urbana (H-5)
- Zonas Especiales
 - Cementerio (ZE-1)
 - Plazas (ZE-2)
 - Áreas Arqueológicas (ZE-3)
 - Reserva Urbana (ZE-4)
- Zona Agro Urbana (ZRA)
- Zona de Protección Agrícola y Cauce del Río

Con respecto a la última zona mencionada, se indica que está constituida por los terrenos colindantes a cauce del Río San Pedro, cuya delimitación está sujeta a las normas previstas en el D.S. N°609 de 1978 del Ministerio de Tierras y Colonización, actual Ministerio de Bienes Nacionales.

Además, cabe señalar que, en su Artículo 8° se indica que *“el canal Vilama queda excluido del área urbana, y la línea conserva una distancia de tres metros del eje del cauce de dicho canal”*.

2.2.6. Planes Seccionales

Adicionalmente, el año 2002 se normó mediante Planes Seccionales los sectores de Pucará de Quito y Pozo Tres⁴ de la comuna de San Pedro de Atacama.

El sector de Pucará de Quito se encuentra en la ribera del Río San Pedro, donde se definen tres zonas de restricción patrimonial:

- ZRP 1: Área en que se sitúa el Pucará, lugar arqueológico constatable y definitivo
- ZRP 2: Área colindante al sur del Pucará, formada por una colina similar a la de éste
- ZRP 3: Área de apoyo al Pucará en infraestructura para las actividades de investigación, preservación y turismo

⁴ Resolución N°15 de 2002 de Gobierno Regional de Antofagasta. Aprueba Planes Seccionales Modificatorios “Entorno del Pucará de Quito” y “Área del entorno Pozo Tres” de San Pedro de Atacama. Disponible en: <http://bcn.cl/2mj5r>

Por su parte, el sector Pozo Tres se ubica al este de la localidad de San Pedro de Atacama, en la ribera del Río Vilama, donde se definen las siguientes zonas:

- ZATI: Zona de apoyo al transporte internacional
- ZET: Zona de Esparcimiento y Turismo (incluye Área Agrícola)

2.2.7. Plan de Desarrollo Comunal

El Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO), junto al Plan Regulador y el Presupuesto Municipal, son las herramientas de planificación local que poseen los Municipios y que se encuentran consagradas en la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades. En particular, el PLADECO es un instrumento rector del desarrollo de la comuna, que contempla acciones orientadas a satisfacer las necesidades de la comunidad local y promover su avance social, económico y cultural.

Actualmente, la comuna de San Pedro de Atacama cuenta con el Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO 2017 – 2021), el que se encuentra vigente toda vez que el Concejo Municipal aprobó el mismo.

La revisión del PLADECO es de utilidad, especialmente, para la Etapa 2D de la presente consultoría donde se definen los objetivos particulares del Plan de Manejo, los cuales deben ser coherentes con las políticas públicas existentes.

Dentro de los antecedentes de interés se encuentra el Capítulo 1 de Antecedentes Generales, que permiten contextualizar el área de estudio y en el que se exponen antecedentes geográficos de la comuna, como las principales localidades, ubicación de Ayllus en el sector de San Pedro de Atacama y la caracterización del relieve y el clima; y antecedentes demográficos de la comuna, respecto a lo que destaca que de la población total un 50,23% declara pertenecer a algún grupo étnico, según Censo 2017. Además, en las conclusiones del capítulo se menciona como aspecto crítico la dispersión geográfica del territorio dificulta dar respuesta adecuada y temprana a las emergencias, por ejemplo, el corte de caminos causados por las lluvias monzónicas, también conocido como lluvias altiplánicas o invierno altiplánico.

Asimismo, resulta de interés el Capítulo 5 de Desarrollo Territorial, donde se exponen los Instrumentos de Ordenamiento Territorial atinentes a la comuna como la Estrategia Regional de Desarrollo de Antofagasta, el Plan Regional de Desarrollo Urbano de Antofagasta y el Plan Regulador Comunal de San Pedro de Atacama, hasta ahora vigentes; y el Equipamiento e Infraestructura de salud, educación, seguridad, vial, energética, agua potable, evacuación de aguas servidas y áreas verdes. Entre sus conclusiones destaca como factor crítico el retraso en la elaboración de una actualización del Plan Regulador de San Pedro de Atacama, respecto a lo que se indica que ha impedido establecer una normativa clara para el uso de suelo urbano de la comuna y de las localidades que pueden quedar incorporadas dentro de su área urbana.

Además, en su Capítulo 8 se realiza un Análisis Medio Ambiental, en el que se menciona que en la comuna el recurso hídrico constituye la base para que exista el Oasis en el que se asienta San

Pedro de Atacama, constituyéndose la existencia de agua para riego como el factor principal que permite el aprovechamiento agrícola de los suelos del desierto, siendo el río San Pedro y Vilama, los principales cursos de agua que abastecen la zona, sin embargo, los aportes hídricos de dichos cauces han disminuido drásticamente. También, se menciona como aspecto clave la salinización de los recursos hídricos durante las crecidas debido a las lluvias altiplánicas en los meses de verano, alterando la calidad del agua de riego. Según se indicó por la comunidad en los talleres territoriales, las lluvias altiplánicas provocan inundaciones que generan aislamiento y cortes en el suministro de energía eléctrica y agua. Al respecto se señala que existe una falta de información levantada en estudios hidrogeológicos acabados, en relación con la calidad y cantidad de agua de las vertientes que abastecen a la cuenca.

Respecto a la Estrategia de Desarrollo Comunal, específicamente en el área de Medio Ambiente, se plantea el lineamiento estratégico *“Prevenir situación de riesgo ambiental comunal”*, cuyo objetivo corresponde a *“Desarrollar un Plan Preventivo que anticipe situaciones complejas repentinas de riesgo ambiental que permita una gestión municipal eficiente y eficaz”*, dentro de lo que se plantea como idea de proyectos específicos la Actualización de Plan de Emergencia Comunal y microzonificación de riesgos y la Elaboración de Planes de Gestión de Riesgos Ambientales. Además, en el área de Desarrollo Territorial, se establece como lineamiento estratégico *“Promover el desarrollo territorial”*, para lo cual se plantea como uno de sus objetivos *“Actualizar los instrumentos de planificación territorial”*, dentro de lo que se plantea como idea de proyecto específico la Actualización del Plan Regulador San Pedro de Atacama, Toconao y Peine.

2.2.8. Plan Estratégico para la Gestión de Recursos Hídricos de Antofagasta

El Plan Estratégico para la Gestión de Recursos Hídricos (PEGRH) de la Dirección General de Aguas (DGA, 2016) corresponde a un instrumento de planificación indicativo, que busca contribuir a orientar las decisiones públicas y privadas, para maximizar la función económica, social y ambiental del agua, acorde con el medio ambiente y en condiciones de equilibrio que permita la sustentabilidad.

El documento se estructura, principalmente, en tres partes: 1) Revisión de Antecedentes y Diagnóstico de la Región, en el cual se presente un diagnóstico de la región en general y un diagnóstico local por cuencas hidrográficas, entre ellas la Cuenca Salar de Atacama, en la que se ubica los ríos San Pedro y Vilama; 2) Análisis de la Información y Formulación del Plan en el que se definen los objetivos del Plan, las brechas y líneas de acción para la región, y la identificación y propuesta de iniciativas por línea de acción; y 3) Presentación del Plan en la que se muestra una matriz global de formulación del Plan, se caracterizan las iniciativas y se entrega una evaluación y priorización de las mismas.

El objetivo general del PEGRH de Antofagasta es *“Contribuir a la buena calidad de vida de los habitantes de la región y al crecimiento del país, en un marco de desarrollo sustentable, gestionando que las personas, el medio ambiente y las actividades productivas accedan a recursos hídricos suficientes, seguros, asequibles y limpios, y que estén protegidos con un nivel de riesgo aceptable frente a eventos extremos relacionados con el agua”*. Además, se presentan objetivos de acuerdo a cada dimensión:

- Dimensión Social:
 - Asegurar la cobertura de servicios básicos suficientes, seguros, asequibles y sustentables para el uso personal y doméstico en las localidades de la región
 - Contribuir a proteger el patrimonio cultural, con énfasis en el patrimonio ancestral.
 - Otorgar un nivel de seguridad aceptable para la población ante eventos extremos asociados al agua, específicamente, inundaciones y aluviones.
- Dimensión Ambiental: Contribuir a la seguridad hídrica del medio ambiente considerando la conservación y restauración de ecosistemas asociados a ríos, lagunas, humedales y acuíferos.
- Dimensión Económica: Mejorar la seguridad hídrica, productividad y eficiencia en el uso del agua para las actividades económicas en todos los sectores usuarios.

Entre las Líneas de Acción establecidas, mediante la identificación de Brechas para cada Dimensión, se indica “Mejorar la Capacidad para enfrentar eventos extremos”, lo que implica iniciativas de construcción de obras de control aluvional para distintos cauces, sin embargo, no se considera entre las iniciativas a los ríos San Pedro y Vilama. Asimismo, se propone como Línea de Acción “Estudiar los sistemas ambientales”, para lo cual se plantean como iniciativas la Caracterización de la calidad química de los cuerpos de agua, no estudiados de la Región. También, asociado a lo anterior, se propone como Línea de Acción “Levantar información hídrica de la región”, para lo cual se exponen iniciativas como: Análisis de Previsiones de Precipitaciones para determinación de Caudales de Crecidas; y Análisis de los mecanismos de Evaporación y Determinación de la descarga natural del Salar de Atacama.

Cabe señalar, que no se observan iniciativas directamente relacionadas a los cauces en estudio.

2.2.9. Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo: Inundaciones por Crecidas de Ríos y Embalse, Región de Antofagasta

El Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo: Inundaciones por Crecidas de Ríos y Embalses, de la Región de Antofagasta (ONEMI, 2018), está orientado a canalizar y direccionar las acciones de coordinación y planificación de los organismos del Sistema de Protección Civil frente a eventos de inundación que puedan producir alteración o daños a las personas, bienes y medio ambiente, específicamente para las provincias El Loa y Tocopilla, a fin de lograr una respuesta eficaz cuando se presente una emergencia, desastre y/o catástrofe, y contrarrestar los efectos negativos que esta variable de riesgo pudiese tener sobre la población.

Este Plan se estructura de la siguiente manera:

1. Introducción
2. Descripción de la Variable de Riesgo
3. Roles y Funciones
4. Coordinación (según fases de Alertamiento, Respuesta y Rehabilitación)
5. Zonificación de la Amenaza
6. Comunicación e Información
7. Sistema de Alertas
8. Evaluación de Daños y Necesidades
9. Implementación y Readequación del Plan

En su capítulo 2 se presenta una descripción de la variable de riesgo de inundación en la región junto con definiciones y terminología técnica, además se presentan categorías de precipitaciones en milímetros (mm) según cantidad en 24 horas, para lo cual se indica en la zona de Antofagasta Altiplano y Precordillera, en la cual se ubica el área de estudio, las siguientes:

- Normal: 8,0 – 12,9 mm
- Moderada: 13,9 – 24,9 mm
- Fuerte: 25,0 – 49,9 mm
- Intensa: ≥ 50 mm

En su capítulo 5, se muestra una zonificación de la amenaza para los distintos sectores presentes, entre ellos Catarpe, Quito y San Pedro de Atacama, en donde se identifica tanto la zona de riesgo, la cual se consideró según criterio técnico el área de inundación (demarcado en rojo), como la zona de seguridad, para lo que se considera como toda zona fuera del área de inundación (Figura 2-12). Asociado a esto se presenta un proceso de evacuación a nivel regional, provincial y comunal. Por otra parte, se estableció como meta 2019 de actualización del Plan, establecer los puntos de encuentro y vías de evacuación para esta zona.



FIGURA 2-12: ZONIFICACIÓN DE AMENAZA SAN PEDRO DE ATACAMA, CATARPE Y QUITOR

Fuente: ONEMI, 2018.

Cabe señalar que el presente Plan se vincula con los Planes Comunales de Emergencia, definiendo los integrantes de sus Comités de Emergencia (COE Comunal).

2.2.10. Plan de Emergencia Comunal

El Plan Comunal de Emergencia de San Pedro de Atacama, aprobado en febrero de 2020, es un instrumento a nivel comunal de carácter indicativo que establece las acciones de respuesta, ante situaciones de emergencia, desastre y/o catástrofe; en base al marco legal vigente, los roles, funciones y capacidades y competencias de organismos del Sistema Nacional de Protección Civil.

El objetivo general del plan es *“Establecer un marco de acción permanente para el manejo coordinado de las acciones destinadas a enfrentar eficaz y eficientemente las situaciones de emergencia y/o desastre que afectan a la comuna de San Pedro de Atacama.”*

No se presentan medidas ni estrategias directamente vinculadas al presente Plan de Manejo de Cauce.

2.3. Infraestructura Existente

Para la recopilación de antecedentes de infraestructura existente, se consultaron las siguientes fuentes de información:

- Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta", CNR, 2014
- DGA. 2002. Levantamiento y catastro bocatomas
- Se solicitó información a DOH respecto a las APR existentes en el área de estudio
- Se consultó inventario público de obras hidráulicas menores y mayores, DGA 2018.
- Se solicitó información al Departamento de Puentes de la Dirección de Vialidad, respecto a estudios de diseño hidráulico y/o los parámetros de caudal máximo, altura de escurrimiento y socavación máxima en los puentes existentes en cada cauce en estudio

La información recopilada referente a la infraestructura existente es la base para la realización del catastro de obras

En la Figura 2-13 se presenta la infraestructura existente en el área de estudio.

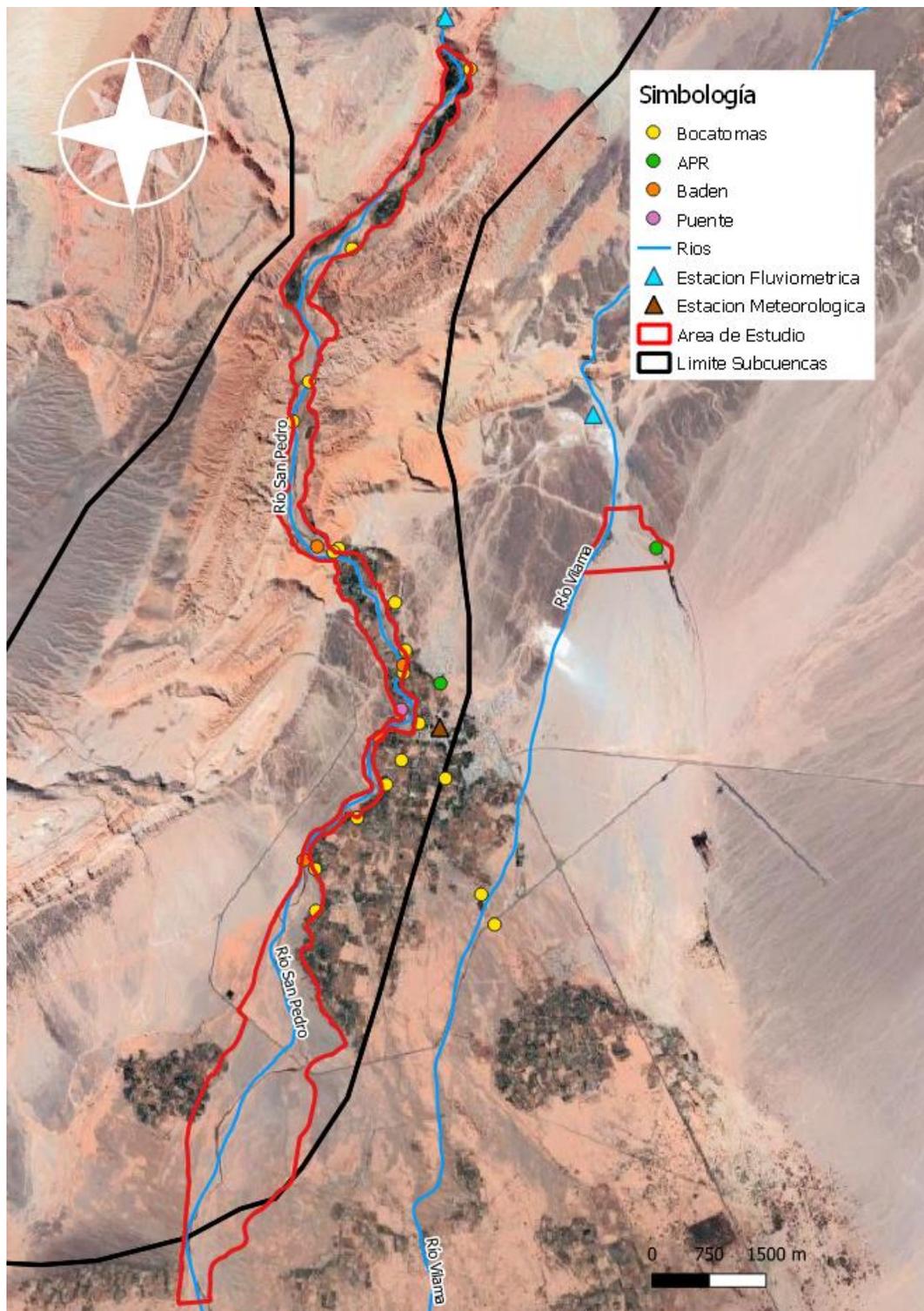


FIGURA 2-13: INFRAESTRUCTURA EXISTENTE

Fuente: Elaboración Propia

2.4. Antecedentes Ambientales

2.4.1. Áreas Silvestres Protegidas

Se revisaron todos aquellos sitios o zonas catalogadas de alto valor para el patrimonio natural que considere alguno de los cauces en estudio, distinguiendo aquellas que se encuentran bajo protección oficial y aquellas de propiedad privada. Se tomó como antecedente para las áreas protegidas oficiales, las diferentes categorías de manejo para la conservación de la Biodiversidad presentadas en el Cuadro 2-7.

CUADRO 2-7: CATEGORÍAS DE MANEJO PARA LA CONSERVACIÓN

CATEGORÍA DE MANEJO	SISTEMA/MARCO REGULATORIO	ENTIDAD REGULADORA/ ADMINISTRADORA
Parque Nacional	SNASPE	CONAF
Reserva Nacional		
Monumento Natural		
Santuario de la Naturaleza	Ley 17.288/70	Ministerio de Educación, a través del Consejo de Monumentos Nacionales
Bienes Nacionales protegidos	DFL 939/77. Terrenos fiscales con fines de conservación	Ministerio de Bienes Nacionales
Reserva de la Biósfera	Programa Hombre y Biosfera, UNESCO. Ministerio de Relaciones Exteriores	CONAF, a través del SNASPE
Sitios RAMSAR	Convención RAMSAR. D.S. 771/1981.	Regulación intersectorial y administración: Ministerio RR.EE.-CONAF, Comité Nacional de Humedales.
Áreas con prohibición de caza	Artículo 4º, Ley Nº 19.473 sobre Caza.	Carabineros de Chile, SAG, SERNAPESCA, CONAF, inspectores ad-honorem
Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad	No presenta	Ministerio del Medio Ambiente

Fuente: Sierralta L., R. Serrano. J. Rovira & C. Cortés (eds.). 2011. Las áreas protegidas de Chile. Ministerio del Medio Ambiente.

Así, es posible identificar que dentro de la Comuna de San Pedro de Atacama existen áreas protegidas del Estado circunscritas dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), así como también Sitios Prioritarios para la conservación de la Biodiversidad, los que se señalan a continuación:

- Santuario de la Naturaleza Laguna Tebenquiche
- Santuario de la Naturaleza Valle de La Luna y parte de la Sierra de Orbate
- Reserva Nacional Los Flamencos
- Bien Nacional Protegido Laguna Lejía (también Sitio Prioritario con efecto SEA)
- Sitio RAMSAR Pujsa

- Sitio RAMSAR Salar de Tara
- Sitio Prioritario Ayllus de San Pedro de Atacama (sin efecto SEA)
- Sitio Prioritario Salar de Atacama (sin efecto SEA)
- Sitio Prioritario Sector Volcán Licancabur (sin efecto SEA)
- Sitio Prioritario Geisers del Tatio (sin efecto SEA)

Además, en la comuna se encuentra la Iniciativa de Conservación Privada (ICP) Termas de Puritama.

En relación con los cauces en estudios, se encuentra el Sitio Prioritario Ayllus de San Pedro de Atacama, que intercepta con los tramos de interés. Por otra parte, la Reserva Nacional Los Flamencos y el Santuario de la Naturaleza Valle de La Luna y parte de la Sierra de Orbate, se encuentran cercanos al Río San Pedro y a la localidad de San Pedro de Atacama (Figura 2-14).

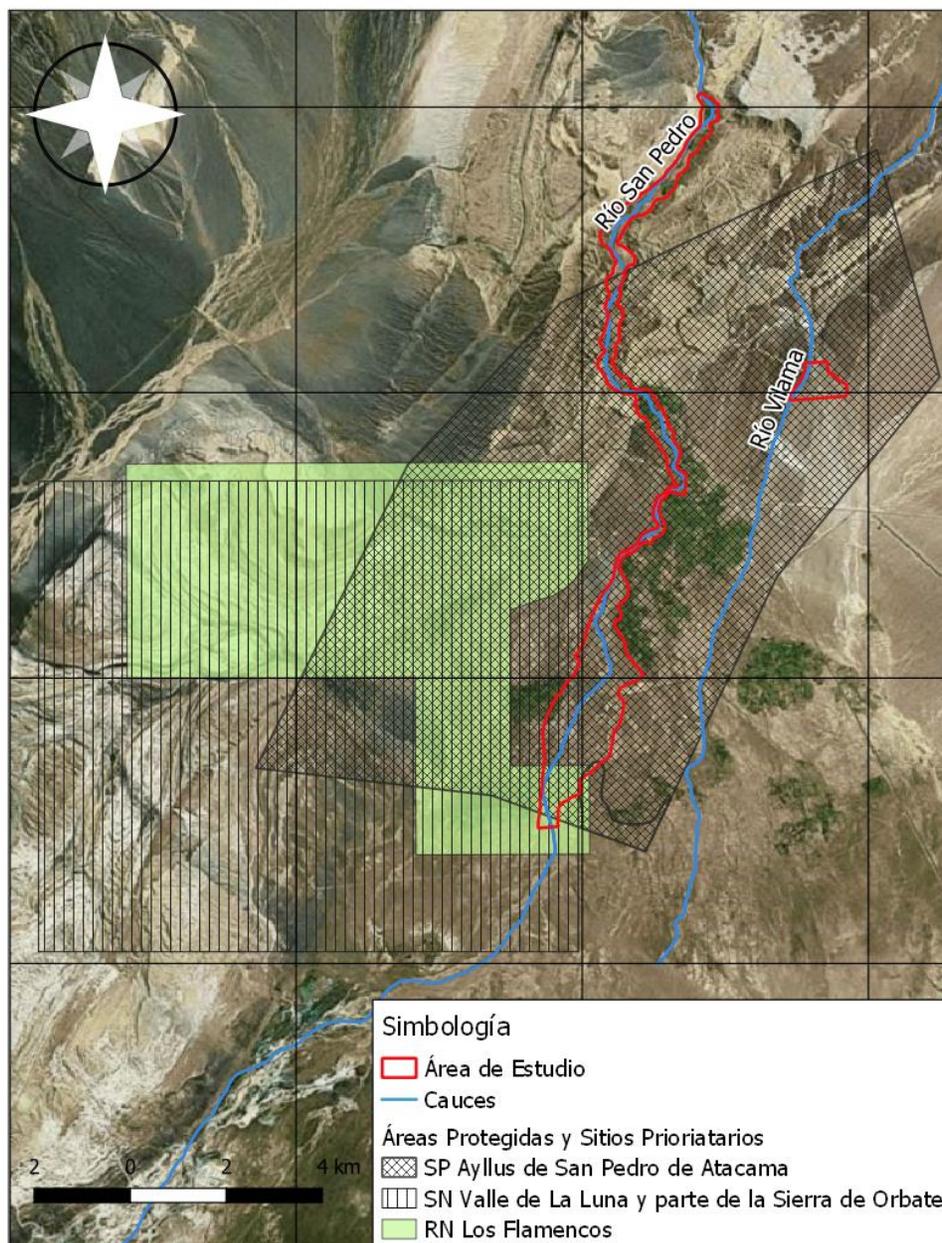


FIGURA 2-14: ÁREAS PROTEGIDAS Y SITIOS PRIORITARIOS

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Territorios Indígenas

En relación con la existencia de territorios indígenas al interior del área de estudio, de acuerdo con el informe de Estadísticas Sociales Indígenas de Región de Antofagasta, de la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI, 2020), se registra presencia indígena en la comuna de San Pedro de Atacama, representada por 58 agrupaciones indígenas: 31 asociaciones y 21 comunidades (actualizado al 19 de octubre de 2020).

Al respecto, en el Sistema Integrado de Información CONADI SIIC⁵ se identificó en las cuencas del Río San Pedro y el Río Vilama, la presencia de las siguientes Comunidades Indígenas Atacameñas Catarpe, de Quitor, de San Pedro de Atacama, de Solcor, de Larache, de Sequitor y Checar, del Ayllu de Checar y de Yaye.

En Anexo 2-5 se presenta kmz con ubicación de las comunidades.

2.4.3. Patrimonio Cultural

Se revisó la información del Consejo de Monumentos Nacionales (CMN)⁶ a fin de identificar elementos del patrimonio cultural que pudiesen ser potencialmente afectados por las medidas que proponga el Plan de Manejo de Cauces, de lo cual se desprenderían medidas ambientales.

Así, se registran 11 Monumentos Nacionales presentes en la comuna de San Pedro de Atacama (Cuadro 2-8).

CUADRO 2-8: MONUMENTOS NACIONALES EN SAN PEDRO DE ATACAMA

N°	Categoría	Tipología	Denominación Oficial
1	Monumento Arqueológico	Inmueble (Sitio arqueológico y paleontológico)	Tambo Incaico de Peine
2	Santuario de La Naturaleza	Geología	Laguna Tebenquiche
3	Zona Típica	Pueblo Tradicional	Pueblo de San Pedro de Atacama
4	Monumento Arqueológico	Inmueble (Sitio arqueológico y paleontológico)	Pucará de Quitor
5	Monumento Arqueológico	Inmueble (Sitio arqueológico y paleontológico)	Pueblo Abierto de Peine
6	Santuario de la Naturaleza	Geomorfología	Área que señala del Valle de La Luna
7	Monumento Histórico	Inmueble (Sitio arqueológico y paleontológico)	Pucará de Quitor
8	Monumento Histórico	Inmueble (Equipamiento Religioso/Ceremonial)	Iglesia de San Pedro de Atacama
9	Monumento Arqueológico	Inmueble (Equipamiento Religioso / Ceremonial)	Ruinas de La Capilla de Misiones de Peine Viejo
10	Monumento Histórico	Inmueble (Equipamiento Religioso / Ceremonial)	Ruinas de la Capilla de Misiones de Peine Viejo
11	Monumento Histórico	Inmueble (Equipamiento Religioso / Ceremonial)	Campanario de Toconao

Fuente: Elaboración propia en base a CMN (2020).

Al respecto, se identifica que en la ribera del Río San Pedro se encuentra el Monumento Arqueológico y Monumento Histórico Pucará de Quitor. Por otro lado, la localidad de San Pedro de Atacama fue declarada Zona Típica en 1980 y su área fue ampliada en 1994, destaca entre sus características que en torno al poblado se desenvuelven 12 ayllus, unidades territoriales, productivas y sociales, propias de la forma de organización tradicional de la etnia atacameña. También, en dicha

⁵ Disponible en: <http://siic.conadi.cl/>

⁶ Catálogo disponible en línea: <https://www.monumentos.gob.cl/monumentos>

localidad, la Iglesia de San Pedro de Atacama se encuentra catalogada como Monumento Histórico (Figura 2-15).

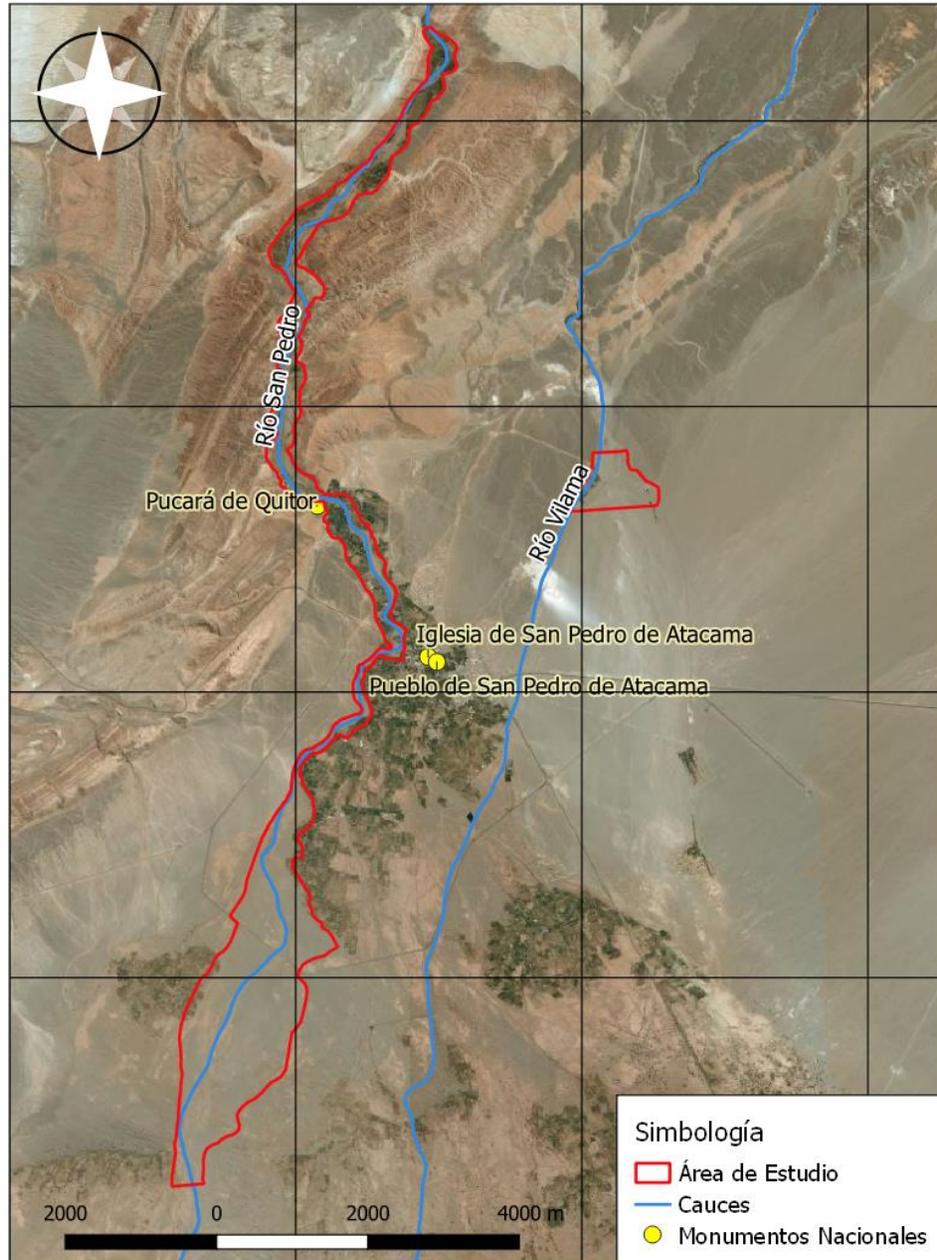


FIGURA 2-15: DISTRIBUCIÓN DE MONUMENTOS NACIONALES

Fuente: Elaboración propia en base a CMN (2020).

2.4.4. Revisión Proyectos en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)⁷, del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), institución dependiente del Ministerio de Medio Ambiente, dispone de una plataforma en línea donde es posible efectuar una búsqueda de proyectos que han sido sometidos al SEIA.

Para efectos de la presente consultoría, se realizó una búsqueda y selección de proyectos en el SEIA en noviembre de 2020, con el fin de identificar posibles obras instalaciones o actividades que pudiesen interferir o provocar impactos en los cauces en estudio, o bien, cuyos antecedentes puedan ser de utilidad. Para dicha selección, se utilizaron 2 grandes criterios de selección:

- a) Estado de Proyectos: Aprobado, En Calificación o En Admisión.
- b) Localización: Comuna de San Pedro de Atacama, ubicados en la localidad de homónima, o en cauces o riberas en estudio.

De esta forma, se seleccionaron 10 proyectos (Figura 2-16 y Cuadro 2-9), los cuales se encontraban Aprobados, 2 de ellos correspondientes a Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y 8 correspondientes a Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA). Al revisar la ubicación de los proyectos indicados por el SEA, se desprende que 5 proyectos se encuentran en la ribera del Río San Pedro, mientras que 5 proyectos se ubican en la localidad de San Pedro de Atacama. Cabe destacar, que la mayoría de los proyectos corresponden al sector turístico, específicamente hoteles u hospederías. Además, dos de los proyectos corresponden a Instrumentos de Planificación Territorial: Planes Seccionales (actualmente vigente) y Plan Regulador Comunal (actualización).

⁷ Plataforma de búsqueda en línea: <https://www.sea.gob.cl/>

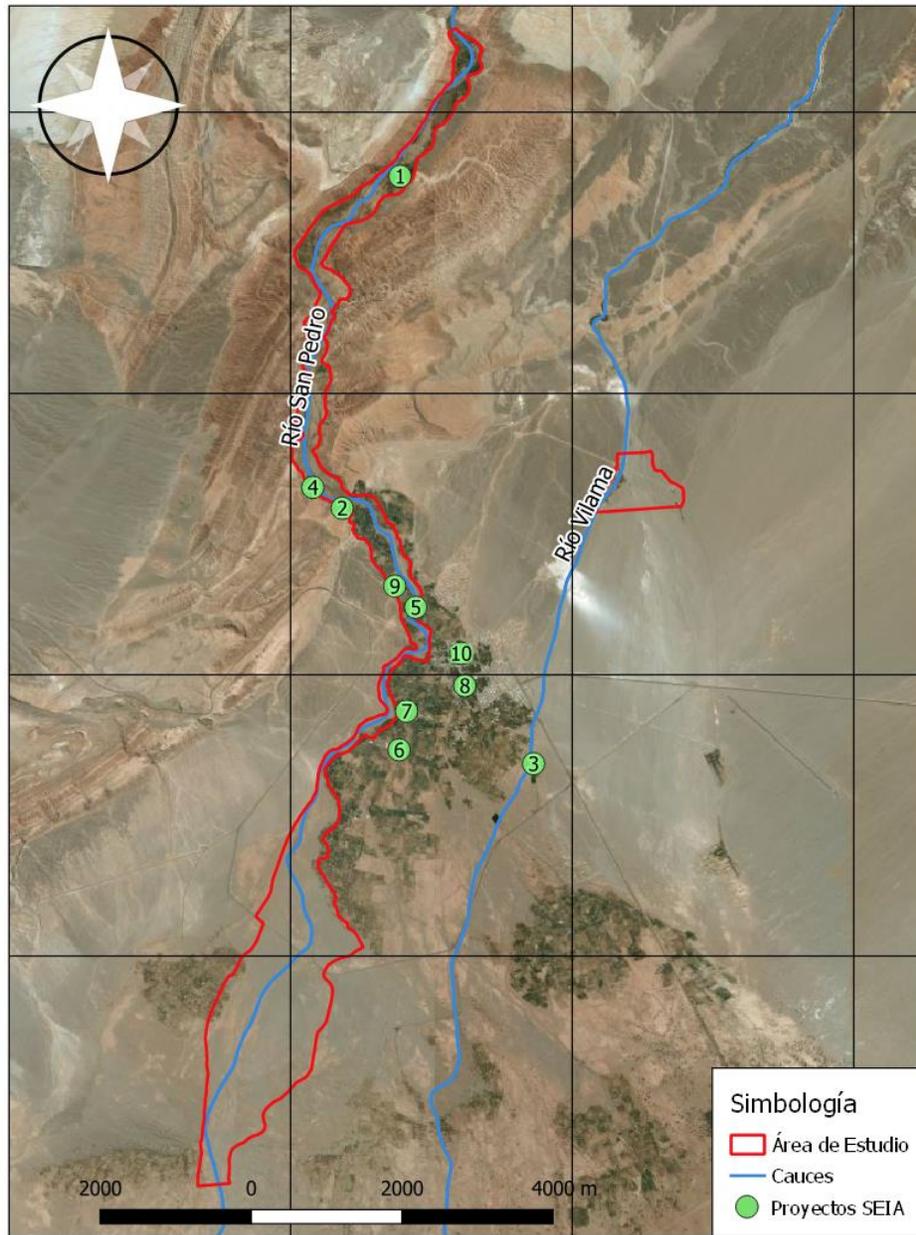


FIGURA 2-16: DISTRIBUCIÓN DE PROYECTOS INGRESADOS AL SEIA

Fuente: Elaboración propia en base a SEA (2020).

CUADRO 2-9: PROYECTOS SEIA

N°	Nombre	Tipo	Titular	Sector Productivo	Año de aprobación
1	Construcción de Instalaciones Hoteleras en el Ayllu de Catarpe	DIA	Inmobiliaria Darío Urzúa 1825 Ltda.	Turístico	1998
2	Planes Seccionales Área entorno Pucará de Quitor y Área entorno Pozo Tres Comuna de San Pedro de Atacama	DIA	Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama	Planes seccionales	2000
3	Construcción de Alcantarillado de San Pedro de Atacama	DIA	Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama	Saneamiento Ambiental	2000
4	Hotel en Suchor Ayllu de Quitor San Pedro de Atacama	DIA	Humberto Urdangarín Beltrán	Turístico	2001
5	Hotel Conde Duque	DIA	Juan Francisco Etigny Lira	Turístico	2001
6	Hospedería en el Ayllu de Yaye	EIA	ZAPALERI S.A.	Turístico	2004
7	Hotel Kunza	EIA	Inversiones Surandino S.A.	Turístico	2006
8	Actualización Plan Regulador San Pedro de Atacama	DIA	Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama	Plan Regulador Comunal	2010
9	Ampliación Hotel Iorana Tolache	DIA	Turismo Sam Petero Ltda.	Turístico	2011
10	Reposición del Museo Arqueológico R.P. Gustavo Le Paige	DIA	Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama	Otro	2013

Fuente: Elaboración propia en base a SEA (2020).

2.4.5. Disposición de Residuos

Respecto a la disposición de residuos en el área de estudio tales como basurales rellanos, sanitarios, vertederos, botaderos y canteras (autorizados o no autorizados), se consultó a las siguientes fuentes de información:

- Solicitud de información a Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) de Salud de Antofagasta
- Solicitud de información a Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE):
 - Actualización de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables. Programa Nacional de Residuos Sólidos. 2019.
- Solicitud de información al Ministerio de Medio Ambiente

En relación con la información entregada por la SUBDERE, se identificó que la comuna San Pedro de Atacama cuenta con un Vertedero Municipal para la disposición de residuos domiciliarios y asimilables, en el Cuadro 2-10 se puede observar información respecto a su ubicación, autorización sanitaria, operación, superficie, población atendida y residuos recibidos. Además, cercano al Vertedero Municipal se ubica el Relleno Sanitario SPA, cuya autorización sanitaria se encuentra en trámite. Por otra parte, en la comuna de San Pedro de Atacama, cercano al Área de Estudio, se encontraba un basural, el que actualmente se encuentra cerrado. En la Figura 2-17 se puede observar la ubicación de los sitios mencionados.

CUADRO 2-10: SITIO EN OPERACIÓN PARA LA DISPOSICIÓN DE RESIDUOS EN LA COMUNA DE SAN PEDRO DE ATACAMA

Sitio de disposición	Vertedero Municipal de San Pedro de Atacama
Comunas que disponen	San Pedro de Atacama
Autorización sanitaria	RES. EX 071/2000
RCA	RCA 0121/1999
UTM N	7.467.506
UTM E	591.042
Operación	Municipal
Propietario	Municipalidad de San Pedro de Atacama
Operador	Municipalidad de San Pedro de Atacama
Estado	En operación
Inicio de operaciones	2000
Vida útil (años)	10
Superficie (Ha)	3
Año cierre	2018
Plan cierre	RCA 724/2014
Población total atendida	88.384
RSD recibidos (ton/año)	34.724

Fuente: Elaboración propia en base a "Actualización de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables" SUBDERE, 2019.

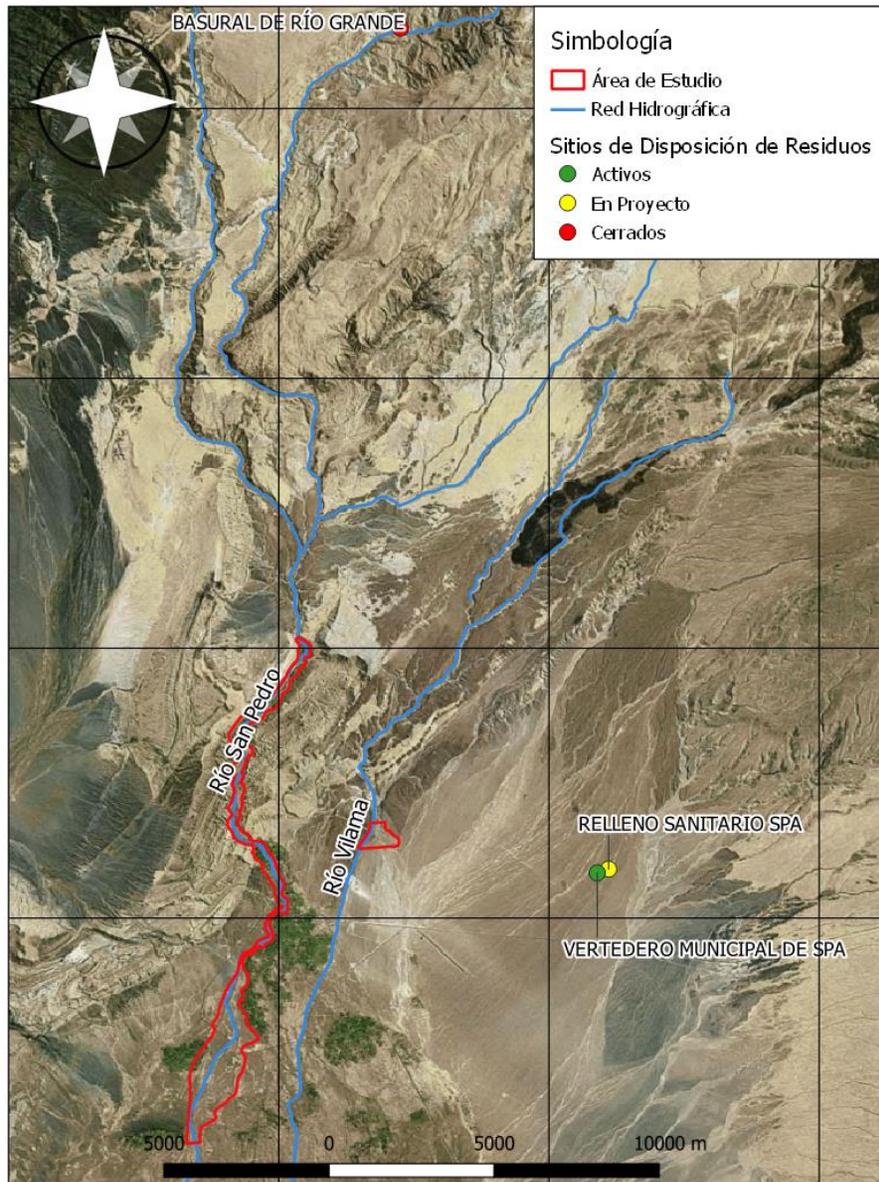


FIGURA 2-17: DISPOSICIÓN DE RESIDUOS

Fuente: Elaboración propia en base a “Actualización de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables” SUBDERE, 2019.

Cabe señalar, que no se observa ningún vertedero, relleno sanitario o basural dentro del Área de Estudio.

2.5. Daños Producidos por Crecidas

Se realizó un análisis de los antecedentes disponible sobre los daños que han producido las crecidas del río San Pedro en las distintas áreas del proyecto, considerando tópicos estratégicos: infraestructura, propiedades rurales, suelos urbanos y otros.

2.5.1. Revisión de Antecedentes de Prensa anteriores a 2014

Para desarrollar este objetivo el primer paso fue realizar una revisión de antecedentes de prensa, con el fin de identificar los hitos históricos de crecidas del Río San Pedro y sus afluentes, y los daños producto de estas en el área de estudio.

A la búsqueda realizada se añadió la realizada en Arrau (2014) utilizando los archivos de prensa existentes en la Biblioteca Nacional, referentes a los siguientes medios escritos: El Mercurio, El Mercurio de Antofagasta y El Mercurio de Calama. Es importante indicar se revisó información desde el año 1924 hasta el año 2012.

Siguiendo los mismos criterios utilizados en Arrau (2014), la revisión se realizó buscando información referente a:

- Eventos del invierno altiplánico que han afectado al área de estudio.
- Crecidas del Río San Pedro o sus afluentes (Río Grande y Río Salado)
- Antecedentes de daños producidos por pérdidas de viviendas, daños en los cultivos, cortes en los caminos, etc.) y localidades afectadas dentro de la Comuna de San Pedro de Atacama.
- Respuesta de las autoridades públicas frente a estos eventos.
- Identificar montos de los daños y/o inversiones para recuperación del área afectada.

En el Cuadro 2-11 se presenta un resumen de los antecedentes recopilados en la prensa, indicando tanto la fecha, el lugar afectado, así como las características más relevantes de la noticia. En este cuadro se incluye además la revisión complementaria realizada en medios de prensa en formato digital.

CUADRO 2-11: RESUMEN ANTECEDENTES REVISIÓN DE PRENSA.

Fecha Publicación	Periódico	Evento	Resumen
07/04/1971	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	San Pedro de Atacama sin suministro de agua potable y caminos interiores cortados
04/02/1972	El Mercurio	Aluvión	No se cuantificaron daños
18/02/1972	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	Casas dañadas: 8 en San Pedro de Atacama, 3 en Río Grande
18/02/1972	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	Casas dañadas en la comuna de San Pedro de Atacama: 156.
09/02/1973	El Mercurio de Calama	Lluvias	Corte de camino Calama - San Pedro
09/02/1973	El Mercurio de Calama	Lluvias	Corte de Camino Calama - San Pedro de atacama
08/03/1973	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	Corte del puente sobre el Río San Pedro

CUADRO 2-11: RESUMEN ANTECEDENTES REVISIÓN DE PRENSA.

Fecha Publicación	Periódico	Evento	Resumen
25/02/1977	El Mercurio	Lluvias	San Pedro de Atacama aislado, caminos cortados
25/02/1977	El Mercurio	Lluvias	Se corta el puente de acceso a San Pedro de Atacama y daños en caminos interiores.
21/02/1981	El Mercurio	Inundación	Caminos cortados por crecida río San Pedro camino cortado Toconao-Socaire Toconao-Peine
24/02/1981	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	San Pedro de Atacama, caminos cortados hacia el sur por inundaciones. Grietas de 7 metros en el camino impiden el tránsito producto de las lluvias que han afectado la zona
24/02/1981	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	Corte caminos de San Pedro a Toconao
27/02/1981	El Mercurio	Lluvias	Corte de suministro de agua y cortes en caminos
27/02/1981	El Mercurio	Lluvias	San Pedro de Atacama, viviendas dañadas y caminos que conectan con las localidades del sur agrietados e intransitables.
06/02/1989	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	4 mm de agua caída en San Pedro de Atacama. Caminos con daños leves.
01/02/1995	El Mercurio	Lluvias	Río Grande queda aislado por 3 días por las intensas lluvias y además de perder su cosecha de habas, 3 días sin agua potable y 16 canales quedaron con sus bocatomas tapadas de barro. No se dispone de agua de riego
02/02/1995	El Mercurio	Lluvias	Sin agua potable San Pedro de Atacama y Río Grande, este último con problemas en siembras y canales de regadío. Ambos lugares aislados producto de las lluvias
02/02/1995	El Mercurio	Lluvias	Daños en caminos de localidades al sur de la comuna de San Pedro de Atacama.
20/02/1999	El Mercurio	Lluvias	Caen 60 mm en San Pedro de Atacama. Problemas en el camino de acceso a Santiago de Río Grande.
30/01/2000	El Mercurio	Lluvias	Poblado de Río Grande sin agua potable, problemas en los caminos de acceso. Baden Salado que conduce a Ayquina, cortado.
28/02/2001	El Mercurio	Lluvia	Corte de agua potable en Río Grande.
02/03/2001	El Mercurio	Inundación	Localidad de Río Grande, Matansilla, San Pedro, Toconao, Talabre, Camar, Socaire, Peine y Machuca: El Gobierno de Chile declaró el 03 de marzo de 2001 a San Pedro como zona afectada por catástrofe. Restricción de suministro de agua por 10 horas durante el día. Anegamiento de calles y viviendas.
03/03/2001	El Mercurio	Inundación	Crecida Río Grande y Río San Pedro, colapso de canales de riego. Total de damnificados:500. San Pedro de Atacama y los Ayllus cercanos fueron afectados por las precipitaciones y la inundación. Corte de caminos aísla a los sectores de Cuchabrachi y Río Grande.
16/01/2008	El Mercurio	Lluvias	Daños en caminos interiores y pasos internacionales.
19/01/2008	El Mercurio	Lluvias	Corte camino San Pedro - Paso Sico.
13/02/2011	El Mercurio de Antofagasta	Lluvias	Corte de caminos San Pedro de Atacama
11/02/2012	El Mercurio	Inundación	Los damnificados por las fuertes lluvias en San Pedro de Atacama aumentaron a 25 personas y ya se registra un total de 800 afectados a causa del aluvión que afectó a parte de la Provincia del Loa.
14/02/2012	El Mercurio	Inundación	500 personas afectadas en la comuna de San Pedro de Atacama, por inundaciones de viviendas, filtraciones, problemas de cortes de agua y electricidad.

CUADRO 2-11: RESUMEN ANTECEDENTES REVISIÓN DE PRENSA.

Fecha Publicación	Periódico	Evento	Resumen
14/02/2012	El Mercurio de Antofagasta	Inundación	Desborde del Río Salado deja 320 damnificados en San Pedro de Atacama, en que los poblados más afectados son el mismo San Pedro, Toconao y Quito.
17/02/2012	El Mercurio de Antofagasta	Inundación	Las pérdidas se estiman en 2500 millones de pesos. El Gobierno decreta Emergencia Agrícola.
19/02/2012	El Mercurio de Antofagasta	Inundación	Las peores lluvias en 10 años dejan pérdidas cercanas a los 2.500 millones de pesos en la agricultura y daños inestimables en la actividad turística.
19/02/2012	La Tercera *	Inundación	Decenas de damnificados en San Pedro de Atacama por la crecida de los ríos de la comuna. El poblado más afectado es Río Grande con decenas de damnificados
20/02/2012	La Tercera *	Inundación	La ONEMI dio a conocer un conteo de 132 personas están afectadas por las crecidas de los ríos en la comuna de San Pedro de Atacama. En total, las fuertes lluvias del invierno altiplánico han dejado 343 viviendas dañadas y 4.243 afectados en la Región de Antofagasta. Según la alcaldesa de San Pedro de Atacama, Sandra Berna, las localidades más perjudicadas son Río Grande, Matancilla, Quito, Catarpe, Socaire, Peine y Toconao

* Revisión de prensa disponible en internet

Fuente: Arrau (2014)

Del análisis de la prensa realizado por Arrau (2014) se concluyó lo siguiente:

d) De los daños estructurales:

- Los principales daños estructurales se han producido por el corte parcial o total de los caminos desde y hacia San Pedro de Atacama, y caminos y puentes de acceso a localidades interiores como Santiago de Río Grande, Toconao, Machuca, etc.
- Un aspecto mencionado reiterativamente en la prensa local es el colapso de los sistemas de agua potable de los diferentes poblados por efecto de la caída de las cañerías que trasladan este elemento o por colapso de las tomas y/o bocatomas desde donde se obtiene el agua para las plantas de tratamiento del agua.

e) De los daños a la población:

- En cuanto a los daños del evento producido en el año 2001 no se especifican mayores antecedentes sobre los montos de los daños, sin embargo, se declara Zona de Catástrofe al área de San Pedro de Atacama.
- En cuanto a los daños, en la prensa se hace principalmente mención a dos temáticas: vivienda y agricultura. Esto es atribuible en el caso del evento del año 2012 a la presencia casi inmediata de los ministros de las carteras de Agricultura, Desarrollo Social, Obras Públicas y Economía en la zona y además porque son las áreas en que se han cuantificado los montos de los daños junto con lo cual se ha señalado el financiamiento comprometido para la restauración.

- En el caso de la agricultura, los daños se estimaron en 2.500 millones de pesos, por lo que se declara zona de emergencia agrícola en parte de la Región de Antofagasta, lo que incluye a la Comuna de San Pedro de Atacama. El Ministerio de Agricultura informó la reasignación de \$1.000 millones del prepuesto de la cartera para financiar las medidas de emergencia y la reconstrucción: \$500 millones de Indap (50% de estos para obras de riego) y \$500 millones adicionales para concursos de riego de la CNR.
 - Respecto a los daños en cuanto a viviendas, estos se produjeron tanto por las inundaciones de los inmuebles producto del desborde de ríos y canales, como por los daños por las precipitaciones que en suma dejan cientos de damnificados en la zona. Según señala además que la inversión para reconstrucción y reparación de las viviendas afectadas en la Comuna de San Pedro de Atacama alcanza aproximadamente los mil millones de pesos.
 - En tercer lugar y aunque sin restarle importancia, en los medios de prensa se hace referencia a los daños a la industria turística que se desarrolla en la Comuna de San Pedro de Atacama y que constituye una de las actividades económicas principales de la zona. No se entregan montos, sin embargo, se señala la suspensión de gran parte de las reservas de alojamiento (tanto por el temor de los turistas como por el daño en las instalaciones hoteleras) y de los circuitos turísticos programados.
- f) De las reacciones ciudadanas:
- En términos generales no aparecen muchas en la prensa local, excepto los años 2001 y 2012, en que hay declaraciones de autoridades y funcionarios municipales. Además de esto, impresiones de dirigentes vecinales respecto a los daños en las diferentes localidades.

La información relativa a los daños ocasionados por las crecidas, se basa en el análisis de la información periodística presentada en el acápite anterior. Esta información se presenta en el Cuadro 2-12.

CUADRO 2-12: DAÑOS PRODUCIDOS POR LAS CRECIDAS DE LOS AÑOS 2001 Y 2012

Año	Descripción
2001	Río Grande y Río San Pedro, colapso de canales de riego y destrucción de obras de riego.
	Corte de agua potable en Río Grande.
	Anegamiento de calles y viviendas en las localidades de Río Grande, Matancilla, San Pedro, Toconao, Talabre, Camar, Socaire, Peine y Machuca.
	500 damnificados en San Pedro de Atacama y los Ayllus cercanos
	Corte de caminos de acceso a Cuchabrachi y Río Grande.
2012	Desborde del Río Salado deja 320 damnificados en San Pedro de Atacama
	Las pérdidas en agricultura se estiman en 2500 millones de pesos
	Destrucción de bocatomas, canales y compuertas
	Destrucción y embancamiento de estanques acumuladores
	Anegamiento de terrazas de cultivo
	Pérdida de cultivos
Pérdida de las cosechas por exceso de humedad	

CUADRO 2-12: DAÑOS PRODUCIDOS POR LAS CRECIDAS DE LOS AÑOS 2001 Y 2012

Año	Descripción
	Falta de forraje
	Daños inestimables en la actividad turística.
	Corte de caminos San Pedro de Atacama y conexión con poblados interiores
	Cortes de agua y electricidad en toda la comuna

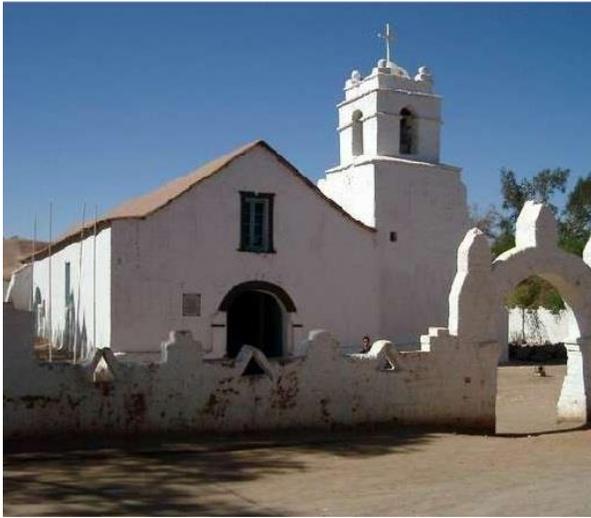
De la información contenida en el cuadro anterior, se desprende que en general no se dispone de magnitud de daños en cuanto a valores monetarios, sólo una descripción cualitativa de los mismos.

En las siguientes fotografías se presentan imágenes de los daños producidos por la crecida ocurrida en febrero de 2012 y 2013.



FOTOGRAFÍA 2-3: FOTOS DAÑOS PRODUCIDOS POR LA CRECIDA 2012

Fuente: Ediciones digitales de los periódicos El Mercurio y La Tercera. (2012), desde Arrau (2014).



FOTOGRAFÍA 2-4: IGLESIA DE SAN PEDRO, AÑOS 2012 Y 2013

Fuente: Ediciones digitales de los periódicos El Mercurio y theclinic .<https://www.theclinic.cl/2012/02/11/> ,
<https://www.emol.com/fotos/25124/>



FOTOGRAFÍA 2-5: MAQUINARIA DE VIALIDAD OPERANDO EN EL SECTOR DEL AYLLU DE QITOR.

Fuente: <https://www.df.cl/noticias/empresas/actualidad/>

2.5.2. Revisión de Antecedentes de Prensa posteriores a 2014

Desde 2014 se han producidos diferentes inundaciones. En enero de 2017 una tormenta eléctrica obligó a albergar algunos habitantes de San Pedro de Atacama. El alcalde Aliro Catur informó que la comuna se encuentra sin energía eléctrica que la lluvia ha provocado algunos anegamientos.



FOTOGRAFÍA 2-6: INUNDACIONES EN LA COMUNA. 26 DE ENERO DE 2017.

Fuente: <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/>

En febrero del mismo año, aproximadamente 120 personas fueron evacuadas en la Comuna de San Pedro de Atacama, de las cuales nueve debieron ser trasladadas a un albergue habilitado en la sede social El Carmen. Otras 12 personas quedaron aisladas en el sector de Catarpe, también en la comuna de San Pedro de Atacama.

En 2018, la zona más afectada corresponde a la localidad Caspana, donde 25 viviendas debieron ser evacuadas por el barro. En ese lugar, las autoridades municipales debieron disponer de un albergue emplazado en la escuela local. En Toconao se debieron evacuar dos casas de forma preventiva. Asimismo, las autoridades de San Pedro de Atacama anunciaron que los atractivos turísticos de la zona se encuentran cerrados por barro.



FOTOGRAFÍA 2-7: DESPRENDIMIENTOS DE TIERRA EN LA LOCALIDAD DE CASPANA, 2018

Fuente: Diario el Día - <http://www.diarioeldia.cl/pais/>

Sobre la revisión realizada, puede extenderse lo ya fue observado en Arrau (2014) para la información realizada sobre daños producidos por crecidas:

- Los eventos que han sido identificados en la información periodística hacen referencia casi en su totalidad a eventos intensos de precipitaciones que han afectado a la totalidad de la provincia, y que en el caso del área de estudio correspondiente a la comuna de San Pedro de Atacama no han causado estragos mayores, esto exceptuando los eventos de los años en que el invierno altiplánico ha sido de mayor intensidad y se han desbordado el Río San Pedro o alguno de sus afluentes.
- Escasean antecedentes en la prensa relacionados con la cuantificación económica de los impactos de este fenómeno o la estimación de las pérdidas en cuanto a agricultura o infraestructura, no se hace referencia a los caudales escurridos ni a cifras, sino que es información más general. Ante este escenario a partir de la información recopilada no es posible construir una clara idea de los problemas que afectan al área, en cuanto a la productividad, puesto que no existen cifras exactas. Esto se debe fundamentalmente a que las noticias se preocupan de los impactos instantáneos, y no de los efectos de largo plazo que puedan tener las crecidas y aluviones ocasionados por el invierno altiplánico.
- Las zonas más afectadas tanto por las lluvias como por los eventos de crecidas corresponden a las localidades de Santiago de Río Grande, Toconao, San Pedro de Atacama y los Ayllus que allí y en los alrededores existen.

La excepción corresponde a los eventos de inundaciones producto del invierno altiplánico acontecidos en los años 2001, 2012 y a principios del año 2019. Debido a su relevancia y actualidad, este último es revisado detalladamente a continuación.

2.5.3. Crecida de enero de 2019

Las lluvias acaecidas entre los días 30 de enero y 8 de febrero del año 2019, producidas por el invierno altiplánico, se caracterizaron por presentar una magnitud muy superior a las registradas históricamente. El aumento de los caudales fue generalizado en los cauces de ríos y quebradas. Se observaron:

- Erosiones de riberas,
- Desbordamientos en distintos sectores,
- Daños generales a la población y a la infraestructura pública y privada emplazada en las riberas de los cauces afectados por el fenómeno.

Respecto de la afectación a la infraestructura fluvial, tales como puentes, bocatomas y canales; se pudo constatar que éstas sufrieron importantes socavaciones. Como contrapartida, también se observaron embancamientos producto de la deposición de sedimentos arrastrados por el río durante la crecida.

Los desbordamientos del cauce registrados en el río San Pedro se observaron en diferentes puntos del cauce fluvial, entre los Ayllus de Catarpe y Tulor. Se produjeron:

- Diversos daños en las defensas fluviales existentes,
- Destrucción total de la estación fluviométrica "Río San Pedro en Cuchabrachi", dependiente de la Dirección General de Aguas,
- Destrucción de canales de riego del sector.
- Anegamientos de viviendas, y
- Pérdidas de cosechas y deterioro de terrenos agrícolas contiguos a ambas riberas del cauce del río San Pedro.

Por su parte, la crecida del río Vilama generó una inundación aguas abajo del cauce, en una extensión aproximada de 6 kilómetros, lo cual se ha traducido en:

- El anegamiento del cementerio local,
- La inundación del colegio
- Pérdida de conectividad hacia las localidades de Susques y Toconao.

Los puntos afectados por desbordamientos del río San Pedro y acumulaciones de agua que generaron pérdidas materiales y daños a la población se listan a continuación:

- a) Poblado de San Pedro de Atacama: En general se trata de anegamiento de calles y viviendas en los siguientes sectores:
 - Casco antiguo San Pedro de Atacama
 - Poblaciones Conde Duque, Lickan Antay, Licancabur y Población el Carmen
 - Villa los Algarrobos
- b) Ayllus: Estos anegamientos se produjeron por desbordamiento del río San Pedro y río Vilama, en los sectores:
 - Soncor, donde se produjeron cortes producto de la crecida del río Vilama, alimentado por una multitud de quebradas afluentes a ella.
 - Cuchabrachi, donde la estación fluviométrica fue destruida.
 - Catarpe, donde se produjo una acumulación crítica de agua, producto de la obstrucción que genera la carretera, y la alcantarilla que evacua esas aguas las desvía hacia Villa Solor.

- Quito, donde se registra el colapso de las defensas fluviales de gaviones existentes.
- Conde Duque, donde colapsa la totalidad de las defensas fluviales de gaviones, produciéndose desbordes hacia terrenos aledaños afectando a viviendas y terrenos agrícolas.
- Coyo, donde Se produjeron los cortes de caminos afectando la conectividad de la vialidad local.
- Tulo, donde los gaviones existentes en el río fueron sobrepasados, produciéndose desbordamientos hacia terrenos aledaños

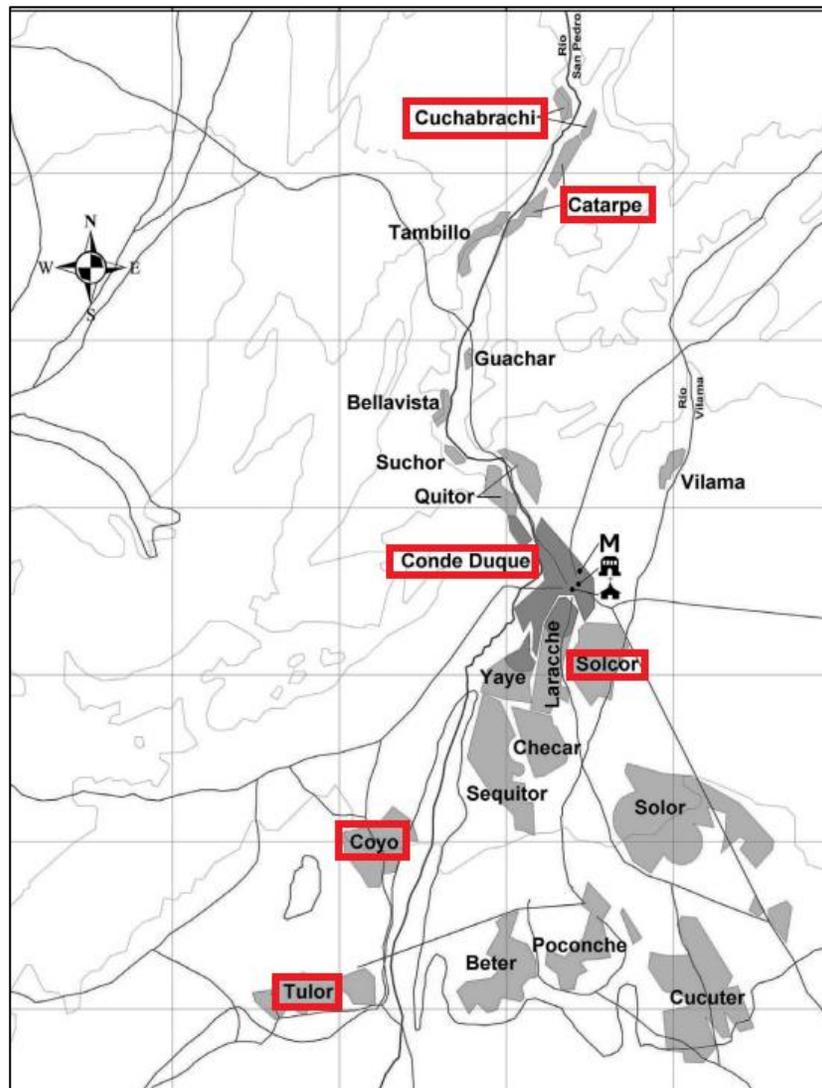


FIGURA 2-18: UBICACIÓN DE LOS AYLLUS AFECTADOS POR LAS INUNDACIONES PRODUCIDAS ENTRE ENERO Y FEBRERO DE 2019



FOTOGRAFÍA 2-8: DAÑOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA

Fuente: <https://www.cooperativa.cl/>



FOTOGRAFÍA 2-9: DAÑOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA

Fuente: <https://www.cooperativa.cl/>



FOTOGRAFÍA 2-10: ANEGAMIENTOS E INUNDACIONES EN SAN PEDRO DE ATACAMA

Fuente: <https://www.soychile.cl/Calama/Sociedad/>



FOTOGRAFÍA 2-11: AUMENTO DE CAUDAL DEL RÍOS SAN PEDRO, EN LA COMUNA OASIS

<https://www.soychile.cl/Calama/Sociedad/>

En base a información entregada por el MINVU, las viviendas dañadas por las lluvias altiplánicas del año 2019, para lo cual se seleccionaron aquellas afectadas en un margen de 100 metros a cada lado de los ríos San Pedro y Vilama, detectándose 23 registros (Cuadro 2-13 y Figura 2-19).

CUADRO 2-13: CATASTRO DE VIVIENDAS DAÑADAS POR LAS LLUVIAS ALTIPLÁNICAS DE 2019

Nombre Calle	Número	Existe Inundación	Nivel de Afectación
Tumisa	899	No	Daño leve
Avenida Selti	2	No	Daño leve
Solcor	748	Sí	Daño leve
Pasaje Cuchabrache	0	Sí	Daño mayor
Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Pasaje Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Cuchabrache	0	Sí	Daño mayor
Cuchabrache	0	Sí	Daño mayor
Pasaje Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Pasaje Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Cuchabrache	0	Sí	Daño no reparable
Pucará	0	Sí	Daño moderado
Pucará	0	Sí	Daño moderado
Pucará	0	Sí	Daño moderado
Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Cuchabrache	0	Sí	Daño leve
Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Pucará	0	Sí	Daño leve
Pucará	0	Sí	Daño leve
Pasaje Cuchabrache	0	Sí	Daño moderado
Domingo Atienza	324	Sí	Daño leve

Fuente: MINVU.

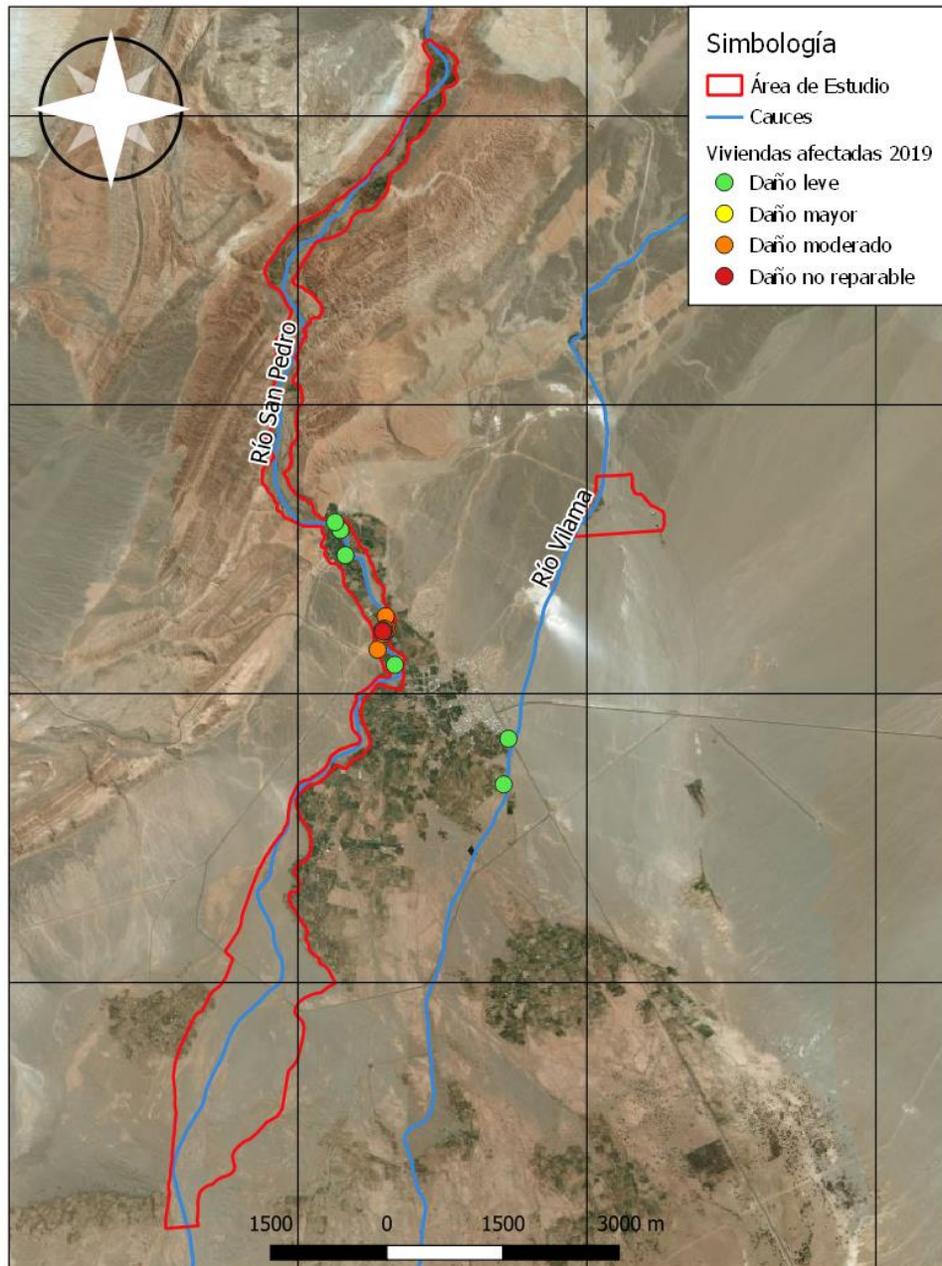


FIGURA 2-19: UBICACIÓN VIVIENDAS AFECTADAS 2019

Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por el MINVU.

Debido a la inusual intensidad del fenómeno climático se registró un aumento muy significativo del caudal de varios cauces ubicados en la región de Antofagasta, transportando una cantidad ingente de material sólido de diversas especies bajo la forma de aluviones y crecidas, todo lo cual generó severos procesos de erosión de riberas, desbordes y afectación a la población e infraestructura pública y privada emplazada en las zonas aledañas.

Con el objetivo de mitigar los impactos antes descritos, sobre la población, bienes e infraestructura ubicada en las proximidades de los cauces, la Dirección de Obras Hidráulicas identificó las obras necesarias tendientes a superar los problemas originados sobre la infraestructura de defensa fluvial y de riego. Estas son resumidas a continuación en el Cuadro 2-14.

CUADRO 2-14: PROBLEMAS ORIGINADOS SOBRE LA INFRAESTRUCTURA DE DEFENSA FLUVIAL Y DE RIEGO

Cauce	Comuna	Sector	Descripción del daño	Obras necesarias
San Pedro	San Pedro de Atacama	Ayllu de Quito, Sector medio	Colapso del 100% de los gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en aproximadamente 250m
San Pedro	San Pedro de Atacama	Pucara de Quito, Sector Alto	Colapso de un 30% de los gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en aproximadamente 180km
San Pedro	San Pedro de Atacama	Ayllu de Conde Duque, sector medio	Durante la crecida, los gaviones existentes fueron sobrepasados desbordan a los terrenos aledaños y terrenos agrícolas	Peraltamiento de gaviones existentes
San Pedro	San Pedro de Atacama	Sector alto de Ayllu de Conde Duque	Colapso del 100% de los gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en ambas riberas en aproximadamente 700ml de cauce.
San Pedro	San Pedro de Atacama	Ayllú de Tulo	Los gaviones existentes fueron sobrepasados desbordando a los terrenos aledaños afectando viviendas y terrenos agrícolas	Peraltamiento de gaviones existentes
Toconao	San Pedro de Atacama	Valle de Jerez	Daño de la fundación de las 3 mallas dinámicas existentes y embanque de cauce	Reparación de fundaciones de las Tocona 3 mallas existentes en cauce del río, además de realizar las limpiezas respectivas.
Toconao	San Pedro de Atacama	Pueblo Viejo Toconao	Cauce embancado y ribera erosionada con riesgo de colapso	Construcción de un muro de piedra de aproximadamente 200 m de encauzamiento, que evite la salida del agua a las casas del sector, a la vez se requiere sacar material rocoso que no permite el libre escurrimiento
San Pedro	San Pedro de Atacama	Ayllu de Quito Sector Bajo	Colapso de un 40% de gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en aproximadamente 360m.

Fuente: Dirección de Obras Hidráulicas.

CAPÍTULO 3 TRABAJOS DE TERRENO

0	15-11-2021	Aprobado	ELA/CGT/JV	WLN	SPA
A	12-11-2021	Emitido para Revisión Interna	ELA/CGT/JV	WLN	SPA
REV	FECHA	REVISIÓN PARA	POR	CHECK	JDP
		CÓDIGO DOCUMENTO			
		ARR104-IF-C03 0 TRABAJOS DE TERRENO			

3. TRABAJOS DE TERRENO

3.1. Reconocimiento de Terreno con Especialistas

3.1.1. Generalidades

Se realizó una visita inicial a la zona de estudio en conjunto Consultor – DOH, con el fin de formarse una idea cabal y completa de las condiciones en terreno, como apoyo a la revisión y validación de antecedentes.

La visita se desarrolló durante los días 11 y 12 de febrero del 2021, realizando el recorrido en conjunto el segundo día de dicha visita. Los profesionales que participaron de la actividad fueron los siguientes:

CUADRO 3-1: ASISTENTES ACTIVIDAD DE RECONOCIMIENTO DE TERRENO

	NOMBRE	CARGO	INSTITUCIÓN/EMPRESA
ASISTENTES	Raúl Godoy M. (RG)	Profesional DOH Antofagasta	DOH
	Sandra Pérez A. (SPA)	Jefa de Proyecto	Arrau Ingeniería
	Jaime Villanueva (JV)	Especialista en Geomensura	
	Christian González T. (CGT)	Especialista en mecánica fluvial	
	Enson Labraña A. (ELA)	Especialista en mecánica de suelos y geotecnia	

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan los alcances observados y aquellos manifestados por los profesionales participantes.

3.1.2. Desarrollo de la Visita

La visita partió con el punto de encuentro a un costado del puente de la ruta que une Calama y San Pedro de Atacama, allí se realizó la revisión de la extensión de la zona de estudio mediante el apoyo de un plano y se acordaron los puntos a recorrer.



FOTOGRAFÍA 3-1: REVISIÓN PLANO ZONA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el recorrido del río San Pedro partiendo desde el tramo de inicio en sector cercano a la estación San Pedro en Cuchabrachi. En este sector se inspeccionaron los puntos 1 y 2 mostrados en la Figura 3-1, correspondientes a un tramo del cauce en que se aprecia depositación de material en el lecho fluvial, cuyas características serían acordes para su uso en gaviones y enrocados. Asimismo, en este sector se propone como alternativa de solución a nivel de idea una obra que permita retener volumen de la crecida mediante la implementación de un muro sedimentador, que a su vez requeriría de la retención de material de mayor tamaño hacia aguas arriba como el que se aprecia en la Fotografía 3-3.



FOTOGRAFÍA 3-2: REVISIÓN SECTOR PROPUESTO COMO SITIO RETENEDOR DE CRECIDAS

Fuente: Elaboración propia



FOTOGRAFÍA 3-3: VISTA MATERIAL DE MAYOR TAMAÑO ARRASTRADO POR EL CAUCE EN CRECIDAS

Fuente: Elaboración propia

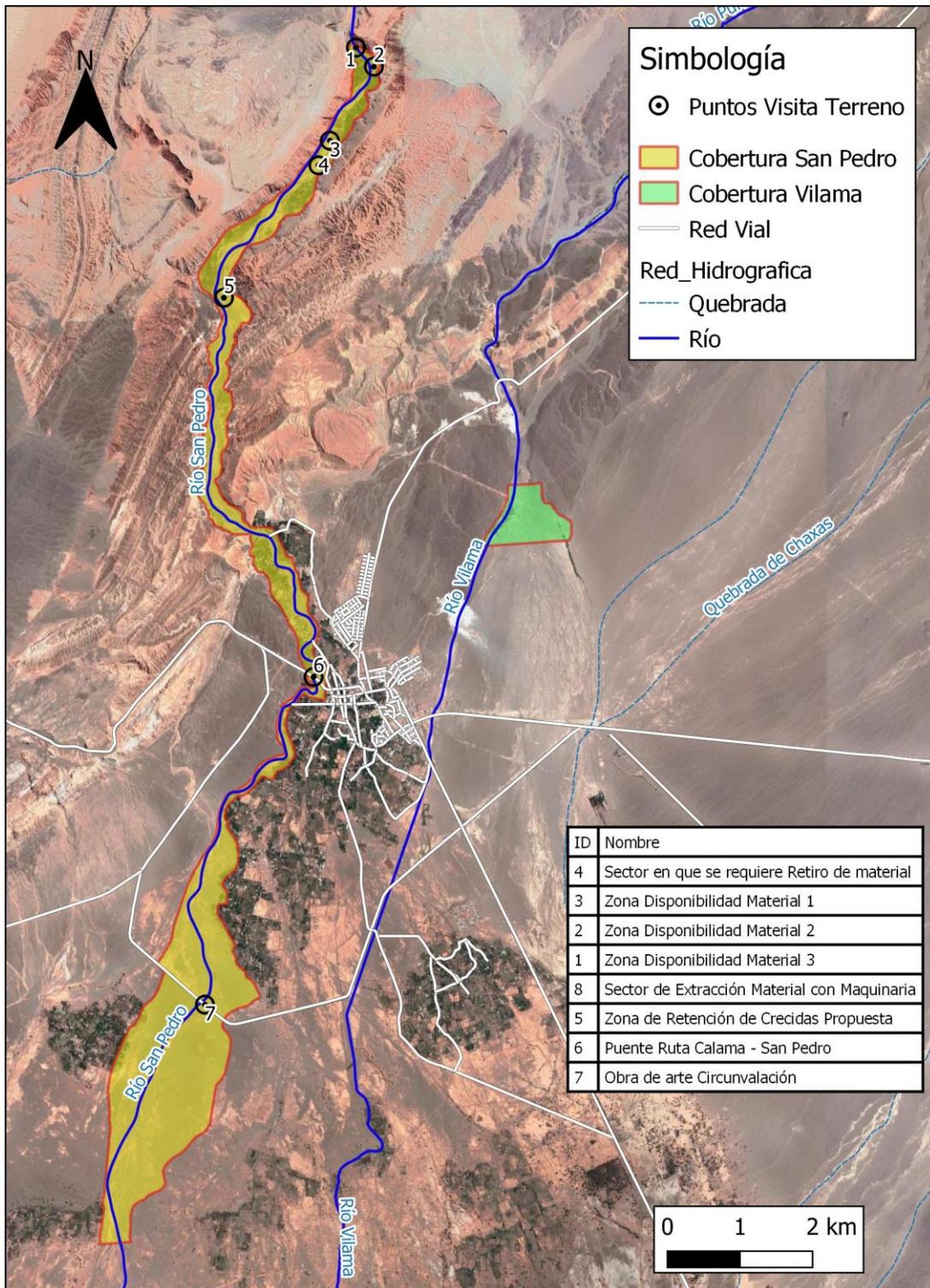


FIGURA 3-1: UBICACIÓN GENERAL PUNTOS RECORRIDO EN TERRENO

Fuente: Elaboración propia

Se inspeccionó en conjunto los puntos 3 y 4 de la Figura 3-1, los cuales se ubican cercanos a la sede social de la Comunidad de Catarpe. En este sector se aprecia abundante depositación de material fluvial correspondiente a bloques, gravas y arenas que, de acuerdo a lo señalado por el

especialista geotécnico, también servirían como material para gaviones y enrocados de protección. Se consulta al encargado DOH respecto a si se ha utilizado material de estos sectores en las obras ejecutadas por la DOH, a lo que indica que en general el material utilizado ha provenído de cauce afluente al río Vilama. Puntualiza que existe cierto grado de dificultad de realizar trabajos de movimiento de material en el cauce mediante maquinaria en todo el tramo de Catarpe, debido a la oposición por parte de la Comunidad.

En la Fotografía 3-4 se muestra sector correspondiente al punto número 4 de la Figura 3-1. En dicho sector se aprecia en la ribera izquierda una línea de gaviones recientemente construida con el objetivo de proteger la sede social. En este sector, los especialistas comentan respecto al riesgo que eventualmente existe en este sector debido a que la construcción de la obra dejó una vía preferente de menor cota hacia la línea de gaviones y una gran acumulación de material en el cauce sin realizar el encauzamiento debido al río San Pedro. El encargado DOH comenta diferentes aspectos asociados a estas obras, ya que por un lado la obra licitada corresponde específicamente a la construcción de la defensa mediante gavión y que por otro lado existe la dificultad de realizar movimiento de material en el cauce en este sector. En consecuencia, comenta la importancia de este estudio que permita relevar estos aspectos de riesgo y de esta manera sensibilizar a la Comunidad respecto a la importancia de realizar estos trabajos de encauzamiento.



FOTOGRAFÍA 3-4: VISTA GENERAL A SECTOR QUE REQUIERE RETIRO DE MATERIAL Y ENCAUZAMIENTO

Fuente: Elaboración propia

Se recorre un quinto sector que se muestra en la Fotografía 3-5, en el cual se visualiza la posibilidad a nivel de idea, de retener volumen de la crecida ya que se trata de una gran explanada con presencia de vegetación que pudiera tener las características de funcionamiento de humedal. Se comenta esta solución con el encargado DOH y se puntualiza respecto a que, para un análisis más detallado respecto a la efectividad de esta solución propuesta, es requerido realizar la estimación de volúmenes posibles de retener y volumen afluente del hidrograma de crecida. La idea principal considerada para este tipo de soluciones es que el caudal que llegue al tramo urbano del río San Pedro sea el que es capaz de portear el cauce en su condición actual en dicho sector. Un aspecto importante respecto de este tema, es poder retener el sobretamaño antes de que el flujo alcance este sector, dados los daños que provoca el arrastre de material en todas las obras de protección de las riberas.



FOTOGRAFÍA 3-5: SECTOR EN QUE SE PROPONE ALTERNATIVA DE RETENCIÓN DE CRECIDAS

Fuente: Elaboración propia

Se recorre el tramo final del río San Pedro, deteniéndose en la obra de arte de cruce del río con el camino de circunvalación. En este sector se comenta con el encargado DOH respecto a los daños sufridos en este sector por el evento de febrero del año 2019, en que la obra correspondiente a un par de cajones de hormigón colapsó siendo totalmente destruida por la crecida del río. Si bien es cierto que, es materia del estudio el diagnóstico de las obras existentes, se comenta que la nueva obra de atraveso aparentemente sería insuficiente debido a que no abarca el ancho natural del cauce que se pudo visualizar aproximadamente unos 1000 m aguas arriba.

Se comenta y consulta respecto a la eventual extracción de áridos que se observa aguas abajo en sector frente a la Comunidad de Coyo. El encargado DOH indica que no existe autorización de extracción en dicho sector, sin embargo, indica que es usual que se realice extracción de material principalmente debido al desconocimiento de la normativa relacionada a este tema.

El profesional especialista en geomensura comenta respecto a la necesidad de contar con los antecedentes topográficos de estudios anteriores que DOH quiera vincular con la topografía en ejecución. Se acuerda enviar al profesional DOH el listado de información requerida.

Finalmente, el profesional DOH recomienda realizar una reunión con la presidenta de la Comunidad de Coyo y con el presidente del Consejo de Pueblos Atacameños, con el fin de recoger la información que ellos pueden transmitir respecto a las crecidas históricas del cauce y sus efectos. Para ello solicita indicar fecha de próxima visita a terreno y ofrece su apoyo para gestionar dichas reuniones.

3.2. Trabajos Topográficos y Levantamiento Aerofotogramétrico

3.2.1. Introducción

3.2.1.1. Generalidades

La Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas ha adjudicado a la Empresa Consultora ARRAU INGENIERIA SpA, el Proyecto “CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE CAUCE DE LOS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA”. En este contexto, el presente informe tiene por objetivo describir los procedimientos y resultados en el desarrollo de las actividades topográficas ejecutadas a la fecha, en relación a la cartografía del lugar. El estudio fue efectuado en conformidad al Especificaciones Técnicas Topográficas de la DOH 2021 (ETT-DOH 2021).

La finalidad del estudio topográfico es proporcionar la base topográfica y cartográfica georreferenciada que permita los estudios de caracterización y manejo de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama.

El siguiente informe contiene los antecedentes, metodología y resultados de:

- Levantamiento Aerofotogramétrico LIDAR
- Sistema de Transporte de Coordenadas.
- Nivelaciones Geométricas.

A la fecha se ha realizado la referenciación planimétrica y altimétrica del proyecto, con la materialización y medición de puntos de referencias, determinando sus coordenadas planas topográficas con origen UTM y sus respectivas cotas geométricas para las áreas del cauce del río San Pedro y del río Vilama.

3.2.1.2. Descripción General del Área de Estudio

La comuna de San Pedro de Atacama se encuentra ubicada en la provincia del Loa, Región de Antofagasta. Esta localidad se encuentra emplazada al norte del Salar de Atacama dentro de una cuenca endorreica que se encuentra protegida por el oeste por la cordillera de la sal y por el este por la cordillera de los Andes.

El área general del estudio comprende el cauce del río San Pedro, con una extensión y superficie de 19,7 Km aproximadamente y 897,76 hectáreas respectivamente y también el estudio alcanza el cauce del río Vilama con una extensión de 870 m y una superficie de 71,32 hectáreas.

3.2.1.3. Plano de Ubicación General de la Zona de Estudio



FIGURA 3-2: ÁREAS DE ESTUDIO, SAN PEDRO DE ATACAMA

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Unidades, Instrumental y Personal

3.2.2.1. Sistema de Unidades

Todos los trabajos topográficos están en función de las Especificaciones Técnicas Topográficas de la DOH 2021 (ETT-DOH 2021), también así los sistemas de unidades, tanto las medidas de longitud como medidas angulares y los procedimientos de mediciones y vinculaciones con instrumentos de nivelaciones e instrumentos GNSS respectivamente.

3.2.2.2. Sistema de Referencia

Se densificaron un total de 50 puntos de referencias, distribuidos tanto para la zona del cauce del río San Pedro como para el cauce del río Vilama. La mayoría de las referencias son materializadas en las campañas de terreno indicadas en este informe, también fueron utilizados puntos de referencias que fueron encontrados en las distintas zonas de trabajo, como por ejemplo monolitos de la Comisión Nacional de Riego (CNR) y de la Dirección de Validación (DV). Los puntos de referencias construidos fueron denominados RSP-XX para el sector del río San Pedro y VI-XX para el sector del río Vilama, todos los puntos de referencias corresponden a monolitos de hormigón de 30x30x50 cm con un fierro estriado de 12 mm en su centro, como lo establecen las ETT-DOH 2021.

El sistema de referencia planimétrico es SIRGAS, el cual se encuentra normado a nivel nacional por el Instituto geográfico Militar (IGM). Para este proyecto el vértice utilizado es la estación **SAN PEDRO DE ATACAMA (SPAT)**.

Para determinar la cota de partida de este proyecto, se utilizó como referencia el Nivel Medio del Mar (NMM) materializado en el pilar de nivelación **PN-4B-69**.

Para la densificación del marco de referencia se usaron sistemas de transporte de coordenadas (STC), determinando redes primarias y redes secundarias, mediante la medición con receptores GNSS de doble frecuencia.

3.2.2.3. Planificación

Los trabajos en terreno desarrollados para este proyecto se efectuaron entre los meses de enero y febrero del año 2021, cumpliendo las disposiciones de las ETT-DOH 2021.

Para poder realizar las campañas en terreno en forma eficaz, se han dividido en dos cuadrillas todas a cargo de un Geomensor Jefe de Terreno.

Los trabajos realizados corresponden a las siguientes tareas:

1. Construcción de PRs vinculación SIRGAS.
2. Medición GNSS vinculación SIRGAS.
3. Construcción de PRs de Redes Primarias.
4. Construcción de PRs de Redes Secundarias.
5. Medición GNSS de Redes Primarias y Redes Secundarias.
6. Nivelación geométrica de enlace a Pilar de Nivelación.
7. Nivelaciones geométricas de los circuitos de PRs cauce río San Pedro y río Vilama.

Para el sector del río San Pedro se materializó una red primaria conformada por 10 puntos. Las vinculaciones se realizaron formando cuadriláteros que permitan controlar los cierres de figura,

todas las observaciones se hicieron empleando el método estático y ajustado a lo que establecen las ETT-DOH 2021. Para el sector del río Vilama la red primaria está conformada por 3 monolitos, cuya medición y cálculo es bajo los mismos criterios de la red de San Pedro.

A partir de las redes primarias se densificaron poligonales secundarias para San Pedro y Vilama, éstas fueron materializadas con PRs intervisibles cada 500 metros aproximadamente, el transporte de coordenadas se realizó con inicio y fin en vértices de la red primaria, los tiempos de observación son de mínimo 30 minutos, según lo establecen las ETT-DOH 2021.

Por cada vértice o punto de referencia se realizó una monografía con las amarras respectivas del monolito de hormigón, estas monografías contienen una foto referencial, croquis de ubicación, descripción de las amarras, coordenadas Planas Topográficas y su pertinente cota geométrica.

3.2.2.4. Personal Técnico

Los trabajos desarrollados para el proyecto “CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE CAUCE DE LOS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA” se realizaron en función de la planificación en gabinete según el documento METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE LA TOPOGRAFÍA y enmarcado en los Términos de Referencia y Bases Administrativas que contemplaba la correspondiente etapa.

Los trabajos ejecutados en terreno constaron con la distribución de dos cuadrillas operativas, estas cuadrillas operaban con tres personas cada una, supervisadas por el Profesional Especialista en Geomensura. En Gabinete también se contó con profesionales del área.

La nómina del Personal Técnico en terreno es el siguiente:

CUADRO 3-2: NÓMINA PERSONAL TÉCNICO

Nombre	Rut	Ocupación
Jaime Villanueva Álvarez	14.553.966-8	Especialista Jefe en Geomensura
Pablo Chamorro Castillo	14.159.173-8	Ingeniero Geomensor
Pedro Rosales Miranda	12.265.091-k	Técnico Topógrafo
Cesar Morales Balladares	18.837.460-3	Apoyo Geomensura
Felipe Saavedra Muñoz	19.038.644-9	Apoyo Geomensura
Carlos Moreno Ayala	17.666.306-7	Alarife
Cristian Del Solar Aránguiz	18.840.570-3	Alarife

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.5. Equipos Topográficos Y Software

Para efecto de las mediciones de las redes del STC se utilizaron equipos GNSS Diferenciales Doble Frecuencia, GPS + GLONASS, en método de posicionamiento Estático, con Precisiones Nominales: H: 3 mm + 0.1 ppm, V: 3.5 mm + 0.4 ppm. Con sistema RTK.

Para el cálculo de desniveles de las mediciones de cotas geométricas se utilizó Nivel Digital con zoom óptico de a los menos 28x, 2 miras de fibra de vidrio desmontables con código de barra normal.

Los certificados de calibraciones de los equipos señalados anteriormente y de las respectivas bases nivelantes se presentaron en informe de la Etapa 1 en el capítulo de planificación de los trabajos topográficos diciembre 2020, igualmente se presentan en el Anexo 3-2-3 de esta etapa.

El software empleado en el post-procesamiento de la data GNSS fue Trimble Business Center (TBC) versión 5.0.

3.2.3. Levantamiento Aerofotogramétrico Lidar

3.2.3.1. Identificación

El siguiente Informe Técnico, describe los trabajos realizados en el Sector de San Pedro de Atacama y Vilama, cuyo objetivo es generar la cartografía base del proyecto, actualizada al año 2021, con una escala de precisión 1:1.000 para las zonas comprometida en el estudio.

Los trabajos topográficos corresponden al Levantamiento Laser Aerotransportado de las zonas involucradas en el estudio, y que tiene una superficie equivalente a 969 há, y para la cual se consideró una cantidad de 6 puntos por m². Para cumplir con este objetivo se realizó un levantamiento topográfico, mediante tecnología LIDAR, capturando datos e imágenes de las zonas solicitadas por el mandante. El área comprometida en el estudio se aprecia en los polígonos marcados en color magenta.



FIGURA 3-3: UBICACIÓN GENERAL LEVANTAMIENTO LIDAR.

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3.2. Antecedentes

LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. Al igual que ocurre con la tecnología radar, donde se utilizan ondas de radio en vez de luz, la distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

El LIDAR es un sistema que permite obtener una nube de puntos del terreno tomándolos mediante un escáner láser aerotransportado (ALS). Para realizar este escaneado se combinan dos movimientos. Uno longitudinal dado por la trayectoria del avión y otro transversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz láser emitido por el escáner.

Con el propósito de ubicar en forma precisa las coordenadas de cada punto reflejado por el rayo Láser, se emplea conjuntamente una unidad de medición inercial (IMU), y el Sistema de posicionamiento global (GPS).

El IMU permite medir la orientación del sensor durante el vuelo, registrando los ángulos de inclinación y giros del avión.

La información del GPS del avión, en combinación con el apoyo terrestre de las estaciones bases, se obtiene posteriormente la posición espacial del sensor.

La densidad obtenida es notoriamente alta, debido a que es necesario filtrar puntos para obtener una cantidad adecuada de dicha información.

Los productos obtenidos de los datos Láser son el Modelo Digital de Terreno (DTM), el Modelo Digital de Superficie (DMS), la imagen de intensidad y la nube de puntos.

Los componentes del LIDAR son:

- ALS: Escáner Láser Aerotransportado. Emite pulsos de luz infrarroja que servirán para determinar la distancia entre el sensor y el terreno.
- GPS Diferencial: Mediante el uso de un receptor en el avión y uno o varios en estaciones de control terrestres (en puntos de coordenadas conocidas), se obtiene la posición y altura del avión.
- INS Sistema Inercial de Navegación. Nos informa de los giros y de la trayectoria del avión.
- Cámara Fotográfica digital: permite obtener una imagen de la zona de estudio, que servirá para la mejor interpretación de los resultados.
- Medio aéreo: Se utiliza un avión acondicionado especialmente cuando se quiere primar la productividad y el área es grande.

Las medidas obtenidas por los tres componentes principales, ALS, GPS e IMU, se toman con una misma etiqueta de tiempos acorde con el GPS. De esta forma después se pueden relacionar fácilmente en el cálculo posterior.

El sistema LIDAR obtiene la siguiente información, por cada pulso emitido puede captar 2 o más ecos. Esto nos permite recoger información a diferentes alturas. Por ejemplo, si estamos sobrevolando una zona arbolada, el primer eco puede responder a la copa de los árboles y el último a la superficie terrestre.

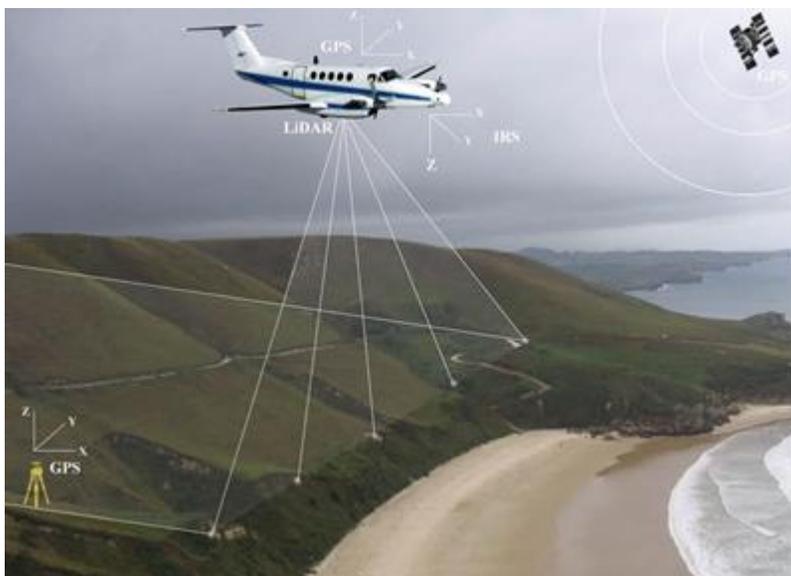


FIGURA 3-4: ESQUEMA COMPONENTES SISTEMA LIDAR.

Fuente: Elaboración Propia

La precisión de los datos obtenidos mediante la técnica LIDAR dependen de:

- La frecuencia del pulso.
- La altura de vuelo.
- El diámetro del rayo láser (dependiente del sistema)
- La calidad de los datos GPS / IMU y los procedimientos de post procesamiento.

3.2.3.3. Metodología de Trabajo

Planificación de vuelo

Para la planificación de vuelo, se consideró como base los polígonos correspondientes al área de estudio, con el fin de asegurar:

- Vuelo para escala 1:1.000
- Recubrimiento y cobertura, para evitar zonas sin imagen ni puntos de la zona de estudio.
- Densidad de Puntos por m² igual a 6.
- Tamaño de píxel capturado (20 cm GSD)

Precisión para dar cumplimiento al estándar de ± 1 mt para la planimetría y ± 0.50 mt para la altimetría en la escala 1:1.000. Definida por las tolerancias establecidas en punto 12.2 Tolerancia; indicadas en la ETT-DOH.

Según lo anterior, se realizó la planificación del vuelo con los parámetros ajustados a las especificaciones solicitadas por el cliente y a los equipos utilizados: Láser OPTECH Inc ALTM 3100i, Cámara Trimble TAC-80. El sistema Lidar utilizado es un Sistema de medición aérea completamente

integrado, probado y calibrado. El Sistema integra un sistema de navegación inercial (IMU) y un receptor GPS que proporcionan datos de posición y orientación de alta precisión.

Durante la planificación, se ha tenido en cuenta la reflectividad del terreno, los elementos e infraestructuras subyacentes, vegetación y orografía, de manera de obtener los datos que permitan representar la zona apropiadamente.

CUADRO 3-3: PARÁMETROS PARA VUELO LÁSER Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS Y FOTO A OBTENER

Área Total (ha)	969
Ancho cada línea de vuelo (m)	780
Altura de vuelo promedio sobre el terreno (m)	790
Velocidad promedio (nudos)	90
Frecuencia escaneo LIDAR (KHz)	300
Angulo escaneo LIDAR (°)	30

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se presentan las gráficas del plan de vuelo realizado en el levantamiento LIDAR para el proyecto, en donde se definieron 15 líneas de vuelo para el proyecto.



FIGURA 3-5: LÍNEAS Y TRAYECTORIAS PLANIFICADAS PARA EL SECTOR DE SAN PEDRO-VILAMA

Fuente: Elaboración Propia

Ejecución del vuelo

Para realizar la cartografía escala 1:1.000, se realizó el vuelo LIDAR el día 22 de marzo 2021, considerando la topografía del lugar, condiciones climáticas del día de vuelo y cumplir con el criterio de densidad de puntos por m². El levantamiento Láser fue efectuado con el sistema LIDAR OPTECH Inc ALTM 3100, que incluye una cámara métrica Trimble TAC80 Metric y Sistema Inercial de Navegación (INS).

Los antecedentes para la realización del levantamiento fueron los siguientes:

- Escala de Proyecto: 1/1.000
- Tipo de Vegetación: Baja

Procesamiento de datos

Una vez evaluada la información de los datos obtenidos durante el Levantamiento Láser y verificado que existe un 100% de cobertura del área comprometida en el estudio se procede con el procesamiento de la información obtenida por el sensor Láser y la Cámara. Los datos LIDAR están referenciados en el sistema WGS84, Sistema UTM HUSO 19 sur y altura ortométrica aplicando el modelo geoidal global de la zona comprometida en el estudio.

En esta etapa del proceso se integran los datos de la solución de navegación de los vuelos, los datos capturados por el sensor y parámetros de calibración del sensor LIDAR.

Proceso de fotografía

En este proceso las imágenes son transformadas desde su formato nativo a un formato que permite ser reconocido por los programas (Formato TIF) que se utilizan en los siguientes procesos. Junto al proceso de revelado de las imágenes se aplican ajustes en la luminosidad y tonalidad de las imágenes.

Recibidos los datos levantados en terreno por nuestra área de procesamiento de imágenes, se procede a la generación de la Ortofoto, para ello se ocupa el software de la SUITE INPHO.

Los trabajos se inician generando los siguientes procesos.

- Archivos de Eventos
- Listas de Imágenes
- Transformación de imágenes brutas

Una vez finalizado los procesos antes descritos, se procedió con la generación de la ortoimagen, se realizó una revisión de los calces y se analizan las diferencias de tonalidad de las fotografías.



FIGURA 3-6: MUESTRA ORTOFOTO SECTOR SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3.4. Proceso de nube de puntos

La nube de puntos LIDAR es el conjunto de puntos con posición tridimensional obtenidos a través de tecnología LIDAR. Adicionalmente a las coordenadas X, Y, Z, se cuenta con información característica de este tipo de sistemas que corresponde a los atributos de intensidad, clasificación, número de retorno y tiempo de captura GPS, entre otros.

Antes de comenzar el procesamiento de la nube de puntos obtenida con el Sistema Láser se comprobó que la totalidad de la zona comprometida en el estudio tuviera 100% de cobertura de datos Láser, teniendo especial cuidado con los bordes del proyecto.

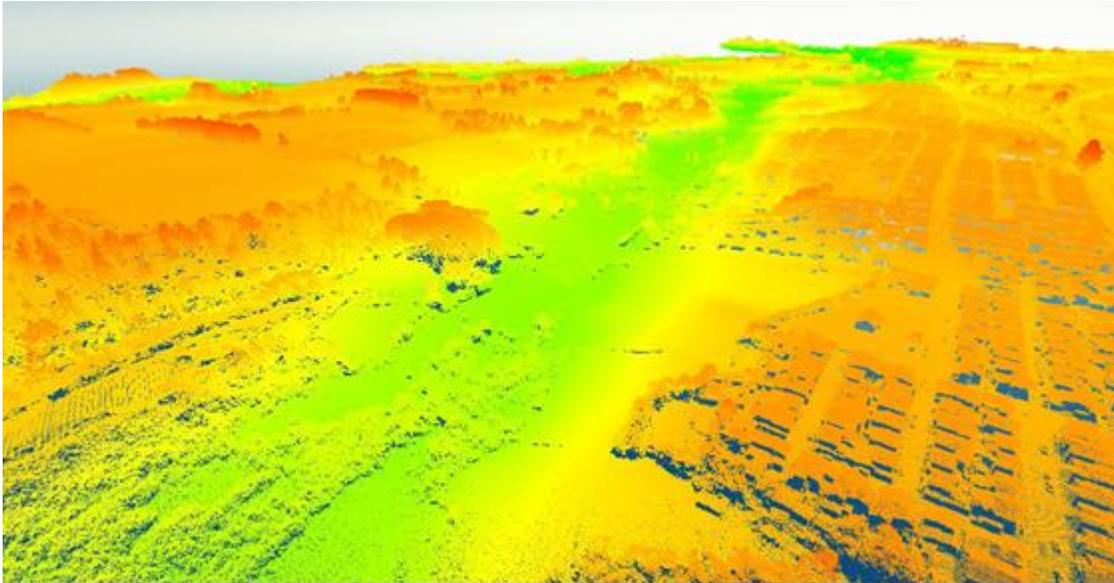


FIGURA 3-7: REPRESENTACIÓN 3D DE NUBE DE PUNTOS REFERENCIAL

Fuente: Elaboración Propia

La etapa de filtrado de puntos Laser, consta de dos procesos, un primer filtrado automático en el cual se generan parámetros (algoritmos automáticos de clasificación, filtrado automático de errores, etc.) según la densidad de vegetación existente en la zona y tipo de relieve (inclinaciones del terreno).

El segundo filtro por el cual pasan los datos Laser, es el proceso manual, en este proceso el filtrado de puntos lo realiza el operador y se realiza utilizando la ortofoto generada anteriormente y clasificando los puntos según lo que se observa en la imagen. Para un filtrado más preciso se generan en las zonas de interés perfiles transversales en la nube de puntos lo que permite ver la representación en altura de estos y clasificarlos según los objetos que se identifiquen. Debido a los múltiples retornos que se pueden obtener de un pulso Láser existen puntos que, proviniendo de un mismo pulso, generan múltiple información.

El filtrado de los datos LIDAR se lleva a cabo para almacenar cada punto en el grupo o clase que corresponda. Determinados programas producen un conjunto de puntos que representen solo los retornos que han rebotado en el suelo desnudo, almacenando el resto de los puntos como un conjunto "sin clasificar". Otros programas, que han desarrollado mejores algoritmos, son capaces de clasificar todos los puntos según grupos establecidos (vegetación alta, media y baja, edificios, etc.).

3.2.3.5. Modelo digital de terreno MDT

Este producto es aquel en el que la variable representada es la cota de terreno (sin ningún tipo de elemento estructural o de vegetación presente en el lugar en relación a un Sistema de referencia concreto, para este proyecto UTM Sur Zona 19 Datum SIRGAS (WGS-84), altura ortométrica aplicando el modelo geoidal global. Permite generar las curvas de nivel y dar cota a cualquier elemento vectorial que se dibuje. Para lograr obtener este producto a partir del DSM, se realiza un trabajo de filtrado automático y depurado manual para asegurar que se elimine cualquier elemento que no sea terreno.

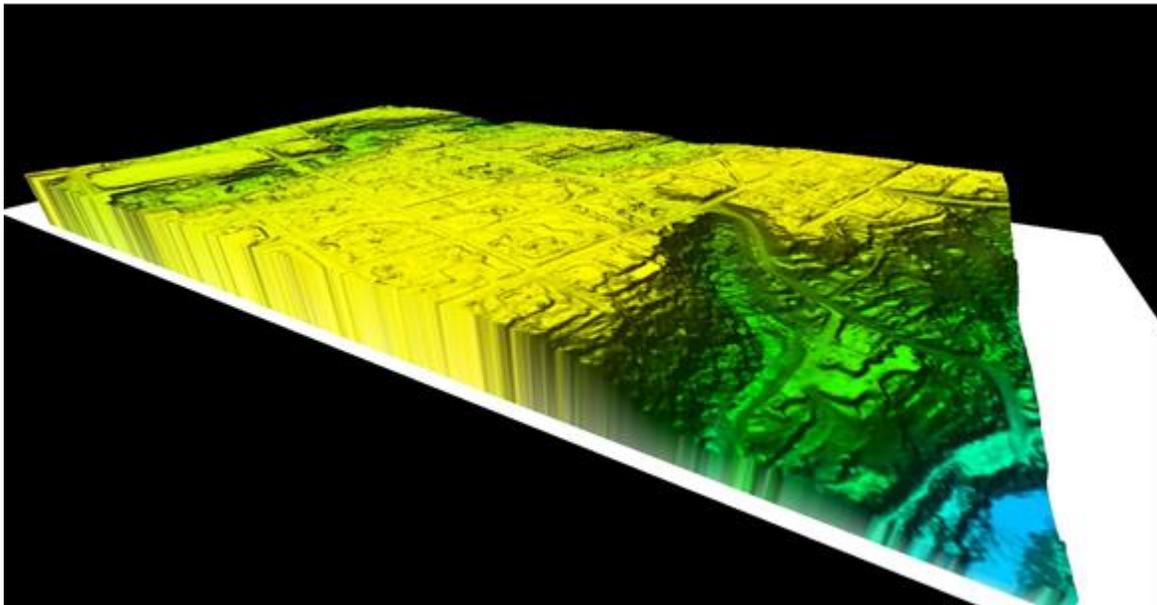


FIGURA 3-8:MODELO DIGITAL DE TERRENO DE LA ZONA REFERENCIAL.

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3.6. Modelo digital de superficie DSM

Este producto es la representación del terreno incluyendo todos los elementos presentes en el área de interés, este modelo se usa específicamente para el proceso de ortorectificación.

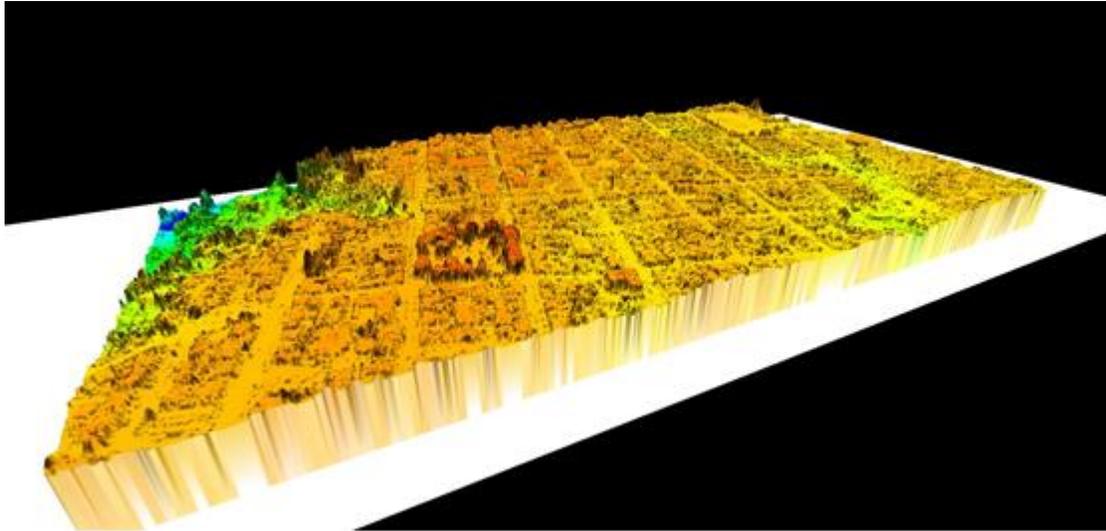


FIGURA 3-9: MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE REFERENCIAL

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3.7. Curvas de nivel y planimetría

La planimetría consiste en el dibujo por computadora de los elementos foto identificables presentes en la zona del proyecto, tales como: caminos, huellas, Manzanas, etc, los cuales se clasificaron o separaron en capas de información. La estructura de capas y formatos del plano, se ajustan a lo que establecen las normas de dibujo de DOH.



FIGURA 3-10: MODELO PLANIMÉTRICO REFERENCIAL.

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3.8. Red geodésica y Control terrestre

Red Geodésica

Para la georeferenciación del Vuelo Laser y ajuste de la nube de puntos, se emplearon todos los puntos existentes del STC en altimetría, y la planimetría.

El proceso realizado es el siguiente:

- Primero se controló la nube de puntos con altura elipsoidal
- Posteriormente se aplicó el modelo de ondulaciones EGM08 obteniendo como resultados una nube de puntos con cota ortométrica, y finalmente se controló con el STC nuevamente, comparando sus cotas ortométricas.

Para efectos de reducir todas las alturas elipsoidales a Nivel Medio del Mar se utilizó el siguiente procedimiento para obtener un modelo geoidal local.

El objetivo de esta etapa es estimar una grilla de ondulaciones geoidales locales para ser aplicadas a las alturas elipsoidales provenientes del levantamiento láser y ser referenciadas como alturas al geoide (Nivel Medio del Mar).

Los procedimientos para la estimación de alturas ortométricas (H) a partir de las alturas elipsoidales (h) entregadas por el instrumental GPS, más el modelo geoidal global (Negm08).

La siguiente metodología tiene por objeto minimizar el error sistemático del modelo geoidal, resultando las alturas H estimadas, afectadas solo por los errores relativos del modelo, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\boxed{h_A = H_A + N_A} \quad \rightarrow \quad \boxed{H_A = h_A - N_A}$$

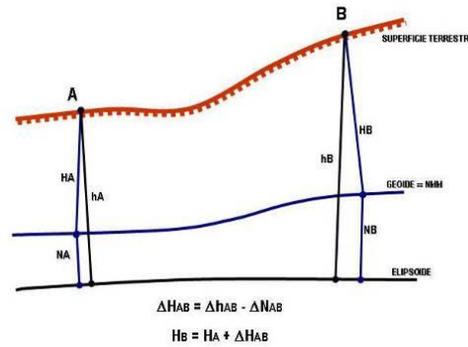
h_A: altura elipsoidal en A
H_A: altura ortométrica en A
N_A: ondulación geoidal en A

Lo anterior aplicado en forma relativa toma la forma de:

$$\boxed{\Delta H_{AB} = \Delta h_{AB} - \Delta N_{AB}}$$

Δh_{AB} : desnivel elipsoidal AB
 ΔH_{AB} : desnivel ortométrico AB
 ΔN_{AB} : diferencia de ondulación geoidal entre A y B (N_B – N_A)

Relación de alturas



Control Altimétrico del levantamiento

Como método de control de los productos provenientes del levantamiento lidar, se realizó un levantamiento GNSS en modo RTK de puntos en la zona levantada con Lidar, para el control vertical. Esto permite calcular las diferencias en la componente H entre el valor medido en terreno y el obtenido para el mismo punto desde el modelo, se presentan los reportes de autocontrol para cada sector.

Control de Calidad Topográfico Sector San Pedro de Atacama

Clase(m)	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Distribución Normalizada
-0,25	30	3,14%	3,14%
-0,2	34	6,70%	3,56%
-0,15	63	13,30%	6,60%
-0,1	67	20,31%	7,02%
-0,05	123	33,19%	12,88%
0	150	48,90%	15,71%
0,05	139	63,46%	14,55%
0,1	140	78,12%	14,66%
0,15	87	87,23%	9,11%
0,2	61	93,61%	6,39%
0,25	38	97,59%	3,98%
y mayor...	23	100,00%	2,41%
Puntos	955		

Estadísticas Descriptivas	
Media	0,002649
Error típico	0,004228602
Mediana	0,006
Moda	0
Desviación estándar	0,130676812
Varianza de la muestra	0,017076429
Curtosis	0,261167115
Coficiente de asimetría	-0,27451786
Rango	0,894
Mínimo	-0,542
Máximo	0,352
Suma	2,53
Cuenta	955
Nivel de confianza(95.0%)	0,008298436

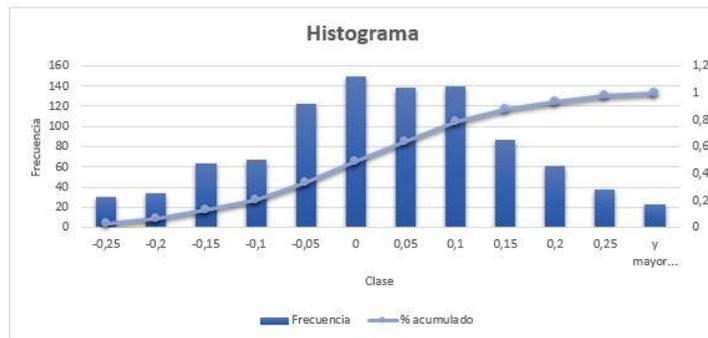


FIGURA 3-11: RESUMEN CONTROL DE CALIDAD SAN PEDRO (ELIPSOIDAL).

Fuente: Elaboración Propia.

Control de Calidad Topográfico
Sector Vilama

Clase(m)	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Distribución Normalizada
-0,25	30	3,14%	3,14%
-0,2	34	6,70%	3,56%
-0,15	63	13,30%	6,60%
-0,1	67	20,31%	7,02%
-0,05	123	33,19%	12,88%
0	150	48,90%	15,71%
0,05	139	63,46%	14,55%
0,1	140	78,12%	14,66%
0,15	87	87,23%	9,11%
0,2	61	93,61%	6,39%
0,25	38	97,59%	3,98%
y mayor...	23	100,00%	2,41%
Puntos	955		

Estadísticas Descriptivas	
Media	0,002649
Error típico	0,004228602
Mediana	0,006
Moda	0
Desviación estándar	0,130676812
Varianza de la muestra	0,017076429
Curtosis	0,261167115
Coefficiente de asimetría	-0,27451786
Rango	0,894
Mínimo	-0,542
Máximo	0,352
Suma	2,53
Cuenta	955
Nivel de confianza(95.0%)	0,008298436

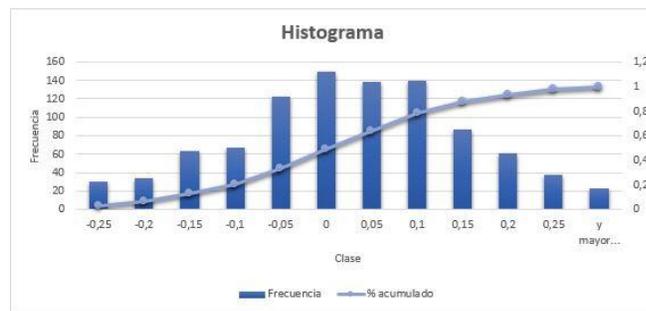


FIGURA 3-12: RESUMEN CONTROL DE CALIDAD SAN PEDRO (ORTOMÉTRICO).

Fuente: Elaboración Propia.

Control de Calidad Topográfico
Sector Vilama

Clase(m)	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Distribución Normalizada
-0,25	30	3,14%	3,14%
-0,2	34	6,70%	3,56%
-0,15	63	13,30%	6,60%
-0,1	67	20,31%	7,02%
-0,05	123	33,19%	12,88%
0	150	48,90%	15,71%
0,05	139	63,46%	14,55%
0,1	140	78,12%	14,66%
0,15	87	87,23%	9,11%
0,2	61	93,61%	6,39%
0,25	38	97,59%	3,98%
y mayor...	23	100,00%	2,41%
Puntos	955		

Estadísticas Descriptivas	
Media	0,002649
Error típico	0,004228602
Mediana	0,006
Moda	0
Desviación estándar	0,130676812
Varianza de la muestra	0,017076429
Curtosis	0,261167115
Coefficiente de asimetría	-0,27451786
Rango	0,894
Mínimo	-0,542
Máximo	0,352
Suma	2,53
Cuenta	955
Nivel de confianza(95.0%)	0,008298436

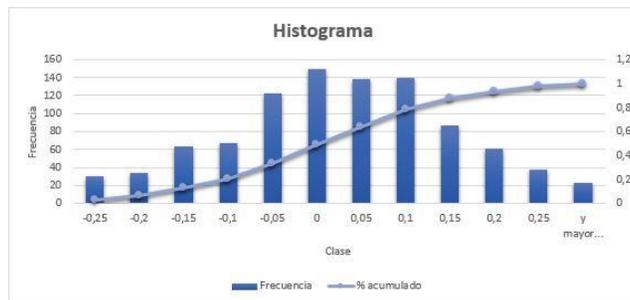


FIGURA 3-13: RESUMEN CONTROL DE CALIDAD VILAMA (ELIPSOIDAL).

Fuente: Elaboración Propia.

Control de Calidad Topográfico
Sector Vilama

Clase(m)	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Distribución Normalizada
-0,25	0	0,00%	0,00%
-0,2	0	0,00%	0,00%
-0,15	0	0,00%	0,00%
-0,1	0	0,00%	0,00%
-0,05	0	0,00%	0,00%
0	1	14,29%	14,29%
0,05	3	57,14%	42,86%
0,1	3	100,00%	42,86%
0,15	0	100,00%	0,00%
0,2	0	100,00%	0,00%
0,25	0	100,00%	0,00%
y mayor...	0	100,00%	0,00%
Puntos	7		

Estadísticas Descriptivas	
Media	0,040571
Error típico	0,01310372
Mediana	0,036
Moda	#N/A
Desviación estándar	0,034669185
Varianza de la muestra	0,001201952
Curtosis	-0,374770186
Coefficiente de asimetría	0,274114433
Rango	0,1
Mínimo	-0,004
Máximo	0,096
Suma	0,284
Cuenta	7
Nivel de confianza(95.0%)	0,032063648

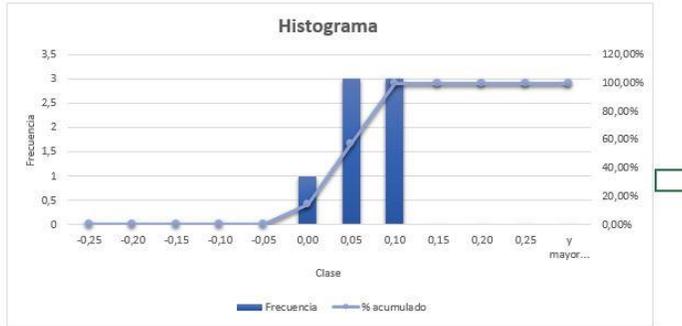


FIGURA 3-14: RESUMEN CONTROL DE CALIDAD VILAMA (ORTOMÉTRICO).

Fuente: Elaboración Propia.

Puntos de Control de apoyo Ortofotogramétrico

Como método de control de los productos provenientes del levantamiento con cámara aérea digital, se realizó un levantamiento GNSS en modo RTK de puntos foto identificables, evaluando las diferencias en las componentes planimétricas entre el punto obtenido de la ortofoto y el punto medido en terreno, diferencias que no superaron los 20 cm.

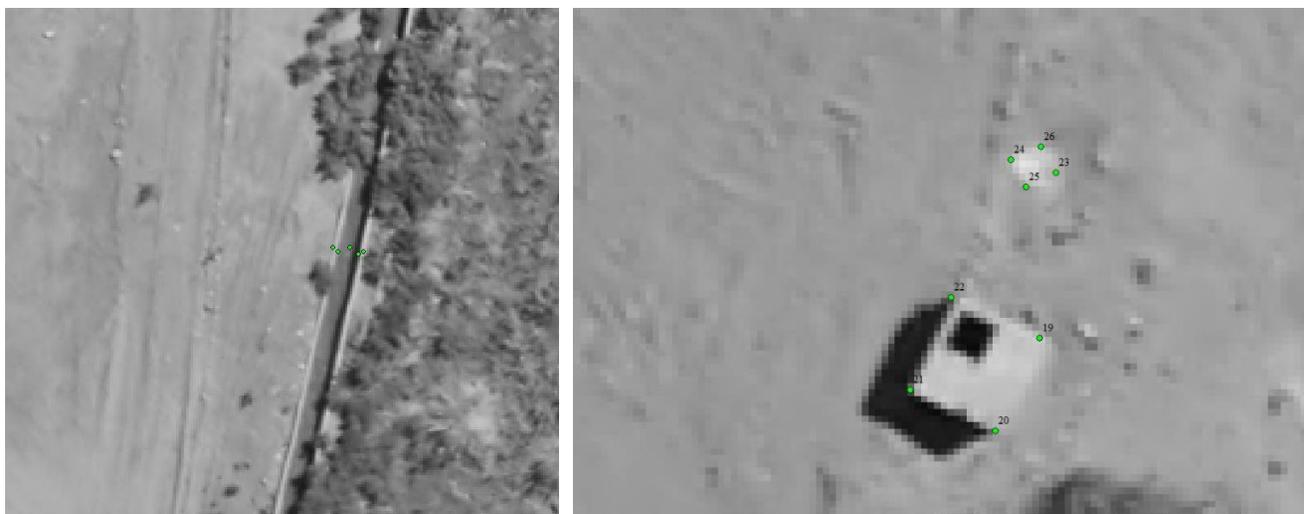


FIGURA 3-15: PUNTOS DE CONTROL DE APOYO ORTOFOTOGRAMÉTRICO

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3.9. Equipamiento Empleado

Equipamiento Fase del Vuelo Laser

- Avión Cessna, modelo 172

Equipamiento Fase Toma de Datos Laser

LIDAR OPTECH Inc ALTM 3100

Altura de Operación entre 210 y 3.500 mts. sobre el terreno

Precisión Altimétrica < 5-20 cms.

Precisión Horizontal mejor que $1/5.500 * \text{altitud}$

3.2.3.10. Productos Obtenidos.

Como resultado del vuelo con láser aerotransportado Lidar y cámara aérea digital se obtuvieron los siguientes productos cartográficos:

- Nube de puntos de terreno y no terreno en formato *.las *.xyz.
- Ortoimágenes pancromáticas en formato *.tiff *.ECW.
- Ortoimágenes RGB en formato *.tiff *.ECW.
- Modelo digital de terreno en formato *.tiff *.xyz
- Modelo de curvas de nivel en formato *.dwg.
- Modelo de planimetría en formato *.dwg

3.2.4. Vinculación Planimétrica por Satélites GPS

3.2.4.1. Generalidades

El proyecto “CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE CAUCE DE LOS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA” contempla el uso de dos sistemas de transporte de coordenadas, estos se denominan de la siguiente forma:

1. Sistema de transporte de coordenadas San Pedro: STC San Pedro.
2. Sistema de transporte de coordenada Vilama: STC Vilama.

El primero, STC San Pedro, está conformado por 43 monolitos de hormigón, éstos se encuentran ubicados en la cuenca del río San Pedro a lo largo de 20 Km aproximadamente y distribuidos homogéneamente en el área de interés del proyecto.

El segundo sistema, STC Vilama, está conformado por 7 monolitos de hormigón, se encuentran ubicados en un sector del río Vilama próximo a la ciudad de San Pedro de Atacama.

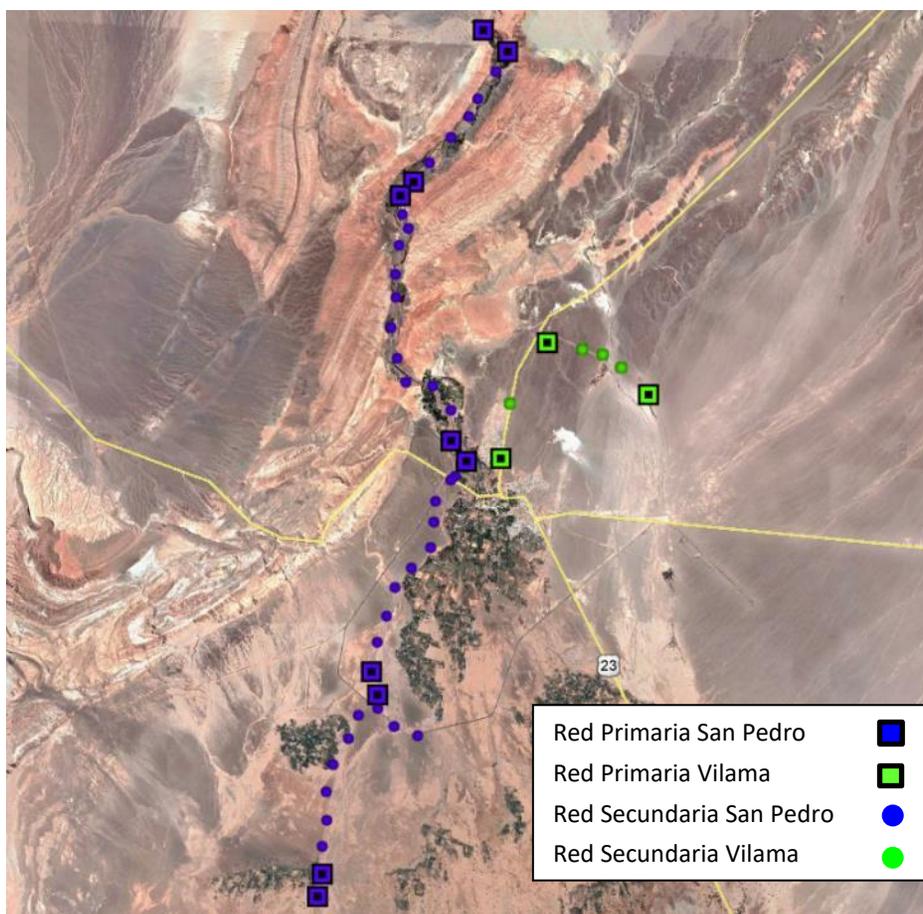


FIGURA 3-16: ESQUEMA STC SAN PEDRO Y VILAMA

Fuente: Elaboración Propia desde Google Earth

Ambos STC, se encuentran referidos planimétricamente al sistema de referencia SIRGAS a partir del vértice geodésico SPAT (estación activa), perteneciente a la red del IGM y ubicado en la Región de Antofagasta. A su vez, altimétricamente están referidos al nivel medio del mar a partir del pilar de nivelación PN 4B-69 perteneciente a la red de nivelación del IGM y ubicado en la ciudad de San Pedro. Cartográficamente los STC están referidos en la proyección Universal Transversal de Mercator – UTM y a un sistema plano topográfico con origen UTM.

CUADRO 3-4: ORIGEN PLANIMÉTRICO DEL STC SAN PEDRO Y VILAMA

PR	ESTE UTM [m]	NORTE UTM [m]
<i>SPAT</i>	584.190,906	7.461.551,210

Fuente: Certificado de coordenadas IGM.

CUADRO 3-5: ORIGEN ALTIMÉTRICO DEL STC SAN PEDRO Y VILAMA

PR	COTA GEOMÉTRICA [m]
<i>PN 4B-69</i>	2.437,913

Fuente: Certificado IGM.

Red Geodésica Primaria San Pedro

La Red Geodésica Primaria tiene como objetivo materializar el sistema de transporte de coordenadas del proyecto, servir de apoyo a vértices de control y permitir la reducción de alturas elipsoidales a ortométricas.

La red geodésica primaria San Pedro la conforman 10 monolitos que se encuentran referidos al vértice geodésico SPAT correspondiente a una estación activa de la Red Geodésica Nacional. Estos monolitos se encuentran distribuidos homogéneamente a lo largo del área de interés del proyecto. Las líneas bases fueron definidas formando cuadriláteros con enlace diagonal.

La ubicación y denominación de los vértices de la red primaria San Pedro queda definida como muestra la Figura 3-17

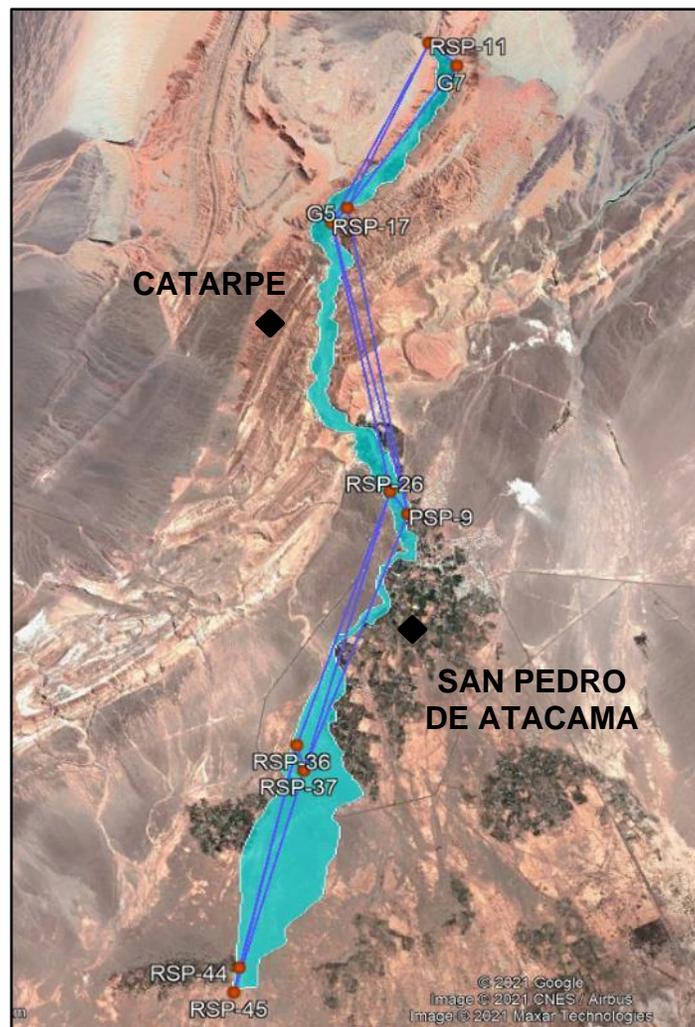


FIGURA 3-17: ESQUEMA UBICACIÓN RED PRIMARIA SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia desde Google Earth

Red Geodésica Primaria Vilama

La red geodésica primaria Vilama la conforman 3 monolitos que se encuentran referidos al vértice geodésico SPAT correspondiente a una estación activa de la Red Geodésica Nacional. Estos monolitos se encuentran equidistantes, dos de ellos cercanos al área de interés del río Vilama, y el restante ubicado cercano a la ciudad de San Pedro. La ubicación y denominación de los vértices de la red primaria Vilama queda definida como muestra la siguiente figura:



FIGURA 3-18: ESQUEMA UBICACIÓN RED PRIMARIA VILAMA

Fuente: Elaboración Propia desde Google Earth

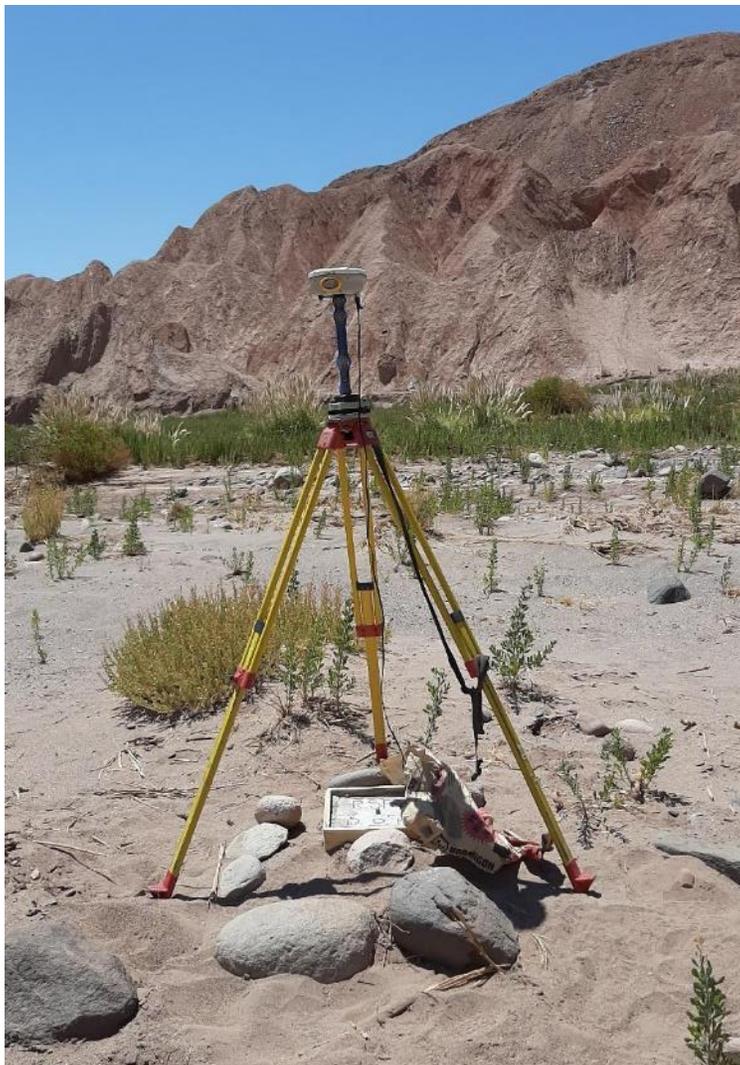
Redes Geodésicas Secundarias

Las redes secundarias del STC San Pedro y Vilama fueron definidas según cuadro 2-3, corresponden a 5 redes y 48 monolitos en total. Los vértices de inicio y termino de todas las redes pertenecen a puntos de la red geodésica primaria San Pedro o Vilama los que fueron usados como control de cada red secundaria de coordenadas.

CUADRO 3-6: DEFINICIÓN DE REDES SECUNDARIAS DE STC SAN PEDRO

STC	Nº Red	Vértice Inicio	Vértice Final	Cantidad de Monolitos
SAN PEDRO	01	G7	G5	7
	02	RSP-17	RSP-26	12
	03	PSP-9	RSP-36	11
	04	RSP-37	RSP-44	11
VILAMA	VILAMA	VIL-2	VI-03	7

Fuente: Elaboración propia.



FOTOGRAFÍA 3-6: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE VINCULACIÓN GNSS RSP-20

Fuente: Elaboración Propia



FOTOGRAFÍA 3-7: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE VINCULACIÓN GNSS RSP-31

Fuente: Elaboración Propia

3.2.4.2. Receptores y Softwares GPS

Receptores

Las mediciones fueron realizadas con 2 equipos geodésicos GNSS de doble frecuencia, marca Trimble modelo R4 y R8 con controladoras Trimble modelo JUNO y TSC 2 respectivamente. La precisión de ambos equipos en método estático es:

- Precisión horizontal: 3 mm + 0.1 ppm
- Precisión vertical: 3.5 mm + 0.4 ppm

Software

El software empleado en el post-procesamiento de la data GNSS fue Trimble Business Center (TBC) versión 5.0.

3.2.4.3. Método de Medición

La vinculación planimétrica GNSS se efectuó a partir de las ETT-DOH 2021.

Las vinculaciones se realizaron mediante mediciones GNSS entre todos los vértices de la red tanto para el STC San Pedro y STC Vilama. Las observaciones se realizaron en método estático y con periodos de grabación por sobre 1 hora para el caso de las redes primarias y por sobre 30 min para las redes secundarias. Los datos fueron procesados en el software Trimble Business Center versión 5.0 y se consideraron sólo los vectores independientes en el proceso. Los archivos GNSS finales en formato RINEX se encuentran en el Anexo 3-2-9 de este documento.

De acuerdo a las ETT-DOH 2021, la red primaria fue vinculada al vértice geodésico denominado SPAT, correspondiente a una estación activa de la red de vértices del IGM.

3.2.4.4. Procedimiento de Terreno

Previa planificación y programación de los trabajos a realizar, primero se materializaron los monolitos en terreno, esto corresponde a la construcción y reparación de 50 puntos de referencias, todos del tipo monolito de concreto.

Las ubicaciones de los puntos cumplieron con el criterio de:

- a) Cercanos a la zona de estudio.
- b) Considerando los posibles desbordes de los ríos en cuestión.
- c) Alejadas de construcciones en altura, cerros y árboles que obstaculicen visual y señal.
- d) El nombre de los PRs quedo acordado previamente con la inspección.
- e) Cada PRs contiene dos mediciones a objetos preferentemente permanentes (roca o cercos), en los lugares desérticos, a tablillas de madera bien ancladas.
- f) Las dimensiones y características de los monolitos son construidos según numeral 3.8.2 Monolito de Concreto, de las ETT-DOH 2021.

Una vez finalizada la construcción gruesa de los puntos de referencias, se realizaron mediciones GNSS a toda la red del STC San Pedro y Vilama. Las mediciones se realizaron en 10 días entre el 16 y 28 de febrero de 2021. Estas mediciones son en modo estático de más de 1 hora de grabación por sesión para las redes primarias y de más de 30 minutos para las redes secundarias, los receptores son posicionados y nivelados con bases tribach con plomada óptica, previamente calibradas para este proyecto. Cada sesión es registrada también en una libreta de terreno con las sesiones u ocupaciones de medición.

Se miden solo vectores independientes, considerando mediciones en sesiones diferentes cuando corresponda. El ángulo de elevación configurado en los receptores GNSS es de 10°, con intervalos de registro cada 1 segundo.

3.2.4.5. Registros y Archivos GPS

Registro Post-Procesamiento Diferencial Estático

A continuación, se presentan los esquemas de vinculación de todas las redes procesadas y los resultados obtenidos en cada red, luego de ser procesadas en software TBC:

Red Primaria San Pedro

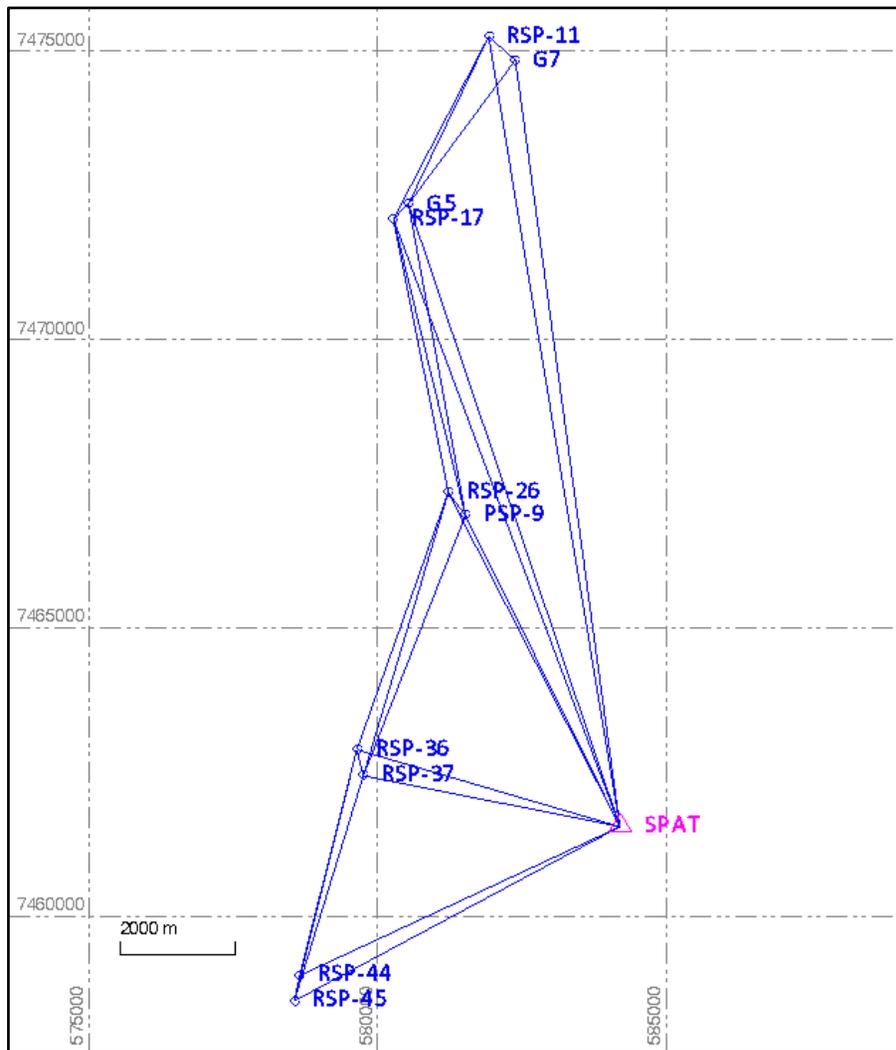


FIGURA 3-19: ESQUEMA RED PRIMARIA SAN PEDRO Y VINCULACIÓN A SPAT

Fuente: Elaboración Propia desde TBC

Con la información procesada, se analizó la calidad de las soluciones y se generó un resumen de las componentes vectoriales. Posteriormente se procedió a verificar la calidad interna de la red mediante los valores de cierre. A continuación, se presentan las soluciones obtenidas.

CUADRO 3-7: RESUMEN DE SOLUCIONES Y VECTORES RED PRIMARIA SAN PEDRO

Desde	A	Tipo de solución	Duración	Precisión h (Metro)	Precisión v (Metro)	ΔX (Metro)	ΔY (Metro)	ΔZ (Metro)	Dist. Elip. (Metro)
SPAT	PSP-9	Fija	1:02:01	0.005	0.009	-1714.046	-2992.320	4939.374	6021.545
SPAT	RSP-11	Fija	1:03:01	0.012	0.050	-150.306	-5942.918	12557.398	13887.230
SPAT	PSP-9	Fija	1:25:30	0.004	0.015	-1714.047	-2992.328	4939.366	6021.542
SPAT	RSP-36	Fija	1:19:39	0.003	0.023	-4042.102	-2175.505	1201.556	4743.192
SPAT	G5	Fija	1:49:17	0.004	0.008	-1857.219	-5367.005	9891.508	11401.013
SPAT	G5	Fija	1:21:34	0.005	0.008	-1857.215	-5367.009	9891.504	11401.012
SPAT	RSP-26	Fija	4:46:33	0.004	0.018	-1933.825	-3247.800	5303.944	6510.335
SPAT	RSP-17	Fija	3:06:08	0.005	0.024	-2138.092	-5363.947	9648.868	11239.888
SPAT	RSP-37	Fija	2:39:40	0.004	0.022	-4000.619	-1967.887	789.526	4526.057
SPAT	G7	Fija	1:29:18	0.004	0.008	221.473	-5617.182	12186.794	13414.857
SPAT	RSP-44	Fija	2:39:08	0.002	0.006	-5516.967	-1092.715	-2402.581	6113.485
SPAT	RSP-45	Fija	3:01:20	0.004	0.023	-5665.396	-965.704	-2803.690	6392.073
RSP-17	RSP-26	Fija	1:12:36	0.006	0.025	204.266	2116.165	-4344.916	4834.983
RSP-17	PSP-9	Fija	1:02:01	0.006	0.011	424.035	2371.641	-4709.480	5287.609
RSP-37	PSP-9	Fija	1:03:30	0.004	0.016	2286.561	-1024.413	4149.840	4845.519
RSP-37	RSP-36	Fija	1:08:50	0.004	0.010	-41.485	-207.608	412.032	463.055
RSP-26	RSP-37	Fija	2:34:53	0.005	0.025	-2066.794	1279.918	-4514.407	5125.182
RSP-17	RSP-11	Fija	1:03:01	0.003	0.015	1987.771	-578.936	2908.552	3568.428
RSP-17	G5	Fija	0:54:33	0.001	0.003	280.874	-3.067	242.639	371.003
RSP-26	PSP-9	Fija	1:36:16	0.003	0.006	219.776	255.478	-364.578	496.279
RSP-26	RSP-36	Fija	1:04:03	0.004	0.035	-2108.277	1072.289	-4102.370	4733.402
PSP-9	G5	Fija	1:01:43	0.005	0.009	-143.157	-2374.699	4952.124	5491.456
G5	RSP-11	Fija	1:03:01	0.012	0.044	1706.899	-575.879	2665.908	3215.916
RSP-45	RSP-36	Fija	1:01:15	0.005	0.012	1623.308	-1209.794	4005.245	4486.046
RSP-45	RSP-37	Fija	0:59:40	0.002	0.009	1664.796	-1002.203	3593.222	4083.367
RSP-45	RSP-44	Fija	2:39:08	0.001	0.002	148.434	-127.027	401.102	445.974
RSP-11	G7	Fija	1:29:18	0.002	0.003	371.785	325.715	-370.604	617.490
RSP-44	RSP-36	Fija	1:01:15	0.004	0.011	1474.875	-1082.774	3604.139	4040.348
G7	G5	Fija	1:00:50	0.004	0.028	-2078.678	250.154	-2295.306	3105.316

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

Posterior al procesamiento, filtrado de observaciones y obtención de componentes vectoriales GNSS, el principal indicador de calidad de las figuras vectoriales es el valor de cierre de las figuras geométricas conformadas por las mediciones realizadas. A continuación, se informan algunos de los cierres en coordenadas horizontal y vertical y su precisión asociada.

CUADRO 3-8: CONTROL DE CIERRE DE FIGURAS RED PRIMARIA SAN PEDRO

MODULO	Longitud	Horizontal	Vertical	PPM
	(Metro)	(Metro)	(Metro)	
G5-G7-RSP11	6942.025	0.003	-0.011	1.586
RSP11-RSP17-SPAT	28708.389	0.006	0.043	1.505
PSP9-RSP26-RSP17	10623.603	0.014	-0.005	1.430
PSP9-RSP17-SPAT	22558.756	0.011	0.030	1.420
G5-PSP9-RSP17	11155.065	0.008	0.008	0.990
RSP45-RSP36-RSP44	8975.958	0.001	-0.008	0.890
RSP26-RSP17-SPAT	22594.940	0.006	0.019	0.881
RSP37-RSP26-SPAT	16168.179	0.009	0.009	0.756

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

Todos los módulos cumplen con la tolerancia de cierre de 2 PPM exigida en las Especificaciones Técnicas y Topográficas de DOH, validando de esta forma la Red Geodésica Primaria.

El resultado de ajuste de la red primaria, teniendo fija la coordenada geodésica y altura elipsoidal del vértice SPAT, entrega los siguientes valores de coordenadas y alturas geodésicas junto con las coordenadas proyectadas en UTM para la red primaria.

CUADRO 3-9: COORDENADAS AJUSTADAS GEODÉSICAS-SIRGAS, RED PRIMARIA SAN PEDRO

Coordenadas Geodésicas			
Punto	Latitud	Longitud	Altura (Metro)
G5	S22°51'17.05832"	W68°12'54.03503"	2537.729
G7	S22°49'55.65650"	W68°11'49.62190"	2571.953
PSP-9	S22°54'12.50424"	W68°12'18.45953"	2480.464
RSP-11	S22°49'42.48508"	W68°12'05.96376"	2579.631
RSP-17	S22°51'25.67534"	W68°13'03.14022"	2533.301
RSP-26	S22°53'59.62330"	W68°12'28.94408"	2481.950
RSP-36	S22°56'24.90840"	W68°13'23.66104"	2441.867
RSP-37	S22°56'39.48530"	W68°13'19.60692"	2439.111
RSP-44	S22°58'32.42782"	W68°13'57.62974"	2418.065
RSP-45	S22°58'46.62227"	W68°14'00.81448"	2415.358

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

CUADRO 3-10: COORDENADAS AJUSTADAS UTM/19S-SIRGAS, RED PRIMARIA SAN PEDRO

Coordenadas UTM HUSO 19 SIRGAS			
Punto	Este (Metro)	Norte (Metro)	Elevación Ortométrica (Metro)
G5	580534.598	7472346.221	2499.562
G7	582383.951	7474839.564	2533.589
PSP-9	581519.375	7466945.561	2442.572
RSP-11	581920.330	7475247.129	2541.253
RSP-17	580273.700	7472082.615	2495.156
RSP-26	581222.809	7467343.281	2444.044
RSP-36	579640.338	7462883.837	2404.221
RSP-37	579753.432	7462434.962	2401.485
RSP-44	578652.375	7458967.481	2380.618
RSP-45	578559.413	7458531.450	2377.931

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

Red Primaria Vilama

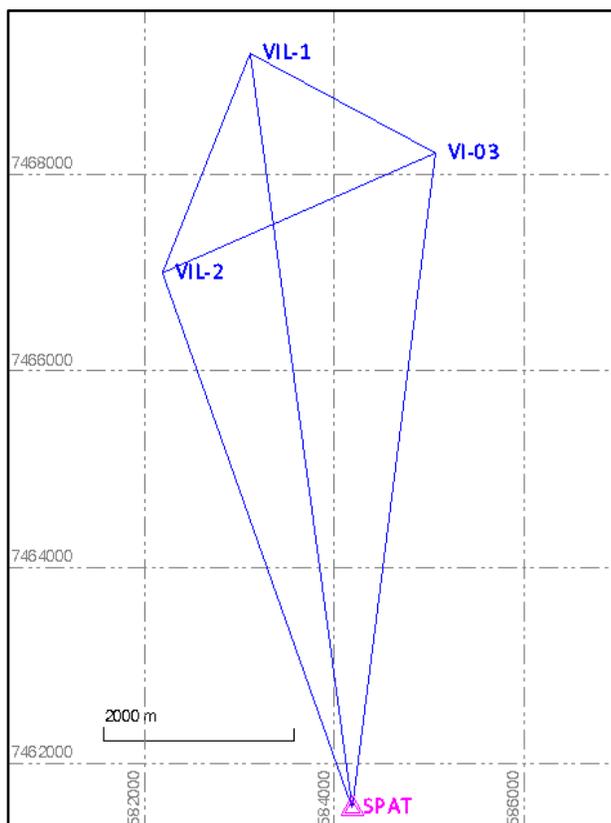


FIGURA 3-20: ESQUEMA RED PRIMARIA VILAMA Y VINCULACION A SPAT

Fuente: Elaboración Propia desde TBC

Con la información procesada, se analizó la calidad de las soluciones y se generó un resumen de las componentes vectoriales. Posteriormente se procedió a verificar la calidad interna de la red mediante los valores de cierre. A continuación, se presentan las soluciones obtenidas.

CUADRO 3-11: RESUMEN DE SOLUCIONES Y VECTORES RED PRIMARIA VILAMA

Desde	A	Tipo de solución	Duración	Precisión h (Metro)	Precisión v (Metro)	ΔX (Metro)	ΔY (Metro)	ΔZ (Metro)	Dist. Elip. (Metro)
SPAT	VIL-2	Fija	1:03:36	0.004	0.015	-1081.407	-2768.039	4986.789	5802.631
SPAT	VIL-2	Fija	1:02:48	0.005	0.017	-1081.411	-2768.03	4986.797	5802.634
SPAT	VI-03	Fija	1:30:25	0.005	0.009	1767.81	-2152.393	6121.331	6722.333
SPAT	VI-03	Fija	1:09:23	0.005	0.009	1767.813	-2152.393	6121.331	6722.334
SPAT	VIL-1	Fija	3:09:11	0.005	0.021	117.993	-3308.601	7015.361	7753.043
VIL-1	VIL-2	Fija	1:03:36	0.003	0.011	-1199.411	540.584	-2028.564	2415.417
VIL-1	VI-03	Fija	1:30:25	0.004	0.007	1649.814	1156.206	-894.024	2201.889
VIL-1	VI-03	Fija	1:09:23	0.004	0.007	1649.818	1156.206	-894.021	2201.891
VI-03	VIL-2	Fija	1:02:48	0.003	0.011	-2849.228	-615.625	-1134.538	3126.752

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

Posterior al procesamiento, filtrado de observaciones y obtención de componentes vectoriales GNSS, el principal indicador de calidad de las figuras vectoriales es el valor de cierre de las figuras geométricas conformadas por las mediciones realizadas. A continuación, se informan algunos de los cierres en coordenadas horizontal y vertical y su precisión asociada.

CUADRO 3-12: CONTROL DE CIERRE DE FIGURAS RED PRIMARIA VILAMA

MODULO	Longitud	Horizontal	Vertical	PPM
	(Metro)	(Metro)	(Metro)	
VIL2-VIL1-SPAT	15980.281	0.003	0.026	1.628
VIL2-VI03-VIL1	7749.894	0.006	-0.001	0.725
VIL2-VI03-SPAT	15658.337	0.006	0.023	1.551
VI03-VIL1-SPAT	16686.630	0.009	0.002	0.539

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

Todos los módulos cumplen con la tolerancia de cierre de 2 PPM exigida en las Especificaciones Técnicas y Topográficas de DOH, validando de esta forma la Red Geodésica Primaria.

El resultado de ajuste de la red primaria, teniendo fija la coordenada geodésica y altura elipsoidal del vértice SPAT, entrega los siguientes valores de coordenadas y alturas geodésicas junto con las coordenadas proyectadas en UTM para la red geodésica primaria.

CUADRO 3-13: COORDENADAS AJUSTADAS GEODÉSICAS-SIRGAS, RED PRIMARIA VILAMA

Coordenadas Geodésicas			
Punto	Latitud	Longitud	Altura (m)
VI-03	S22°53'30.62469"	W68°10'14.13319"	2494.033
VIL-1	S22°52'58.04523"	W68°11'22.92087"	2570.256
VIL-2	S22°54'10.74745"	W68°11'54.93468"	2486.577

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

CUADRO 3-14: COORDENADAS AJUSTADAS UTM/19S-SIRGAS, RED PRIMARIA VILAMA

Coordenadas UTM HUSO 19 SIRGAS			
Punto	Este (m)	Norte (m)	Elevación Ortométrica (m)
VI-03	585068.600	7468213.892	2455.957
VIL-1	583114.228	7469226.673	2532.196
VIL-2	582189.874	7466995.952	2448.664

Fuente: Elaboración propia desde TBC.

Redes Geodésicas Secundarias

A continuación, se presentan los esquemas y resultados del procesamiento de las líneas bases de cada una de las redes secundarias.

La red secundaria 01 de STC San Pedro está compuesta por 7 monolitos, la vinculación se inicia en el vértice G7 y finaliza en el G5, ambos pertenecientes a la red primaria San Pedro. El esquema de medición de la red se presenta a continuación:

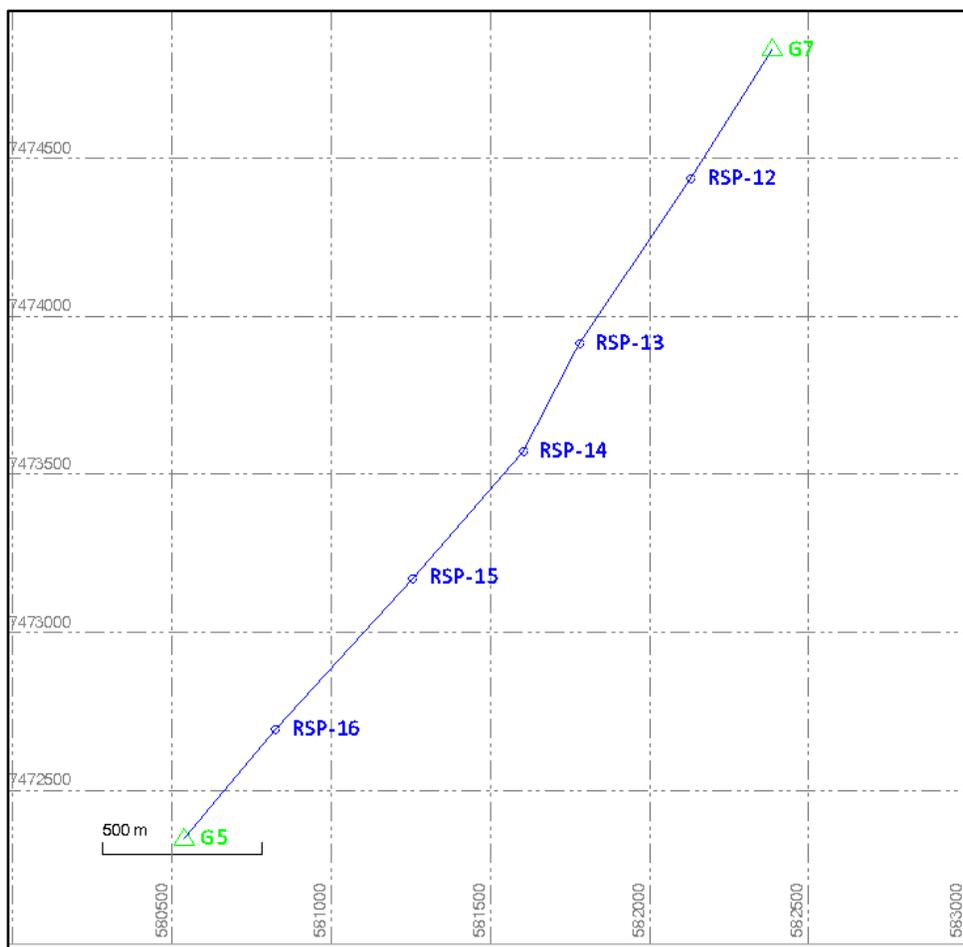


FIGURA 3-21: ESQUEMA RED SECUNDARIA 01 SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia desde TBC

A modo de control en el ajuste de la Red Secundaria 01, primero se fijó sólo el vértice G7 de la red primaria, con el fin de verificar el transporte de coordenadas hacia el vértice G5. Las diferencias en coordenadas respecto a la red primaria San Pedro se presentan a continuación:

CUADRO 3-15: VERIFICACIÓN TRANSPORTE DE COORDENADAS DE LA RED SECUNDARIA 01

Vértice	Diferencia Coordenada UTM		Diferencia Altura Elipsoidal
	Este (m)	Norte (m)	
G5	0.002	0.000	0.001

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

Las diferencias en coordenadas planimétricas y altimétricas presentan valores aceptables en relación a la precisión interna de la red de PRs, se procedió a realizar el ajuste de la red y fijar los vértices G7 y G5 con las coordenadas de la red primaria, luego se procesaron las líneas bases y se obtuvieron las coordenadas que se presentan a continuación:

CUADRO 3-16: COORDENADAS AJUSTADAS SIRGAS-RED SECUNDARIA 01 SAN PEDRO

ID	Latitud	Longitud	Altura (m)	Este UTM (m)	Norte UTM (m)	Elevación Ortométrica (m)
G5	S22°51'17.05832"	W68°12'54.03503"	2537.729	580534.598	7472346.221	2499.562
G7	S22°49'55.65650"	W68°11'49.62190"	2571.953	582383.951	7474839.564	2533.588
RSP-12	S22°50'08.86054"	W68°11'58.47051"	2568.529	582129.528	7474434.891	2530.198
RSP-13	S22°50'25.91210"	W68°12'10.68071"	2560.075	581778.665	7473912.414	2521.784
RSP-14	S22°50'37.03833"	W68°12'16.81182"	2555.826	581602.070	7473571.210	2517.560
RSP-15	S22°50'50.10463"	W68°12'28.86394"	2549.217	581256.407	7473171.251	2510.984
RSP-16	S22°51'05.74936"	W68°12'43.98902"	2542.511	580822.760	7472692.461	2504.318

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

La red secundaria 02 de STC San Pedro está compuesta por 12 monolitos, la vinculación se inicia en el vértice RSP-17 y finaliza en el RSP-26, ambos pertenecientes a la red primaria San Pedro. El esquema de medición de la red se presenta a continuación:

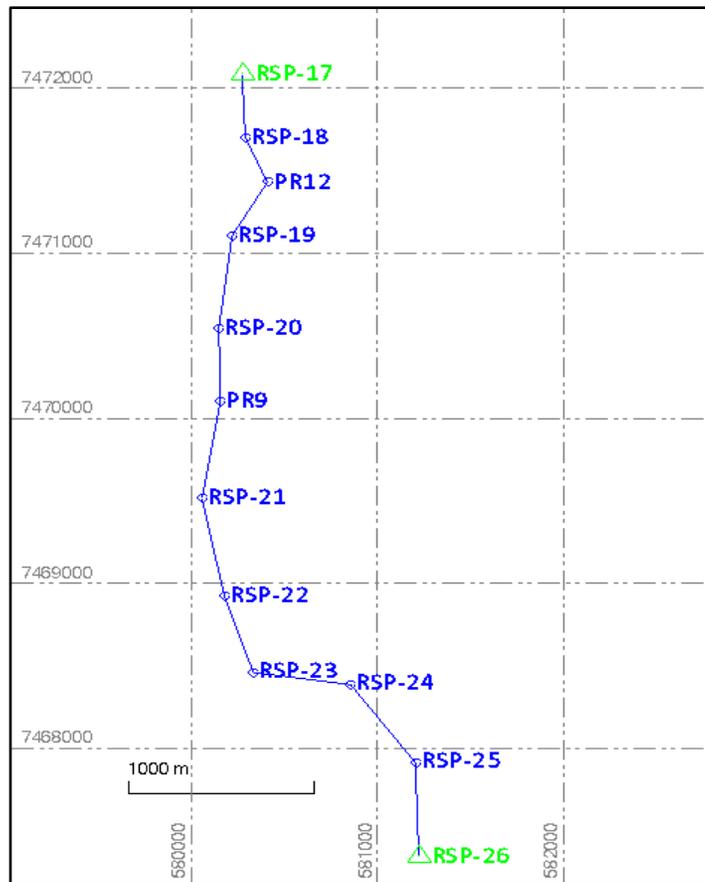


FIGURA 3-22: ESQUEMA RED SECUNDARIA 02 SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia desde TBC

A modo de control en el ajuste de la Red Secundaria 02, primero se fijó sólo el vértice RSP-17 de la red primaria, con el fin de verificar el transporte de coordenadas hacia el vértice RSP-26. Las diferencias en coordenadas respecto a la red primaria San Pedro se presentan a continuación:

CUADRO 3-17: VERIFICACIÓN TRANSPORTE DE COORDENADAS DE LA RED SECUNDARIA 02

Vértice	Diferencia Coordenada UTM		Diferencia Altura Elipsoidal
	Este (m)	Norte (m)	
RSP-26	-0.014	0.017	-0.011

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

Las diferencias en coordenadas planimétricas y altimétricas presentan valores aceptables en relación a la precisión interna de la red de PRs, se procedió a realizar el ajuste de la red y fijar los vértices RSP-17 y RSP-16 con las coordenadas de la red primaria, luego se procesaron las líneas bases y se obtuvieron las coordenadas que se presentan a continuación:

CUADRO 3-18: COORDENADAS AJUSTADAS SIRGAS-RED SECUNDARIA 02 SAN PEDRO

ID	Latitud	Longitud	Altura (m)	Este UTM (m)	Norte UTM (m)	Elevación Ortométrica (m)
PR9	S22°52'30.20730"	W68°13'06.85989"	2512.498	580157.177	7470098.728	2474.468
PR12	S22°51'46.97193"	W68°12'58.27569"	2528.234	580408.853	7471426.979	2490.125
RSP-17	S22°51'25.67534"	W68°13'03.14022"	2533.301	580273.700	7472082.615	2495.156
RSP-18	S22°51'38.19569"	W68°13'02.47384"	2528.672	580290.648	7471697.496	2490.549
RSP-19	S22°51'57.51078"	W68°13'04.84321"	2521.847	580219.976	7471103.888	2483.760
RSP-20	S22°52'15.82045"	W68°13'07.23677"	2516.717	580148.783	7470541.201	2478.663
RSP-21	S22°52'49.22818"	W68°13'10.20616"	2506.971	580058.727	7469514.313	2468.976
RSP-22	S22°53'08.51441"	W68°13'05.89625"	2500.212	580178.386	7468920.582	2462.247
RSP-23	S22°53'23.47907"	W68°13'00.33949"	2497.764	580334.268	7468459.556	2459.820
RSP-24	S22°53'25.79892"	W68°12'42.00988"	2491.625	580856.134	7468385.431	2453.673
RSP-25	S22°53'41.06971"	W68°12'29.72091"	2487.959	581203.745	7467913.952	2450.023
RSP-26	S22°53'59.62330"	W68°12'28.94408"	2481.950	581222.809	7467343.280	2444.045

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

La red secundaria 03 de STC San Pedro está compuesta por 11 monolitos, la vinculación se inicia en el vértice PSP-9 y finaliza en el RSP-36, ambos pertenecientes a la red primaria San Pedro. El esquema de medición de la red se presenta a continuación:

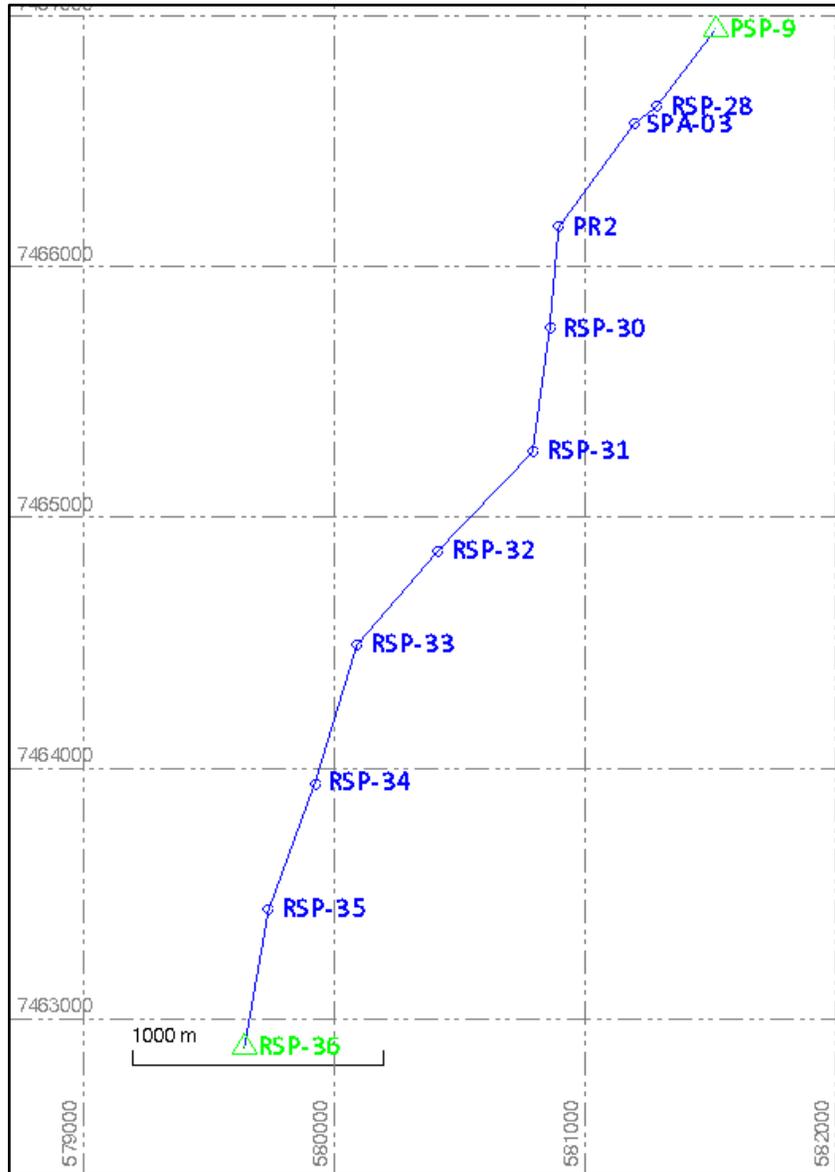


FIGURA 3-23: ESQUEMA RED SECUNDARIA 03 SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia desde TBC

A modo de control en el ajuste de la Red Secundaria 03, primero se fijó sólo el vértice PSP9 de la red primaria, con el fin de verificar el transporte de coordenadas hacia el vértice RSP-36. Las diferencias en coordenadas respecto a la red primaria San Pedro se presentan a continuación:

CUADRO 3-19: VERIFICACIÓN TRANSPORTE DE COORDENADAS DE LA RED SECUNDARIA 03

Vértice	Diferencia Coordenada UTM		Diferencia Altura Elipsoidal
	Este (m)	Norte (m)	
RSP-36	0.006	0.018	0.021

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

Las diferencias en coordenadas planimétricas y altimétricas presentan valores aceptables en relación a la precisión interna de la red de PRs, se procedió a realizar el ajuste de la red y fijar los vértices PSP-9 y RSP-36 con las coordenadas de la red primaria, luego se procesaron las líneas bases y se obtuvieron las coordenadas que se presentan a continuación:

CUADRO 3-20: COORDENADAS AJUSTADAS SIRGAS-RED SECUNDARIA 03 SAN PEDRO

ID	Latitud	Longitud	Altura (m)	Este UTM (m)	Norte UTM (m)	Elevación Ortométrica (m)
PR2	S22°54'38.27489"	W68°12'40.24891"	2486.845	580894.366	7466156.411	2449.009
PSP-9	S22°54'12.50424"	W68°12'18.45953"	2480.464	581519.375	7466945.561	2442.572
RSP-28	S22°54'22.54428"	W68°12'26.64928"	2491.477	581284.393	7466638.072	2453.606
RSP-30	S22°54'51.43747"	W68°12'41.43158"	2477.740	580858.505	7465751.821	2439.926
RSP-31	S22°55'07.43072"	W68°12'43.72010"	2462.491	580790.679	7465260.352	2424.703
RSP-32	S22°55'20.31263"	W68°12'56.88426"	2457.654	580413.573	7464866.215	2419.895
RSP-33	S22°55'32.55886"	W68°13'08.14788"	2456.551	580090.727	7464491.331	2418.818
RSP-34	S22°55'50.62833"	W68°13'13.98238"	2450.354	579921.589	7463936.547	2412.651
RSP-35	S22°56'07.07499"	W68°13'20.35026"	2445.585	579737.534	7463431.745	2407.911
RSP-36	S22°56'24.90840"	W68°13'23.66104"	2441.867	579640.338	7462883.837	2404.221
SPA-03	S22°54'24.85645"	W68°12'29.83516"	2493.257	581193.249	7466567.457	2455.393

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

La red secundaria 04 de STC San Pedro está compuesta por 11 monolitos, la vinculación se inicia en el vértice RSP-37 y finaliza en el RSP-44, ambos pertenecientes a la red primaria San Pedro. El esquema de medición de la red se presenta a continuación:

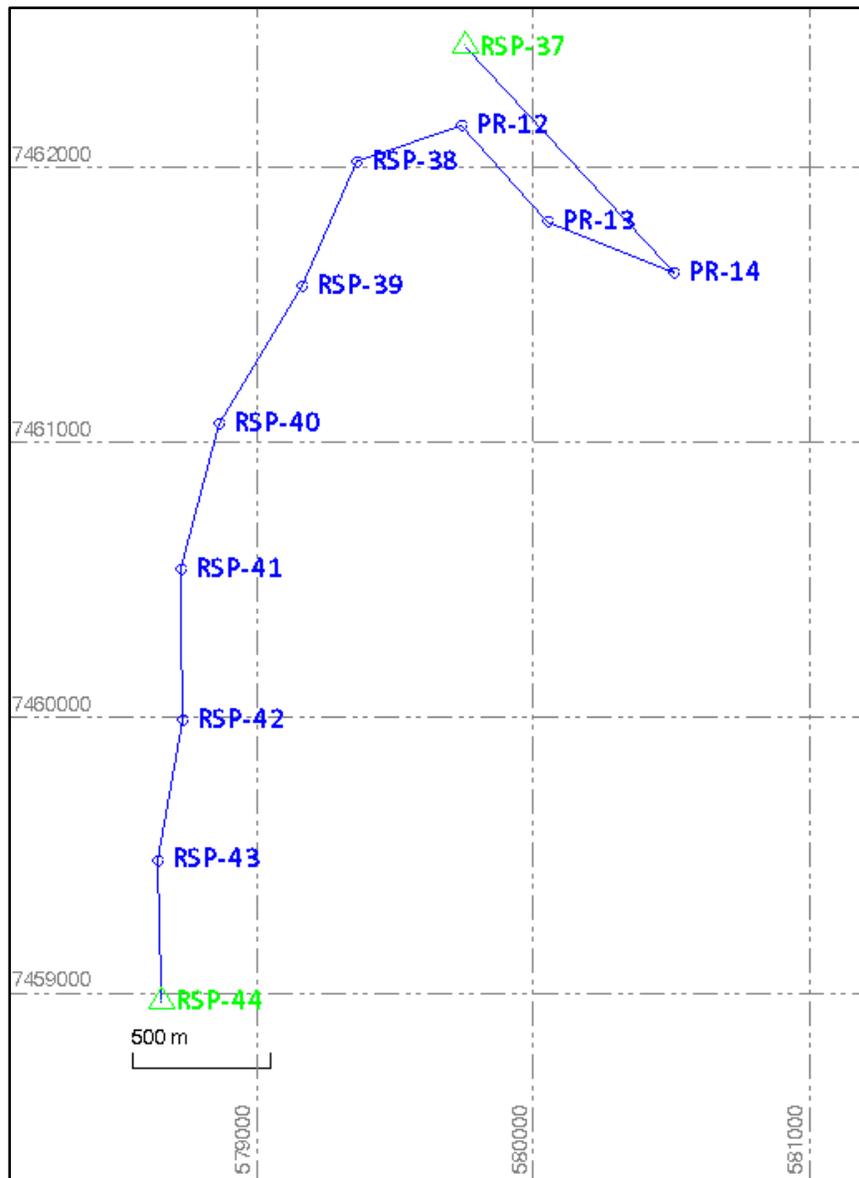


FIGURA 3-24: ESQUEMA RED SECUNDARIA 04 SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia desde TBC

A modo de control en el ajuste de la Red Secundaria 04, primero se fijó sólo el vértice de la red primaria RSP-37, con el fin de verificar el transporte de coordenadas hacia el vértice RSP-44. Las diferencias en coordenadas respecto a la red primaria San Pedro se presentan a continuación:

CUADRO 3-21: VERIFICACIÓN TRANSPORTE DE COORDENADAS DE LA RED SECUNDARIA 04

Vértice	Diferencia Coordenada UTM		Diferencia Altura Elipsoidal
	Este (m)	Norte (m)	
RSP-44	-0.001	0.006	0.010

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

Las diferencias en coordenadas planimétricas y altimétricas presentan valores aceptables en relación a la precisión interna de la red de PRs, se procedió a realizar el ajuste de la red y fijar los vértices RSP-37 y RSP-44 con las coordenadas de la red primaria, luego se procesaron las líneas bases y se obtuvieron las coordenadas que se presentan a continuación:

CUADRO 3-22: COORDENADAS AJUSTADAS SIRGAS-RED SECUNDARIA 04 SAN PEDRO

ID	Latitud	Longitud	Altura (m)	Este UTM (m)	Norte UTM (m)	Elevación Ortométrica (m)
PR-12	S22°56'48.78393"	W68°13'20.07223"	2437.340	579738.667	7462149.084	2399.727
PR-13	S22°57'00.10571"	W68°13'09.04299"	2436.611	580050.930	7461799.254	2399.009
PR-14	S22°57'05.98972"	W68°12'52.88180"	2435.390	580510.224	7461615.857	2397.786
RSP-37	S22°56'39.48530"	W68°13'19.60692"	2439.111	579753.432	7462434.962	2401.485
RSP-38	S22°56'53.07337"	W68°13'33.34408"	2435.782	579359.989	7462019.172	2398.183
RSP-39	S22°57'07.79574"	W68°13'40.21873"	2432.710	579161.821	7461567.464	2395.136
RSP-40	S22°57'24.16933"	W68°13'50.70346"	2429.409	578860.591	7461065.515	2391.865
RSP-41	S22°57'41.33254"	W68°13'55.50652"	2425.840	578721.050	7460538.433	2388.323
RSP-42	S22°57'59.21690"	W68°13'55.15771"	2423.669	578728.106	7459988.406	2386.177
RSP-43	S22°58'15.69856"	W68°13'58.21871"	2420.556	578638.293	7459482.023	2383.087
RSP-44	S22°58'32.42782"	W68°13'57.62974"	2418.065	578652.375	7458967.481	2380.618

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

La Red Secundaria Vilama está compuesta por 7 monolitos, la vinculación se inicia en el vértice VIL-2 y finaliza en el VI-03, ambos pertenecientes a la Red Primaria Vilama. El esquema de medición de la red se presenta a continuación:

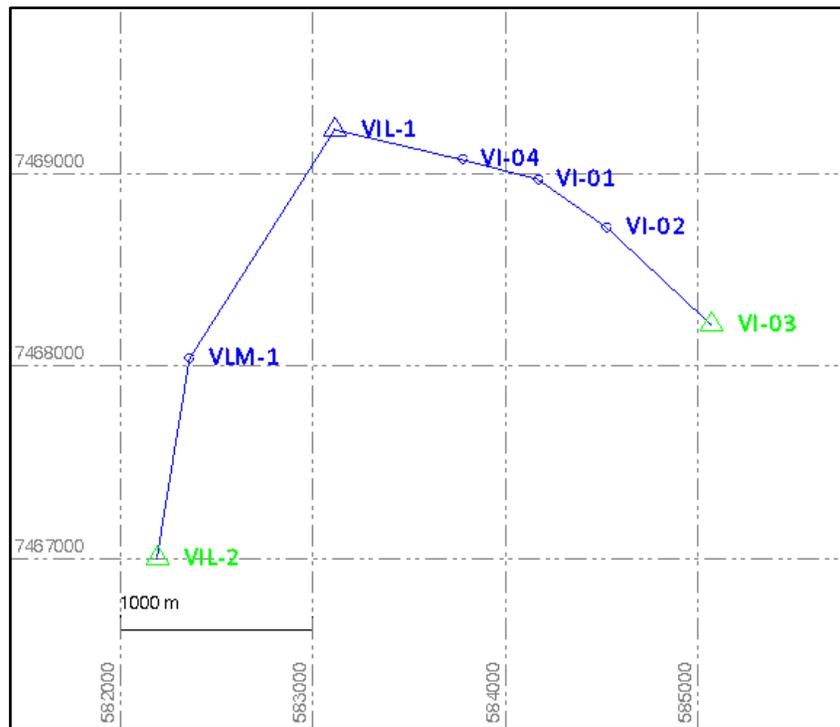


FIGURA 3-25: ESQUEMA RED SECUNDARIA VILAMA

Fuente: Elaboración Propia desde TBC

A modo de control en el ajuste de la Red Secundaria Vilama, primero se fijó sólo el vértice VIL-2 de la red primaria, con el fin de verificar el transporte de coordenadas hacia el vértice VIL-1 y VI-03. Las diferencias en coordenadas respecto a la red primaria Vilama se presentan a continuación:

CUADRO 3-23: VERIFICACIÓN TRANSPORTE DE COORDENADAS DE LA RED SECUNDARIA VILAMA

Vértice	Diferencia Coordenada UTM		Diferencia Altura Elipsoidal (m)
	Norte (m)	Este (m)	
VIL-1	-0.006	-0.004	0.003
VI-03	-0.014	-0.007	-0.002

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

Las diferencias en coordenadas planimétricas y altimétricas presentan valores aceptables en relación a la precisión interna de la red de PRs, se procedió a realizar el ajuste de la red y fijar los vértices VIL-1, VIL-2 y VI-03 con las coordenadas de la red primaria, luego se procesaron las líneas bases y se obtuvieron las coordenadas que se presentan a continuación:

CUADRO 3-24: COORDENADAS AJUSTADAS SIRGAS-RED SECUNDARIA VILAMA

ID	Latitud	Longitud	Altura (m)	Este UTM (m)	Norte UTM (m)	Elevación Ortométrica (m)
VI-01	S22°53'06.18507"	W68°10'45.94162"	2518.774	584166.507	7468970.528	2480.692
VI-02	S22°53'14.33699"	W68°10'33.23172"	2509.641	584527.25	7468717.821	2471.559
VI-03	S22°53'30.62469"	W68°10'14.13319"	2494.033	585068.600	7468213.892	2455.957
VI-04	S22°53'02.99384"	W68°10'59.72023"	2534.797	583774.455	7469070.845	2496.725
VIL-1	S22°52'58.04523"	W68°11'22.92087"	2570.256	583114.228	7469226.673	2532.196
VIL-2	S22°54'10.74745"	W68°11'54.93468"	2486.577	582189.874	7466995.952	2448.665
VLM-1	S22°53'36.83142"	W68°11'49.16097"	2510.42	582360.051	7468038.029	2472.447

Fuente: Elaboración propia desde procesamiento con TBC

3.2.4.6. Transformación a Coordenadas Planas Topográficas

La proyección UTM presenta distorsiones en las distancias, que no la hacen adecuada para desarrollar proyectos de ingeniería, DOH dispone de un procedimiento de “aplanamiento de coordenadas”, que logra establecer un circuito de reducción considerando las deformaciones asociadas a la proyección UTM, logrando obtener coordenadas topográficas sin estas distorsiones, es decir, coordenadas sobre la superficie terrestre con un origen en una coordenada UTM.

Dando cumplimiento a las ETTDOH_2021, se realizó la reducción a coordenadas planas topográficas con origen UTM. En el proceso de reducción, para el STC San Pedro, se definió como punto de origen el PR PSP9 y como calaje el PR RSP-26, ambos pertenecientes a la red primaria y ubicados aproximadamente en el centro del STC San Pedro. Luego fueron definidos 3 circuitos de reducción de coordenadas. El primero desde PSP9 siguiendo el sentido de avance de PRs hacia el norte, el segundo desde PSP9 en sentido de avance de PRs hacia el sur sin considerar los PRs PR-13 y PR-14, mientras que el tercer circuito se definió con la finalidad de incluir a los PRs PR-13 y PR-14. Todos los circuitos manteniendo el mismo punto de origen PSP9 y calaje RSP-26.

En relación a la reducción a coordenadas topográficas para el STC Vilama, se definió como punto de origen el PR VIL-2 y como calaje el PR VLM-1. El PR VIL-2 pertenece a la red primaria Vilama y está ubicado en el extremo oeste de la red de PRs. Para la reducción fue definido solo 1 circuito que inicia en VIL-2 siguiendo el sentido de avance de la red hasta finalizar en VI-03.

Reducción a Coordenadas Planas Topográficas STC San Pedro

A continuación, se presentan los esquemas de circuitos utilizados en el proceso de reducción a coordenadas topográficas para la red de PRs del STC San Pedro.

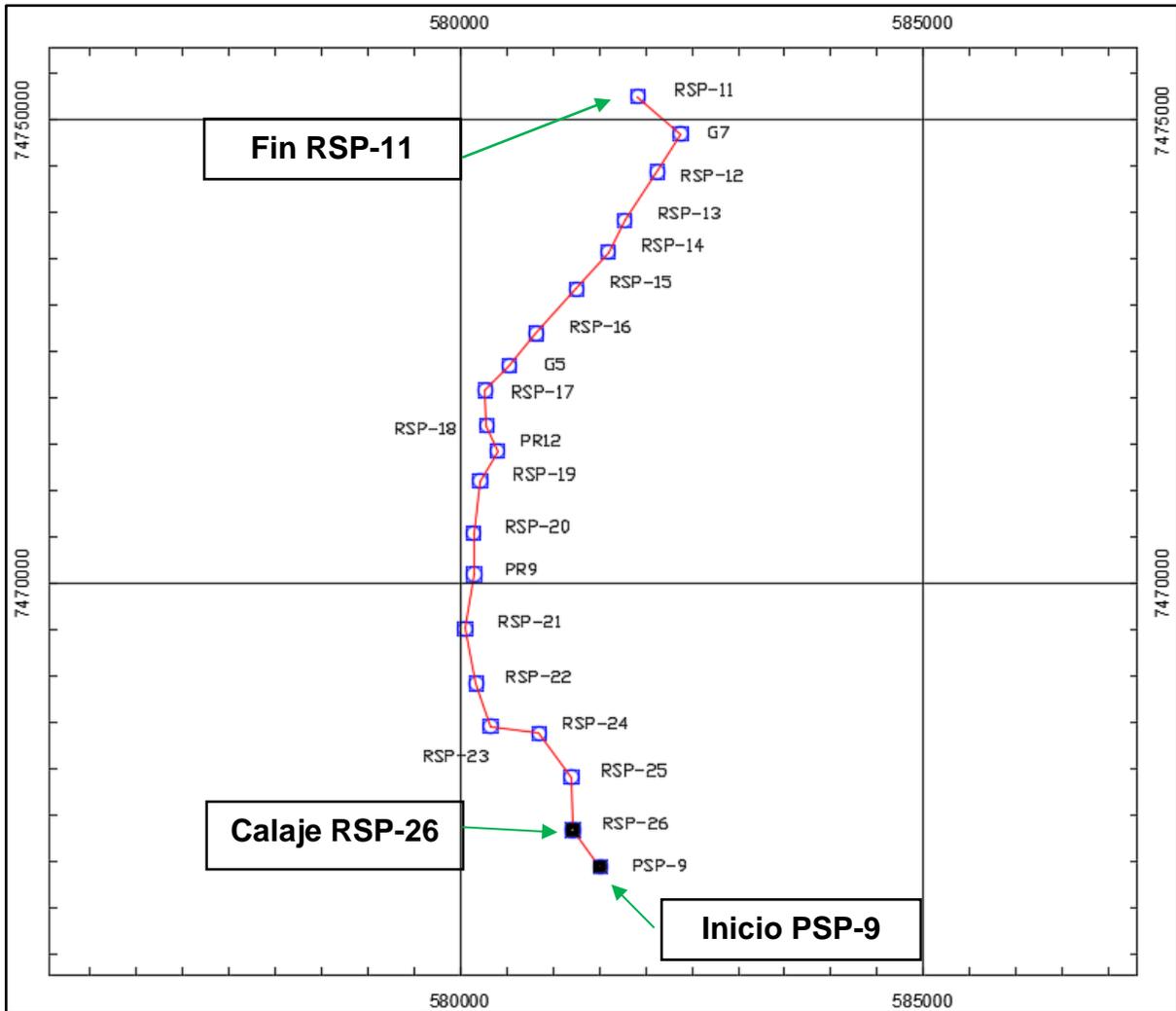


FIGURA 3-26: ESQUEMA DE REDUCCIÓN CIRCUITO 01 STC SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

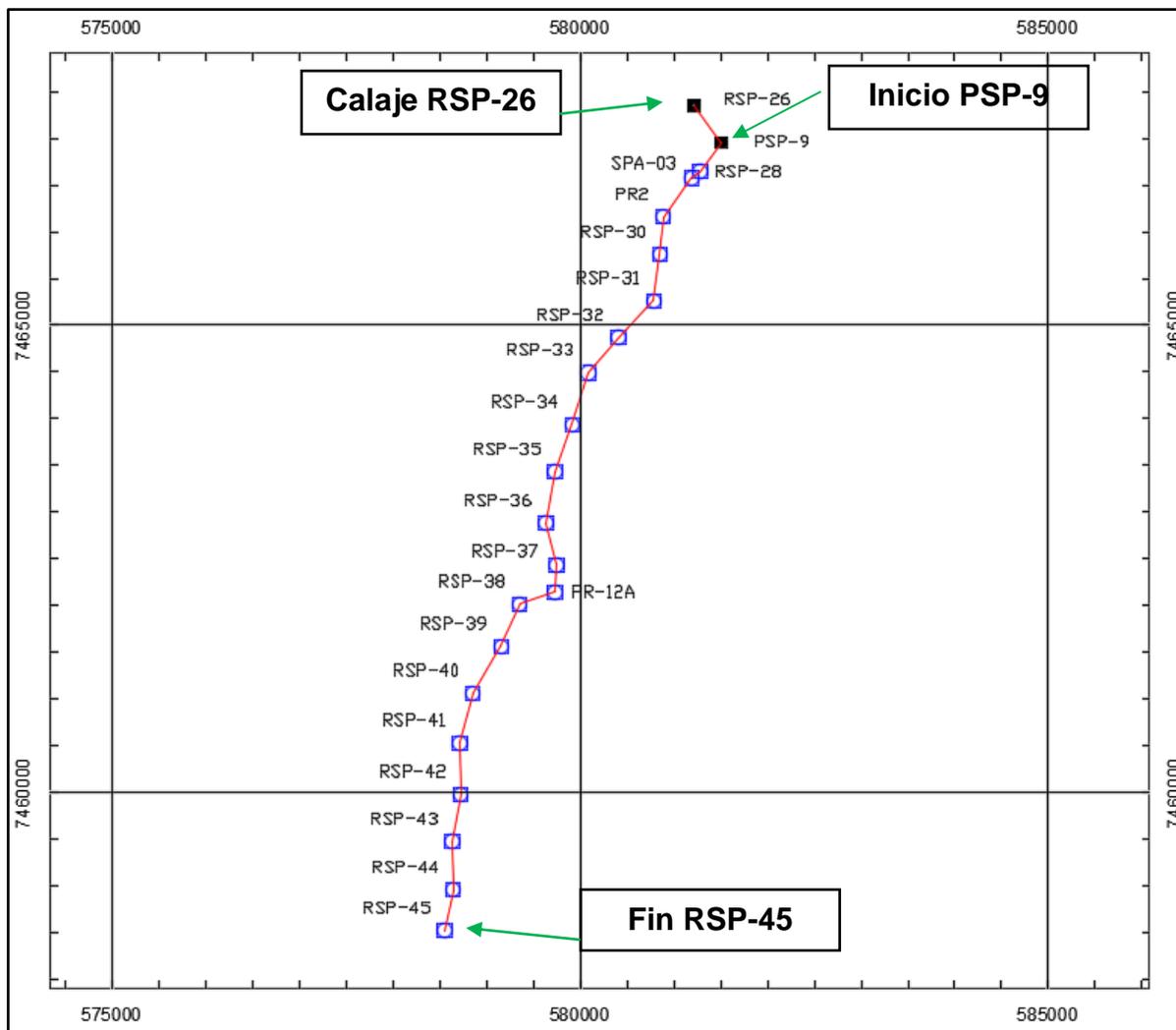


FIGURA 3-27: ESQUEMA DE REDUCCIÓN CIRCUITO 02 STC SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

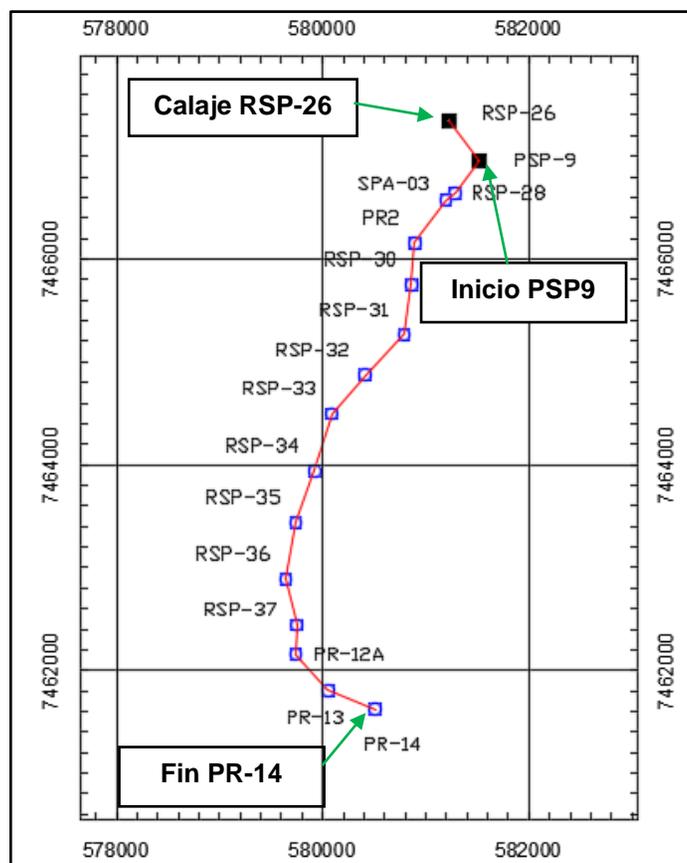


FIGURA 3-28: ESQUEMA DE REDUCCIÓN CIRCUITO 03 STC SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

Con el origen, la orientación y circuito ya definido, se fijó como latitud media de la zona de trabajo, el paralelo 22.86° S para el circuito 01 y el paralelo 22.94° S para los circuitos 02 y 03, luego se realizaron las transformaciones según esquemas indicados y se generó el listado de coordenadas planas topográficas con origen UTM para cada circuito. Las planillas de transformación de todos los circuitos se presentan en Anexo digital 3-2-10 de este documento.

A continuación, se presenta el resultado de la reducción de coordenadas UTM a coordenadas planas topográficas de los 3 circuitos realizados.

CUADRO 3-25: COORDENADAS PLANAS TOPOGRÁFICAS CON ORIGEN UTM- CIRCUITO 01 SAN PEDRO

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS		
Punto	Este (m)	Norte (m)
PSP-9	581519.375	7466945.561
RSP-26	581222.601	7467343.560
RSP-25	581203.524	7467914.632
RSP-24	580855.669	7468386.442
RSP-23	580333.435	7468460.620
RSP-22	580177.443	7468921.971
RSP-21	580057.700	7469516.122
PR9	580156.220	7470100.951
RSP-20	580147.820	7470543.738
RSP-19	580219.064	7471106.824
PR12	580408.075	7471430.144
RSP-18	580289.786	7471700.854
RSP-17	580272.826	7472086.247
G5	580533.910	7472350.040
RSP-16	580822.277	7472696.527
RSP-15	581256.233	7473175.657
RSP-14	581602.143	7473575.901
RSP-13	581778.864	7473917.348
RSP-12	582129.977	7474440.197
G7	582384.582	7474845.159
RSP-11	581920.630	7475253.015

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3-26: COORDENADAS PLANAS TOPOGRÁFICAS CON ORIGEN UTM- CIRCUITO 02 SAN PEDRO

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS		
Punto	Este (m)	Norte (m)
PSP-9	581519.375	7466945.561
RSP-26	581222.601	7467343.560
RSP-28	581284.229	7466637.856
SPA-03	581193.021	7466567.191
PR2	580893.928	7466155.856
RSP-30	580858.042	7465750.982
RSP-31	580790.169	7465259.168
RSP-32	580412.799	7464864.755
RSP-33	580089.727	7464489.609
RSP-34	579920.471	7463934.437

**CUADRO 3-26: COORDENADAS PLANAS
TOPOGRÁFICAS CON ORIGEN UTM- CIRCUITO 02 SAN
PEDRO**

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS		
Punto	Este (m)	Norte (m)
RSP-35	579736.288	7463429.282
RSP-36	579639.024	7462880.991
RSP-37	579752.197	7462431.803
PR-12A	579737.422	7462145.725
RSP-38	579358.480	7462015.722
RSP-39	579160.174	7461563.699
RSP-40	578858.734	7461061.399
RSP-41	578719.095	7460533.949
RSP-42	578726.157	7459983.539
RSP-43	578636.281	7459476.802
RSP-44	578650.373	7458961.902
RSP-45	578557.347	7458525.567

Fuente: Elaboración propia.

**CUADRO 3-27: COORDENADAS PLANAS TOPOGRÁFICAS CON ORIGEN UTM- CIRCUITO 03 SAN
PEDRO**

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS		
Punto	Este (m)	Norte (m)
PSP-9	581519.375	7466945.561
RSP-26	581222.601	7467343.560
RSP-28	581284.229	7466637.856
SPA-03	581193.021	7466567.191
PR2	580893.928	7466155.856
RSP-30	580858.042	7465750.982
RSP-31	580790.169	7465259.168
RSP-32	580412.799	7464864.755
RSP-33	580089.727	7464489.609
RSP-34	579920.471	7463934.437
RSP-35	579736.288	7463429.282
RSP-36	579639.024	7462880.991
RSP-37	579752.197	7462431.803
PR-12A	579737.422	7462145.725
PR-13	580049.903	7461795.651
PR-14	580509.517	7461612.127

Fuente: Elaboración propia.

Reducción a Coordenadas Planas Topográficas STC Vilama

A continuación, se presentan el esquema de circuito utilizado en el proceso de reducción a coordenadas topográficas para la red de PRs del STC Vilama.

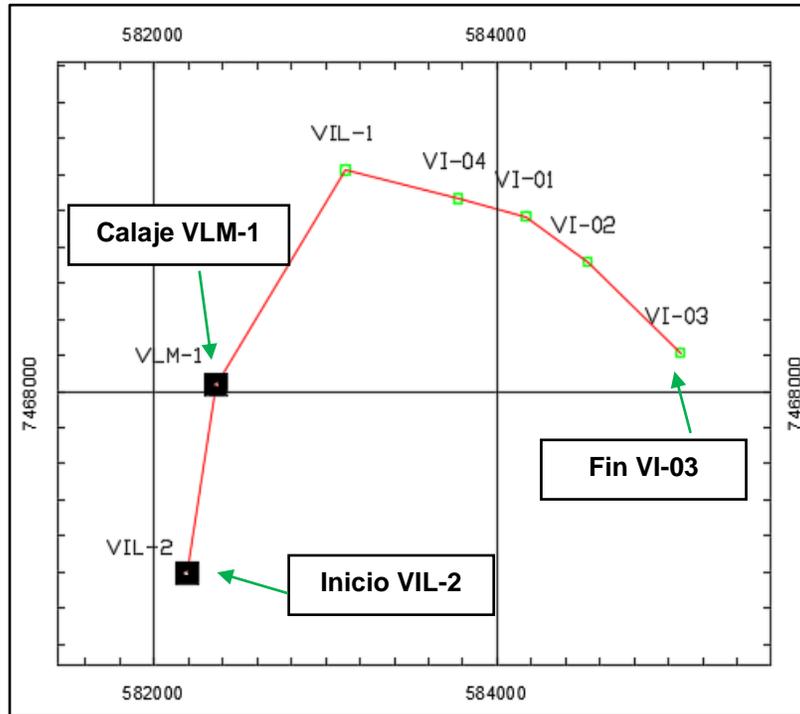


FIGURA 3-29: ESQUEMA DE REDUCCIÓN STC VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

Con el origen, la orientación y circuito definido, se fijó como latitud media de la zona de trabajo, el paralelo 22.89° S, luego se realizaron las transformaciones según esquema indicado y se generó el listado de coordenadas planas topográficas con origen UTM para toda la red de PRs del STC Vilama. Las planillas de transformación de todos los circuitos se presentan en anexo digital 3-2-10 de este documento.

A continuación, se presenta el resultado de la reducción de coordenadas UTM a coordenadas planas topográficas de STC Vilama.

CUADRO 3-28: COORDENADAS PLANAS TOPOGRÁFICAS CON ORIGEN UTM- STC VILAMA

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS		
Punto	Este (m)	Norte (m)
VIL-2	582189.874	7466995.952
VLM-1	582360.172	7468038.760
VIL-1	583114.884	7469228.245
VI-04	583775.578	7469072.307
VI-01	584167.906	7468971.919
VI-02	584528.902	7468719.035
VI-03	585070.629	7468214.755

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Nivelaciones

3.2.5.1. Generalidades

La nivelación del STC San Pedro y del STC Vilama, se realizó tomando como origen altimétrico la cota geométrica del pilar de nivelación PN 4B-69 perteneciente a la red IGM y se definieron dos circuitos de nivelaciones geométricas. El primer circuito se realizó partiendo desde PN 4B-69, midiendo desniveles entre cada PR consecutivo hasta llegar al RSP-11 en el sector norte de la zona de interés. De la misma forma el segundo circuito se realizó midiendo desde PN 4B-69 hasta llegar al PR RSP-45 al sur de la zona de interés. La elevación referida al nivel medio del mar (n.m.m), utilizada para este proyecto, fue:

CUADRO 3-29: COTA PN 4B-69

PR	COTA GEOMÉTRICA (m)
PN 4B-69	2.437,913

Fuente: Certificado IGM.



FOTOGRAFÍA 3-8: REGISTRO FOTOGÁFICO DE PN 4B-69

Fuente: Elaboración Propia

3.2.5.2. Nivelación Geométrica

Monumentación

La monumentación de puntos altimétricos del proyecto se efectuó de acuerdo a las normas (ETT-DOH 2021) y los Términos de Referencia del proyecto.

La red de puntos altimétricos es coincidente con los PRs del STC del proyecto, y corresponde a un conjunto de 50 monolitos en total, distribuidos en la zona de interés de San Pedro y Vilama respectivamente. Todos los monolitos están materializados con una base de hormigón de 30x30x50 cm con una barra de fierro en su centro.

Métodos de Medición

Se realizó una nivelación geométrica de precisión entre cada par de PR con el método “Nivelación simple con cierre”.

Todas las mediciones fueron realizadas con un nivel digital marca SOKKIA modelo SDL50 con zoom óptico de 28x, se utilizaron miras de fibra de vidrio desmontables y código de barra normal y para puntos de cambios se ocuparon pizones metálicos.



FOTOGRAFÍA 3-9: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE NIVELACIÓN

Fuente: Elaboración Propia



FOTOGRAFÍA 3-10: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE NIVELACIÓN

Fuente: Elaboración Propia



FOTOGRAFÍA 3-11: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE NIVELACIÓN

Fuente: Elaboración Propia

Tolerancias

Las nivelaciones se realizaron considerando las tolerancias de las ETT-DOH 2021 para nivelaciones de precisión, la cual estipula cierres de $\pm 0.005 * \text{Raíz}(K)$, donde K corresponde a la distancia recorrida ida y vuelta expresada en kilómetros.

Compensación

Una vez verificada la tolerancia del error de cierre, la compensación fue realizada por partes iguales en cada tramo nivelado.

A continuación, se detallan los esquemas y resultados de las cotas obtenidas para los PRs del proyecto.

Nivelación Geométrica STC San Pedro

La red de monolitos perteneciente al STC San Pedro se realizó en 2 circuitos de nivelación. Ambos se inician en el PN 4B-69, el primer circuito hacia el sector norte del área de interés, pasando por todos los PR's hasta llegar al RSP-11 y el segundo circuito partiendo desde PN 4B-69 hacia el sur del área de interés hasta llegar al RSP-45.

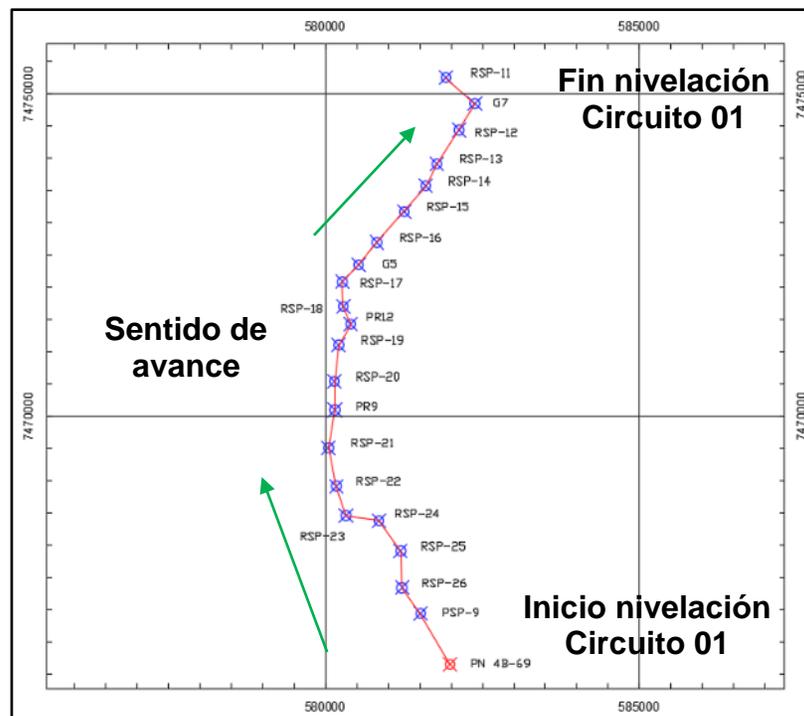


FIGURA 3-30: ESQUEMA DE NIVELACIÓN CIRCUITO 01 STC SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

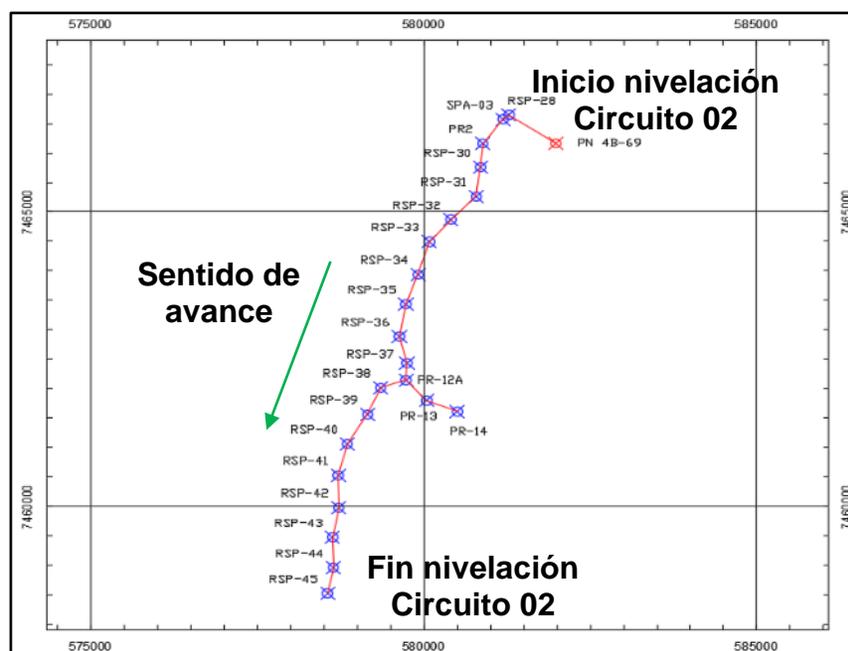


FIGURA 3-31: ESQUEMA DE NIVELACIÓN CIRCUITO 02 STC SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

Calculados los desniveles geométricos, se obtuvieron las cotas de cada vértice para todos los PRs del STC San Pedro, trasladando la cota desde PN 4B-69. A continuación, se presentan los desniveles y cotas obtenidas en cada circuito de nivelación, los registros pueden ser consultados en los anexos digitales de nivelación de este documento.

CUADRO 3-30: RESUMEN NIVELACIÓN GEOMÉTRICA CIRCUITO 01 SAN PEDRO

DESDE	HASTA	DESNIVEL		ERROR	DESNIVEL PROMEDIO (m)	PR	COTA (m)
		IDA	VUELTA	DE CIERRE (m)			
ORIGEN							2437.913
PN 4B-69	PSP9	2.9863	-2.9865	-0.0002	2.9864	PSP9	2440.899
PSP9	RSP-26	1.4610	-1.4613	-0.0003	1.4612	RSP-26	2442.361
RSP-26	RSP-25	5.9855	-5.9774	0.0081	5.9815	RSP-25	2448.342
RSP-25	RSP-24	3.6126	-3.6157	-0.0031	3.6142	RSP-24	2451.956
RSP-24	RSP-23	6.1708	-6.1744	-0.0036	6.1726	RSP-23	2458.129
RSP-23	RSP-22	2.4191	-2.4210	-0.0019	2.4201	RSP-22	2460.549
RSP-22	RSP-21	6.7204	-6.7213	-0.0009	6.7209	RSP-21	2467.270
RSP-21	PR9	5.4856	-5.4889	-0.0033	5.4873	PR9	2472.757
PR9	RSP-20	4.1913	-4.1933	-0.0020	4.1923	RSP-20	2476.949
RSP-20	RSP-19	5.0782	-5.0825	-0.0043	5.0804	RSP-19	2482.030
RSP-19	PR12	6.3570	-6.3580	-0.0010	6.3575	PR12	2488.387
PR12	RSP-18	0.4109	-0.4105	0.0004	0.4107	RSP-18	2488.798
RSP-18	RSP-17	4.6170	-4.6189	-0.0019	4.6180	RSP-17	2493.416
RSP-17	G5	4.4005	-4.4013	-0.0008	4.4009	G5	2497.817

CUADRO 3-30: RESUMEN NIVELACIÓN GEOMÉTRICA CIRCUITO 01 SAN PEDRO

DESDE	HASTA	DESNIVEL		ERROR	DESNIVEL PROMEDIO (m)	PR	COTA (m)
		IDA	VUELTA	DE CIERRE (m)			
G5	RSP-16	4.7386	-4.7394	-0.0008	4.7390	RSP-16	2502.556
RSP-16	RSP-15	6.6616	-6.6640	-0.0024	6.6628	RSP-15	2509.218
RSP-15	RSP-14	6.5747	-6.5716	0.0031	6.5732	RSP-14	2515.792
RSP-14	RSP-13	4.2174	-4.2237	-0.0063	4.2206	RSP-13	2520.012
RSP-13	RSP-12	8.3916	-8.3924	-0.0008	8.3920	RSP-12	2528.404
RSP-12	G7	3.3865	-3.3885	-0.0020	3.3875	G7	2531.792
G7	RSP-11	7.6634	-7.6668	-0.0034	7.6651	RSP-11	2539.457

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3-31: RESUMEN NIVELACIÓN GEOMÉTRICA CIRCUITO 02 SAN PEDRO

DESDE	HASTA	DESNIVEL		ERROR	DESNIVEL PROMEDIO (m)	PR	COTA (m)
		IDA	VUELTA	DE CIERRE (m)			
ORIGEN							2437.913
PN 4B-69	RSP-28	14.0250	-14.0288	-0.0038	14.0269	RSP-28	2451.940
RSP-28	SPA03	1.7790	-1.7786	0.0004	1.7788	SPA03	2453.719
SPA03	PR2	-6.3783	6.3814	0.0031	-6.3799	PR2	2447.339
PR2	RSP-30	-9.0737	9.0777	0.0040	-9.0757	RSP-30	2438.263
RSP-30	RSP-31	-15.220	15.2181	-0.0027	-15.2195	RSP-31	2423.044
RSP-31	RSP-32	-4.8049	4.8005	-0.0044	-4.8027	RSP-32	2418.241
RSP-32	RSP-33	-1.0708	1.0688	-0.0020	-1.0698	RSP-33	2417.171
RSP-33	RSP-34	-6.1663	6.1671	0.0008	-6.1667	RSP-34	2411.005
RSP-34	RSP-35	-4.7314	4.7334	0.0020	-4.7324	RSP-35	2406.272
RSP-35	RSP-36	-3.6619	3.6614	-0.0005	-3.6617	RSP-36	2402.610
RSP-36	RSP-37	-2.7352	2.7338	-0.0014	-2.7345	RSP-37	2399.876
RSP-37	PR12A	-1.7545	1.7528	-0.0017	-1.7537	PR12A	2398.122
PR12A	PR13	-0.7157	0.7190	0.0033	-0.7174	PR13	2397.405
PR13	PR14	-1.2225	1.2267	0.0042	-1.2246	PR14	2396.180
PR12A	RSP-38	-1.5356	1.5371	0.0015	-1.5364	RSP-38	2396.586
RSP-38	RSP-39	-3.0412	3.0413	0.0001	-3.0413	RSP-39	2393.545
RSP-39	RSP-40	-3.2670	3.2686	0.0016	-3.2678	RSP-40	2390.277
RSP-40	RSP-41	-3.5437	3.5405	-0.0032	-3.5421	RSP-41	2386.735
RSP-41	RSP-42	-2.1473	2.1491	0.0018	-2.1482	RSP-42	2384.587
RSP-42	RSP-43	-3.0920	3.0878	-0.0042	-3.0899	RSP-43	2381.497
RSP-43	RSP-44	-2.4615	2.4600	-0.0015	-2.4608	RSP-44	2379.036
RSP-44	RSP-45	-2.6850	2.6833	-0.0017	-2.6842	RSP-45	2376.352

Fuente: Elaboración propia.

Nivelación Geométrica STC Vilama

La red de monolitos perteneciente al STC Vilama se realizó en 1 circuito de nivelación, éste se inició en el PN 4B-69 hacia el PR VIL-2 siguiendo el sentido de avance que muestra la figura 2-18.

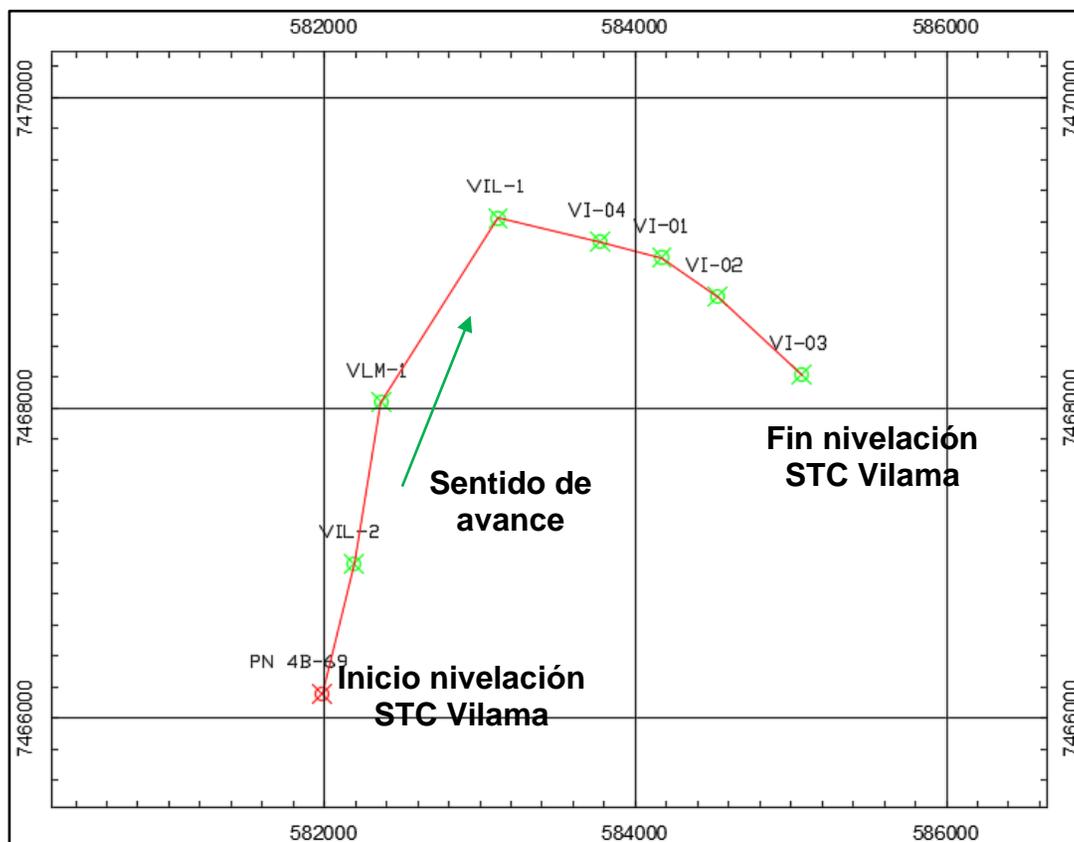


FIGURA 3-32: ESQUEMA DE NIVELACIÓN STC VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

Calculados los desniveles geométricos, se obtuvieron las cotas de cada vértice para todos los PRs del STC Vilama, trasladando la cota desde PN 4B-69. A continuación, se presentan los desniveles y cotas obtenidas, los registros pueden ser consultados en los anexos digitales de nivelación de este documento.

CUADRO 3-32: RESUMEN NIVELACIÓN GEOMÉTRICA STC VILAMA

DESDE	HASTA	DESNIVEL		ERROR DE CIERRE (m)	DESNIVEL PROMEDIO (m)	PR	COTA (m)
		IDA	VUELTA				
ORIGEN							2437.913
PN 4B-69	VIL-2	9.0884	-9.0835	0.0049	9.0860	VIL-2	2446.999
VIL-2	VLM1	23.7689	-23.7718	-0.0029	23.7704	VLM1	2470.769
VLM-1	VIL01	59.7167	-59.7243	-0.0076	59.7205	VIL-1	2530.490
VIL-1	VI04	-35.476	35.4695	-0.0072	-35.4731	VI04	2495.017
VI04	VI01	-16.020	16.0223	0.0015	-16.0216	VI01	2478.995
VI01	VI02	-9.1284	9.1328	0.0044	-9.1306	VI02	2469.865
VI02	VI03	-15.599	15.5988	-0.0002	-15.5989	VI03	2454.266

Fuente: Elaboración propia.

3.2.6. Conclusiones

El informe presenta todos los trabajos topográficos ejecutados a la fecha, incluyendo el vuelo y vectorización LIDAR.

De la densificación de la red geodésica:

Se realizó la construcción de PRs para los sectores de los ríos San Pedro y Vilama, vértices que permitieron apoyar todos los trabajos topográficos. Sus valores de coordenadas se calcularon a partir de los valores informado por los vértices de referencias del IGM

De las redes secundarias:

Se construyeron y midieron todos los PRs propuesto en la planificación de trabajos topográficos, ajustándose a las normas técnicas, todos los informes asociados a vinculaciones se pueden revisar en los anexos.

De la nivelación geométrica:

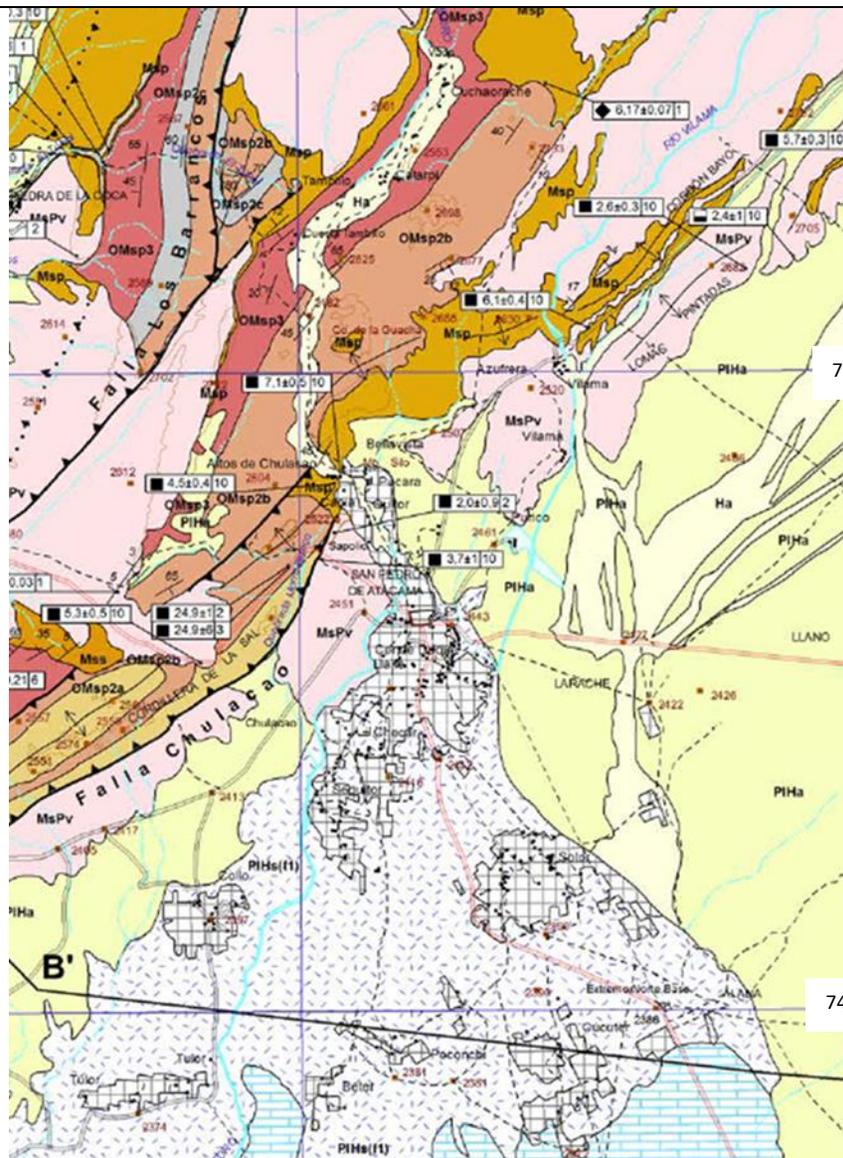
Se completaron todos los circuitos planificados para el transporte altimétrico, logrando calcular cotas geométricas para todos los PRs que conforman el sistema de transporte de coordenadas STC San Pedro y Vilama, alcanzando una distancia total de 31 Km. de nivelación.

3.3. Mecánica de Suelos para Caracterización de Sedimentos

3.3.1. Marco Geológico General

3.3.1.1. Marco Geológico

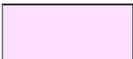
Las rocas más antiguas presentes en el área de la carta San Pedro de Atacama corresponden a una sucesión de lavas andesíticas, tobas, y areniscas (Formación Tuina) depositadas en un ambiente volcánico continental durante el permotriásico. En suave discordancia angular afloran sucesiones de rocas estratificadas sedimentarias continentales del Albiano al Maastrichtiano-Daniano (**formaciones Tonel, Purilactis y Barros Arana**). Hacia el oeste y en la parte suroeste de la carta se reconoce, en discordancia angular, sobre las formaciones Tonel y Tuina, una sucesión estratificada de conglomerados con registro desde el Eoceno hasta el Oligoceno Temprano (**Formación Loma Amarilla**). A partir del Oligoceno tardío, en discordancia angular, sobre las secuencias cretácicas y paleógenas, se registra una actividad sedimentaria continental de ambiente aluvial proximal (**Formación Tambores**) que lateralmente pasan a facies distales, con desarrollo de una cuenca evaporítica (Formación San Pedro) y volcanismo subordinado, que constituyen el Grupo Paciencia. El registro geológico del Neógeno en la región, en discordancia angular y erosiva sobre todas las unidades anteriores, se constituye principalmente de unidades sedimentarias continentales de ambiente aluvial (**formaciones Chiquinaputo, Gravas de Hollingworth, Gaínza, Gravas del Llano de la Paciencia y Depósitos Aluviales Mioceno a Plioceno**) y fluvial (**Formación El Túnel**) en las que se intercalan una serie de flujos ignimbríticos del Mioceno Superior a Plioceno (Grupo San Bartolo: ignimbritas Artola, Sifón, Pelón y Puripicar). Durante el Plioceno, en el sector centro-oriental del área de estudio, en discordancia erosiva sobre el Grupo San Bartolo y la Formación San Pedro, se acumuló una sucesión volcano-sedimentaria en un ambiente lacustre cercano a un área de actividad volcánica con aportes de material aluvial distal y fluvial proveniente del noreste (**Formación Vilama**) y flujos ignimbríticos provenientes del este (Ignimbritas Chaxas y Cajón). Durante el Mioceno a Pleistoceno, en el extremo noreste del área de la carta San Pedro de Atacama, se desarrollaron conos volcánicos (volcanes Miocenos y Pliocenos) y se depositaron coladas de lavas Pleistocenas provenientes del este. La estructura más sobresaliente de la zona de estudio es un sinclinal que se extiende a lo largo de toda el área con un rumbo NNE (Sinclinal de Barros Arana). Este sinclinal involucra principalmente a las formaciones cretácicas y, secundariamente, a los grupos Paciencia y San Bartolo en sus bordes. Secundariamente, el sector noroccidental de los Cerros de Tuina se encuentra intensamente deformado y cortado por sistemas de fallas inversas de alto ángulo de orientación NS a NNE y NNO. *Al este se observa un relieve elongado NNE caracterizado por estructuras de alto ángulo, pliegues y domos de Sal (Cordillera de la Sal) que afecta las formaciones San Pedro, Vilama, el Túnel y al Grupo San Bartolo.* Los yacimientos minerales del área la carta San Pedro de Atacama se concentran en dos distritos mineros: San Bartolo y Tuina. El Distrito Minero San Bartolo se ubica entre las quebradas de Palicaye y Río Grande, al norte de San Pedro de Atacama. Son yacimientos estratoligados de cobre con un enriquecimiento supergeno hospedados en areniscas de la Formación San Pedro. El Distrito Minero de Tuina, por su parte, se ubica en los Cerros de Tuina hospedado en la Formación Tuina. Incluye dos tipos de yacimientos con mineralización primaria y supergena de cobre: los estratoligados y los vetiformes. Los yacimientos estratoligados se encuentran controlados por estructuras regionales orientadas NS y por la presencia de areniscas de la Formación Tuina. Los yacimientos vetiformes, por su parte, están relacionados a vetas con orientación principal NS, alineadas con las fallas inversas regionales con orientación NS.



7470000

7460000

MsPv



Formación Vilama (Mioceno Superior-Plioceno).

Sucesión sedimentaria continental compuesta por calizas y areniscas calcáreas con intercalaciones de areniscas de grano medio y color gris; lutitas, limolitas y areniscas de color pardo claro a pardo rojizo claro, laminadas, con cemento calcáreo o salino. Incluye intercalaciones de caliza silícea, kieselgur y ceniza volcánica. Hacia el techo comprende conglomerados de caliza y gravas poco consolidadas de color gris pardusco claro, con clastos subredondeados de andesita, riolita y pómez. Se dispone en discordancia angular sobre las ignimbritas miocenas y la Formación San Pedro.

Msp



Ignimbrita Pelón (ca. 6 Ma).

Toba riódacítica gris clara, débil a fuertemente soldada, con cristales de biotita orientados, cuarzo, plagioclasa y algunos fragmentos líticos. Los líticos son alargados y subredondeados y corresponden a vidrio riolítico, ceniza riolítica y esquirlas de vidrio. Se dispone discordante sobre la Ignimbrita Yerba Buena e infrayace, en discordancia por erosión, a la ignimbrita Puripicar y Chaxas.

Ha	Depósitos aluviales y fluviales recientes (Holoceno). Gravas, arenas y limos asociados al drenaje activo y esporádico con desarrollo local de terrazas.
PIHa	Depósitos aluviales (Pleistoceno-Holoceno). Depósitos de bloques y gravas sueltos de mala selección, expuestos principalmente a lo largo del Llano de la Paciencia y en quebradas y depresiones locales sobre la Cordillera de Domeyko. También incluye los depósitos aluviales presentes a lo largo de la Precordillera.

FIGURA 3-33: GEOLOGÍA DEL ÁREA SAN PEDRO DE ATACAMA, REGIÓN DE ANTOFAGASTA, ESCALA 1:100.000

Fuente: CARTA GEOLÓGICA DE CHILE, SERIE GEOLOGÍA BÁSICA, No. 171, 2014".

3.3.1.2. Geología Local

El área de estudio se ubica en la II Región de Antofagasta, entre los 22°81' y los 22.99°S y los 68.135° y 68°25'O y comprende la zona donde, se ubica el oasis de San Pedro de Atacama, parte de la cordillera de la Sal y el borde oriental de la cordillera de Domeyko incluyendo los cerros de Purilactis y el llano de la Paciencia. Su acceso desde Santiago une la ciudad de Calama con San Pedro de Atacama, la que cruza el área de la Carta con el mismo nombre desde su extremo NO hasta el sector SE de la misma.

En las cercanías de la Localidad de San Pedro, principalmente en la caja del río con el mismo nombre y Río Vilama, se puede apreciar la abundante presencia de depósitos de recientes, del cuaternario, que podrían ser utilizados para la ejecución de obras de rellenos, enrocados y gaviones, agrupados geológicamente como Depósitos Aluviales (PIHa) y depósitos Fluviales (Ha), la descripción detallada técnica de estos materiales se entrega en los acápite siguientes. Se descarta la utilización Depósitos Salinos PIHs, en la ejecución de las obras antes descritas:

Depósitos Aluviales PIHa (Pleistoceno-Holoceno)

Corresponden a depósitos detríticos de gravas, arenas y limos provenientes de las unidades litológicas cercanas, que se observan en la vertiente oeste del cordón de Barros Arana, en el llano de la Paciencia, en los flancos de la cordillera de la Sal, y al oeste a lo largo de la precordillera. Generalmente, están constituidos por facies de bloques y gravas, limos salinos y arenas. Estos depósitos son pobremente consolidados, forman abanicos en planta, con pendientes de 10°, con buena expresión en el Llano de la Paciencia, donde se encuentran aparentemente basculados por estructuras y seccionados por los cauces de las quebradas actuales (Ha). Estos depósitos se interdigitan con los depósitos salinos del Llano de la Paciencia y Salar de Atacama. En el área de estudio, el espesor expuesto de esta unidad es del orden de los 2 m. Litología. Consta de bloques, gravas y ripios sueltos de mala selección expuestos, de color oscuro, principalmente a lo largo del llano de la Paciencia y en quebradas y depresiones locales sobre la cordillera de Domeyko. Las gravas son esencialmente oligomícticas, de mala consolidación y selección, con clastos del sustrato cercano (areniscas, limolitas, escasos clastos de

granitoides y riolitas) de la Formación Purilactis y de la Formación Loma Amarilla. Además, lo constituyen gravas, ripios y arenas de origen fluvial asociados al río San Pedro, y arenas gruesas a finas y limos, parcialmente cementados por evaporitas. Estos depósitos se engranarían con los depósitos actuales del salar de Atacama, y se habrían formado por procesos aluviales y de corrientes de barro.

Depósitos Fluviales Ha (Holoceno)

Depósitos Salinos PIHs

Unidad descrita por Marinovic y Lahsen (1984) dentro del Salar de Atacama, en el sector sur del área de estudio como limos y arcillas de color pardo que tienen un alto contenido de yeso y/o cloruro. Los Depósitos Salinos tienen continuidad hacia el sur, en el área Salar de Atacama y donde cubren un 66% del área. En este sector, Ramírez y Gardeweg (1982) la definieron como una unidad informal que incluye cubiertas de 33 evaporitas en costras, con sedimentos de deltas y niveles freáticos someros. De acuerdo con las unidades definidas el área Salar de Atacama (Becerra et al., en prep.) Las facies que se exhiben en este sector corresponden a depósitos de aluvios y cloruro en forma de delta PIHs(f1) y depósitos aluviales y salinos PIHs(d2). Depósitos de aluvios y cloruros en forma de delta PIHs(f1). Descrita por Moraga et al. (1974), como costras de limos salinos, que incluye costras detríticas de color pardo oscuro, en el área Salar de Atacama, definición que posteriormente Ramírez y Gardeweg (1982) mantuvo. Esta unidad aflora en las cercanías del pueblo San Pedro y del río San Pedro, dentro del Salar de Atacama, y consta de depósitos de gravas, ripios y arenas con costras salinas mientras que hacia el sur, en el área Salar de Atacama, está constituida por facies arenosas finas y de limos, y costras de halita (Becerra et al., 2014). Las facies aluviales de esta unidad se deben a las precipitaciones estivales de la zona, que aumentan el aporte hídrico del río San Pedro, y en conjunto con las condiciones de aridez, favorece la precipitación de cloruros y sulfatos que se interdigita con las facies fluviales en pequeñas cuencas endorreicas (Marinovic y Lahsen, 1984). Depósitos aluviales y salinos PIHs(d2). Definida como Limos Salinos por Ramírez y Gardeweg (1982), que en este trabajo se define además como depósitos de arenas gruesas a finas y limos, parcialmente cementadas por evaporitas, y con abundante vegetación. Además, se observan costras detríticas, frágiles, con un microrelieve rugoso, con cavidades de disolución y estructuras de expansión. Suelen estar cubiertas por una capa sulfatada y clorurada, de color blanco a gris. En área de estudio, presentan un color café a gris mientras que al sur un color blanco y gris, debido a la disminución del aporte de material terrígeno hacia el centro del Salar de Atacama. En el área Salar de Atacama, estos depósitos se presentan en una franja NS, en el flanco occidental de la Cordillera de la Sal, y en el borde este y sureste del Salar de Atacama (Becerra et al., 2014). Representarían un ambiente transicional entre los depósitos distales del río San Pedro y los depósitos evaporíticos del río San Pedro.

3.3.2. Mecánica de Suelos

3.3.2.1. Generalidades

En el este Acápite se detallan los trabajos realizados respecto de las calicatas para análisis granulométrico en cauces de la zona de estudio, de acuerdo con lo solicitado en los Términos de Referencia.

El objetivo de las calicatas, es caracterizar el material del lecho de los cauces en análisis y características granulométricas.

Se realiza un total de 20 prospecciones, 18 en el río San Pedro y 2 en el río Vilama, indicadas en el Cuadro 3-33, Cuadro 3-34, Figura 3-34 y Figura 3-35, respectivamente.

Los anexos que acompañan este capítulo son:

- Anexo 3-3-1 KMZ
- Anexo 3-3-2 Certificados Calicatas
- Anexo 3-3-3 Fotografías Calicatas
- Anexo 3-3-4 Cálculo de Granulometrías

CUADRO 3-33: DESCRIPCIÓN DE LAS CALICATAS REALIZADAS RÍO SAN PEDRO

N°	Código	Descripción de la ubicación
1	CA-SP-01	Calicata en río San Pedro al inicio del tramo de estudio
2	CA-SP-02	Calicata en río San Pedro representativa del sector de descarga de la quebrada Cuchabrache y cercano a bocatoma Patilla.
3	CA-SP-03	Calicata en río San Pedro en sector depositación sedimentos y existencia de gaviones en mal estado.
4	CA-SP-04	Sector de depositación de sedimentos. En inicio de obra de gaviones existente y en ejecución
5	CA-SP-05	Cerca de bocatoma sector de Guacha zona de depositación de sedimentos.
6	CA-SP-06	Sector entre dos bocatomas
7	CA-SP-07	Sector de estrechamiento del río cercano a bocatoma y zona de depositación de sedimentos
8	CA-SP-08	Cercano a badén y bocatoma es representativa de este tramo del río.
9	CA-SP-09	Aguas arriba del puente San Pedro de Atacama
10	CA-SP-10	Aguas arriba de pretilos de encauzamiento hacia obras de cruce paso Sico
11	CA-SP-11	Carca de un badén y representativo del tramo del río. Sector de defensa con gaviones ribera izquierda
12	CA-SP-12	Zona de curvas del río, bocatoma y representativo del tramo.
13	CA-SP-13	Zona de depositación de sedimentos y curva.
14	CA-SP-14	Badén representativo de acceso a Sector de Sequitor
15	CA-SP-15	Zona de depositación de sedimentos y representativa de sector de descarga de cauce secundario
16	CA-SP-16	Aguas arriba de obra de arte principal de cruce de río San Pedro ruta paso Sico
17	CA-SP-17	Calicata en río San Pedro en sector de sifón canal Vilama
18	CA-SP-18	Calicata representativa del tramo final del río San Pedro

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 3-34: UBICACIÓN CALICATAS RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

CUADRO 3-34: DESCRIPCIÓN DE LAS CALICATAS REALIZADAS RÍO VILAMA

N°	Código	Descripción de la ubicación
1	CA-VI-01	Inicio del tramo de estudio representativa del sector.
2	CA-VI-02	Cercana a cruce de río y representativa del tramo final de estudio de río Vilama.

Fuente: Elaboración Propia.

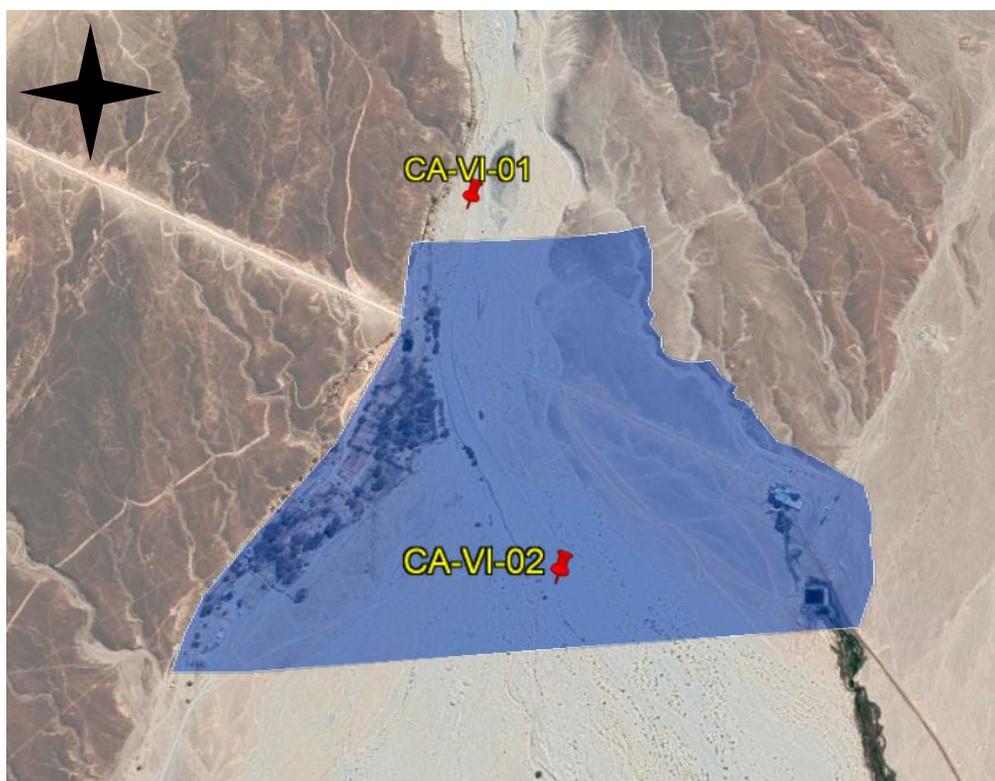


FIGURA 3-35: UBICACIÓN CALICATAS RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2.2. Resultados de las Prospecciones

En el Cuadro 3-35 se presenta el resumen de las calicatas realizadas y sus resultados.

CUADRO 3-35: RESUMEN DE CALICATAS

Calicata	Coordenadas		Cauce	Horizonte	Profundidad alcanzada	Muestras	Observaciones
	UTM WGS84						
	Este	Norte			(m)		
CA SP 01	581973	7475159	San Pedro	0,00-0,40 0,40-2,50	2,50	2	No se pudo excavar por presencia de napa a los 1,5m
CA SP 02	582302	7474958	San Pedro	0,00-1,40 1,40-3,40 3,40-4,00	4,00	3	
CA SP 03	582036	7474289	San Pedro	0,00-1,60 1,60-2,50	2,50	2	No se pudo excavar por presencia de napa a los 1,5m
CA SP 04	581741	7473964	San Pedro	0,00-2,20 2,20-2,60	2,60	2	No se pudo excavar por presencia de napa a los 1,3m
CA SP 05	580734	7472565	San Pedro	0,00-1,30 1,30-2,00 2,00-3,00	3,00	3	No se pudo excavar por presencia de napa a los 2,5m

CUADRO 3-35: RESUMEN DE CALICATAS

Calicata	Coordenadas		Cauce	Horizonte	Profundidad alcanzada	Muestréos	Observaciones
	UTM WGS84						
	Este	Norte					
CA SP 06	580114	7470446	San Pedro	0,00-0,30 0,30-2,20	2,20	2	No se pudo excavar por presencia de napa a los 1,2m
CA SP 07	580549	7468425	San Pedro	0,00-1,20 1,20-2,70	2,70	2	No se pudo excavar por presencia de napa a los 1,5m
CA SP 08	581505	7466980	San Pedro	0,00-4,00	4,00	1	
CA SP 09	581549	7466552	San Pedro	0,00-1,40 1,40-2,00 2,00-4,00	4,00	3	
CA SP 10	580106	7462255	San Pedro	0,00-0,70 0,70-2,00 2,00-4,00	4,00	3	
CA SP 11	581167	7466034	San Pedro	0,00-0,90 0,90-1,90 1,90-3,50 3,50-4,00	4,00	4	
CA SP 12	581186	7465378	San Pedro	0,00-0,30 0,30-1,20 1,20-4,00	4,00	3	
CA SP 13	580772	7465174	San Pedro	0,00-1,20 1,20-2,70 2,70-3,50 3,50-4,00	4,00	4	
CA SP 14	580203	7464398	San Pedro	0,00-0,10 0,10-1,30 1,30-4,00	4,00	3	
CA SP 15	579927	7463437	San Pedro	0,00-0,90 0,90-1,90 1,90-3,60 3,60-4,00	4,00	4	
CA SP 16	580014	7461914	San Pedro	0,00-1,30 1,30-3,00 3,00-4,00	4,00	3	
CA SP 17	579028	7460085	San Pedro	0,00-0,40 0,40-3,00 3,00-4,00	4,00	3	
CA SP 18	578706	7458830	San Pedro	0,00-4,00	4,00	1	
CA VL 01	584270	7469130	Vilama	0,00-4,00	4,00	1	

CUADRO 3-35: RESUMEN DE CALICATAS

Calicata	Coordenadas		Cauce	Horizonte	Profundidad alcanzada	Muestras	Observaciones
	UTM WGS84						
	Este	Norte			(m)		
CA VL 02	584479	7468376	Vilama	0,00-0,60 0,60-1,30 1,30-4,00	4,00	3	

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2.3. Diámetros Característicos

Rio San Pedro

En el Cuadro 3-36 se presentan los diámetros característicos para cada una de las prospecciones, en cada uno de sus estratos, así como también el coeficiente de uniformidad (Cu), coeficiente de curvatura (Cc) y la desviación estándar (σ_g).

En el Cuadro 3-37 se presentan los porcentajes de gravas, arenas y finos de cada una de las muestras. Además, se incluye la densidad de las partículas sólidas, su límite líquido, límite plástico y su índice de plasticidad.

CUADRO 3-36: DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Prospección	Horizonte	Dm	D95	D90	D84	D60	D50	D30	D16	D10	Cu	Cc	σ_g
	m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm				
CA SP 01	0,00-0,40	1,19	7,77	5,67	0,41	0,22	0,17	0,10	0,08	0,08	2,72	0,56	2,26
CA SP 01	0,40-2,50	17,40	58,78	52,37	44,01	14,14	7,35	1,07	0,34	0,17	81,54	0,47	11,43
CA SP 02	0,00-1,40	0,29	1,00	0,42	0,35	0,18	0,13	0,08	0,08	0,08	2,19	0,46	2,10
CA SP 02	1,40-3,40	20,35	71,77	64,38	56,12	11,49	2,96	0,53	0,18	0,11	104,70	0,22	17,85
CA SP 02	3,40-4,00	23,58	71,77	64,38	56,72	27,46	5,95	0,85	0,28	0,15	184,34	0,18	14,30
CA SP 03	0,00-1,60	0,79	2,00	1,04	0,48	0,23	0,18	0,10	0,08	0,08	2,87	0,59	2,45
CA SP 03	1,60-2,50	15,04	52,37	45,73	40,00	11,04	5,74	1,38	0,57	0,35	31,61	0,49	8,35
CA SP 04	0,00-2,20	23,45	67,45	60,48	55,74	21,54	12,08	2,00	0,59	0,22	99,57	0,86	9,69
CA SP 04	2,20-2,60	18,81	65,56	56,12	46,42	15,16	8,71	1,23	0,31	0,17	86,82	0,57	12,17
CA SP 05	0,00-1,30	0,30	0,98	0,48	0,37	0,20	0,16	0,10	0,08	0,08	2,53	0,56	2,15
CA SP 05	1,30-2,00	18,23	65,56	55,21	47,05	11,22	3,47	0,46	0,11	0,08	140,31	0,23	20,76
CA SP 05	2,00-3,00	21,44	72,98	66,57	56,12	16,56	8,20	1,31	0,48	0,23	72,04	0,45	10,77
CA SP 06	0,00-0,30	5,13	20,00	14,98	10,59	2,36	1,39	0,55	0,23	0,15	16,16	0,89	6,79
CA SP 06	0,30-2,20	24,20	70,06	61,89	55,63	24,22	15,87	2,00	0,55	0,27	90,63	0,62	10,03
CA SP 07	0,00-1,20	11,95	48,43	41,30	29,82	5,00	1,62	0,39	0,12	0,08	62,50	0,37	15,69
CA SP 07	1,20-2,70	19,19	60,41	54,38	47,29	17,24	10,51	1,19	0,28	0,15	115,71	0,55	13,05
CA SP 08	0,00-4,00	20,53	71,77	64,38	56,12	12,19	4,46	0,73	0,22	0,13	96,13	0,34	15,96
CA SP 09	0,00-1,40	15,93	70,06	58,33	36,72	9,17	3,16	0,46	0,14	0,09	105,51	0,26	16,03

CUADRO 3-36: DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Prospección	Horizonte	Dm	D95	D90	D84	D60	D50	D30	D16	D10	Cu	Cc	σ_g
	m	mm	mm										
CA SP 09	1,40-2,00	0,45	1,54	0,42	0,34	0,15	0,10	0,08	0,08	0,08	1,82	0,55	2,06
CA SP 09	2,00-4,00	22,94	70,99	63,00	55,54	20,00	14,14	5,00	0,37	0,17	116,29	7,27	12,26
CA SP 10	0,00-0,70	0,82	2,00	1,64	1,29	0,49	0,35	0,19	0,12	0,10	4,82	0,71	3,24
CA SP 10	0,70-2,00	6,78	53,41	25,00	7,58	0,94	0,57	0,22	0,11	0,08	11,20	0,59	8,25
CA SP 10	2,00-4,00	0,05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	1,00	1,00	1,00
CA SP 11	0,00-0,90	1,75	6,80	4,63	2,93	1,09	0,79	0,42	0,17	0,11	9,80	1,45	4,20
CA SP 11	0,90-1,90	13,22	68,90	54,00	36,41	2,24	1,17	0,34	0,13	0,09	26,16	0,61	16,75
CA SP 11	1,90-3,50	30,80	73,46	67,45	60,80	38,33	25,00	10,55	1,60	0,42	91,25	6,91	6,16
CA SP 11	3,50-4,00	0,20	0,62	0,27	0,14	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	1,00	1,00	1,32
CA SP 12	0,00-0,30	1,69	6,10	4,21	2,99	1,11	0,78	0,37	0,15	0,10	10,74	1,19	4,44
CA SP 12	0,30-1,20	13,38	49,31	45,99	42,29	3,41	1,62	0,39	0,14	0,09	36,94	0,48	17,23
CA SP 12	1,20-4,00	27,81	72,42	65,56	56,12	30,95	21,75	7,94	1,00	0,34	90,68	5,96	7,49
CA SP 13	0,00-1,20	0,43	1,41	0,92	0,54	0,26	0,20	0,13	0,09	0,08	3,21	0,79	2,43
CA SP 13	1,20-2,70	28,08	74,57	69,51	63,89	37,72	15,16	0,81	0,26	0,16	231,64	0,11	15,63
CA SP 13	2,70-3,50	4,06	18,78	13,70	9,26	1,11	0,42	0,18	0,10	0,08	13,92	0,35	9,86
CA SP 13	3,50-4,00	26,40	73,46	67,45	61,21	29,24	13,46	0,95	0,29	0,17	174,91	0,19	14,51
CA SP 14	0,00-0,10	0,99	2,71	1,70	1,34	0,51	0,35	0,17	0,11	0,09	5,98	0,69	3,55
CA SP 14	0,10-1,30	9,80	47,29	33,14	22,36	3,16	1,31	0,40	0,17	0,12	26,11	0,41	11,38
CA SP 14	1,30-4,00	21,54	70,99	63,00	57,06	16,41	6,10	0,76	0,26	0,16	105,65	0,23	14,95
CA SP 15	0,00-0,90	14,27	70,06	59,46	36,99	4,46	1,63	0,42	0,17	0,11	40,00	0,35	14,93
CA SP 15	0,90-1,90	6,94	34,20	23,21	15,16	2,00	1,23	0,46	0,16	0,10	19,73	1,06	9,65
CA SP 15	1,90-3,60	15,64	68,90	59,46	50,00	4,23	1,87	0,48	0,18	0,12	34,95	0,45	16,52
CA SP 15	3,60-4,00	1,83	11,49	5,00	2,00	0,38	0,23	0,08	0,08	0,08	4,73	0,21	5,00
CA SP 16	0,00-1,30	0,01	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	1,00	1,00	1,00
CA SP 16	1,30-3,00	0,23	0,38	0,35	0,31	0,20	0,17	0,12	0,09	0,08	2,46	0,84	1,85
CA SP 16	3,00-4,00	0,82	1,81	1,11	0,62	0,23	0,17	0,09	0,08	0,08	2,87	0,47	2,78
CA SP 17	0,00-0,40	18,54	71,77	64,38	45,99	10,00	4,08	0,52	0,08	0,08	125,00	0,33	23,98
CA SP 17	0,40-3,00	4,90	20,00	14,14	9,48	2,28	1,41	0,59	0,24	0,14	16,40	1,11	6,26
CA SP 17	3,00-4,00	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	1,00	1,00	1,00
CA SP 18	0,00-4,00	5,07	22,36	14,86	9,12	2,76	1,64	0,60	0,24	0,14	19,33	0,90	6,23

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 3-37: PORCENTAJES DE GRAVAS, ARENAS Y FINOS

Prospección	km	Cota	Horizonte	gravas	arenas	finos	Densidad Partículas Sólidas (g/cm ³)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
		m	m	%	%	%				
CA SP 01	0	2552	0,00-0,40	0	78	22	2,710	19,2	Impracticable	NP
CA SP 01	0	2552	0,40-2,50	27	70	3	2,780	17,9	Impracticable	NP
CA SP 02	0,4	2540	0,00-1,40	0	67	33	2,700	18,5	Impracticable	NP
CA SP 02	0,4	2540	1,40-3,40	34	60	6	2,780	18,8	Impracticable	NP

CUADRO 3-37: PORCENTAJES DE GRAVAS, ARENAS Y FINOS

Prospección	km	Cota	Horizonte	gravas	arenas	finos	Densidad Partículas Sólidas (g/cm ³)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
		msnm	m	%	%	%				
CA SP 02	0,4	2540	3,40-4,00	42	54	4	2,800	19,4	Impracticable	NP
CA SP 03	1,13	2536	0,00-1,60	0	80	20	2,700	19,7	Impracticable	NP
CA SP 03	1,13	2536	1,60-2,50	23	75	2	2,810	19,6	Impracticable	NP
CA SP 04	1,57	2526	0,00-2,20	0	78	22	2,820	19,1	Impracticable	NP
CA SP 04	1,57	2526	2,20-2,60	27	70	3	2,780	19,9	Impracticable	NP
CA SP 05	3,3	2505	0,00-1,30	0	67	33	2,720	20,1	Impracticable	NP
CA SP 05	3,3	2505	1,30-2,00	34	60	6	2,760	18,6	Impracticable	NP
CA SP 05	3,3	2505	2,00-3,00	42	54	4	2,800	18,9	Impracticable	NP
CA SP 06	5,68	2484	0,00-0,30	0	80	20	2,710	18,4	Impracticable	NP
CA SP 06	5,68	2484	0,30-2,20	23	75	2	2,820	19,0	Impracticable	NP
CA SP 07	7,89	2461	0,00-1,20	36	57	7	2,780	19,5	Impracticable	NP
CA SP 07	7,89	2461	1,20-2,70	29	69	2	2,810	19,3	Impracticable	NP
CA SP 08	9,7	2445	0,00-4,00	0	77	23	2,800	19,6	Impracticable	NP
CA SP 09	10,2	2439	0,00-1,40	31	56	13	2,780	19,8	Impracticable	NP
CA SP 09	10,2	2439	1,40-2,00	32	65	3	2,700	18,6	Impracticable	NP
CA SP 09	10,2	2439	2,00-4,00	3	95	2	2,800	18,2	Impracticable	NP
CA SP 10	15,2	2404	0,00-0,70	39	59	2	2,780	18,4	Impracticable	NP
CA SP 10	15,2	2404	0,70-2,00	19	70	11	2,780	18,0	Impracticable	NP
CA SP 10	15,2	2404	2,00-4,00	30	66	4	2,700	29,0	21,8	8
CA SP 11	11	2435	0,00-0,90	32	63	5	2,780	18,7	Impracticable	NP
CA SP 11	11	2435	0,90-1,90	25	66	9	2,800	19,6	Impracticable	NP
CA SP 11	11	2435	1,90-3,50	0	57	43	2,840	19,3	Impracticable	NP
CA SP 11	11	2435	3,50-4,00	31	65	4	2,640	27,0	23,8	3
CA SP 12	11,6	2429	0,00-0,30	0	98	2	2,640	18,4	Impracticable	NP
CA SP 12	11,6	2429	0,30-1,20	10	81	9	2,810	18,8	Impracticable	NP
CA SP 12	11,6	2429	1,20-4,00	0	4	96	2,820	18,0	Impracticable	NP
CA SP 13	12	2426	0,00-1,20	0	95	5	2,780	20,6	Impracticable	NP
CA SP 13	12	2426	1,20-2,70	20	71	9	2,820	18,2	Impracticable	NP
CA SP 13	12	2426	2,70-3,50	50	46	4	2,760	20,1	Impracticable	NP
CA SP 13	12	2426	3,50-4,00	0	21	79	2,780	17,8	Impracticable	NP
CA SP 14	13	2419	0,00-0,10	0	94	6	2,740	18,4	Impracticable	NP
CA SP 14	13	2419	0,10-1,30	24	68	8	2,800	17,9	Impracticable	NP
CA SP 14	13	2419	1,30-4,00	45	52	3	2,820	18,6	Impracticable	NP
CA SP 15	14	2411	0,00-0,90	0	90	10	2,800	19,1	Impracticable	NP
CA SP 15	14	2411	0,90-1,90	47	52	1	2,780	19,6	Impracticable	NP
CA SP 15	14	2411	1,90-3,60	2	86	12	2,800	18,9	Impracticable	NP
CA SP 15	14	2411	3,60-4,00	42	56	2	2,720	21,6	Impracticable	NP
CA SP 16	15,6	2402	0,00-1,30	0	92	8	2,710	26,0	20,8	5

CUADRO 3-37: PORCENTAJES DE GRAVAS, ARENAS Y FINOS

Prospección	km	Cota	Horizonte	gravas	arenas	finos	Densidad Partículas Sólidas (g/cm ³)	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
		msnm	m	%	%	%				
CA SP 16	15,6	2402	1,30-3,00	13	84	3	2,700	26,0	22,0	4
CA SP 16	15,6	2402	3,00-4,00	33	65	2	2,740	20,9	Impracticable	NP
CA SP 17	17,8	2388	0,00-0,40	21	74	5	2,760	21,1	Impracticable	NP
CA SP 17	17,8	2388	0,40-3,00	9	84	7	2,800	18,7	Impracticable	NP
CA SP 17	17,8	2388	3,00-4,00	24	72	4	2,660	29,0	21,7	7
CA SP 18	19	2382	0,00-4,00	0	70	30	2,800	18,2	Impracticable	NP

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 3-36 se presenta un perfil longitudinal del río san pedro que muestra la variación del diámetro característico D50 y D90 a lo largo su recorrido.

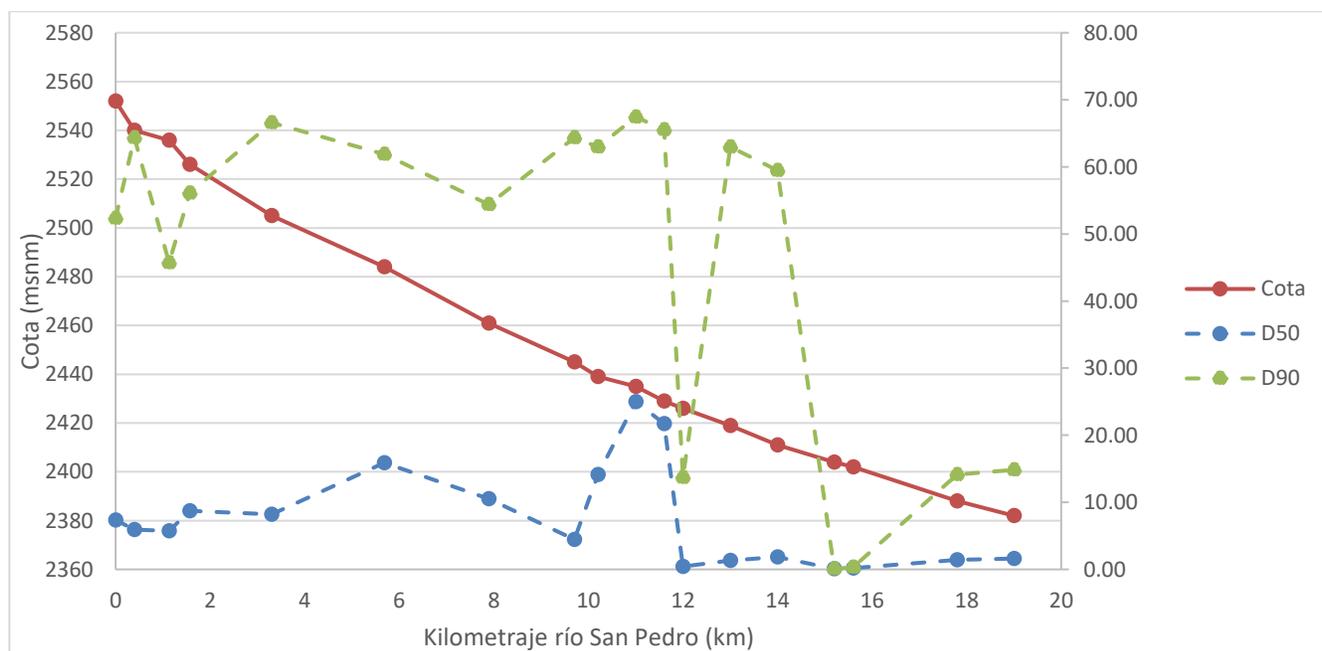


FIGURA 3-36: VARIACIÓN DIÁMETROS D50 Y D90 – RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

Río Vilama

En el Cuadro 3-38 se presentan los diámetros característicos para cada una de las prospecciones, en cada uno de sus estratos, así como el coeficiente de uniformidad (Cu), coeficiente de curvatura (Cc) y la desviación estándar (σ_q). Análogamente, se presentan los porcentajes de gravas, arenas y finos. Se incluye también, la densidad de las partículas sólidas, su límite líquido, límite plástico y su índice de plasticidad.

CUADRO 3-38: CARACTERÍSTICAS CALICATAS VILAMA

Diámetro	CA VL 02	CA VL 02	CA VL 02	CA VL 01
Profundidad	0,00-0,60	0,60-1,30	1,30-4,00	0,00-4,00
Dm (mm)	28,61	1,03	8,98	27,51
D95 (mm)	73,46	3,16	63,00	75,77
D90 (mm)	67,45	1,81	30,17	71,77
D84 (mm)	60,15	1,47	17,41	67,24
D60 (mm)	32,31	0,65	1,76	28,79
D50 (mm)	22,01	0,46	1,14	15,42
D30 (mm)	6,80	0,22	0,48	1,68
D16 (mm)	1,24	0,13	0,21	0,50
D10 (mm)	0,60	0,11	0,14	0,24
Cu	53,66	6,08	12,36	119,12
Cc	2,38	0,72	0,92	0,41
σ_g	6,97	3,32	9,14	11,60
% gravas	46	0	12	43
% arenas	52	98	87	55
% finos	2	2	1	2
Densidad Partículas Sólidas (g/cm ³)	2,780	2,720	2,820	2,810
Límite Líquido (%)	18,4	17,6	17,9	18,3
Límite Plástico (%)	Impracticable	Impracticable	Impracticable	Impracticable
Índice de Plasticidad (%)	NP	NP	NP	NP

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2.4. Estratigrafía Detallada

A continuación, se presenta la estratigrafía detallada de cada una de las 20 calicatas ejecutadas.

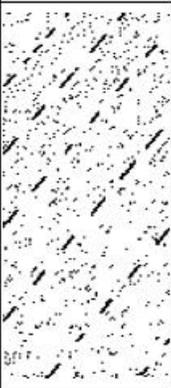
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,40		SM	ARENA LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA A MEDIA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, SE OBSERVAN BOLONES SUPERFICIALES ENTRE 13" A 50".	
2	0,40 - 2,40		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES DE TAMAÑO MÁXIMO 9" Y BOLONES DE 30" EN FONDO DE LA CALICATA.	

FIGURA 3-37: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 01

Fuente Elaboración Propia

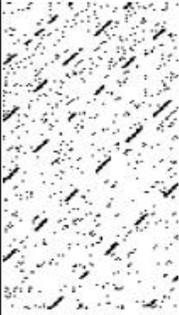
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 1,40		SM	ARENA LIMOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD MEDIA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	1,40 - 3,40		SP-SM	ARENA GRAVO LIMOSA COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA SE OBSERVAN BOLONES ENTRE 10" A 25" RAICES A RICILLAS.	
3	3,40 - 4,00		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD MEDIA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES DE TAMAÑO MÁXIMO 11" Y BOLONES ENTRE 15" A 20".	

FIGURA 3-38: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 02

Fuente Elaboración Propia

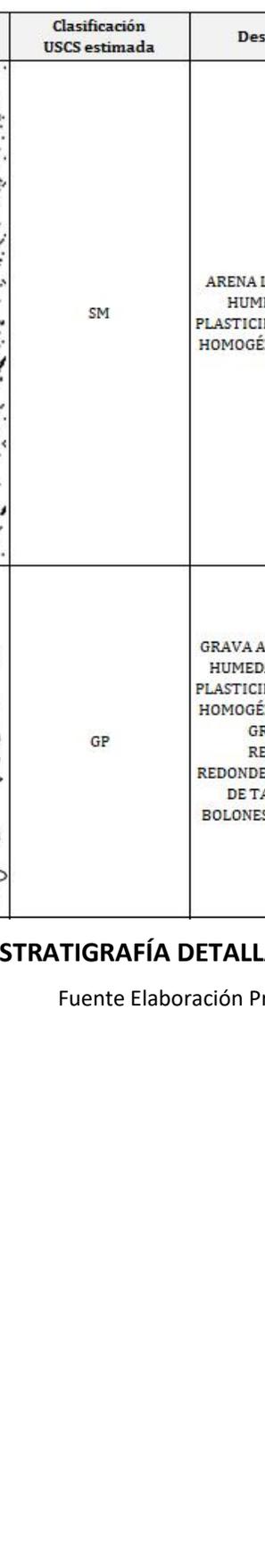
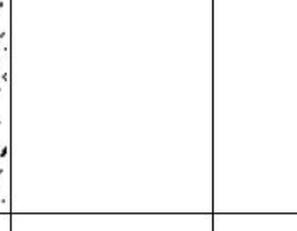
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0.00 - 1.60		SM	ARENA LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA A MEDIA, PLASTICIDAD NULA. ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	1.60 - 2.50		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA. ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA. GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES DE TAMAÑO MÁXIMO 7" Y BOLONES SUPERFICIALES ENTRE 12" A 30".	

FIGURA 3-39: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 03

Fuente Elaboración Propia

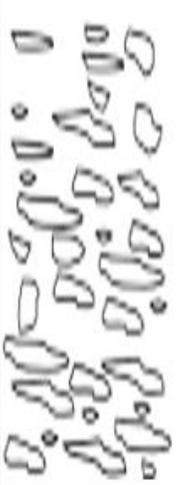
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 2,20		GP-GM	GRAVA ARENOSA ALGO LIMOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD ALTA A SATURADA. PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA A ALTA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 7" Y BOLONES ENTRE 15" A 20".	
2	2,20 - 2,60		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES DE TAMAÑO MÁXIMO 9" Y BOLONES DE 30" EN FONDO DE LA CALICATA.	

FIGURA 3-40: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 04

Fuente Elaboración Propia

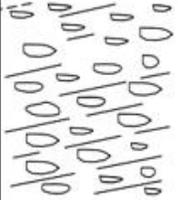
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 1,30		SM	ARENA LIMOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD MEDIA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	1,30 - 2,00		GM	GRAVA LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS Y SUB REDONDEADOS, DE TAMAÑO MÁXIMO 5".	
3	2,00 - 3,00		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA A ALTA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 5".	

FIGURA 3-41: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 05

Fuente Elaboración Propia

Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,30		SW	ARENA GRAVOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD MEDIA A ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	0,30 - 2,20		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, GRAVAS DE CANTOS SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES DE TAMAÑO MÁXIMO 11".	

FIGURA 3-42: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 06

Fuente Elaboración Propia

Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 1,20		SP-SM	ARENA GRAVO LIMOSA COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA BSJA.	
2	1,20 - 2,70		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR CAFÉ GRISACEA, HUMEDAD ALTA A SATURADA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES DE TAMAÑO MÁXIMO 13".	

FIGURA 3-43: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 07

Fuente Elaboración Propia

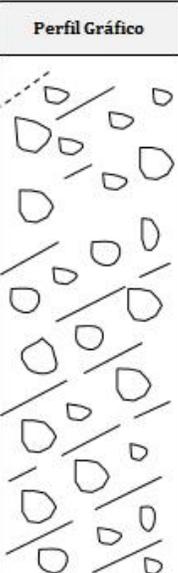
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 4,00		GP - GM	GRAVA ARENO LIMOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, GRAVAS DE CANTOS RDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 10".	

FIGURA 3-44: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 08

Fuente Elaboración Propia

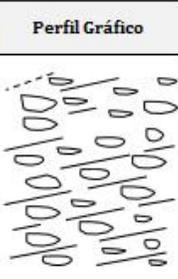
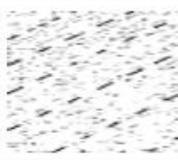
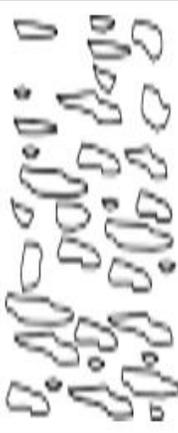
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 1,40		GP - GM	GRAVA ARENO LIMOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD MEDIA A ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, GRAVAS DE CANTOS RDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 10".	
2	1,40 - 2,00		SM	ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
3	2,00 - 4,00		GP	GRAVA ARENOSA ALGO LIMOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 10".	

FIGURA 3-45: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 09

Fuente Elaboración Propia

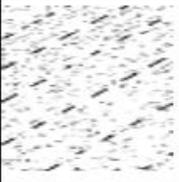
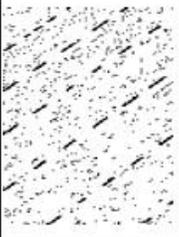
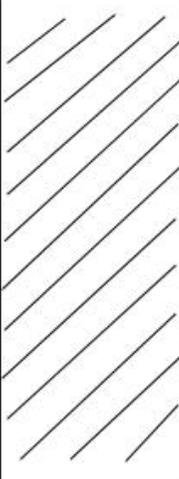
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,70		SM	ARENA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA.	
2	0,70 - 2,00		SP - SM	ARENA LIMO GRAVOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
3	2,00 - 4,00		CL	ARCILLA DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD MEDIA A BAJA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, CONSISTENCIA BAJA.	

FIGURA 3-46: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 10

Fuente Elaboración Propia

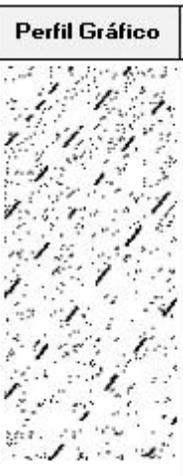
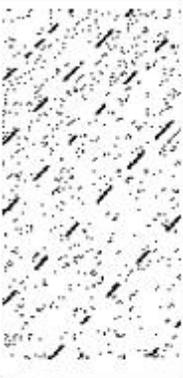
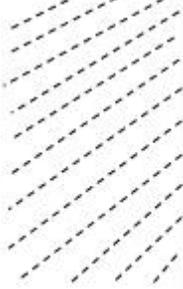
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,90		SW-SM	ARENA LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	0,90 - 1,90		SP - SM	ARENA GRAVO LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD MEDIA A ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD ALTA.	
3	1,90 - 3,50		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 6".	
4	3,50 - 4,00		ML	LIMO DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD BAJA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, CONSISTENCIA BAJA.	

FIGURA 3-47: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 11

Fuente Elaboración Propia

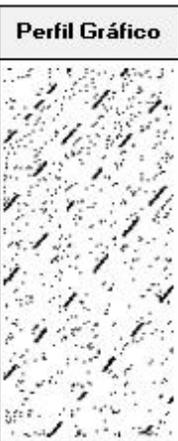
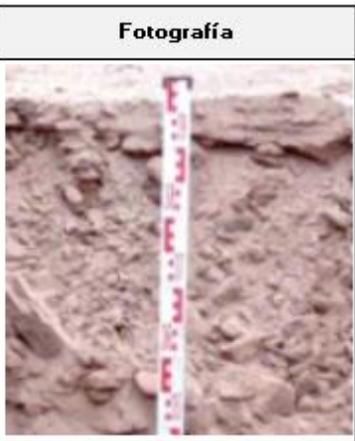
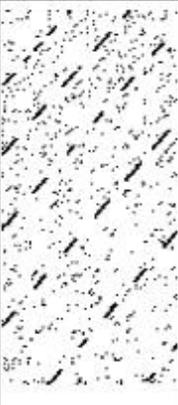
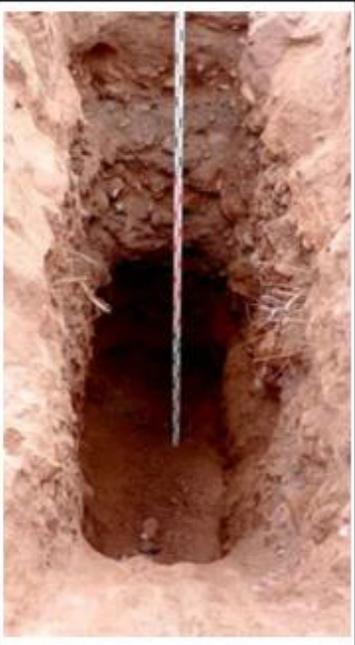
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,30		SW - SM	ARENA LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	0,30 - 1,20		SP - SM	ARENA GRAVO LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD MEDIA A ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD ALTA.	
3	1,20 - 4,00		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 10" Y BOLONES DISPERSOS DE 15".	

FIGURA 3-48: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 12

Fuente Elaboración Propia

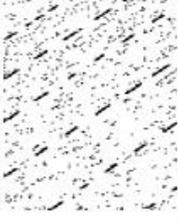
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 1,20		SP- SM	ARENA LIMOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	1,20 - 2,70		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 9", SE OBSERVAN BOLONES DISPERSOS DE 16".	
3	2,70 - 3,50		SP- SM	ARENA GRAVO LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD MEDIA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
4	3,50 - 4,00		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 9", SE OBSERVAN BOLONES DISPERSOS DE 18".	

FIGURA 3-49: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 13

Fuente Elaboración Propia

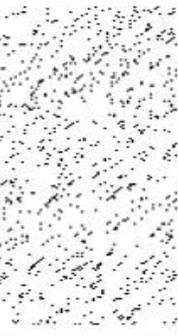
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,10		SP- SM	ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD BAJA. PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
2	0,10 - 1,30		SP	ARENA GRAVOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA. PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
3	1,30 - 4,00		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA. PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA. GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 9", SE OBSERVAN BOLONES DISPERSOS DE 16".	

FIGURA 3-50: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 14

Fuente Elaboración Propia

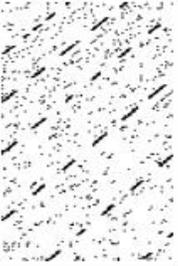
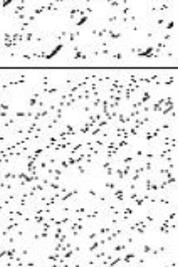
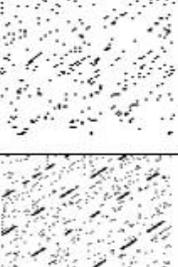
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,90		SP- SM	ARENA GRAVO LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, SE OBSERVAN BOLONES DISPERSOS DE 13".	
2	0,90 - 1,90		SW-SM	ARENA LIMO GRAVOSA DE COLOR GRIS CAFÉ, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
3	1,30 - 3,60		SP	ARENA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	
4	3,60 - 4,00		SM	ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD MEDIA A ALTA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD BAJA.	

FIGURA 3-51: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 15

Fuente Elaboración Propia

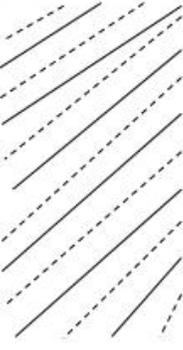
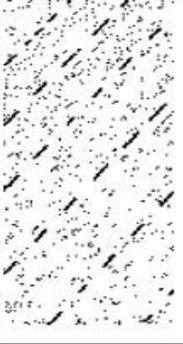
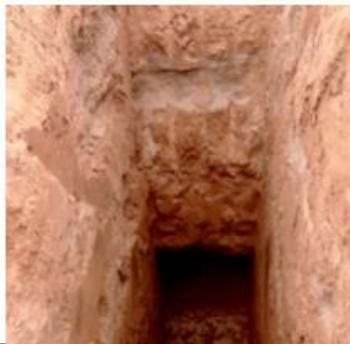
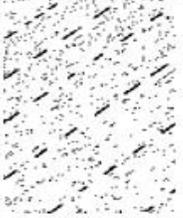
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 1,30		CL-ML	ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD BAJA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, CONSISTENCIA MEDIA, SE OBSERVAN GRAVAS DISPERSAS.	
2	1,30 - 3,00		SP-SM	LIMO DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD BAJA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, CONSISTENCIA BAJA.	
3	3,00 - 4,00		SM	LIMO ARENOSO DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD MEDIA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, CONSISTENCIA ALTA.	

FIGURA 3-52: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 16

Fuente Elaboración Propia

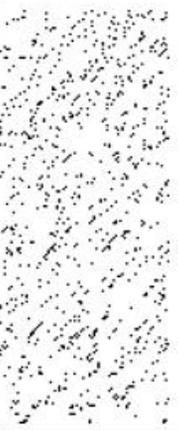
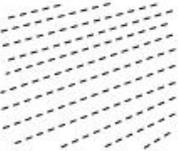
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,40		GM	GRAVA LIMOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA. GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 4".	
2	0,40 - 3,00		SW	ARENA GRAVOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA.	
3	3,00 - 4,00		ML	LIMO DE COLOR CAFÉ, HUMEDAD ALTA, PLASTICIDAD BAJA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, CONSISTENCIA BAJA.	

FIGURA 3-53: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 17

Fuente Elaboración Propia

Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 4,00		SW	ARENA GRAVOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA, SE OBSERVAN BOLONES DISPERSOS DE 9" Y BOLONES SUPERFICIALES ENTRE 17" Y 27".	

FIGURA 3-54: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA SP 18

Fuente Elaboración Propia

Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 4,00		GW	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA, ESTRUCTURA ESTRATIFICADA, COMPACIDAD BAJA A MEDIA, GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 10", SE OBSERVAN BOLONES DISPERSOS DE 23".	

FIGURA 3-55: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA VL 01

Fuente Elaboración Propia

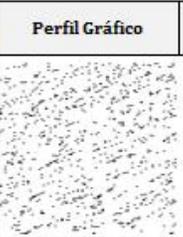
Horizonte	Profundidad (m)	Perfil Gráfico	Clasificación USCS estimada	Descripción del Suelo	Fotografía
1	0,00 - 0,60		SP	ARENA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA. ESTRUCTURA HOMOGÉNEA. COMPACIDAD BAJA, SE OBSERVAN RAICES DISPERSAS.	
2	0,60 - 1,30		SW	ARENA GRAVOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA. ESTRUCTURA HOMOGÉNEA, COMPACIDAD MEDIA.	
3	1,30 - 4,00		GP	GRAVA ARENOSA DE COLOR GRIS, HUMEDAD BAJA, PLASTICIDAD NULA. ESTRUCTURA HOMOGÉNEA. COMPACIDAD MEDIA A BAJA. GRAVAS DE CANTOS REDONDEADOS, SUB REDONDEADOS Y SUB ANGULARES, DE TAMAÑO MÁXIMO 9", SE OBSERVAN BOLONES SUPERFICIALES ENTRE 18" A 28".	

FIGURA 3-56: ESTRATIGRAFÍA DETALLADA CALICATA CA VL 02

Fuente Elaboración Propia

3.3.2.5. Sales Solubles Totales en el Suelo según NCh 1444/1

A tener presente en el diseño de las estructuras de hormigón asociadas al presente proyecto, recubrimientos mínimos (según ACI 318-19), la utilización de áridos locales en la preparación de las mezclas (según M.C. Volumen 8 8.202.14 AGREGADOS PETREOS: METODO PARA DETERMINAR SALES SOLUBLES (LNV 8), NCh163 Of.79 y NCh170 Of.85).y de acuerdo con los ensayos de mecánica de suelos, asociados a la determinación de las sales soluble totales presentes en el suelo natural según la norma NCh1441/1 Of, se tienen los siguientes resultados:

CUADRO 3-39: RESULTADOS ENSAYOS SALES SOLUBLES TOTALES EN MUESTRAS DE SUELO SEGÚN NCH 1444/1

CALICATA	SALES TOTALES mg/kg	CERTIFICADO	SECTOR
M-1.- C-1; H-1; Cota 0,40-2,50 m. M-2.- C-2; H-2; Cota 1,40-3,40 m.	1.935 2.790	ASA 237721-1	RIO SAN PEDRO
M-3.- C-3; H-2; Cota 1,70-2,50 m. M-4.- C-4; H-1; Cota 0,00-2,20 m.	1.026 1.368		
M-5.- C-5; H-2; Cota 1,30-2,00 m.	9.153		
M-6.- C-6; H-2; Cota 0,30-2,20 m. M-7.- C-7; H-2; Cota 1,20-2,40 m.	1.566 1.872		
M-8.- C-8; H-1; Cota 0,00-4,00 m. M-9.- C-9; H-3; Cota 2,00-4,00 m.	1.368 828		
M-10.- C-10; H-3; Cota 2,00-4,00 m. M-11.- C-11; H-3; Cota 1,90-2,50 m.	2.547 785		
M-12.- C-12; H-4; Cota 1,20-4,00 m. M-13.- C-13; H-2; Cota 1,20-2,70 m.	2.016 2.570		
M-14.- C-14; H-3; Cota 1,30-4,00 m.	1.589		
M-15.- C-15; H-2; Cota 0,90-1,90 m. M-16.- C-16; H-3; Cota 0,40-4,00 m.	727 1.023		
M-17.- C-17; H-2; Cota 3,00-4,00 m. M-18.- C-18; H-1; Cota 0,40-3,00 m.	990 954		
M-19.- C-1; H-1; Cota 0,00-4,00 m.	1440	ASA 237721-3	RIO VILAMA
M-20.- C-2; H-3; Cota 1,30-4,00 m.	481		

Fuente Elaboración Propia

3.3.2.6. Comparación con Estudio Anteriores

Para efectos de comparar y concluir acerca de los resultados de los estudios anteriores, se realiza una comparación entre el estudio actual y el realizado por la consultoría “Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama – 2012”. En dicho estudio se realizó una campaña de trabajos de terreno que incluyeron sondajes y pozos de exploración. Dentro de estos antecedentes, se observa que la mayoría de los trabajos de terreno tuvieron lugar en una zona más al norte del área del actual estudio. Sin embargo, se encontraron calicatas que tuvieron lugar en el cauce del río San Pedro. Estas calicatas realizadas fueron ejecutadas hasta 2,00 m de profundidad y, además, no coinciden precisamente en lugar con las ejecutadas recientemente, pero están bastante cercanas. En la Figura 3-57 se presentan las calicatas realizadas en este estudio y el anterior realizado.

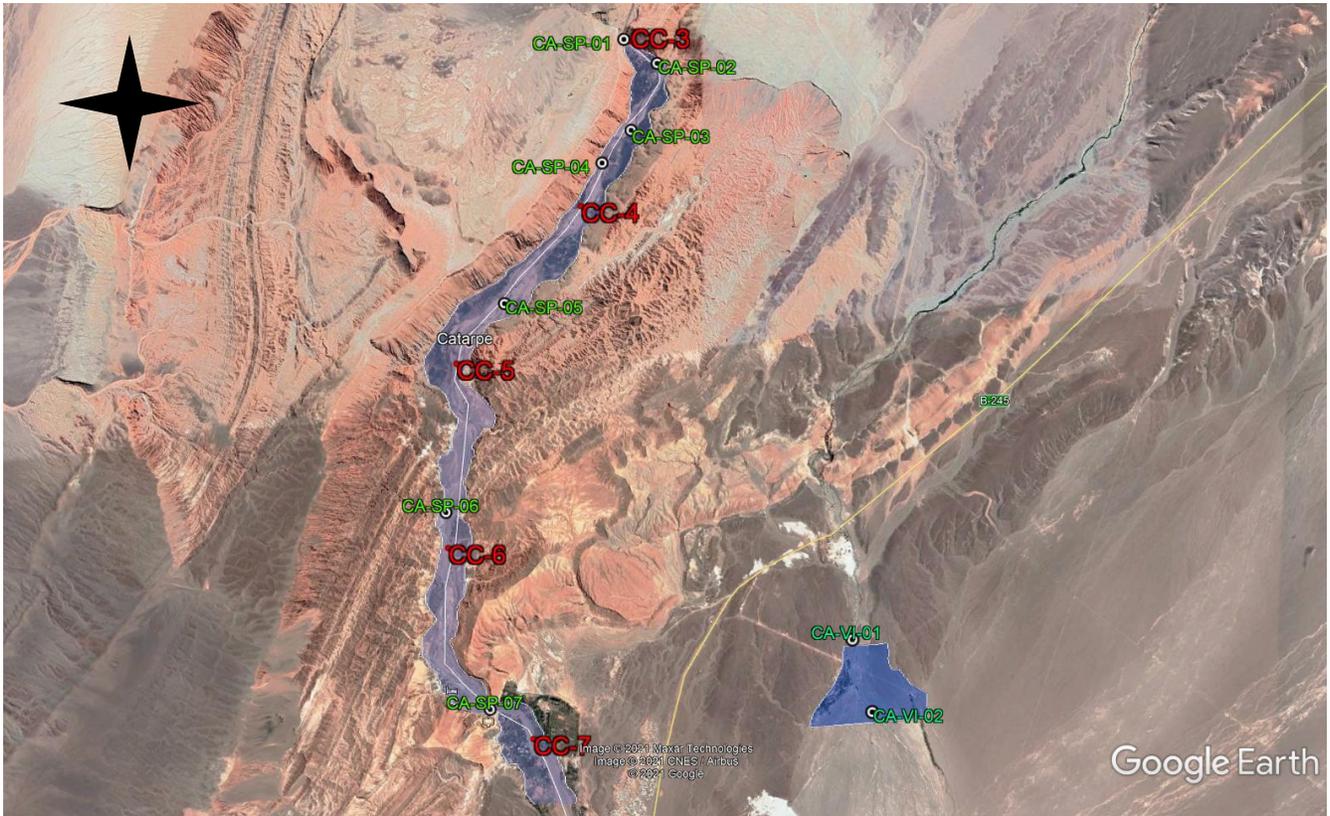


FIGURA 3-57: UBICACIÓN CALICATAS ESTUDIO ACTUAL Y ESTUDIO ANTERIOR

*Las calicatas del estudio anterior corresponden a las denominadas CC-X

Fuente: Elaboración Propia

En el Cuadro 3-40 se presenta la cercanía de pozos de exploración del estudio actual y el anterior.

CUADRO 3-40: UBICACIÓN CALICATAS ESTUDIO ANTERIOR Y ACTUAL

Calicata Estudio Anterior	Cercana a:
CC-3	CA SP 01
CC-4	CA SP 04
CC-5	CA SP 05
CC-6	CA SP 06
CC-7	CA SP 07

Fuente: Elaboración Propia

Establecido lo anterior, en la Figura 3-58 a la Figura 3-62 se presenta la comparación de las curvas granulométricas de los pozos actuales y los del estudio pasado.

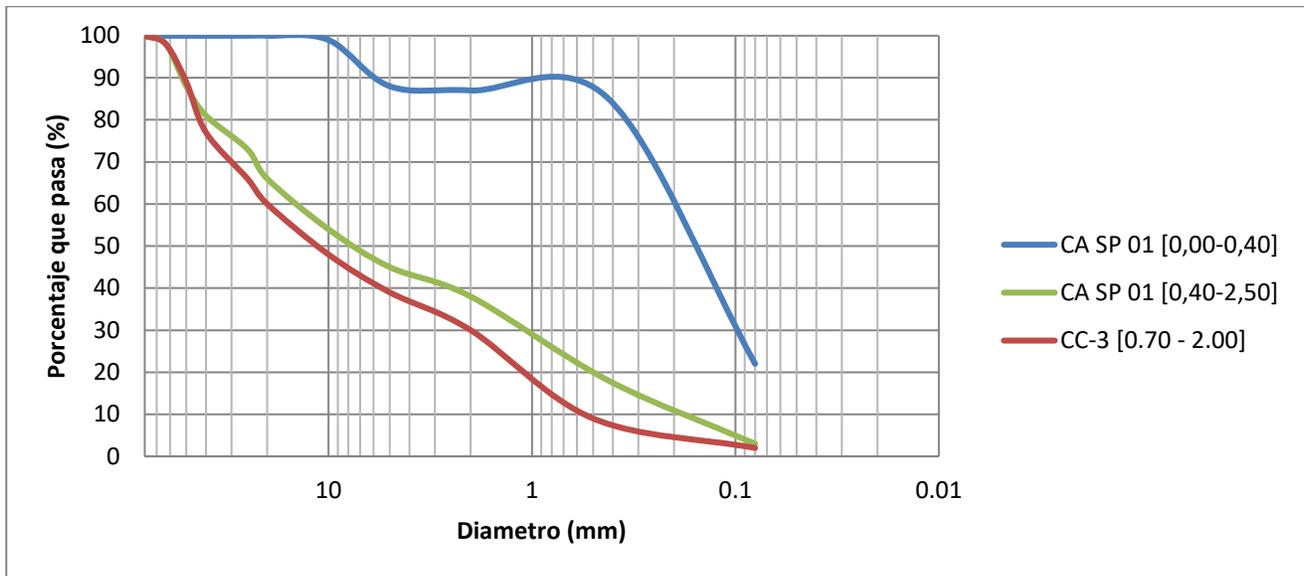


FIGURA 3-58: CC-3 – CA SP 01

Fuente: Elaboración Propia

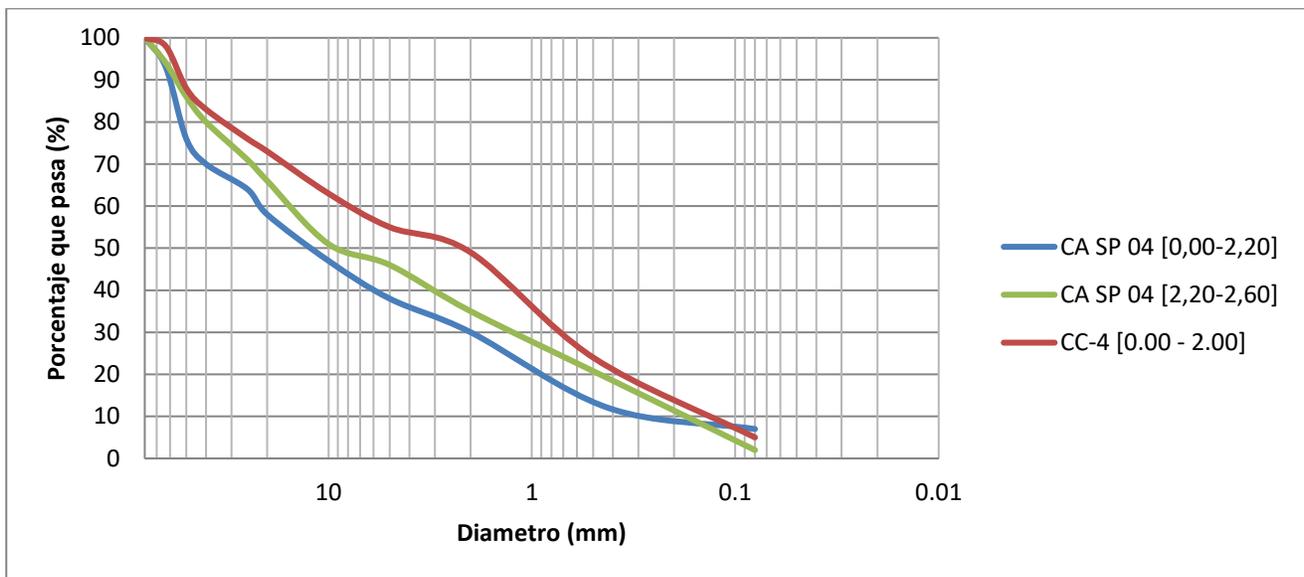


FIGURA 3-59: CC-4 – CA SP 04

Fuente: Elaboración Propia

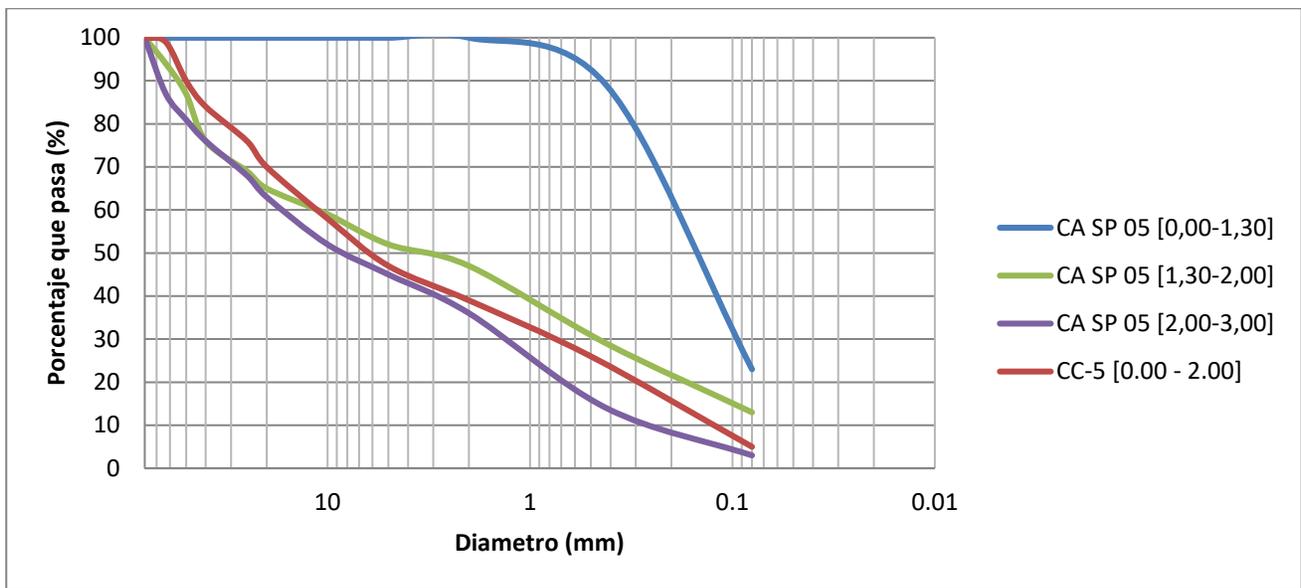


FIGURA 3-60: CC-5 – CA SP 05

Fuente: Elaboración Propia

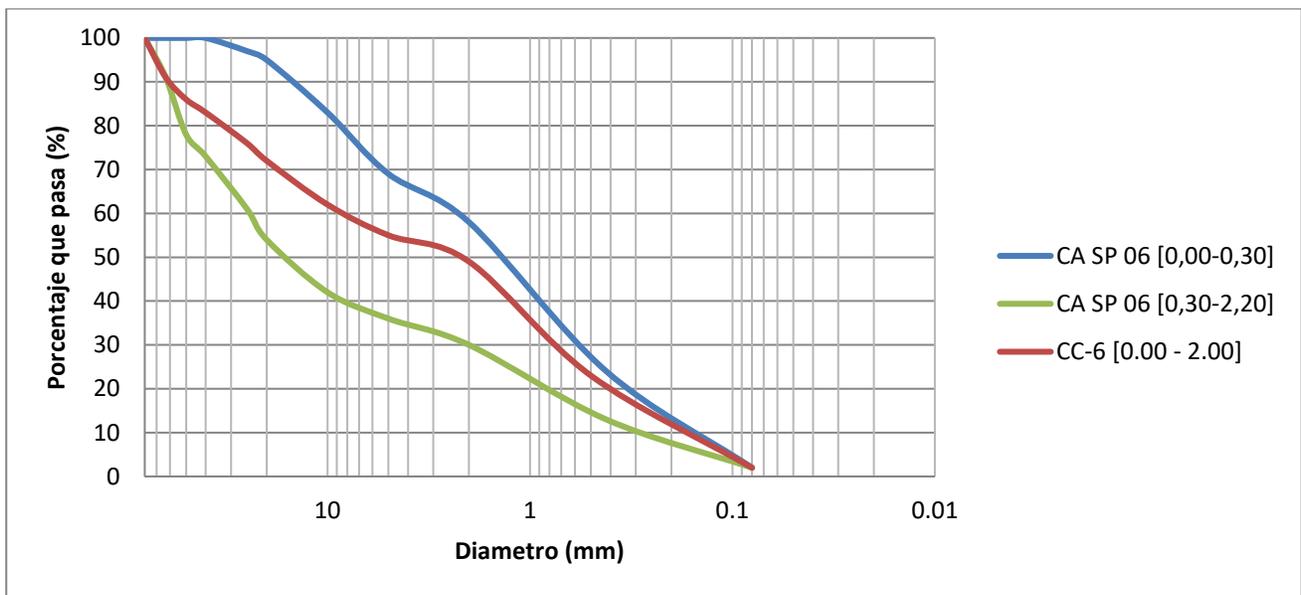


FIGURA 3-61: CC-6 – CA SP 06

Fuente: Elaboración Propia

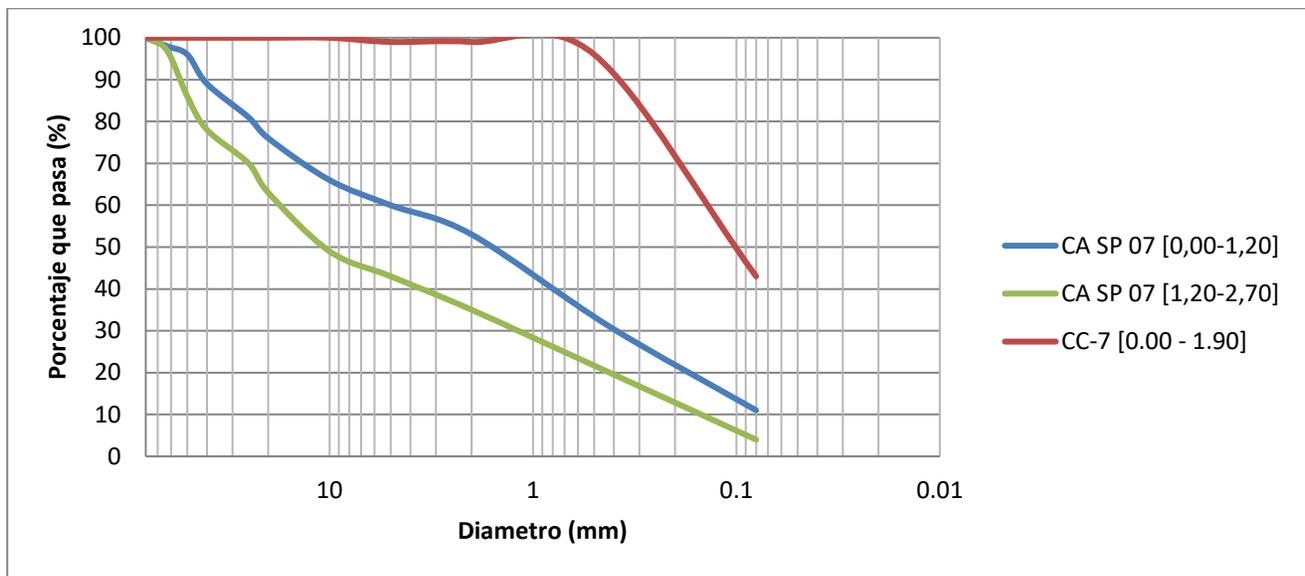


FIGURA 3-62: CC-7 – CA SP 07

Fuente: Elaboración Propia

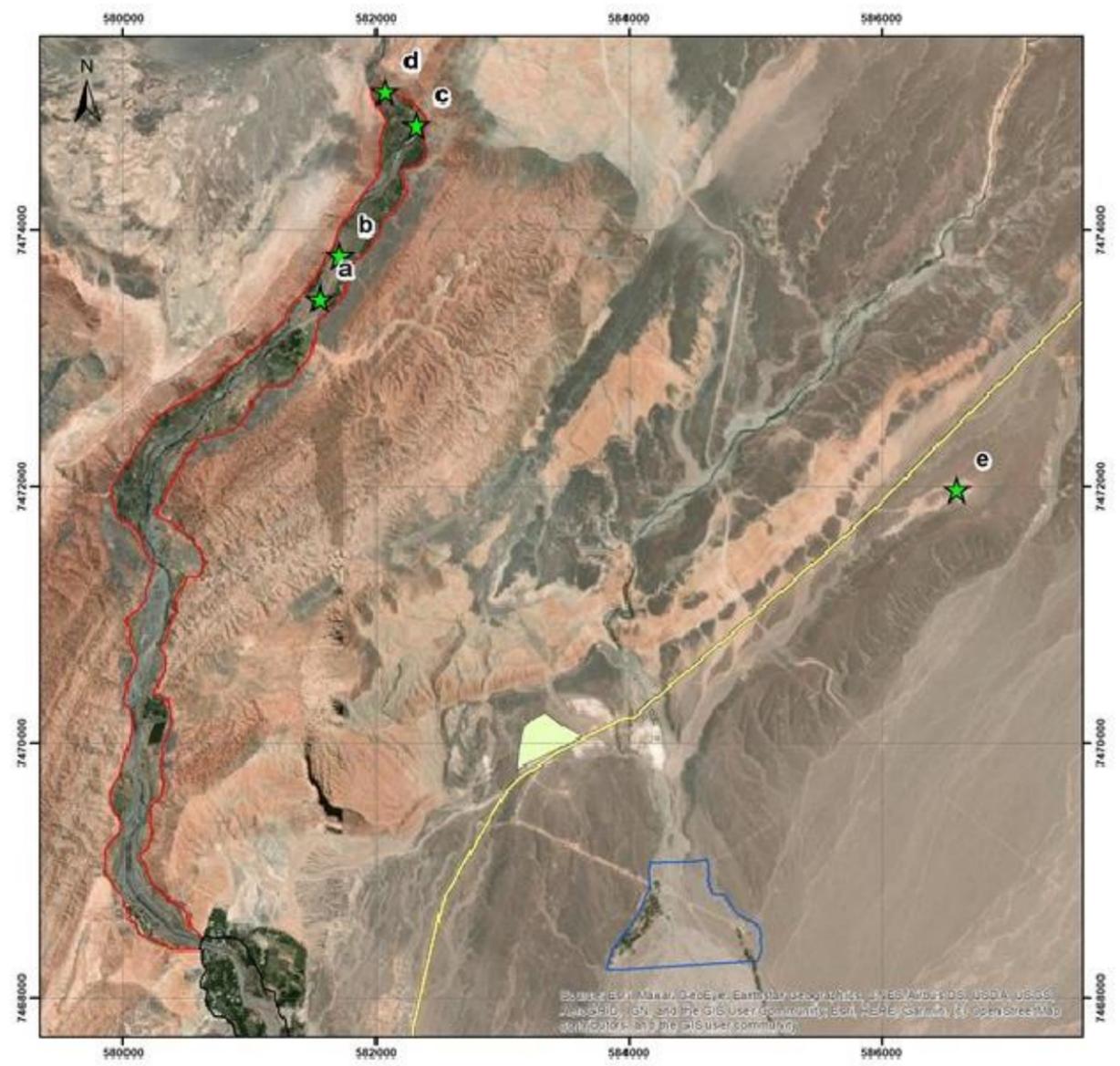
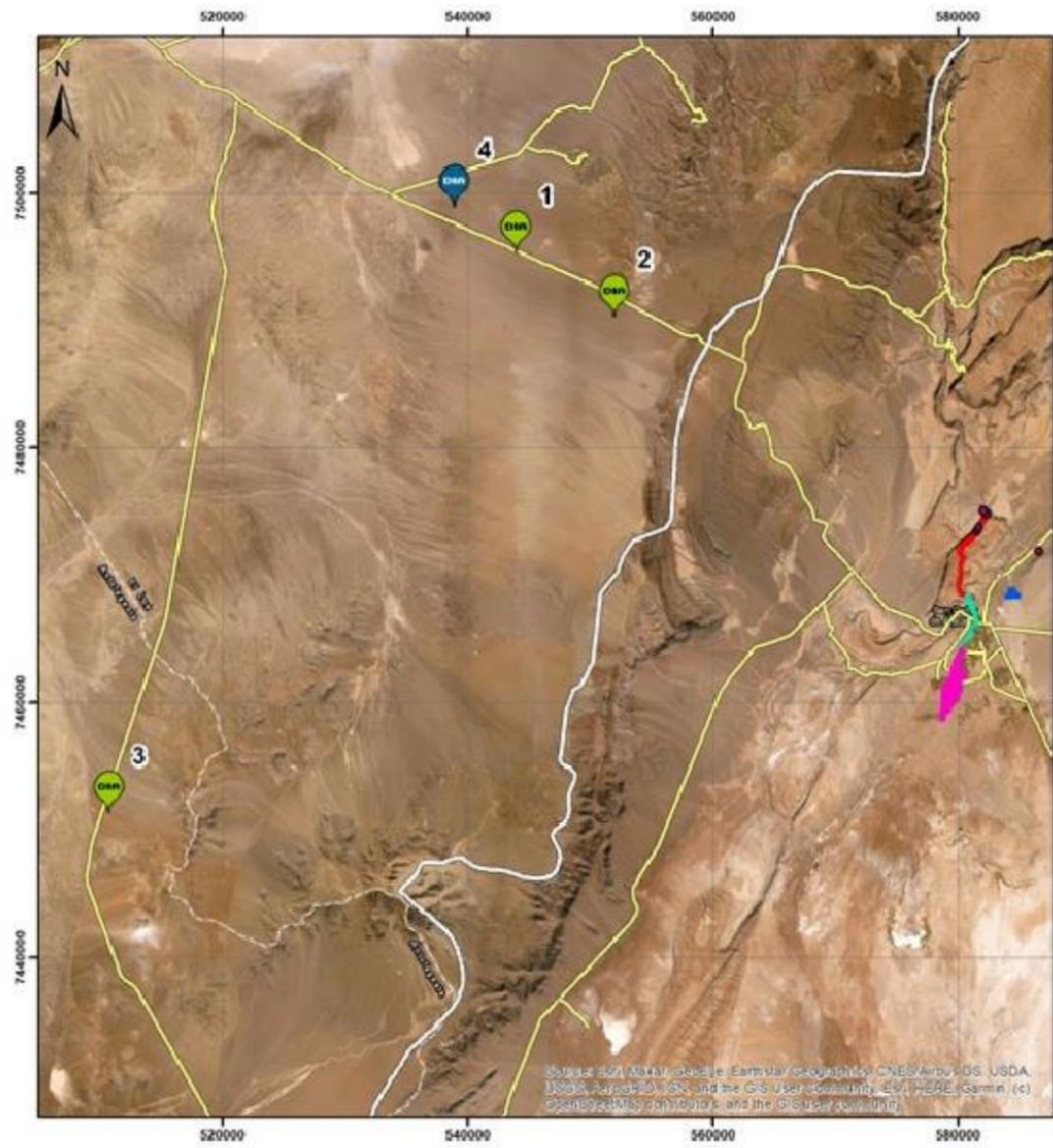
3.3.3. Zona de Botaderos y Canteras

Como parte de la recopilación de antecedentes, fue solicitada información respecto de botaderos, canteras y extracción de áridos a la Subsecretaría de Medioambiente, que derivó la consulta a la I.M. de San Pedro de Atacama. A la fecha no se ha tenido respuesta con relación a este tema.

A partir de antecedentes del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, se identificaron proyectos aprobados de extracción de áridos, en donde el más cercano a la comuna se encuentra a una distancia aproximada de 45 km. Además de esto, durante el catastro se identificó un sector de extracción de áridos en el Sector 3 del Río San Pedro.

A partir de la visita a terreno realizada durante el mes de febrero, se identificaron una serie de puntos que potencialmente podrían constituir zonas de extracción de material, además de un área para el establecimiento de un botadero.

Todo lo anteriormente señalado se presenta en la Figura 3-63.



SIMBOLOGÍA

Área Estudio

- SP1, RIO SAN PEDRO TRAMO INICIAL
- SP2, RIO SAN PEDRO TRAMO INTERMEDIO
- SP3, RIO SAN PEDRO TRAMO FINAL
- VI1, RIO VILAMA

LIMITES COMUNALES

- LIMITES COMUNALES

Red Vial

- Red Vial

PROPUESTA BOTADERO

- PROPUESTA BOTADERO

PUNTOS TERRENO

- ★ a, Sector en que se requiere Retiro de material
- ★ b, Zona Disponibilidad Material 1
- ★ c, Zona Disponibilidad Material 2
- ★ d, Zona Disponibilidad Material 3
- ★ e, Sector de Extracción Material con Maquinaria

PROYECTOS SEIA ÁRIDOS

- DIA - APROBADO
- DIA - EN TRÁMITE

FIGURA 3-63: UBICACIÓN DE PUNTOS IDENTIFICADOS DE BOTADEROS Y CANTERAS

Fuente: Elaboración propia con base en información SEIA y datos de terreno.

3.3.4. Materiales

De los antecedentes revisados y los trabajos en terreno realizados, para efectos de diseño de cualquier obra de protección o estructura en la caja del río San Pedro o Río Vilama, se recomienda considerar el siguiente modelo estratigráfico:

CUADRO 3-41: MODELO ESTRATIGRÁFICO RÍO VILAMA

Horizonte	Profundidad (m)	Descripción Visual
H-1	0,00-1,50	Arena gravosa de color gris, humedad baja, plasticidad nula, estructura homogénea, compacidad media.
H-2	1,50-4,00	Grava arenosa de color gris, humedad baja, plasticidad nula, estructura homogénea, compacidad media a baja, gravas de cantos redondeados, sub redondeados y sub angulares, de tamaño máximo 9", se observan bolones superficiales entre 18" a 28".
Notas		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Puntualmente, se puede detectar el estrato de grava arenosa desde la superficie;</i> • <i>No se detectó la napa durante la exploración (enero, febrero de 2021);</i> • <i>Durante la visita a terreno, se pudo visualizar una cantera de áridos en las cercanías del Río Vilama;</i> • <i>Es importante tener a la vista la presencia de sales solubles totales en unidades arenosos o limo-arenosos para su selección como material de empréstito</i>

Fuente: Elaboración Propia.

CUADRO 3-42: MODELO ESTRATIGRÁFICO RÍO SAN PEDRO

Horizonte	Rango Profundidad (m)	Descripción Visual
H - 1	0,00-1.00	Arena limosa de color gris, humedad baja, plasticidad nula, estructura homogénea, compacidad baja.
H - 2	1,00-2.00	Arena gravo limosa de color gris, humedad media a alta, plasticidad nula, estructura homogénea, compacidad alta. Presencia de gravas tamaño máximo 10"
H - 3	2.00 – 4.00	Grava arenosa de color gris café, humedad alta, plasticidad nula, estructura homogénea, compacidad media, gravas de cantos redondeados, sub redondeados y sub angulares, de tamaño máximo 40".
Notas		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Se puede detectar el estrato de grava arenosa desde la superficie, aguas arriba de la localidad de San Pedro;</i> • <i>Se detectó la napa durante la exploración (enero, febrero de 2021):</i> <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>1,50 m Pozo CA-SP01;</i> ○ <i>1,30 m Pozo CA-SP03;</i> ○ <i>1,50 m Pozo CA-SP04;</i> ○ <i>2,50 m Pozo CA-SP05;</i> ○ <i>1,20 m Pozo CA-SP06;</i> ○ <i>1,50 m Pozo CA-SP07</i>

CUADRO 3-42: MODELO ESTRATIGRÁFICO RÍO SAN PEDRO

Horizonte	Rango Profundidad (m)	Descripción Visual
		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Es importante tener a la vista la presencia de sales solubles totales en unidades arenosas o limo arenosas como para su selección como material de empréstito;</i> • Aguas arriba de la calicata CA-SP05, es posible apreciar la presencia superficial de grandes bloques (más de 1,0 m de diámetro aparente) los que se pueden utilizar en la materialización de enrocados; • Aguas debajo de la localidad de San Pedro, se detectan principalmente limos y arenas limosas con presencia de gravas, desaparece el estrato H-3, mostrado en el modelo estratigráfico

Fuente: Elaboración Propia

3.3.5. Comentarios y Conclusiones

A partir de los trabajos realizados en terreno y gabinete, además de los antecedentes geológicos – geotécnicos recopilados, se puede concluir lo siguiente respecto del sitio de proyecto:

- El suelo de fundación en la caja de los ríos San Pedro y Vilama, aparece adecuado para el apoyo de las estructuras asociadas a las defensas fluviales de las riberas;
- El suelo de fundación debe corresponder en cualquier caso a una grava algo arenosa, con un enterramiento mínimo de 1,0 m respecto de la superficie actual de terreno y 0,60 m respecto del nivel de socavación estimados;
- Existe abundante material, grandes bloques y bolones en el cauce del río San Pedro, aguas arriba de la “sede social” para la materializar de enrocados de protección;
- Se detecta abundante disponibilidad de gravas en el sector del río Vilama para la materialización de gaviones, lo que aparece también respaldado en la carta geología de San Pedro;
- Los lentes de arena, arena limosa y limo arenoso detectados en los pozos de exploración presentan una abundante cantidad de sales solubles en su matriz, por sobre los 1000 mg/kg; por lo que esperable que se produzcan asentamientos diferenciales a causa de lluvias y crecidas de Ríos y Quebradas, dañando con ello las obras que se proyecten en el sector, así como en sus vías de acceso, puentes, terraplenes, etc...La atenuación de estos daños pasa por considerar una mayor profundidad de fundación adecuada para cada caso, con una exploración específica a través de calicatas según la importancia de la obra proyectada (NCh1508 Of.2014);
- No se permitirá la utilización de limos, limos arenosos, arenas finas y arenas limosas, de origen local, para la ejecución de rellenos artificiales compactados controlados
- Dado el ambiente salino del sector de proyecto, cualquier obra de hormigón debe considerar un recubrimiento mínimo de 7,0 cm;

- En aquellos sectores, en los que no se han perfilado los cauces, será necesario materializar una vía preferente para las escorrentías y crecidas de las quebradas de modo de proteger los pies de los muros de gaviones existente;
- Los sellos de fundaciones de enrocados, gaviones o estructuras de hormigón deberá ser recibido conforme por un ingeniero especialista en el área geotécnica, antes de su materialización;
- Antes de la extracción de materiales desde el empréstito seleccionado o cantera será necesario su aprobación por parte del proyectista involucrado, además de la ejecución de ensayos de laboratorio específicos como lo son el peso específico de partículas sólidas, desgaste en la máquina de los ángeles, porcentaje de Lajas, presencia de sales solubles totales, límites de atterberg y clasificación USCS;
- Todas las calicatas prospectadas llegaron a la profundidad de 6 metros con excepción de seis de ellas que no se pudieron excavar más debido a la aparición de napa subterránea.
- Se observa coeficientes de uniformidad mayores en los estratos más profundos ($h > 0,40$ m), lo cual es concordante pues a menores profundidades predominan las partículas finas del material.
- En el río San Pedro, la matriz predominante en los materiales corresponde a arenas, con un promedio del 67%. Luego los materiales gravas y finos corresponden ambos a aproximadamente 16%, no se observa predominancia de un material sobre otro.
- Se observa homogeneidad en los diámetros D50 y D90 durante el recorrido del río San Pedro, a excepción del kilometraje 12 y 15, donde se observan diámetros menores, debido a la aparición de un lente de materiales limosos en esos sectores.
- Con respecto a las calicatas realizadas en el estudio 2012, la gran mayoría de los trabajos de terreno tuvieron lugar en una zona al norte del área del estudio actual, sin embargo, se encontraron calicatas por el cauce del río San Pedro que tienen cercanía a las actuales. Se realiza una comparación de las curvas granulométricas de las calicatas cercanas donde se observa homogeneidad en ambas campañas de exploración. Con excepción de las calicatas CA SP 07 Y CC-7, donde se observa que la calicata CC-7 contiene un alto contenido de materiales arenosos y finos. La razón principal es que esta calicata está más alejada del cauce principal, donde es natural encontrar depósitos más finos y, como se menciona anteriormente, las calicatas del estudio anterior solo llegaron a 2,00 m de profundidad.

3.4. Catastro de Elementos e Interés y Usos del Espacio Fluvial

3.4.1. Infraestructura

El catastro de actividades y elementos, tiene como finalidad, identificar y recabar información precisa, tanto de la infraestructura existente, como de las actividades productivas realizadas en el cauce y/o ribera del Río San Pedro y Vilama, en la comuna de San Pedro de Atacama.

La información catastrada fue debidamente registrada por medio de una aplicación telefónica, que permite un rápido y eficiente levantamiento de datos desde un teléfono celular, incluyendo información general, como tipo de obra, comuna y localidad en la que se encuentra, tramo del cauce, fecha de catastro, permitiendo, además, georreferenciar su ubicación específica e incluso el registro fotográfico de cada obra o actividad catastrada.

Las labores de catastro se iniciaron el día viernes 08 de enero, terminando el día lunes 11 del mismo mes. El levantamiento de información realizado durante cuatro días, se realizó íntegramente a pie, tratando de abarcar la totalidad del cauce y su área de influencia, pudiendo realizar un registro exhaustivo de la infraestructura presente y actividades productivas realizadas en el cauce y sus alrededores. El equipo de trabajo, recorrió los tramos de los dos cauces comprendidos en el Estudio:

- Río San Pedro, desde aproximadamente 450 m aguas debajo de la Estación Fluviométrica DGA en Cuchabrache, hasta un costado del Ayllu de Tulor. Total de 22 km.
- Río Vilama. Área de influencia, a un costado de Ayllu de Vilama. Total de 1 km.



FIGURA 3-64: TRAMOS RECORRIDOS DURANTE CATASTRO DE OBRAS Y ACTIVIDADES

Fuente: Elaboración Propia a partir de Google Earth.

Los resultados del catastro, expuestos en el presente informe, se pueden consultar en detalle en las Fichas de Catastro, las cuales se encuentran alojadas en el Anexo 3-4, así como también, su ubicación en el plano ARR104-SPVL-CTR-001_ET2CV1.

3.4.1.1. Metodología

Previo a llevar a cabo los trabajos de catastro en terreno, el Equipo Consultor, desarrolla una recopilación de información bibliográfica y secundaria, con la finalidad de poseer datos referentes a infraestructura crítica, que se deba identificar y registrar debidamente durante el catastro. Esta información hace referencia principalmente a estructuras de mayor envergadura, como puentes vehiculares y ferroviarios, pasarelas peatonales, sistemas de agua potable rural (APR), bocatomas de canales, entre otros, para lo cual se valen de organismos públicos y privados, que poseen registro de dicha infraestructura.

Posteriormente, para el desarrollo de las labores de catastro, se organizan una cuadrilla de operadores, conformada por un profesional y un técnico o ayudante. Esta cuadrilla, recorre un tramo diario a pie, observando y recabando la información requerida de cada eventualidad que se presente en dicho tramo. Los recorridos se coordinan de forma tal, de lograr un avance diario significativo, entre

puntos estratégicamente seleccionados antes de iniciar la jornada y que permitan el traslado en vehículo hacia y desde dichos puntos. Estos puntos estratégicos, generalmente se asocian a puentes, atraviesos o zonas de acceso al cauce, en donde se logra llegar en vehículo.

La cuadrilla de trabajo, es debidamente equipada con vestuario, calzado y elementos de seguridad acordes a la actividad a desarrollar y de protección contra la radiación UV (Bloqueador solar, gorro legionario y lentes con filtro UV), además de chalecos reflectantes que permitan su identificación en caso de transitar por caminos públicos y botellas de agua. A su vez, se les provee de una croquera y lápices, para la toma de notas y realización de croquis y esquemas representativos de cada obra catastrada, elementos de medición (huinchas).

Junto con los elementos anteriormente mencionados, se cuenta con la aplicación Memento Database (<https://mementodatabase.com/index.html>), instalada en el teléfono celular, con la cual se levantará toda la información precisada para el Catastro de Obras y Actividades, incluyendo su georreferenciación y fotografías de rigor.

Memento Database (© 2019 LuckyDroid. All Rights Reserved), es una aplicación desarrollada para equipos portables con sistemas operativos Android y con una versión de escritorio, compatible con sistemas operativos Windows, Linux y Mac. Este programa, tiene como objetivo, la creación de bibliotecas personalizadas, orientadas al registro de datos de texto, imágenes, referencias geográficas, entre otros, según las necesidades de cada usuario. Posee almacenamiento en una nube virtual y la posibilidad de interactuar entre distintos equipos asociados a ella, con diversas cuentas de usuario que pueden acceder a ella, con permiso de un único administrador. En la Figura 3-65 y Figura 3-66 se puede observar la interfaz de la aplicación.

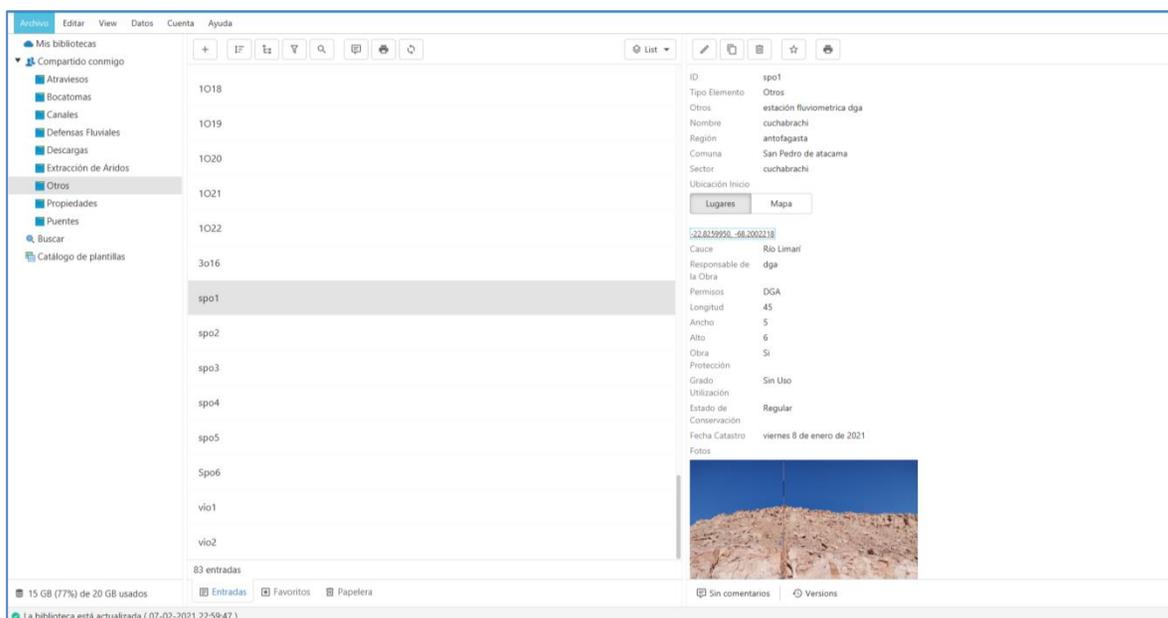


FIGURA 3-65: INTERFASE DE LA APLICACIÓN MEMENTO DATABASE. VERSIÓN DE ESCRITORIO

Fuente: Elaboración propia



FIGURA 3-66: INTERFASE DE LA APLICACIÓN MEMENTO DATABASE. VERSIÓN MÓVIL

Fuente: Elaboración propia

Junto con la información concreta de cada obra o actividad observada y registrada durante las jornadas de catastro, se le atribuyeron a cada una de ellas, características asociadas a su estado de

conservación y/o funcionamiento. Estas características, fueron acordadas previamente en gabinete, en conjunto, entre el Equipo de catastro y el equipo de Ingeniería de la Consultora, otorgándoles un criterio de discernimiento entre aquellas obras que presentaban un Buen estado de conservación y/o funcionamiento, un estado Regular o uno Malo. En el Cuadro 3-43 se presentan en detalle, los Criterios de Definición de las obras a catastrar.

CUADRO 3-43: DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE ESTADO DE LAS OBRAS

Tipo de Obra	Estado de Conservación	Definición
Defensas Fluviales	Bueno	Obra estable opera correctamente
	Regular	Obra opera, sin embargo, podría presentar problemas de estabilidad en el corto plazo
	Malo	Obra inestable, presenta desprendimiento de material con evidencia de posible desborde
Atravesos	Bueno	Obra estable, opera correctamente
	Regular	Obra opera, sin embargo, podría presentar problemas de estabilidad en el corto plazo
	Malo	Obra inestable, presenta desprendimiento de material con evidencia de posible desborde
Bocatomas	Bueno	Obra estable, capaz de captar y conducir eficientemente el agua desde el cauce
	Regular	Obra opera, sin embargo, no es completamente eficiente en la captación y conducción
	Malo	Obra deteriorada, incapaz de captar y/o conducir eficientemente el agua desde el cauce
Descargas	Bueno	Obra estable, entrega la descarga de forma controlada directamente al cauce
	Regular	Obra descarga al cauce, pero con riesgo de afectar terrenos colindantes
	Malo	Obra deteriorada, incapaz de descargar controladamente al cauce
Propiedades	Bueno	Límites prediales claros, debidamente delimitados en relación al cauce
	Regular	Límites prediales en riesgo de ser sobrepasados por eventuales crecidas del cauce
	Malo	Límites prediales difusos, en claro riesgo de ser sobrepasados por el cauce
Puentes	Bueno	Obra estable opera correctamente
	Regular	Obra opera, sin embargo, podría presentar problemas de estabilidad en el corto plazo
	Malo	Obra inestable, presenta desprendimiento de material con evidencia de posible desborde
APRs	Bueno	Obra estable, debidamente protegida operando correctamente
	Regular	Obra opera, sin embargo, podría presentar problemas de estabilidad en el corto plazo
	Malo	Obra sin uso o inestable, sin protección y expuesta a crecidas del cauce
Otros	Bueno	Obra estable opera correctamente
	Regular	Obra opera, sin embargo, podría presentar problemas de estabilidad en el corto plazo
	Malo	Obra inestable, presenta deterioro de material con evidencia de posible desborde

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación de los resultados del catastro se presenta a continuación, detallando la condición de cada una de las obras identificadas, a partir de los criterios presentados en el Cuadro 3-43.

Cabe destacar, que las obras de “Atraveso” mencionadas en las Fichas de Catastro, hacen referencia a una serie de obras, que cruzan o atraviesan el cauce, de una ribera a otra, detallándose para cada una de ellas, el tipo de obra de Atraveso a la que corresponde; ya sea de tipo vial, peatonal, entre otras. Así como también, su materialidad y origen de la construcción; encontrándose obras rústicas de construcción artesanal (principalmente asociadas a pasarelas peatonales), otras con mayor grado de acabado (principalmente asociadas a cruces vehiculares) y otras orientadas a cruces de tuberías o tendidos eléctricos.

A su vez, el ítem “Otros”, se refiere a obras que se observan en el cauce y que no se logran encasillar en el resto de los agregados de las Fichas. Las obras más importantes que se identificaron en este apartado, fueron las asociadas a Sistemas de Agua Potable Rural (APR) y Estaciones Fluviométricas.

En el Cuadro 3-44, se presenta un resumen, con la totalidad de obras catastradas en la cuenca del río San Pedro y Vilama, separadas por ítem y cuenca de estudio.

Por último, en los acápite siguientes, se entrega un detalle de cada una de las obras catastradas, pudiendo identificarse los distintos tipos de Atraviesos identificados y las obras asociadas al ítem Otros.

CUADRO 3-44: OBRAS CATASTRADAS EN EL LOS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA

CUENCA	Río San Pedro	Río Vilama	TOTAL
Defensas Fluviales	46	4	50
Puentes	1	0	1
Atraviesos	51	4	55
Bocatomas	6	0	6
Descargas	22	1	23
Propiedades	3	0	3
Estaciones Fluviométricas	2	0	2
APR	0	1	1
Otros	4	1	5
TOTAL DE OBRAS EN LA CUENCA	135	11	146

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. Río San Pedro

El río San Pedro, nace de la confluencia de los ríos Grande y Salado, los cuales se unen a unos 12 km al norte de la ciudad de San Pedro de Atacama, cerca de la localidad de Cuchabrache.

El recorrido se inició en la Estación Fluviométrica de la Dirección General de Aguas (DGA) en Cuchabrache, en donde el río circula por su cauce natural, sin presencia de defensas fluviales. Sin embargo, en este lugar, existen dos obras de bocatoma. La primera de ellas, en la ribera derecha del cauce, la cual muestra evidentes signos de deterioro, producto de la crecida del cauce, lo cual causó el aterramiento de dicha obra y destrucción del inicio del canal revestido. Por su parte, en el mismo sector, pero en la ribera izquierda, se ubica la bocatoma del canal Cuchabrache, la que se encuentra operativa y en buenas condiciones generales, salvo su obra de desviación, la que ha sido rehabilitada, para lograr captar las aguas del río.

Aguas abajo, el canal Cuchabrache realiza continuas descargas al río, algunas de ellas cuentan con compuertas para su operación, mientras que otras lo hacen por medio de tacos rústicos, compuestos principalmente de tierra, rocas y ramas.

En este primer tramo del río, se observan algunas áreas de cultivo, bastante separadas unas de otras, algunas de las cuales, cuentan con accesos que deben atravesar el río. Estas zonas de cultivo, en donde se desarrolla principalmente alfalfa, cultivos anuales y algunas hortalizas, van aumentando en número, en la medida que se acerca a sector de Catarpe. En esta localidad, también aparecen las primeras defensas fluviales, siendo la principal, la que protege a la Sede Vecinal, la cual cuenta con tres niveles de gaviones, de una altura aproximada de 1 m cada uno, los que, a la fecha del catastro, se encontraban ampliando hacia aguas arriba, protegiendo los accesos al sector.

Como es la tónica en este tramo del río, su cauce tiende a desviarse durante las distintas crecidas, debido a lo extenso y plano del área de influencia del mismo, observándose numerosos cruces del camino principal, alguno de los cuales cuenta con obras asociadas. Ejemplo de esto, son los tubos corrugados que conforman un viaducto en el sector de la quebrada Chulacao, también conocida como “la garganta del Diablo”.

Ya acercándose al radio urbano de la ciudad de San Pedro de Atacama, aumentan considerablemente la cantidad de defensas fluviales existentes y en construcción, encauzando completamente el río. Las defensas fluviales observadas, son casi en su totalidad, compuestas de gaviones, de entre 2 a 3 m de altura (dos a tres niveles) y se encuentran en óptimo estado, muchos de ellos son de corta data. Este tramo de río encauzado por gaviones, solo se ve interrumpido por las descargas que hace el canal San Pedro al río y los atravesos de caminos que conectan los poblados existentes a ambos lados del río y sectores turísticos como el Pucará de Quitar y complejos hoteleros existentes en esta zona.

Circunvalando la ciudad de San Pedro, las obras de defensa se siguen construyendo y una de ellas, de considerable envergadura, es la que se está erigiendo en los alrededores del puente de acceso principal de la ciudad. Al momento del catastro, se observaron pretilos de entre 4 a 5 m de altura, aguas arriba del puente y gaviones de entre 2 y 3 m de altura, tanto aguas arriba como aguas abajo del mismo. Estas obras, tienen como objetivo, proteger la estructura del puente y sus alrededores; zona fuertemente afectada por la última gran crecida del río.

Siguiendo el transcurso del río, ya saliendo del radio urbano de la ciudad, existen un par de atravesos de caminos locales, los cuales no cuentan con mayor infraestructura asociada. Sin embargo, algo que llama la atención, es la presencia, en ocasiones riesgosa, de propiedades, principalmente de hospedaje y casas particulares, relativamente cerca del cauce del río, las cuales podrían ser alcanzadas por eventuales avenidas del río.

Posteriormente, se observa una obra de atraveso de gran envergadura, la cual corresponde a un sifón, el cual conduce las aguas del canal San Pedro, hacia los Ayllu de Coyo y Tulo. Esta obra atraviesa el lecho del río, en un tramo de aproximadamente 1km, en donde se observan numerosas cámaras de inspección, hasta llegar, primero, a un tranque acumulador (tranque Coyo), revestido de geomembrana de polietileno, ubicado a un costado del *bypass* para tránsito de camiones hacia Calama, frente al camino de acceso al Ayllu de Coyo. En paralelo a esta obra de atraveso, se dispone un tendido eléctrico, compuesto de postes de madera (polines impregnados), que conectan también a los Ayllu antes mencionados.

En la ruta o *bypass* de tránsito de camiones a Calama, en donde se encuentra el acceso a los Ayllu de Coyo y Tulor, el río atraviesa el camino, por medio de numerosos viaductos, algunos de mayor data y otro de reciente construcción y/o rehabilitación. Esta característica, también obedece a la variabilidad de las crecidas del río, las cuales, han afectado a esta ruta en distintos puntos, teniéndose que invertir en estas obras y así permitir que el río circule expeditamente, evitando nuevos cortes en la ruta.

En el último tramo del catastro, correspondiente al transcurso del río, frente a los Ayllu de Coyo y Tulor, se observa otra obra de atraveso tipo sifón, en este caso, correspondiente al canal Vilama, el cual transporta agua para el riego de los Ayllu antes mencionados. Esta obra, al igual que la anterior, cruza el río por medio de tubos de polietileno corrugado, con cámaras de inspección a lo largo de su curso. Otra particularidad observada en este tramo, corresponde a una zona de procesado de áridos, en la cual se observaron depósitos de material de distinto tamaño, tamices y un retroexcavadora. Sin embargo, no se observaron operadores al momento del catastro. Finalmente, este tramo del río cuenta con un desnivel mínimo, respecto del camino que conecta los Ayllu y que circula en paralelo al cauce, solo en un pequeño tramo existe un pretil de material aluvial que lo protege, pero se observa un riesgo de intrusión del río, en la eventualidad de una crecida importante.

En el Cuadro 3-45 se presenta la totalidad de obras y actividades catastradas en el río San Pedro. A su vez, en el Cuadro 3-46 se resumen y clasifican estas obras, según su estado de conservación y/o funcionamiento. Finalmente, en la Figura 3-67, se grafica la ubicación de cada una de las obras y actividades catastradas.

CUADRO 3-45: OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO SAN PEDRO

N°	Km	Tipo de Obra	Estado de Conservación	Descripción
SPa1		Atraveso	Regular	cruce de río hacia casa particular
SPa2		Atraveso	Regular	cruce desde camino principal hacia casa en ribera derecha
SPa3		Atraveso	Regular	Viaducto de tubos corrugados
SPa4		Atraveso	Malo	Cruce de camino sobre río, sector Catarpe
SPa5		Atraveso	Bueno	cruce desde camino principal a hotel alto atacama
SPa6		Atraveso	Regular	cruce de camino sobre río, en sector Pucará de Quito, entre gaviones en ambas Riberas
SPa7		Atraveso	Regular	Cruce de camino entre gaviones
SPa8		Atraveso	Regular	Cruce camino San Pedro urbano
SPa9		Atraveso	Regular	Cruce de camino cerca de Hotel Kunza
SPa10		Atraveso	Bueno	Sifón, cruza río en dirección a Coyo, actualmente seco, pero en buenas condiciones
SPa11		Atraveso	Bueno	Sifón, cruza río en dirección a Coyo, operativo y en buenas condiciones

CUADRO 3-45: OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO SAN PEDRO

N°	Km	Tipo de Obra	Estado de Conservación	Descripción
SPa12		Atravesio	Bueno	Serie de postes que cruzan de este a oeste el río San Pedro, hasta encontrarse con carretera que lleva camiones a Calama
SPa13		Atravesio	Bueno	cruce de río bajo camino q conecta a Calama (vía de camiones) a la altura de coyo
SPa14		Atravesio	Bueno	Viaducto de <i>bypass</i> de camiones a Calama
SPa15		Atravesio	Bueno	Viaducto de <i>bypass</i> de camiones a Calama
SPa16		Atravesio	Bueno	Sifón que cruza aguas de canal Vilama hacia Ayllu de Tulor
SPa17		Atravesio	Regular	Viaducto se tres tubos de concreto y mampostería antiguos, a un costado de viaducto nuevo
SPdf1		Defensa Fluvial	Regular	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf2		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf3		Defensa Fluvial	Regular	Pretil de material fluvial
SPdf4		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con enrocado
SPdf5		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf6		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf7		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf8		Defensa Fluvial	Regular	Pretil de material fluvial
SPdf9		Defensa Fluvial	Malo	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf10		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial
SPdf11		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf12		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf13		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf14		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf15		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf16		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf17		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf18		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf19		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial
SPdf20		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf21		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf22		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf23		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf24		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf25		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf26		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf27		Defensa Fluvial	Regular	Pretil de material fluvial
SPdf28		Defensa Fluvial	Regular	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf29		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial
SPdf30		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial

CUADRO 3-45: OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO SAN PEDRO

N°	Km	Tipo de Obra	Estado de Conservación	Descripción
SPdf31		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial
SPdf32		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf33		Defensa Fluvial	Regular	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf34		Defensa Fluvial	Regular	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf35		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf36		Defensa Fluvial	Regular	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf37		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial
SPdf38		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf39		Defensa Fluvial	Malo	Revestimiento de ribera con mampostería
SPdf40		Defensa Fluvial	Regular	Revestimiento de ribera con gaviones
SPdf41		Defensa Fluvial	Regular	Pretil de material fluvial
SPdf42		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial
SPdf43		Defensa Fluvial	Bueno	Pretil de material fluvial
SPdf44		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con enrocado
SPdf45		Defensa Fluvial	Bueno	Revestimiento de ribera con enrocado
SPdf46		Defensa Fluvial	Regular	Pretil de material fluvial
SPp1		Puente	Bueno	Puente con obras en construcción bajo el, de protección del mismo (gaviones)
SPb1		Bocatoma	Malo	Bocatoma aterrada
SPb2		Bocatoma	Bueno	Bocatoma Cuchabrache
SPb3		Bocatoma	Bueno	Bocatoma en Catarpe
SPb4		Bocatoma	Bueno	Bocatoma en Catarpe
SPb5		Bocatoma	Regular	Bocatoma canal San Pedro
SPb6		Bocatoma	Bueno	Bocatoma en buen estado, sin uso, a un costado de descarga de quebrada revestida
SPd1		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd2		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd3		Descarga	Bueno	Inicio de descarga abovedada
SPd4		Descarga	Regular	Confluencia de quebrada con río
SPd5		Descarga	Regular	Descarga posterior a cruce de canal sobre quebrada
SPd6		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd7		Descarga	Regular	Descarga de canal a río. Canal aterrado
SPd8		Descarga	Bueno	Obra de bypass para descarga de canal a río
SPd9		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd10		Descarga	Bueno	Descarga de quebrada revestida, cruza sobre canal revestido
SPd11		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd12		Descarga	Bueno	descarga previa a ingreso a tranque canal San Pedro

CUADRO 3-45: OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO SAN PEDRO

N°	Km	Tipo de Obra	Estado de Conservación	Descripción
SPd13		Descarga	Malo	descargas de canal San Pedro, actualmente aterradas, posteriormente, canal continúa entubado
SPd14		Descarga	Bueno	tubería de descarga en entrada oriente de hotel alto atacama
SPd14		Descarga	Bueno	descarga posterior a sección entubada de canal, de ahí en adelante sigue canal revestido abierto
SPd15		Descarga	Bueno	descarga en sector de barrera Catarpe, canal se divide en dos, un brazo actúa de decantador, pero sin mucho éxito
SPd16		Descarga	Regular	Descarga de canal a río
SPd17		Descarga	Bueno	más que entubado es abovedado
SPd18		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd19		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd20		Descarga	Bueno	Descarga de canal a río
SPd21		Descarga	Regular	desnivel de gavión q funciona como descarga
SPpr1		Propiedades	Regular	predio a un costado de río, cerco a un costado de cauce, se observan daños por crecidas
SPpr2		Propiedades	Bueno	Hotel Kunza
SPpr3		Propiedades	Regular	Serie de casas particulares y de hospedaje a un costado de caja de río
SPo1		Estación Fluviométrica	Regular	Estación Fluviométrica DGA en Cuchabrache
SPo2		Borde de canal	Malo	borde de canal, revestido de geomembrana y sujeto con bolones y tablas
SPo3		Canal deteriorado	Malo	sección de canal revestido y compuertas de descargas, destruidas por crecida
SPo4		Tranque comunitario	Bueno	tranque revestido de geomembrana
SPo5		Estación Fluviométrica	Malo	Estación Fluviométrica DGA en Quito
SPo6		Tranque	Bueno	Tranque a un costado de carretera a Calama (bypass)

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3-46: OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO SAN PEDRO

TIPO DE OBRA	ESTADO			TOTAL OBRAS
	Bueno	Malo	Regular	
Atraveso	8	1	8	17
Bocatoma	4	1	1	6
Defensa Fluvial	33	2	11	46
Descarga	16	1	5	22
Estación Fluviométrica	0	1	1	2
Propiedades	1	0	2	3
Puente	1	0	0	1
Otro	2	2	0	4
TOTAL GENERAL	65	8	28	101

Fuente: Elaboración propia.

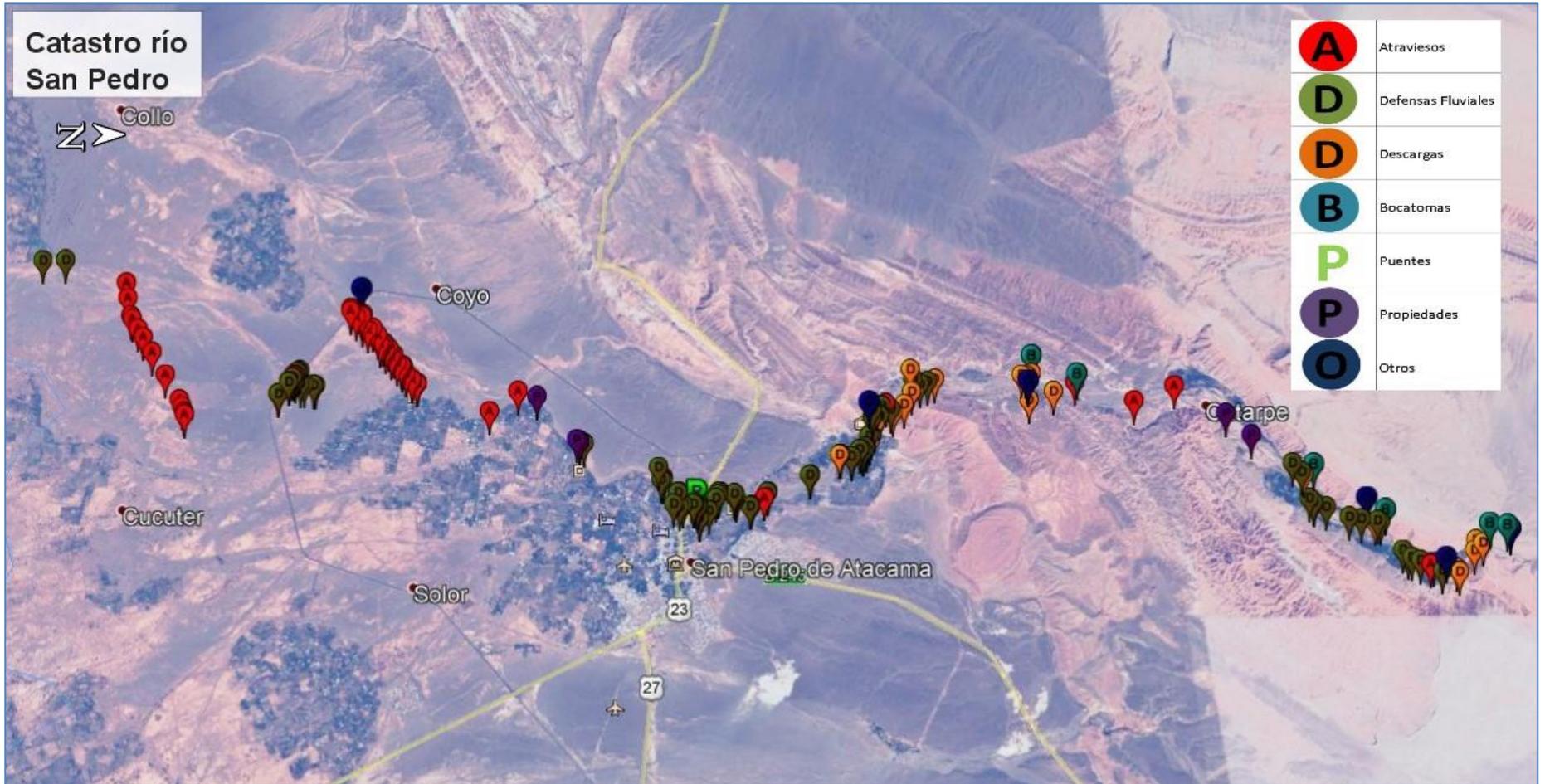


FIGURA 3-67: UBICACIÓN INFRAESTRUCTURA CATASTRADA ENRÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

3.4.1.3. Río Vilama

El tramo a catastrar en el río Vilama, comprende una extensión de aproximadamente 2 km, en el cual, el río circula a un costado del Ayllu del mismo nombre; zona en donde se observan pequeñas áreas de cultivo y arboleda.

A la fecha del catastro, el río no contaba con agua superficial, siendo encauzada en la parte alta del río, a través del canal Vilama, el cual lleva sus aguas hasta los Ayllu de Coyo y Tulor. Esta obra posee gran importancia, ya que a diferencia del río San Pedro, las aguas del río Vilama son claras y libres de turbiedad, por lo que son más valoradas por los agricultores.

Al inicio del tramo a catastrar, se observa un encauzamiento reciente, construido a partir de material fluvial y una pequeña porción de enrocado. Toda esta obra de defensa fluvial, tiene como objetivo, proteger al Ayllu, de las crecidas del río. Del mismo modo, en esta primera parte, se observa infraestructura asociada a la planta de Agua Potable existente en el sector, compuesta de dicha instalación, obras para el tratamiento de aguas servidas y una serie de cámaras de inspección, que acompañan a las tuberías de conducción, en dirección a la ciudad de San Pedro.

Aguas abajo, no se observan nuevas obras, a excepción de algunos postes de un antiguo tendido eléctrico, el cual no se encuentra operativo, pero que aún se yerguen sobre el área de influencia del río. En este tramo final, cruza un camino local, el cual conecta internamente al Ayllu de Vilama, con la planta de Agua Potable y posteriormente con la ruta 27-CH, que conecta San Pedro con el Paso Fronterizo de Jama.

En el Cuadro 3-47 se presenta la totalidad de obras y actividades catastradas en el río Vilama. A su vez, en el Cuadro 3-48 se resumen y clasifican estas obras, según su estado de conservación y/o funcionamiento. Finalmente, en la Figura 3-68, se grafica la ubicación de cada una de las obras y actividades catastradas.

CUADRO 3-47: OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO VILAMA

N°	Km	Tipo de Obra	Estado de Conservación	Descripción
Vla1		Atravieso	Malo	Serie de postes de madera que cruzan transversalmente el río Vilama. Actualmente están los postes pero con sus cables cortados
Vla2		Atravieso	Regular	cruce de camino sobre río Vilama, camino de tierra
Vldf1		Defensa Fluvial	Bueno	peinado o encauzado de río, con material fluvial en ambas Riberas
Vldf2		Defensa Fluvial	Bueno	pretil de material fluvial hasta inicio de enrocado con bolones
Vldf3		Defensa Fluvial	Bueno	enrocado de menor tamaño, posterior a pretil de ficha anterior
Vldf4		Defensa Fluvial	Bueno	pretil a continuación de enrocado de ficha anterior
Vld1		Descarga	Bueno	descarga de canal Vilama hacia río, punto en donde inicia tramo abovedado de canal
Vlo1		Otros	Bueno	serie de cámaras de inspección del APR de Vilama que cruzan río de este a oeste

CUADRO 3-47: OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO VILAMA

N°	Km	Tipo de Obra	Estado de Conservación	Descripción
Vlo2		Otros	Bueno	tranque de tratamiento de aguas servidas, aguas abajo de pozo APR de Vilama

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 3-48: RESUMEN OBRAS CATASTRADAS EN EL RÍO VILAMA

TIPO DE OBRA	ESTADO			TOTAL
	Bueno	Malo	Regular	
Atraveso	0	1	1	2
Defensa Fluvial	4	0	0	4
Descarga	1	0	0	1
APR	1	0	0	1
Otros	1	0	0	1
Total general	7	1	1	9

Fuente: Elaboración propia.

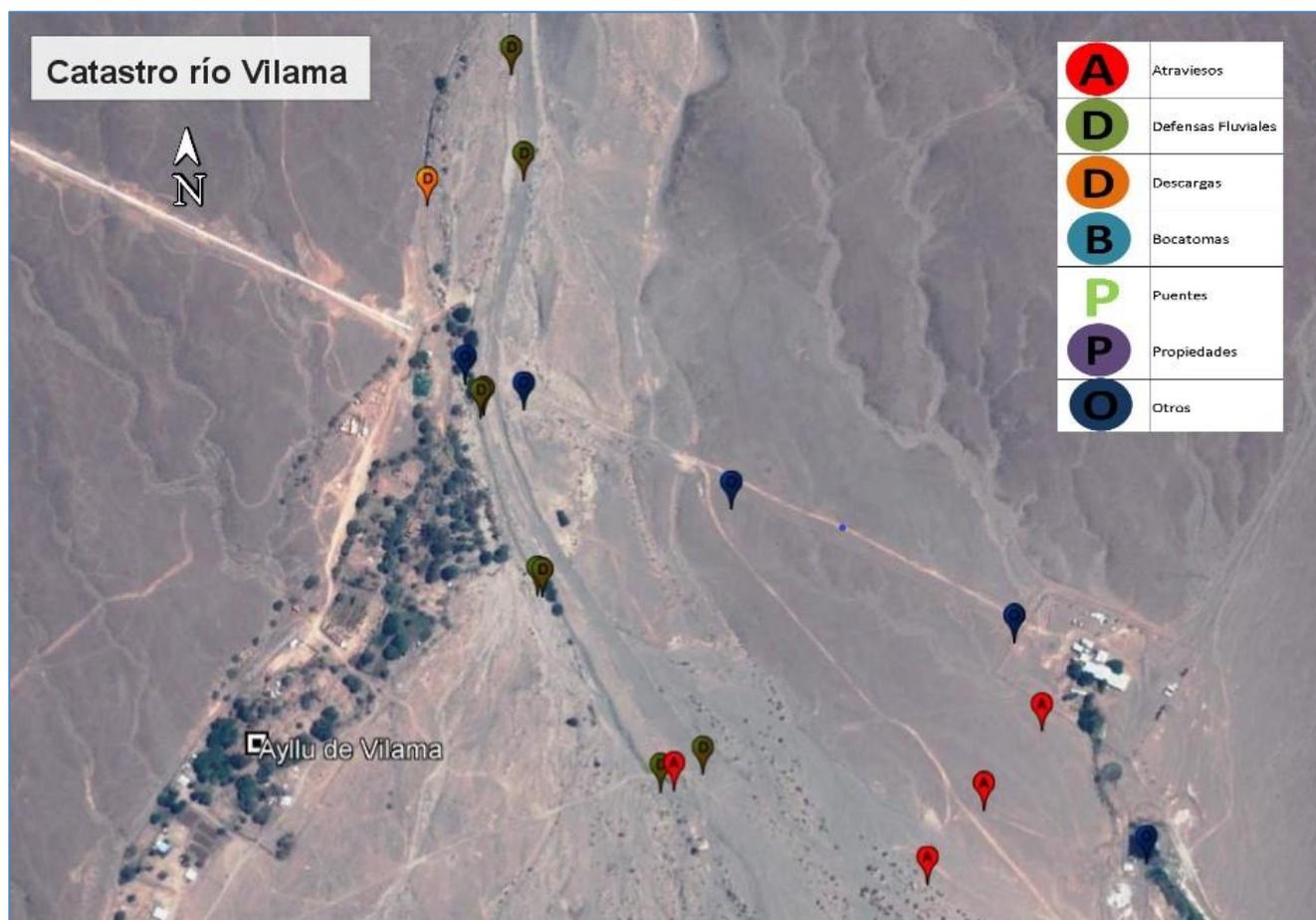


FIGURA 3-68: UBICACIÓN INFRAESTRUCTURA CATASTRADA EN RÍO VILAMA

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

3.4.2. Extracción y Procesamiento de Áridos

A lo largo del río San Pedro, solo se observó una zona en donde se realizaban labores de procesado de áridos. El cual, se encontraba ubicado a un costado del camino que conecta los Ayllu de Coyo y Tolor. En este lugar, se observaron equipos mecánicos para el procesado y clasificación de áridos, además de una retroexcavadora que remueve y traslada el material. Sin embargo, según lo observado, en este lugar solo se procesa el material, dado que no se encontraron pozos lastreros u otros indicios de extracción de material desde esa zona del río.

Otra zona en donde existe un alto nivel de remoción, traslado y perfilado de material, es en los alrededores del puente de acceso a la ciudad de San Pedro. Producto de las faenas que se desarrollan en ese lugar, que tienen como finalidad, proteger esta infraestructura de ingreso, se han realizado importantes movimientos de material fluvial, los que han sido perfilados y acomodados en pretilos de diversa envergadura, acompañado de gaviones que rodean al puente.

En el área de estudio del río Vilama, no se observaron zonas de extracción de áridos, ni otros sitios de remoción de material fluvial.

En la Figura 3-69, se ubica la zona de procesado de áridos identificada durante el catastro.

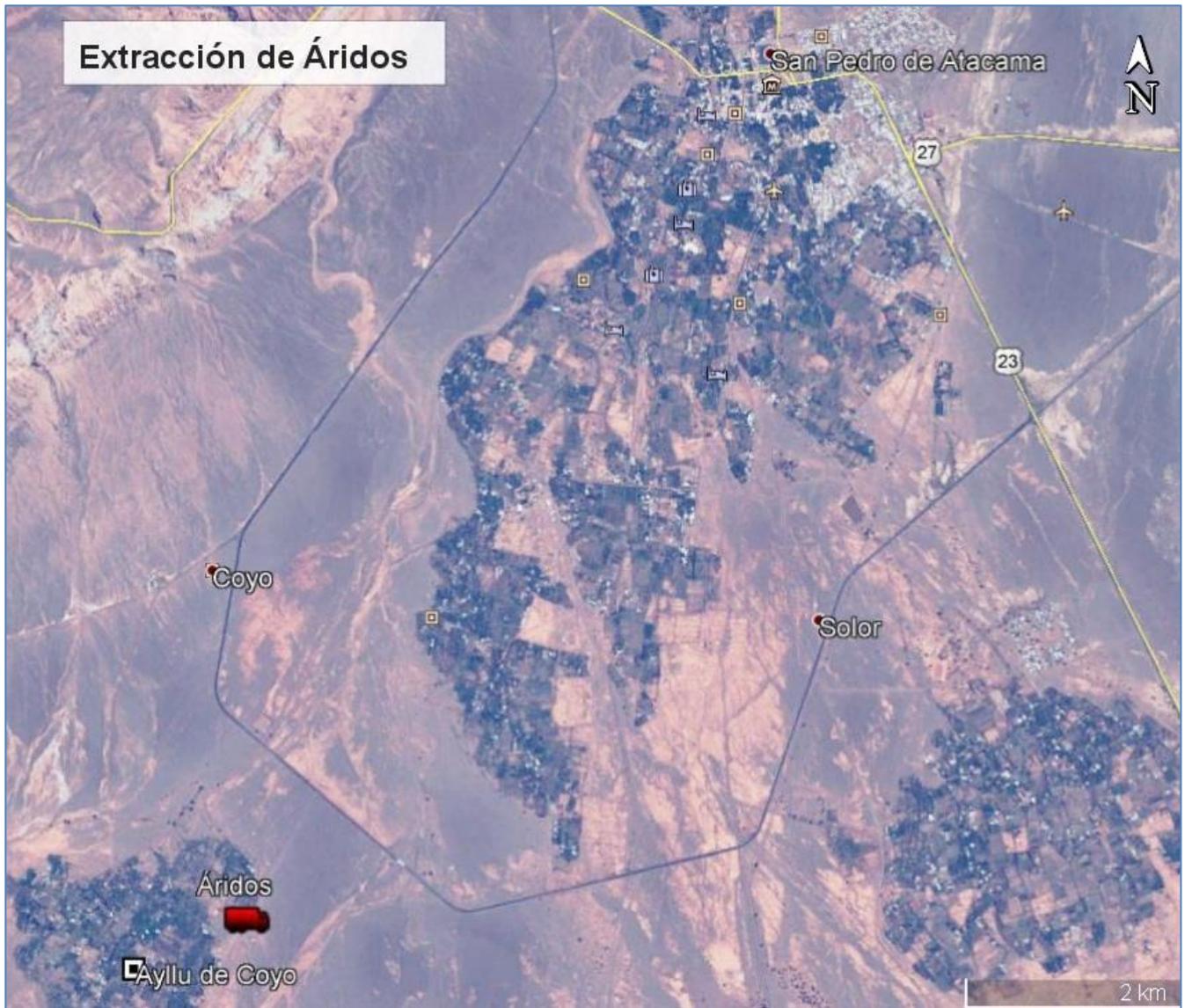


FIGURA 3-69: UBICACIÓN EXTRACCIONES DE ÁRIDOS EN ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración Propia a partir de Google Earth.

3.4.3. Zonas de Riesgo

A partir de la identificación de terrenos realizados durante el “Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro” (CNR 2014), se seleccionan los predios que se encuentran al interior del área de estudio, posterior a esto, se identifica cuáles de estos presentan algún tipo de riesgo según la encuesta de los factores subyacentes de riesgo de desastres, aplicada por la ONEMI en marzo de 2018, donde se identifican causas como; activación de quebradas, flujos de barro, inundación por de desborde de cauce, interrupción de caminos etc.

La identificación espacial de riesgos pudo ser ratificada con el evento del año 2019 a partir del catastro de daños realizado por el Minvu.

Respecto al uso del suelo acorde a la información obtenida del Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, se aprecia que gran parte de los predios dentro de la zona de estudio tienen un uso parcial o totalmente agrícola, de la información obtenida del plan regulador comunal solo se puede identificar zonas arqueológicas dentro del área de estudio y lamentablemente a la fecha no se cuenta con un plan regulador intercomunal vigente. En la Figura 3-70 se presenta la distribución del uso de suelo previamente mencionada, lamentablemente no se cuenta con información para caracterizar la zona de Vilama.

Respecto a la presencia de basurales o rellenos clandestinos, que puedan contribuir con material que pueda ser arrastrado en las crecidas, estos no se identifican en el área de estudio.

En la Figura 3-71 y Figura 3-72 se puede observar la distribución de los predios presentes y el color que tienen denota el riesgo que presentan según los antecedentes de la ONEMI, además en triángulos se presentan las ubicaciones donde se catastraron los daños. La presencia de los sectores con daños registrados evidencia que las previas indicaciones de riesgo en las zonas cercanas al puente fueron acertadas y que la zona requiere especial atención en el desarrollo del presente proyecto.

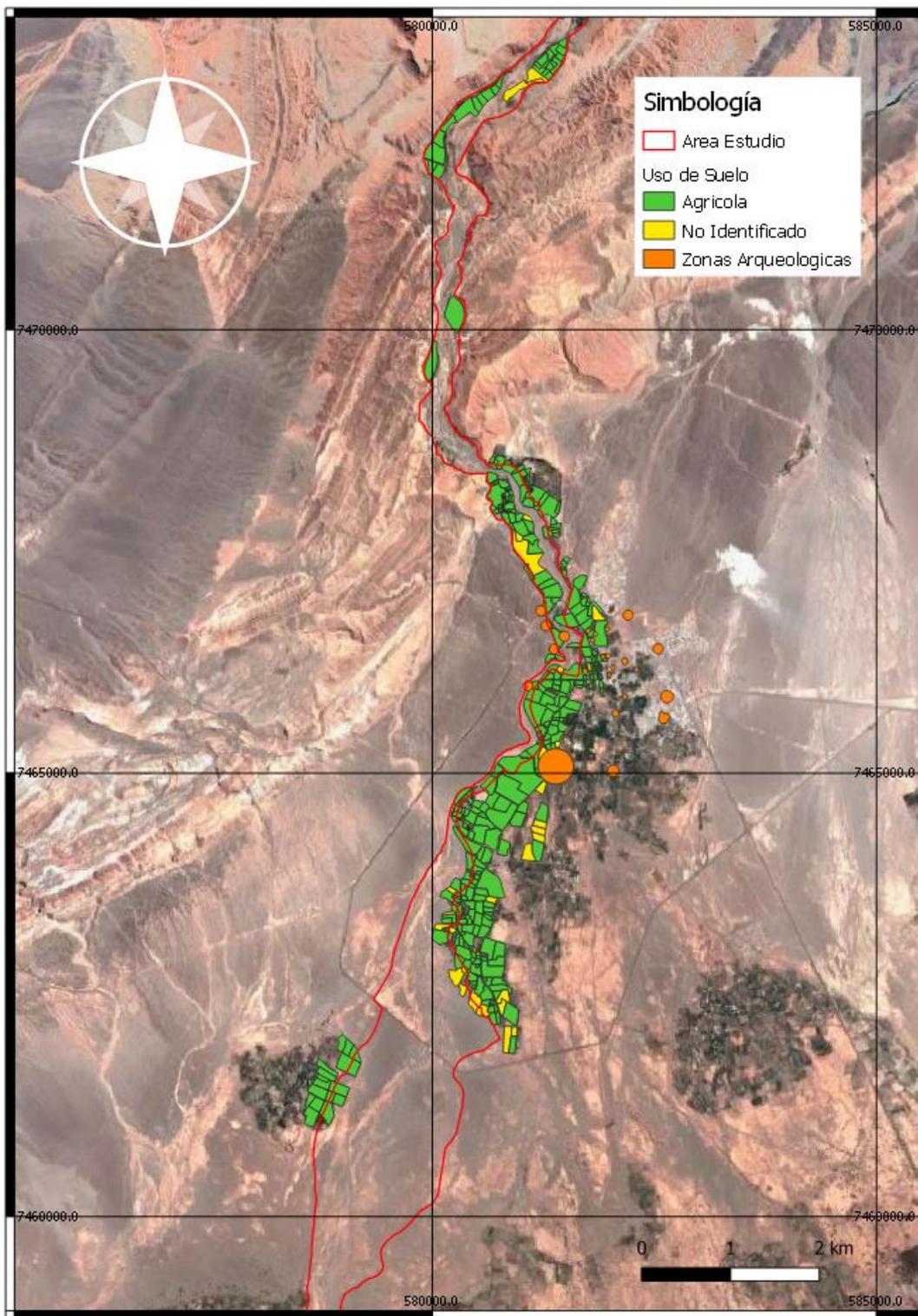


FIGURA 3-70: USOS DE SUELO EN ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración Propia

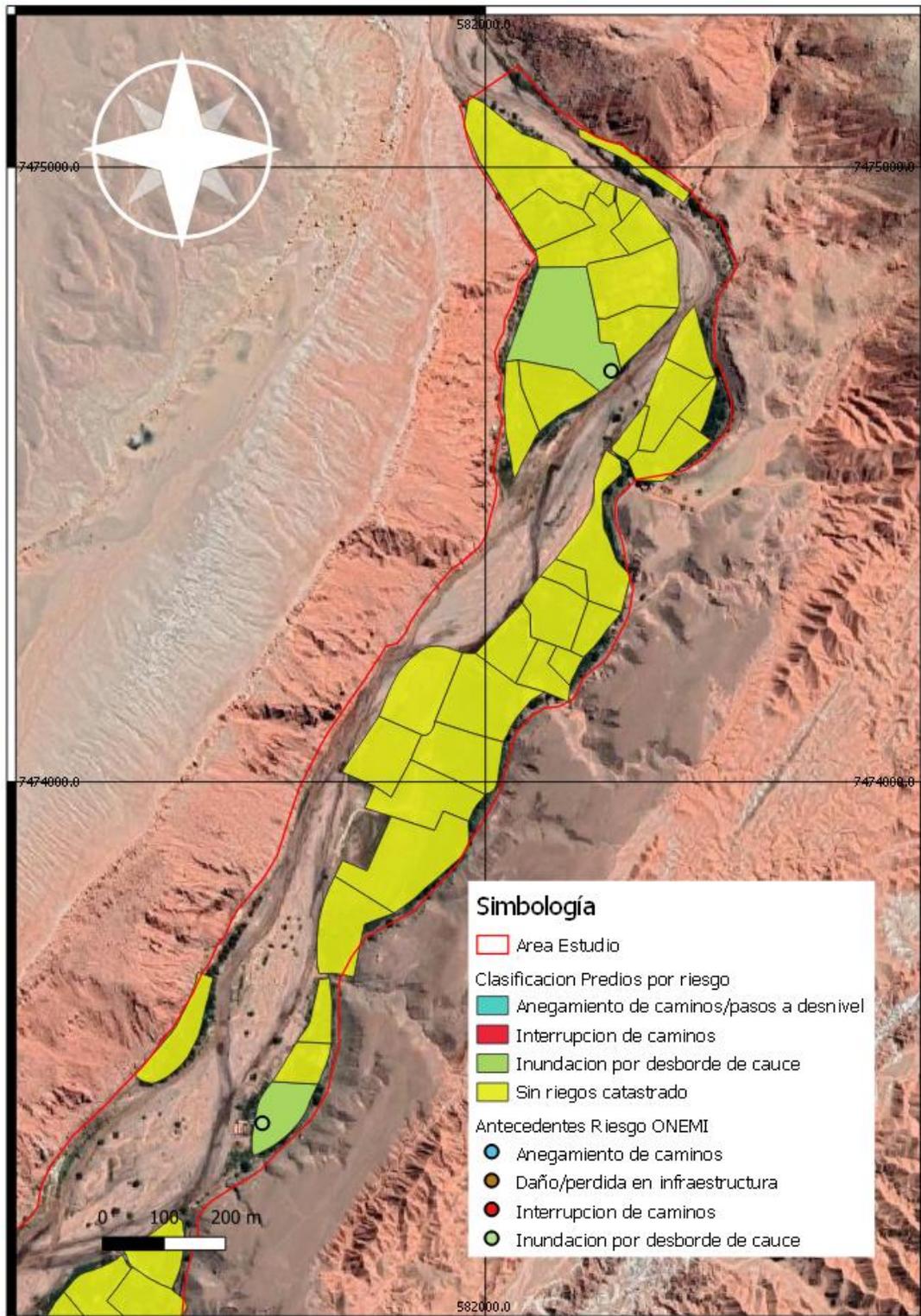


FIGURA 3-71: RIESGOS IDENTIFICADOS EN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

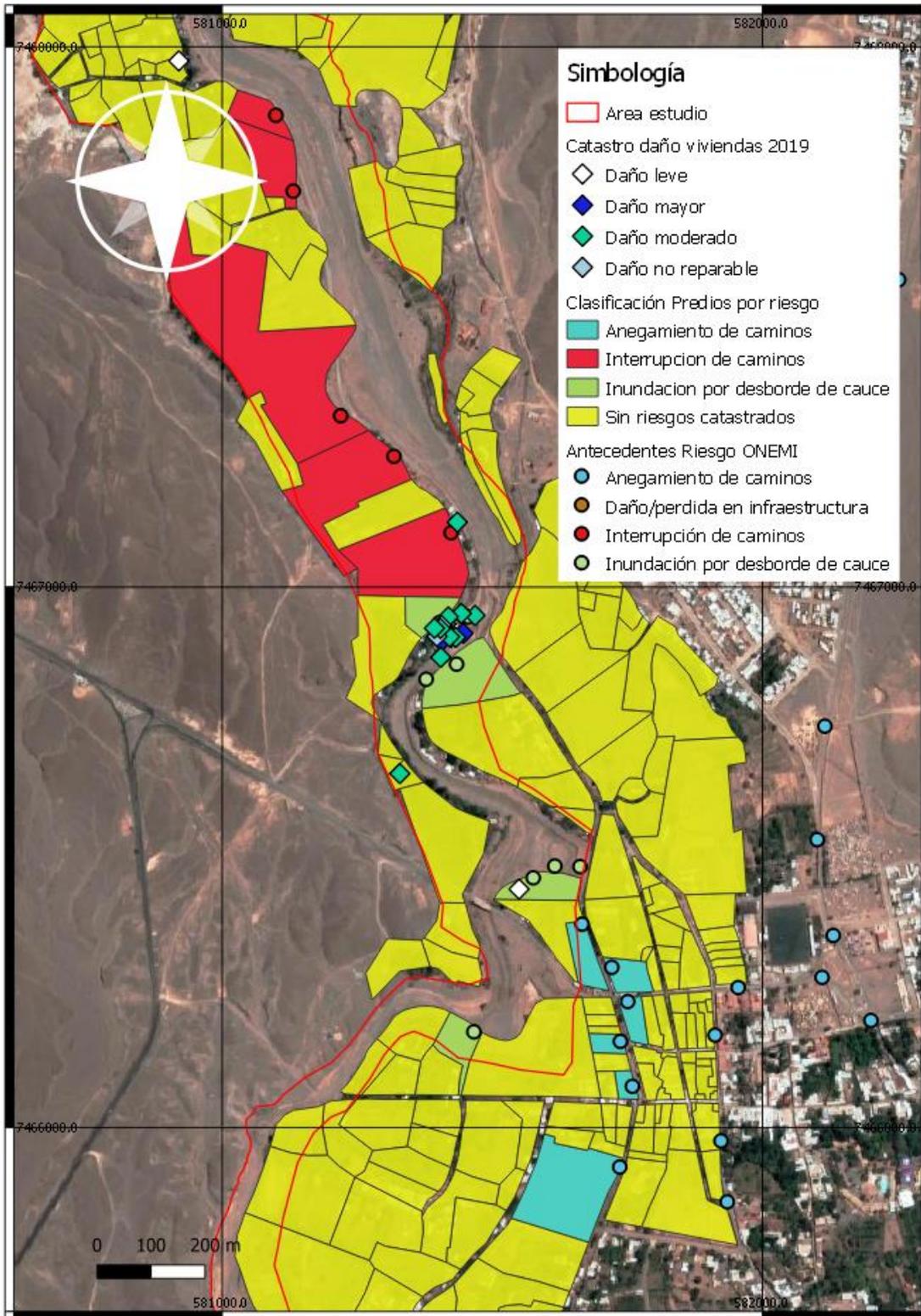


FIGURA 3-72: RIESGOS IDENTIFICADOS EN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4. Zonas de Conflicto por Deslindes

Durante el desarrollo del estudio no se han detectado zonas conflictos de deslindes, puesto que no existen deslindes para los cauces en estudio.

Considerando lo anteriormente señalado, definido geomorfológicamente el límite del cauce que podría ser considerado para una futura definición de deslindes (Figura 3-73).

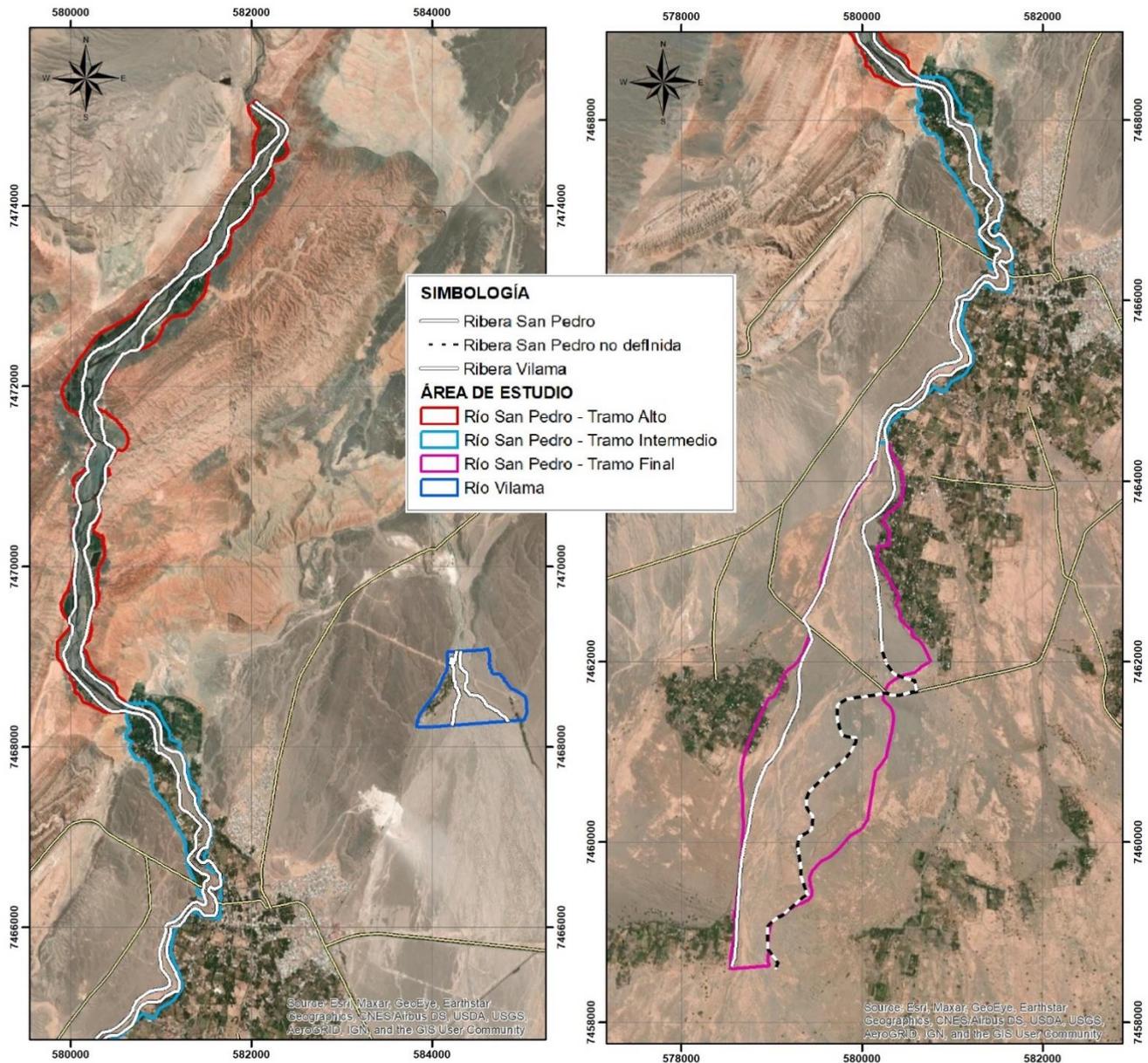


FIGURA 3-73: RIBERAS GEOMORFOLÓGICAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta esta propuesta, es posible identificar que comparando el deslinde propuesto con las construcciones identificadas en la imagen satelital 2021, existen construcciones que se “cortan” con el deslinde o quedan al interior del área propuesta. Estos sectores, en conjunto con las áreas de cauce ocupadas ilegalmente (tomas de terrenos), son potenciales conflictos que surgirán al momento de definir los deslindes del cauce del Río San Pedro. (En el caso del Río Vilama no existen construcciones en el área). Lo anteriormente señalado se puede observar en la Figura 3-74.

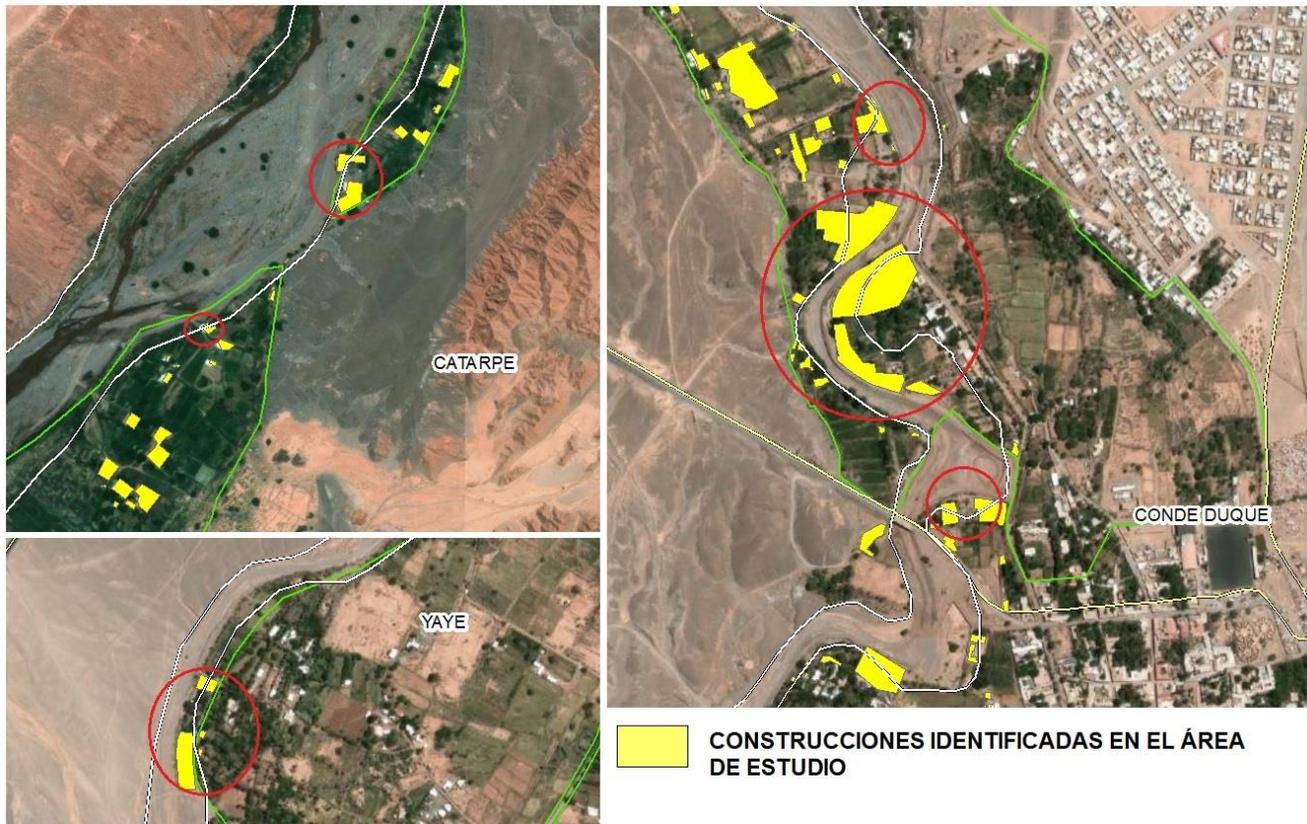


FIGURA 3-74: CONSTRUCCIONES INTERSECTADAS POR LA LÍNEA DE RIBERA PROPUESTA

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente el sector de Catarpe presentado en la figura, fueron afectados por inundaciones en la crecida del año 2019, misma situación para el sector de Conde Duque, y en el caso de Yaye se presentaron áreas con erosión de riberas.

En cuanto a los predios, se estima que aproximadamente 117 predios serían afectados por la potencial área de deslinde, quedando dentro de estas superficies prediales que van desde 1 m² hasta 1,5 ha de terreno.

3.4.5. Conclusiones

El catastro de actividades y elementos, tiene como finalidad, identificar y recabar información precisa, tanto de la infraestructura existente, como de las actividades productivas realizadas en el cauce y/o ribera del Río San Pedro y Vilama, en la comuna de San Pedro de Atacama.

Se catastró un total de 110 obras de infraestructura, correspondiendo aproximadamente un 42% a obras de defensa fluvial conformadas principalmente por gaviones o por pretil de material del lecho fluvial. Del total de obras catastradas un 65% de ellas se encuentran en buen estado de conservación.

CUADRO 3-49: RESUMEN OBRAS CATASTRADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

CAUCE	TIPO DE OBRA	ESTADO			TOTAL OBRAS
		Bueno	Malo	Regular	
Río San Pedro	Atravesio	8	1	8	17
	Bocatoma	4	1	1	6
	Defensa Fluvial	33	2	11	46
	Descarga	16	1	5	22
	Estación Fluviométrica	0	1	1	2
	Propiedades	1	0	2	3
	Puente	1	0	0	1
	Otro	2	2	0	4
	Total general	65	8	28	101
Río Vilama	Atravesio	0	1	1	2
	Defensa Fluvial	4	0	0	4
	Descarga	1	0	0	1
	APR	1	0	0	1
	Otros	1	0	0	1
	Total general	7	1	1	9

Fuente: Elaboración propia.

A lo largo del río San Pedro, solo se observó una zona en donde se realizaban labores de procesado de áridos. El cual, se encontraba ubicado a un costado del camino que conecta los Ayllu de Coyo y Tulor. En este lugar, se observaron equipos mecánicos para la extracción, el procesado y clasificación de áridos.

En el área de estudio del río Vilama, no se observaron zonas de extracción de áridos, ni otros sitios de remoción de material fluvial.

Con respecto a las zonas de riesgo por deslindes, se logró recabar información detallada para toda el área de estudio, respecto a riesgos por desborde, inundación, activación de quebradas y flujos de barro, la cual fue elaborada por ONEMI en conjunto con el departamento de seguridad de la municipalidad de San Pedro de Atacama.

Finalmente, en lo que se refiere a zonas de conflicto por deslinde, es importante señalar que no existe definición de deslinde en el río San Pedro ni en el río Vilama. Sin embargo, se realizó la caracterización de los potenciales sectores que presentarían conflicto si es que el cauce es definido como la línea geomorfológica de la ribera propuesta en el análisis de dinámica fluvial realizado en el presente estudio. De lo anterior, es posible concluir que habría infraestructura en los sectores de Catarpe, Conde Duque y Yaye en potencial conflicto, mientras que serían un total de 117 predios con superficies entre 1 m² hasta 1,5 ha que pudieran tener conflicto por deslinde.

CAPÍTULO 4 ESTUDIOS BÁSICOS

0	15-11-2021	Aprobado	WLN/LEA/CG	DMP	SPA
A	11-11-2021	Emitido para Revisión Interna	WLN/LEA/CG	DMP	SPA
REV	FECHA	REVISIÓN PARA	POR	CHECK	JDP
		CÓDIGO DOCUMENTO			
		ARR104-IF-C04 0			

4. ESTUDIOS BÁSICOS

4.1. Estudio de Dinámica Fluvial

4.1.1. Caracterización del medio fluvial

La caracterización del medio fluvial se realiza a partir de un análisis geomorfológico del cauce, basado en un análisis multitemporal de imágenes satelitales y aéreas, para esto se utilizarán distintas fuentes como son el satélite Sentinel, Google Earth, imágenes del servicio aerofotogramétrico (SAF) y un estudio de prefactibilidad para el mejoramiento sistema de riego en Río San Pedro (CNR 2014), con esto se dispone de una serie de 13 años, considerado imágenes entre el año 1980 a 2020, donde las imágenes de Sentinel corresponden al periodo 2016-2020, las de Google Earth a los años 2005,2007,2009,2010 y 2013, las del SAF corresponden a los años 1980 y 1997 y las del estudio CNR corresponden al año 2012. Se descarta la utilización de otros tipos de imágenes como las del satélite LANDSAT, ya que su resolución es demasiado baja para los ríos analizados no permitiendo analizar los rastros de las crecidas.

El cauce estudiado al no ser rodeado por una vegetación abundante o presentar un material de composición evidentemente distinta en sus riberas genera desafíos a la hora de identificar el medio fluvial, para poder realizar la clasificación se utilizaron dos estrategias según la resolución de las imágenes. En las de menor resolución (10 metros) como son las del satélite Sentinel se procedió a realizar una comparación entre las imágenes del estado del río previo a la temporada de lluvias y una imagen posterior a esta temporada, de esta manera las zonas afectadas por las crecidas presentan colores que revelan la presencia de flujo, lo cual se puede observar en la Figura 4-1. En las de mayor resolución si se puede ver los vestigios de escurrimiento por lo que se pueden trazar los límites directamente, lo ideal es que las imágenes utilizadas correspondan al periodo posterior a las lluvias, para que el rastro sea el más representativo posible.

Posterior a la delimitación del cauce en cada una de las imágenes, se construye el cauce histórico basado en la recurrencia del mismo. Para esto se realiza una superposición de imágenes donde se analiza la cantidad de veces que la superficie de agua pasó por cada uno de los píxeles.

Del proceso anterior, se obtienen las superficies resultantes a las que se le asocia una probabilidad de ocurrencia entre todas las imágenes analizadas. Es así como un valor de 100 indica que el 100% de las veces la superficie representa al cauce, por otra parte, el valor de 8 indica que el 8% de las veces la superficie representa el cauce, es importante recordar que esta ocurrencia va asociada al periodo de las fotografías analizadas.



FIGURA 4-1: COMPARACIÓN DE IMÁGENES SENTINEL PARA LA CRECIDA DEL 18 FEBRERO 2020

Fuente: Elaboración Propia en base a imágenes Sentinel

En las Figura 4-2 y Figura 4-3 se presenta el cauce histórico para el río San Pedro en las zonas aguas abajo del acceso a Catarpe y en la Figura 4-4 se presenta el cauce histórico para el río Vilama. Donde llama la atención la extensión de la superficie asociada a una ocurrencia del 8% en el sector de la ruta de circunvalación para el río San Pedro, esta gran extensión se debe a que en la crecida del 2019 se produjo un apozamiento en la ruta, la cual eventualmente provocó un desborde al Ayllu de Beter, ***esta zona se encuentra fuera del área de estudio, pero se considera importante analizar este fenómeno a futuro.***

Es importante mencionar las limitaciones de este análisis, ya que estas pueden influir en los resultados, siendo las más importantes de mencionar las siguientes:

- Posterior a una gran crecida existe la posibilidad de que se produzcan trabajos para remover parte del material, si la imagen es posterior a esto se subestimaré la dimensión de la afectación.
- También existe una limitación relacionada a la ventana de tiempo acotada que se utilizó, lamentablemente esto último se ve limitado desde el punto de vista técnico, ya que, si bien existen imágenes satelitales con un mayor registro temporal, estas poseen una resolución del orden de los 30 metros lo cual es superior a la sección del cauce analizado en varios tramos por lo que no son útiles para esta tarea.

Independiente de estos puntos, el análisis realizado entrega gran valor, ya que la delimitación del cauce en la zona de estudio no es del todo evidente, porque la composición del cauce como de sus riberas no presentan una separación evidente y muchas zonas que se pensarían son riberas a simple vista conforman parte del cauce durante las crecidas.

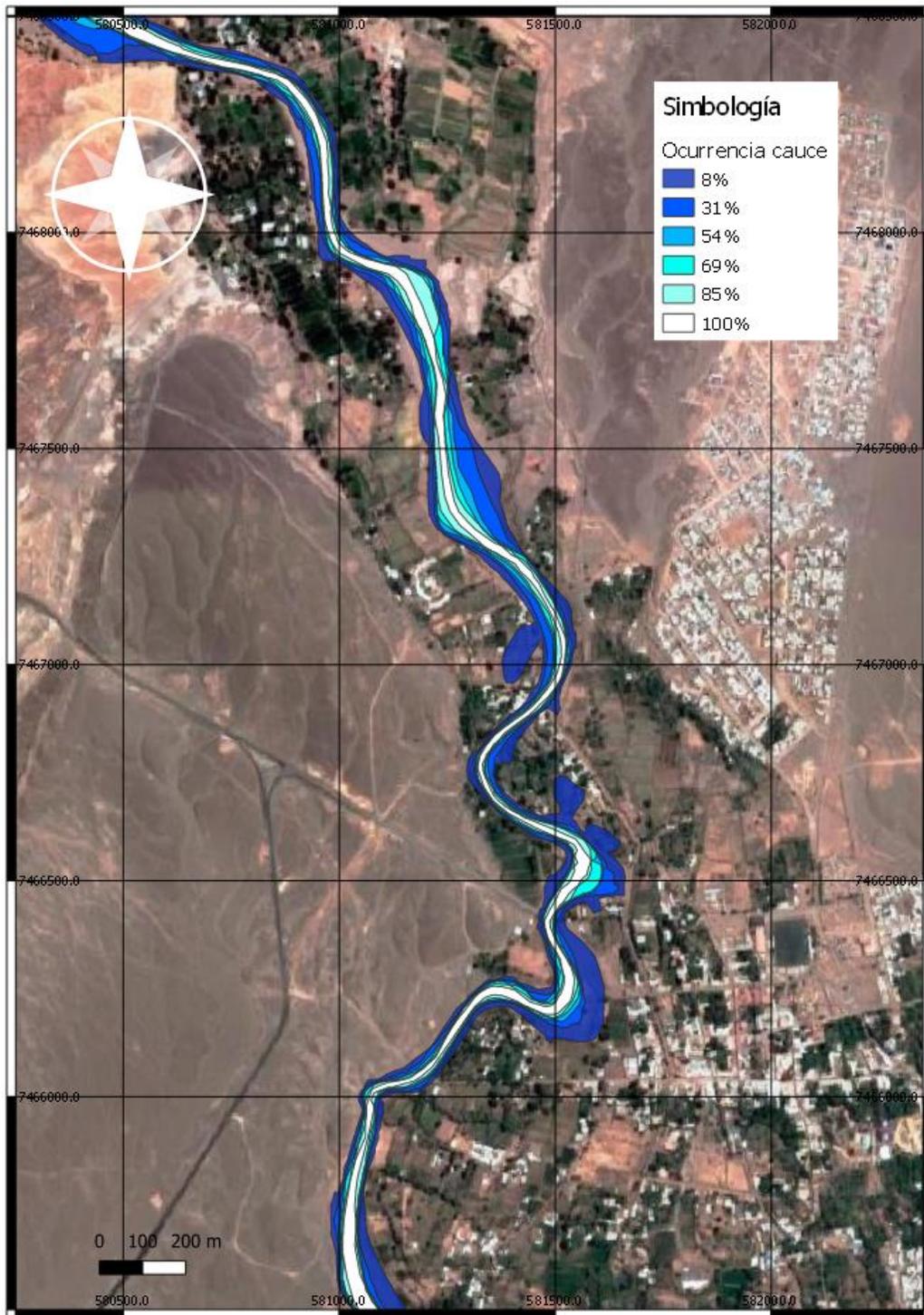


FIGURA 4-2: CAUCE HISTÓRICO EN RÍO SAN PEDRO ENTRE PUCARÁ DE QUITOR Y BADÉN DE ACCESO A SEQUITOR

Fuente: Elaboración Propia

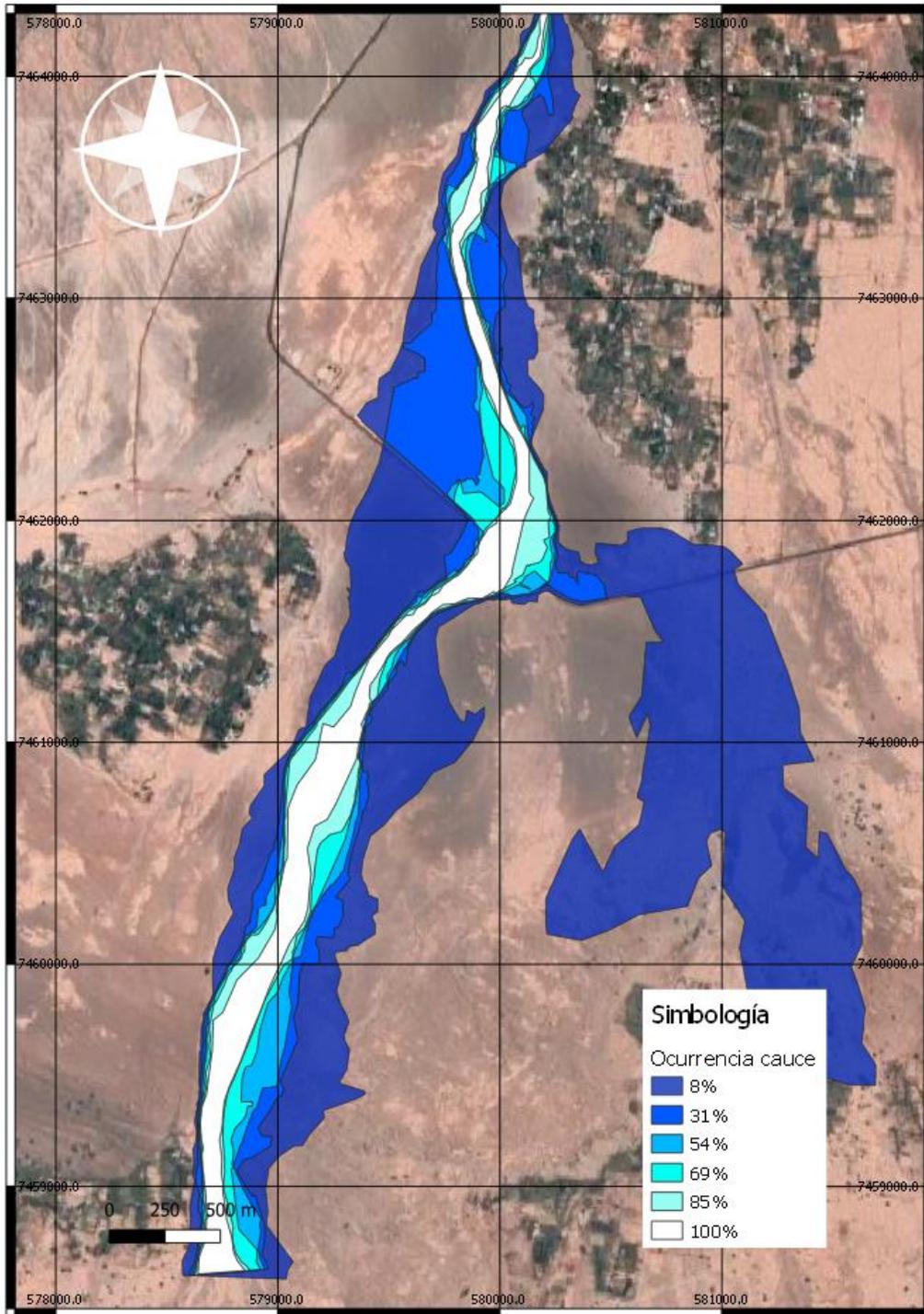


FIGURA 4-3: CAUCE HISTÓRICO EN RIO SAN PEDRO ENTRE BADÉN DE ACCESO DE SEQUITOR Y AYLLU DE TULO

Fuente: Elaboración Propia

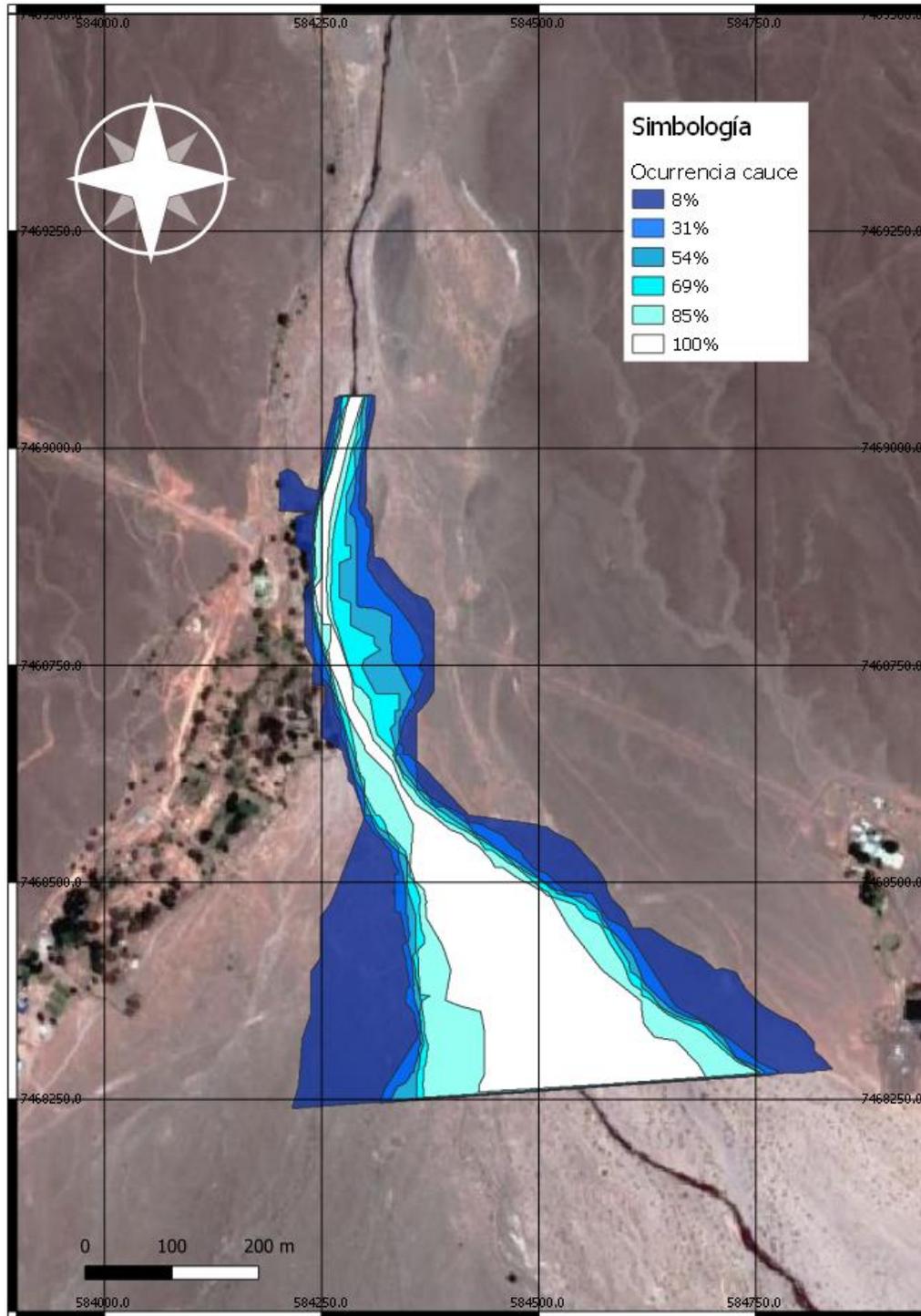


FIGURA 4-4: CAUCE HISTÓRICO EN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2. Estudio del perfil longitudinal y trazado en planta del cauce

En este acápite se incluye el estudio de la pendiente del cauce por tramos, donde se analizará si las intervenciones del cauce tienen influencia sobre la pendiente.

El trazado del cauce y perfil longitudinal se establece en los planos mediante un eje balizado, cuyo inicio se encuentra aguas arriba del cauce, materializado sobre el brazo principal del cauce.

El trazado es desarrollado por medio de un software de diseño de obras lineales, dentro de los planos se incorporan los siguientes cuadros, que respaldan el eje balizado propuesto:

- Plano de planta de ubicación general con el trazado completo del eje balizado por el brazo principal del cauce.
- Cuadros de vértices,
- Cuadros de Rectas y curvas,
- Cuadros de cotas de fondo (rasante).
- Copia del modelo con el trazado geométrico del eje del cauce.

En la Figura 4-5 se presenta el perfil longitudinal del río Vilama, se observa como la pendiente no decrece regularmente, ya que aguas arriba y durante el sector del enrocado se aprecia una pendiente menos pronunciada que aguas abajo de este, esto probablemente se le atribuye a la alta intervención que tiene el sector del río canalizado.

En la Figura 4-6 se presenta el perfil longitudinal del río San Pedro, se observa como la zona aguas arriba del puente San Pedro presenta una pendiente bastante uniforme en la zona urbana, lo cual puede ser provocado por la alta intervención del cauce, en particular el quiebre de la pendiente alrededor del kilómetro 10 puede deberse al badén que permite cruzar de una ribera a otra. El fenómeno de como los atravesos influyen en la pendiente se replica aguas abajo del puente, siendo el caso más dramático el de la ruta de circunvalación donde la pendiente disminuye abruptamente, esto coincide con la observación de que esta obra funciona como un dique durante las crecidas y que además restringe algunos de los brazos que se forman en las avenidas.

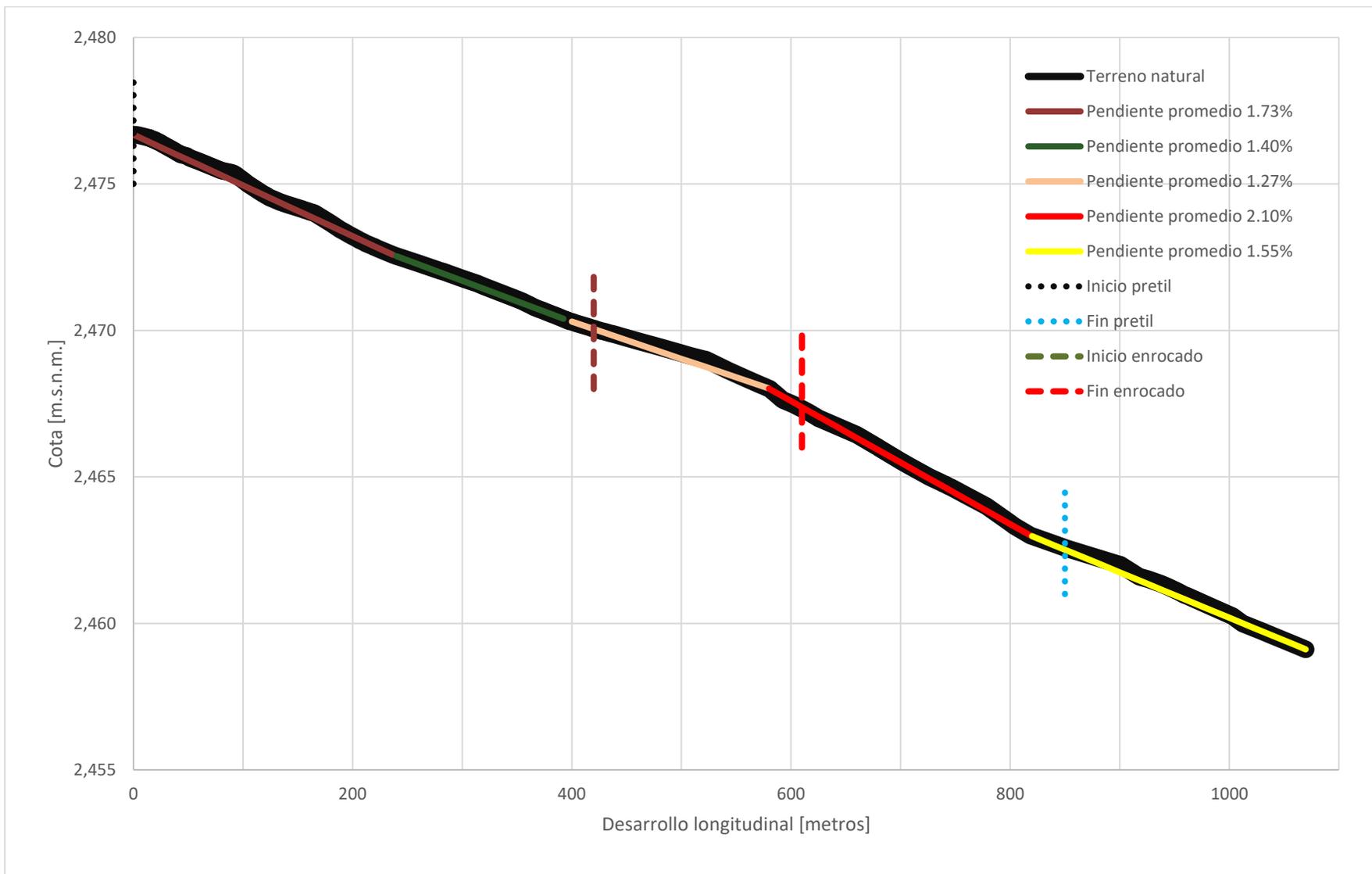


FIGURA 4-5: PERFIL LONGITUDINAL RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia

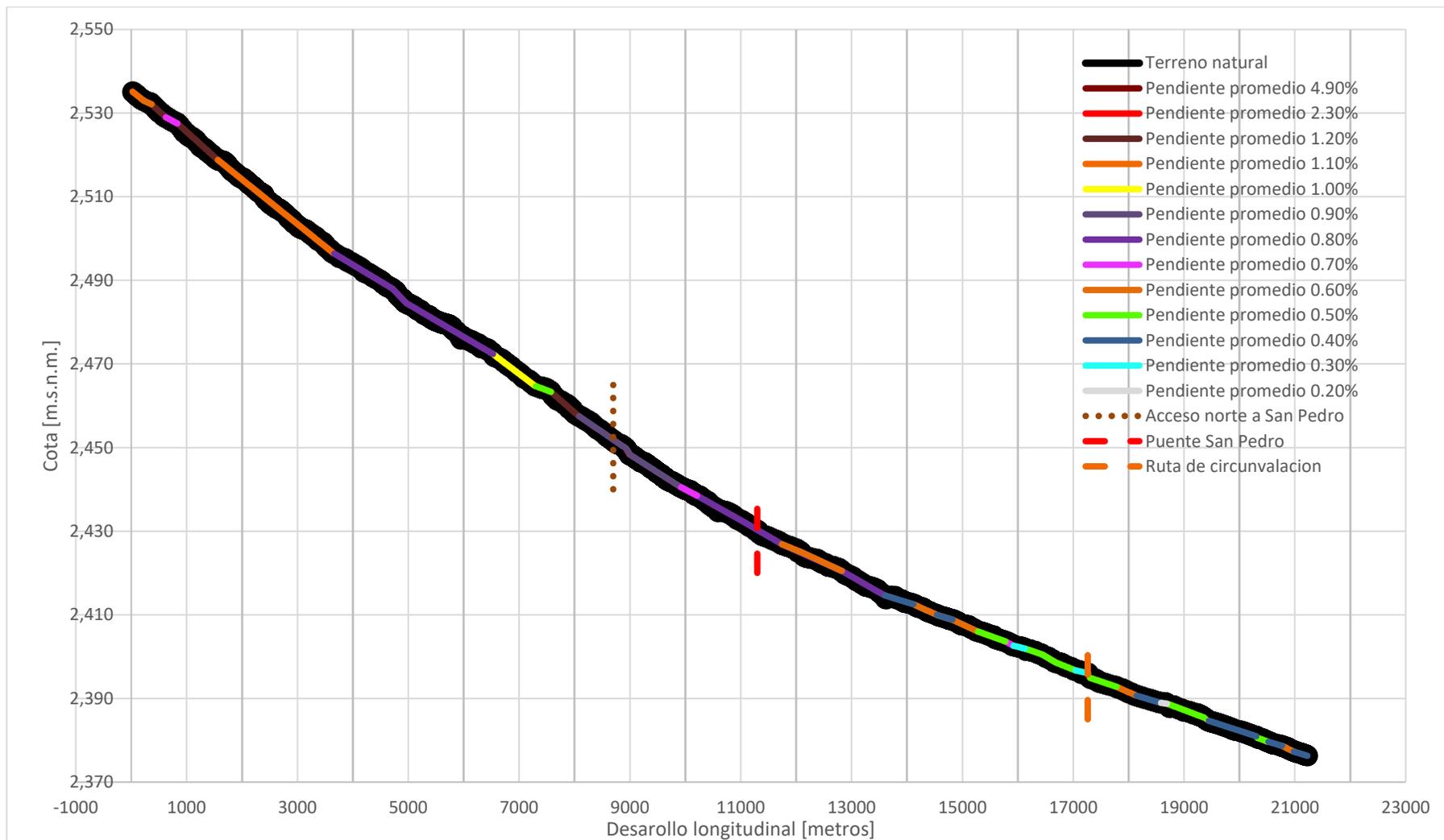


FIGURA 4-6: PERFIL LONGITUDINAL RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

4.1.3. Evaluación de la evolución de las barras de sedimentación, así como también el área que han ocupado a lo largo del tiempo

A partir de la visita a terreno realizada y el análisis de antecedentes, se observa que el río San Pedro presenta un comportamiento semi detrítico ya que, si bien su escurrimiento presenta una turbiedad significativa con presencia de material cohesivo, esta pareciera no alterar de una manera importante el comportamiento del escurrimiento, por otro lado, el río Vilama presenta un lecho sin la presencia de material cohesivo atribuible a un flujo detrítico, pero su flujo es intermitente.

Lo previamente expuesto para el río San Pedro es concordante con las granulometrías del estrato superficial que se presentan en la Figura 4-7, donde muchas de las muestras tienen una gran presencia de material fino.

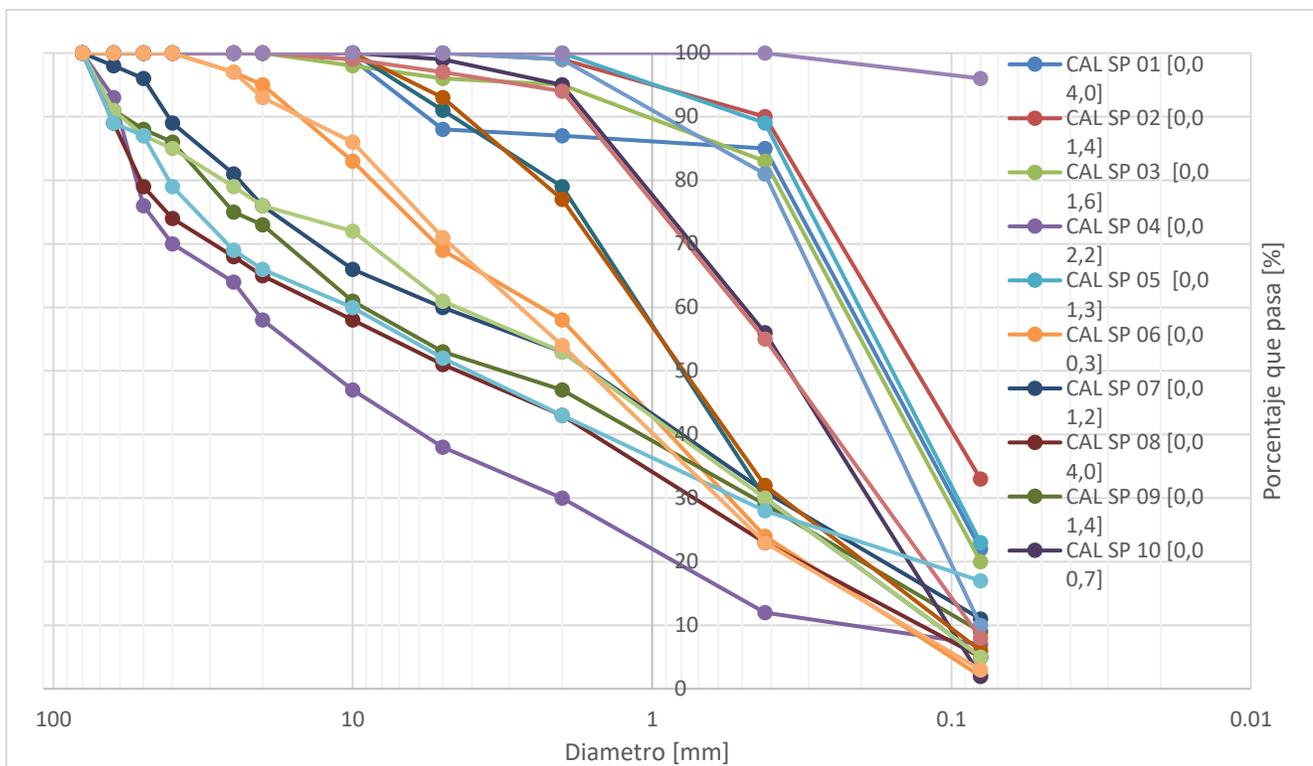


FIGURA 4-7: CURVAS GRANULOMÉTRICAS CALICATAS EN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4-8 se presenta el diámetro característico D_{50} a lo largo del tramo de estudio para el río San Pedro, en azul se presentan los resultados obtenidos de las curvas granulométricas realizadas en el estrato superior y en rojo para el estrato más profundo del que se dispongan datos.

Se puede observar que la presencia de material fino en el estrato superficial es prácticamente constante a lo largo del río, pero en estratos inferiores esto cambia siendo predominante la presencia de gravas, dando a entender que durante las crecidas es cuando ocurre el transporte de

grava y esta va siendo cubierta por material fino correspondiente a escurrimientos de mayor frecuencia y menor magnitud.

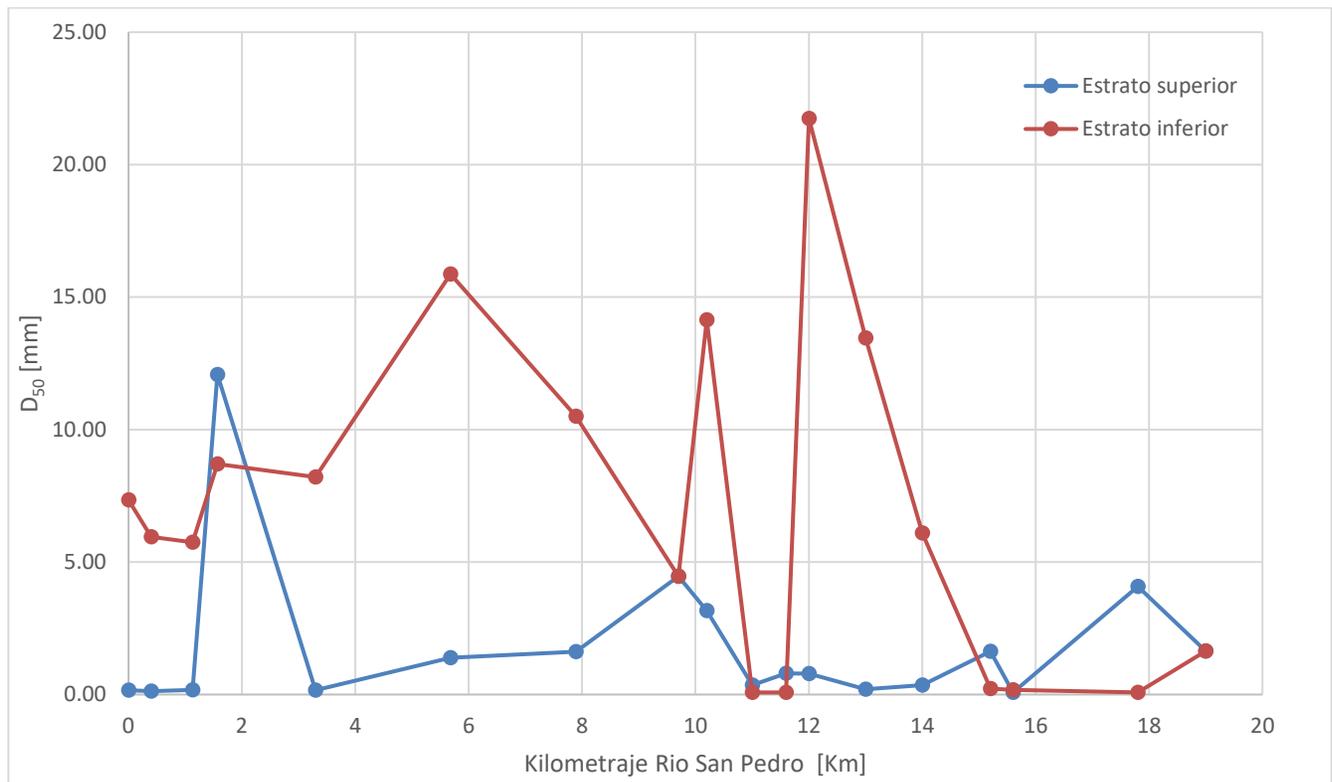


FIGURA 4-8: DIÁMETRO CARACTERÍSTICO A LO LARGO DEL RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia



FIGURA 4-9: CALICATA SAN PEDRO N°13

Fuente: Elaboración Propia

El río Vilama presenta una granulometría bien graduada como se puede observar en la Figura 4-10, donde todas las curvas granulométricas presentan esta característica con la excepción de la segunda calicata superficial, esto podría deberse a que esta corresponde a una zona de depositación.

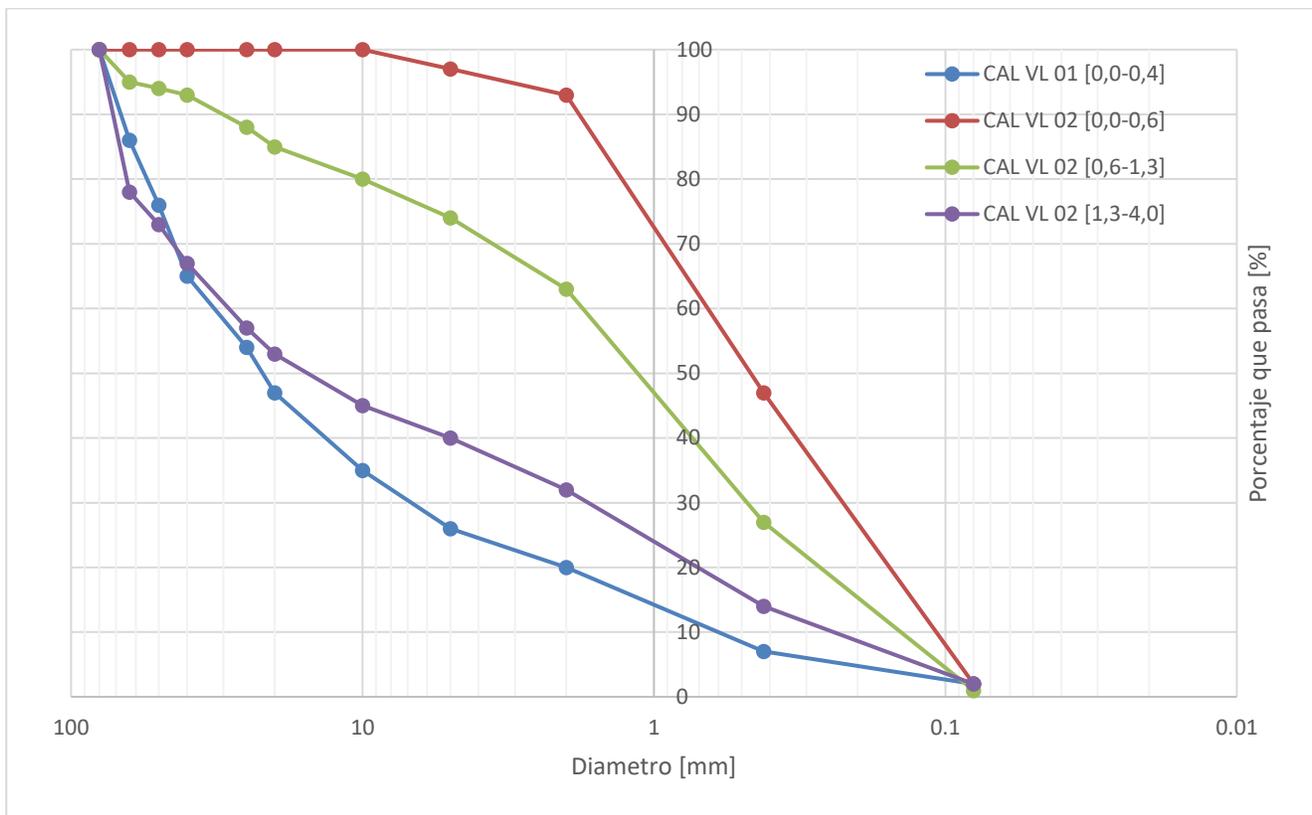


FIGURA 4-10: CURVAS GRANULOMÉTRICAS CALICATAS EN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia

Respecto a la determinación de la evolución de las barras de sedimentación lo ideal sería realizarlo por medio de las imágenes satelitales utilizadas en la determinación del cauce histórico, lamentablemente la relación del tamaño de las barras con el tamaño de pixel de la imagen utilizada no lo permite, ya que estas muchas veces son menores al tamaño del pixel.

Una forma alternativa para realizar esto podría ser utilizar las fórmulas empírico-teóricas de Vanoni o Kuroki y Kishi, las cuales permiten determinar qué tipo de formas de fondo se generarán en función del número de Froude y la altura de escurrimiento en función del diámetro característico, pero la aplicación de estas se ve limitada a lechos bien graduados con poca presencia de grava y materiales no cohesivos, premisas que no se cumplen en el sector analizado.

Para determinar las zonas de depositación de sedimentos se realiza lo siguiente, se calcula la diferencia de superficies entre el cauce que presenta una ocurrencia de escurrimiento en crecidas superior al 8% y una superficie que presente mayor frecuencia en este caso se utilizará la de 31% y 54%, esto se sustenta en que el flujo presenta mayor velocidad en el centro de su cauce (zona donde el escurrimiento es más frecuente) por lo que no se genera depositación, mientras que las zonas exteriores es donde se producen zonas de menor velocidad y se produce recirculación lo que tiene como consecuencia la acumulación del material.

En el río San Pedro desde el inicio de la zona en estudio hasta aguas abajo del puente San Pedro, las zonas de mayor acumulación tienden a coincidir con las curvas, un comportamiento que es típico de los ríos meandrosos, lo anteriormente mencionado se puede observar en la Figura 4-12 .

En la zona aguas abajo del puente San Pedro a la altura de Sequitor, se presenta un río de mayor extensión como se observa en la Figura 4-11 , donde se generan grandes zonas de acumulación de material lo cual coincide con lo observado en terreno y donde destaca la zona de la carretera de circunvalación que es donde se logra la mayor acumulación de material, en la Figura 4-13 se puede observar lo previamente mencionado.

Se optó por no incluir el área afectada del Ayllu de Beter como zona de depositación, ya que como se mencionó previamente este sector requiere futuros estudios para poder caracterizar de buena manera el fenómeno presentado para la crecida del año 2019.



FIGURA 4-11: RIO SAN PEDRO A LA ALTURA DEL BADÉN QUE DA ACCESO A SEQUITOR

Fuente: Elaboración Propia

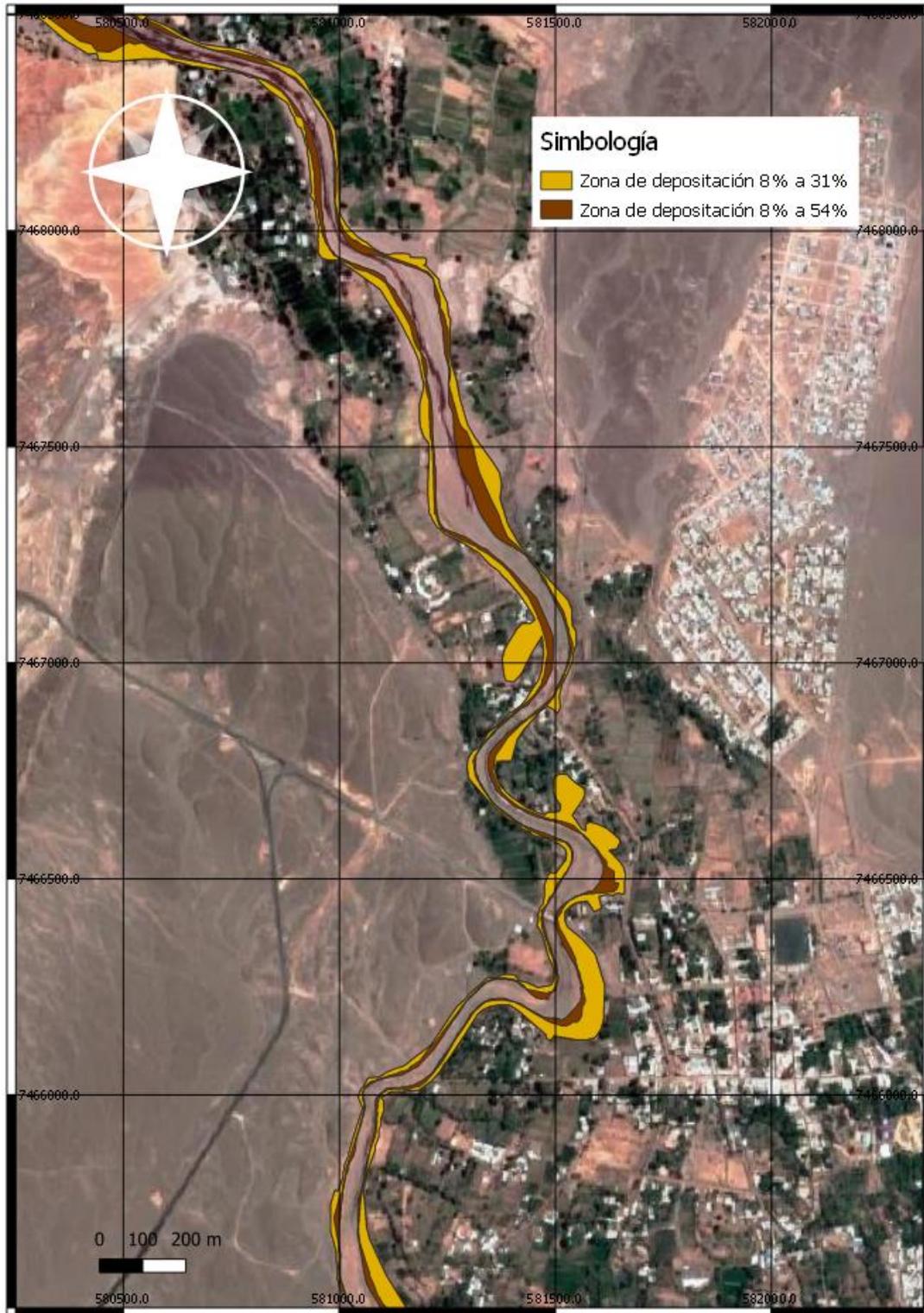


FIGURA 4-12: ZONAS DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN RIO SAN PEDRO ENTRE PUCARÁ DE QUITOR Y BADÉN DE ACCESO A SEQUITOR

Fuente: Elaboración Propia

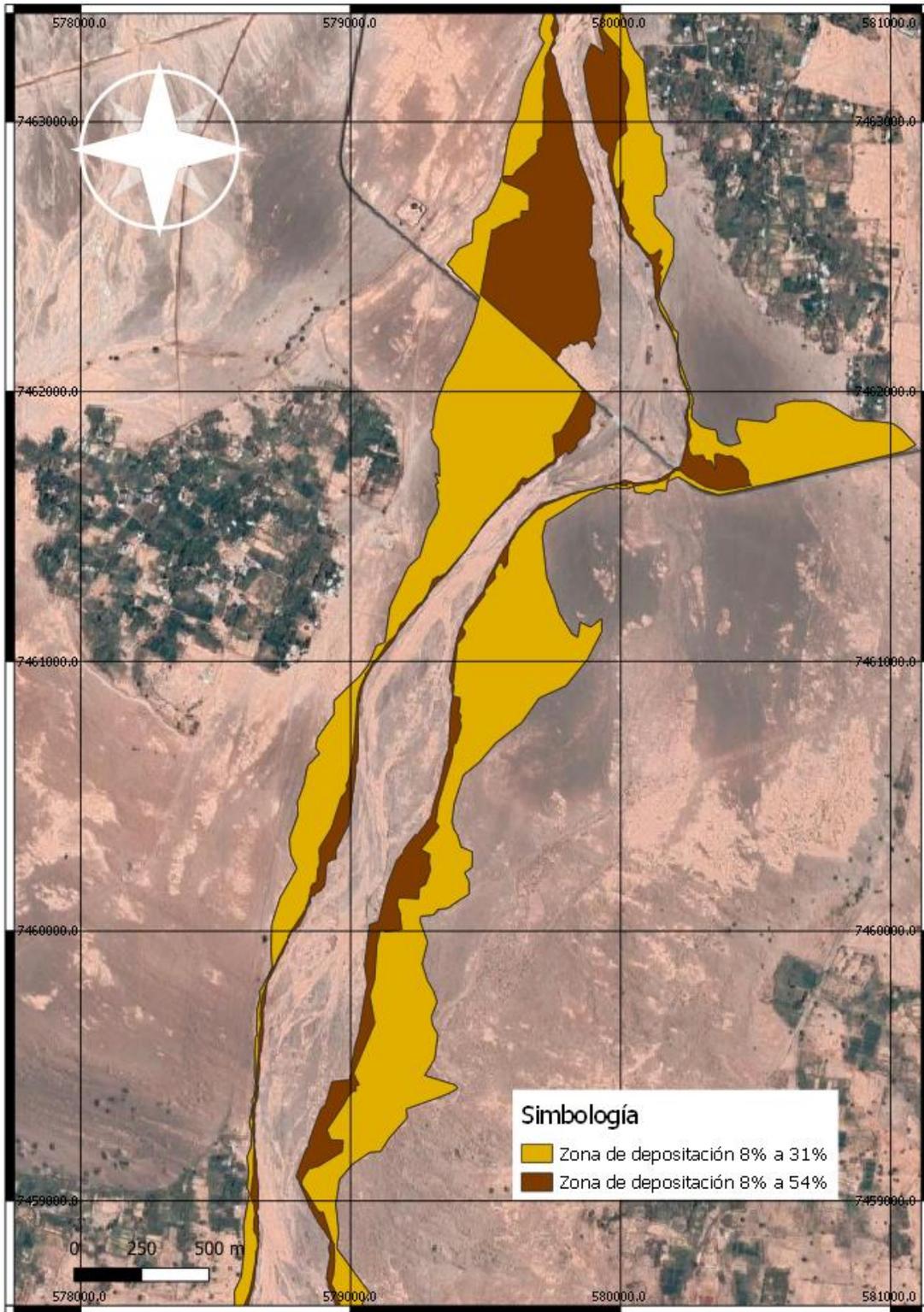


FIGURA 4-13: ZONAS DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN RIO SAN PEDRO ENTRE BADÉN DE ACCESO DE SEQUITOR Y AYLLU DE TULOR

Fuente: Elaboración Propia

El río Vilama al presentar un escurrimiento intermitente, es decir, solo se activa en las crecidas no tiene una tendencia a generar formas de fondo, lo que se observa es un comportamiento trezado aguas abajo de la zona encauzada, lo que es coherente a un flujo que se propaga por una sección amplia con baja velocidad. En la Figura 4-14 se presenta las zonas de acumulación de material.

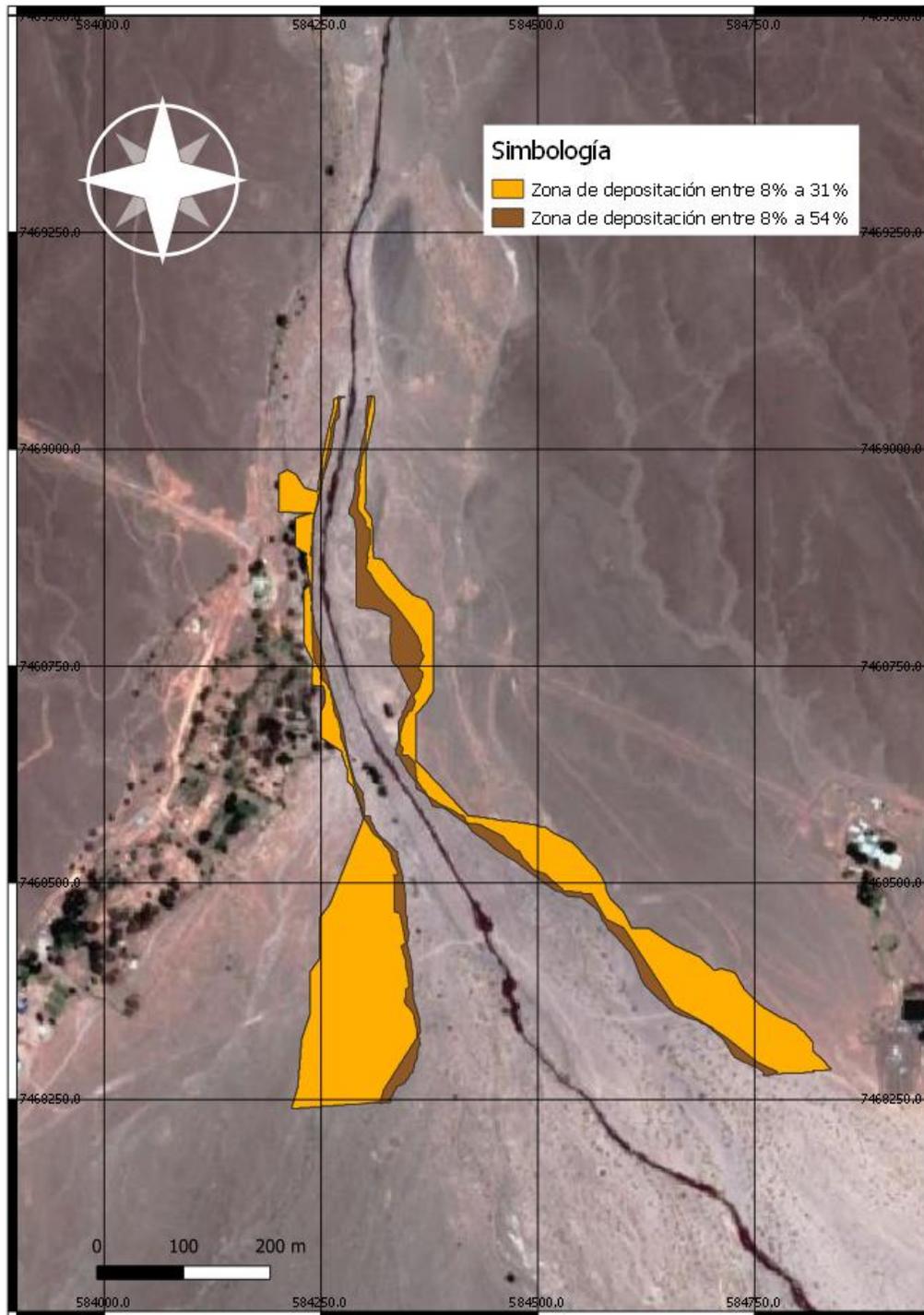


FIGURA 4-14: ZONAS DE ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia

4.1.4. Identificación de la tipología y superficie de la vegetación asociada al cauce

Para identificar las zonas con vegetación dentro del área de estudio, se trabajó con imágenes Sentinel para clasificar la vegetación. Se utilizó la imagen del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) que permite identificar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación en una zona con base en la intensidad de radiación estimada en función del espectro electromagnético. Además, se obtuvo una imagen de falso color, en la cual es posible apreciar en escala de rojos la vegetación y así poder diferenciarla del suelo desnudo. La imagen utilizada corresponde específicamente el mes de diciembre de 2020. En la Figura 4-15 se presenta como ejemplo de estas imágenes el área de la zona de Vilama.

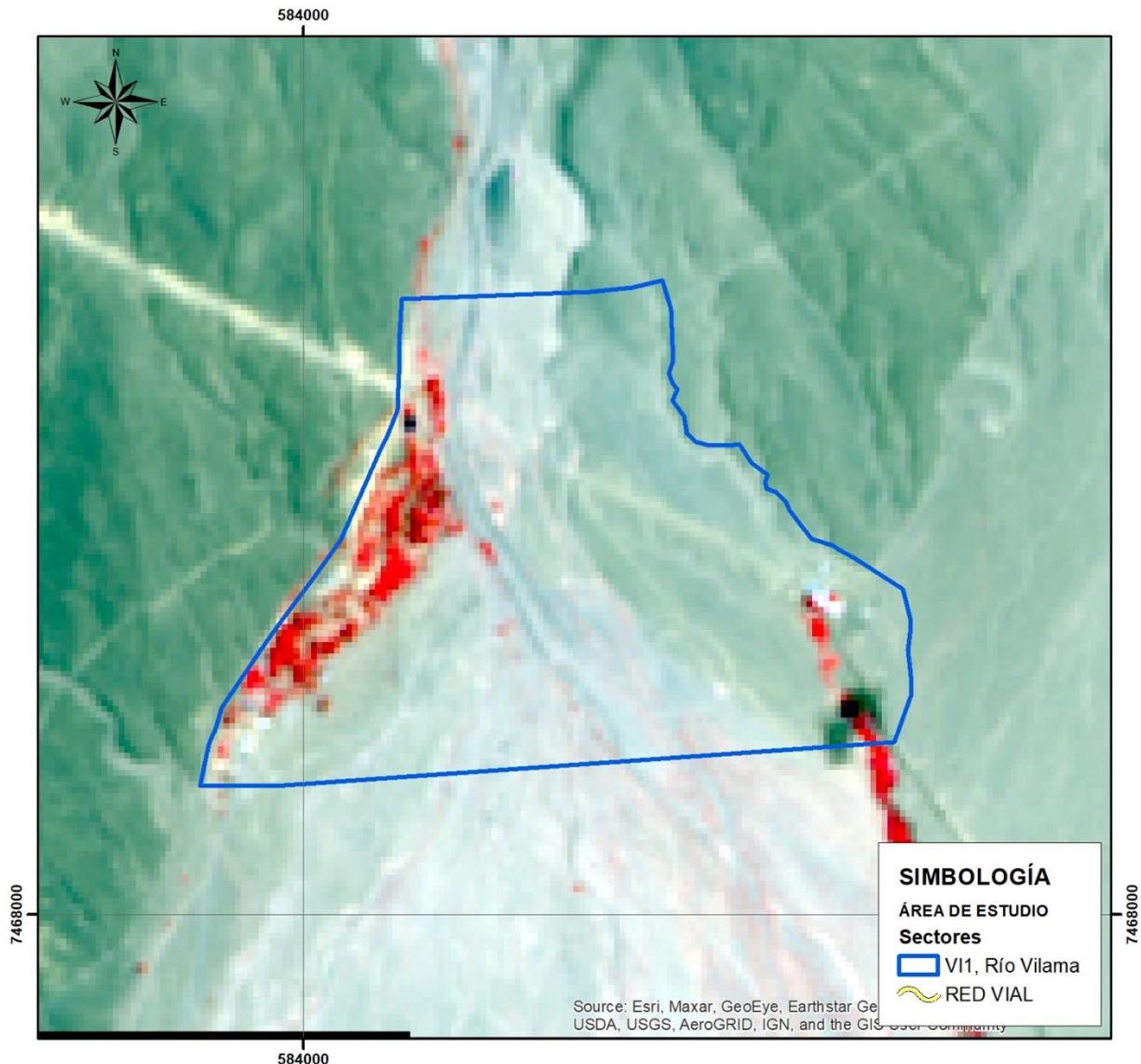


FIGURA 4-15: EJEMPLO FALSO COLOR ÁREA RÍO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia en base a imagen Sentinel

En cuanto a la vegetación natural en el área de estudio, esta se encuentra dentro del área descrita por Luebert y Pliscoff (2008) como el piso vegetacional Matorral desértico tropical interior de *Atriplex atacamensis* y *Tessaria absinthioides*.

Este piso vegetacional se presenta asociado a los salares y está determinado por la presencia de napas freáticas que proporcionan la humedad suficiente para compensar la escasez de precipitaciones, lo que en sectores del área de estudio se compensa por la presencia del escurrimiento superficial del río San Pedro. Este piso de vegetación se encuentra dominado por la presencia de los arbustos *Atriplex atacamensis* (cachiyuyo) y *Tessaria absinthioides* (Brea) y la gramínea *Distichlis spicata* (grama salada), en algunos sectores (como sucede en el área de estudio) es posible observar la presencia de los árboles espinosos *Prosopis alba* (Algarrobo blanco), y *Geoffroea decorticans* (Chañar). Otras especies posibles de encontrar son *Baccharis juncea* (Suncho o totora), *Caesalpinia aphylla* (retamo), *Distichlis scoparia* (grama salada). En las zonas donde fluye el cauce es posible encontrar además *Cortaderia atacamensis*, más comúnmente conocida como cola de zorro.

Respecto de la dinámica de este piso de vegetación, es posible suponer la antropización de la formación, pero no es posible distinguir claramente los terrenos con intervención humana más allá de la presencia de cultivos o de especies de árboles como el *Schinus molle* o Pimiento.

Como complemento a esta imagen, durante la visita a terreno desarrollada durante el mes de marzo, se realizó un reconocimiento de los tipos de vegetación presentes en el cauce, a fin de poder clasificarlos como unidades. En este reconocimiento se identificaron sectores con cultivos agrícolas que se mezclan con árboles y vegetación natural, así como en otros casos tienen marcada presencia de viviendas que disminuyen la intensidad de la presencia de la vegetación. Junto con ellos, se identificaron zonas de vegetación natural, como la descrita anteriormente.

En función de los antecedentes analizados y la visita a terreno, se procedió a realizar un análisis de gabinete en el cual se afinaron las clasificaciones obtenidas y se definieron las siguientes zonas de vegetación en el área de estudio:

- **Terrenos de Cultivo:** estas áreas corresponden principalmente a sectores agrícolas pertenecientes a las diferentes comunidades del área de estudio (ayllus), en los cuales se identifican cultivos en diferente estado de desarrollo, principalmente correspondientes a maíz y alfalfa, además de encontrar especies de árboles como Chañar, Pimiento, Algarrobos en distintos estados de crecimiento: Estos sectores además presentan vegetación natural de la zona en los paños que se encuentran sin uso, pero que por contar con suficiente disponibilidad de agua se encuentran en estados avanzados de crecimiento. La presencia de viviendas es escasa. Estos terrenos se encuentran en el tramo inicial del Río San Pedro.
- **Terrenos de cultivo - sin uso:** estos terrenos tienen similares características a las señaladas en la descripción anterior, salvo porque se presentan sin uso agrícola visible en la última temporada. En estos sectores se mantienen las especies de árboles y algo de vegetación natural, pero con escasa densidad o desarrollo.

- **Terrenos agrícolas de uso mixto:** se clasificó bajo este nombre, aquellos terrenos con vegetación de tipo agrícola (cultivos) que se encuentran en los tramos intermedio y final del Río San Pedro, así como en el Río Vilama. Estos terrenos corresponden a los ayllus ubicados en la zona, pero que su cobertura además de cultivos y árboles (chañares, algarrobos y pimientos son los más característicos). La mezcla de uso agrícola y habitacional de esta zona, le revisten características diferentes de cobertura encontrando mayor cantidad de sectores descubiertos entre las áreas con cultivos-
- **Vegetación natural:** Esta corresponde a los sectores en que se desarrolla la vegetación propia de la zona y descrita como # Matorral desértico tropical interior de *Atriplex atacamensis* y *Tessaria absinthioides*”, pero que dependiendo de la zona en que se encuentra y asociado a la disponibilidad de agua, a la dinámica del cauce y a las intervenciones antrópicas, se subclasificaron en tipos: A (vegetación natural mucho más densa, de mayor tamaño y con mayor diversidad de especies, en las zonas en que el área se ensancha producto probablemente de las dinámicas del cauce, se identifican amplios sectores de matorral bajo de brea y cachiyuyo), B (sectores en que la vegetación natural tiene menor desarrollo, no existe presencia de árboles pero si es posible encontrar arbustos de brea y cachiyuyo de mediano tamaño además de otras especies herbáceas más pequeñas, pero en las grandes explanadas donde es clara la variación del cauce producto de las crecidas, áreas de matorrales de baja altura), y C (en esta zona escasa vegetación natural, se encuentra asociada a sectores de alta intervención humana y en donde las especies más resistentes como la brea y el cachiyuyo crecen a muy baja escala)
- Se incorporó una clasificación denominada **Área APT** en el área de estudio en río Vilama, en donde existe presencia de vegetación, pero esta se encontraría principalmente influenciada por la presencia de las instalaciones del sistema de agua potable y tratamiento. No responde a una condición natural.

La distribución de estas zonificaciones se presenta en la Figura 4-16.

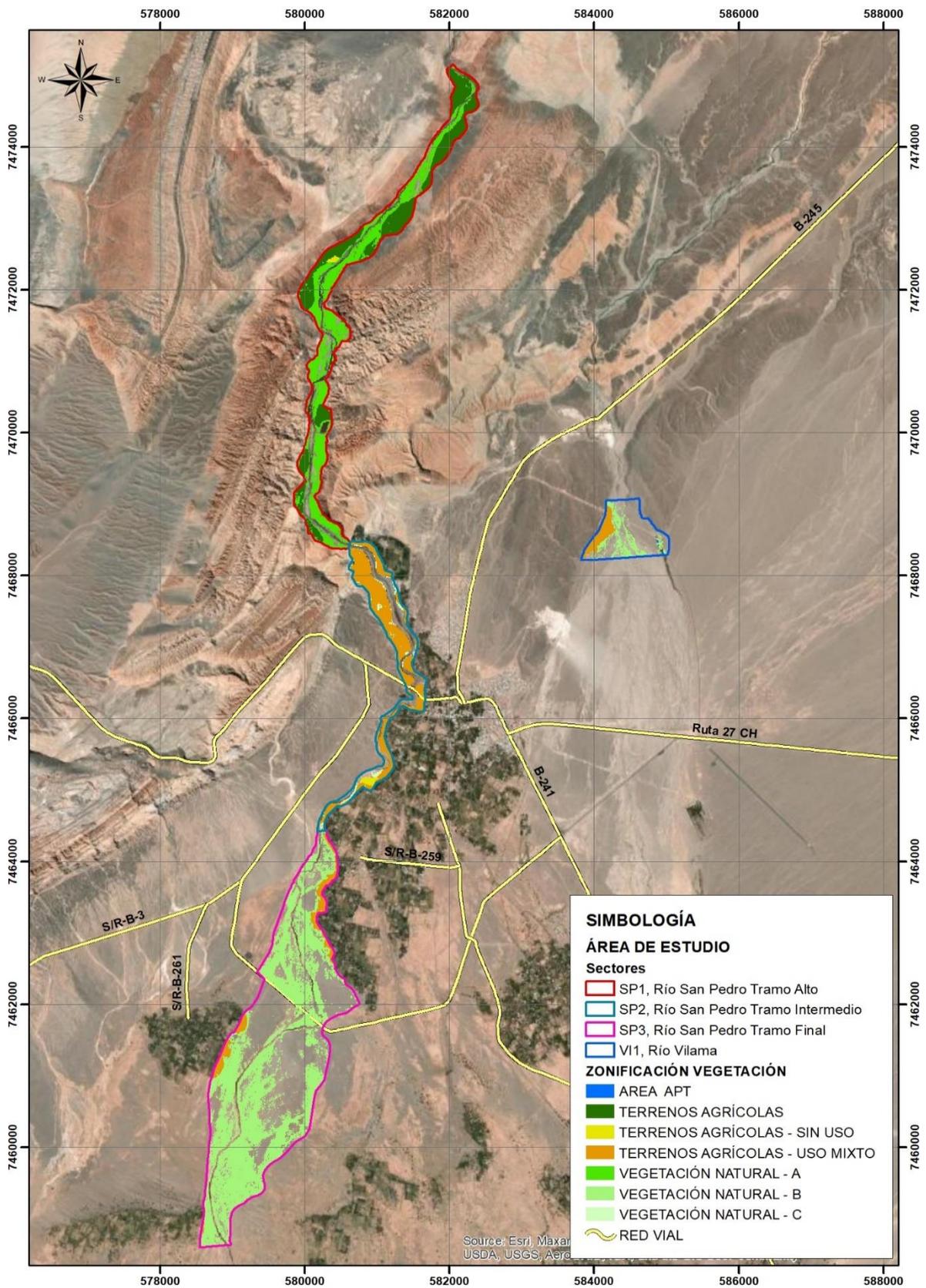


FIGURA 4-16: ZONIFICACIÓN VEGETACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5. Estudio comparativo de la evolución de los usos del suelo

El uso del suelo en el área de estudio solo ha evolucionado de manera considerable para el río San Pedro, en particular para la zona urbana ubicada entre el acceso a Catarpe y el baden de acceso a Sequitor.

El cambio del uso del suelo corresponde principalmente al aumento del uso habitacional en desmedro del uso agrícola y la construcción de caminos en sectores que correspondían al río. Al realizar la comparación de las imágenes obtenidas de vuelos del SAF para el 1980 y 1997, Google Earth para el año 2004 y la fotografía tomada por el vuelo LIDAR en el presente estudio, se observa que la superficie construida en las riberas del sector 2 se ha incrementado en casi un 1000% desde 1980 hasta la fecha, lo que claramente tendrá como consecuencia un aumento de población vulnerable a las crecidas.

CUADRO 4-1: EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE CONSTRUIDA EN SECTOR 2 RIO SAN PEDRO

Año	Superficie (hectárea)
1980	0,9
1997	2,0
2004	3,9
2021	8,8

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 4-17 a la Figura 4-19 se señala con círculos amarillos como aparece infraestructura con uso habitacional y turístico, desafortunadamente muchas de estas edificaciones se encuentran ubicadas en zonas de inundación en particular las ubicadas entre Domingo Atienza y el Puente San Pedro.

En la Figura 4-17 y Figura 4-18 se señala con una línea de color naranja el camino que permite acceder a Catarpe, este se encontraba en el lecho del río, pero con la instalación de defensas fluviales y la disminución de la sección del río actualmente este se encuentra en la ribera izquierda sobre el nivel del río.

Fuera del sector mencionado otro lugar que ha presentado cambios considerables es el asociado a la ruta de circunvalación, el aumento de población y las necesidades de conectividad tuvieron como consecuencia la construcción de la ruta ubicada al sur de San Pedro.

En la Figura 4-20 se presenta la evolución del sector donde se emplaza la ruta circunvalación, se observa que si bien existe un flujo preferencial por la ribera izquierda también existen trazas de material demarcadas con el polígono de contorno rojo, estas indican la existencia de escurrimiento por la ribera derecha, actualmente este flujo se apoza ya que la ruta genera un obstáculo para la libre circulación del flujo, lo que pareciera no ser un inconveniente para flujos pequeños, distinto es el caso en las crecidas ya que las obras de atraveso antiguas no presentaron capacidad suficiente para portear el flujo generando el colapso de la ruta y de las obras en sí, es tarea del modelo a desarrollar, evaluar si las nuevas obras serán suficientes para las futuras crecidas.

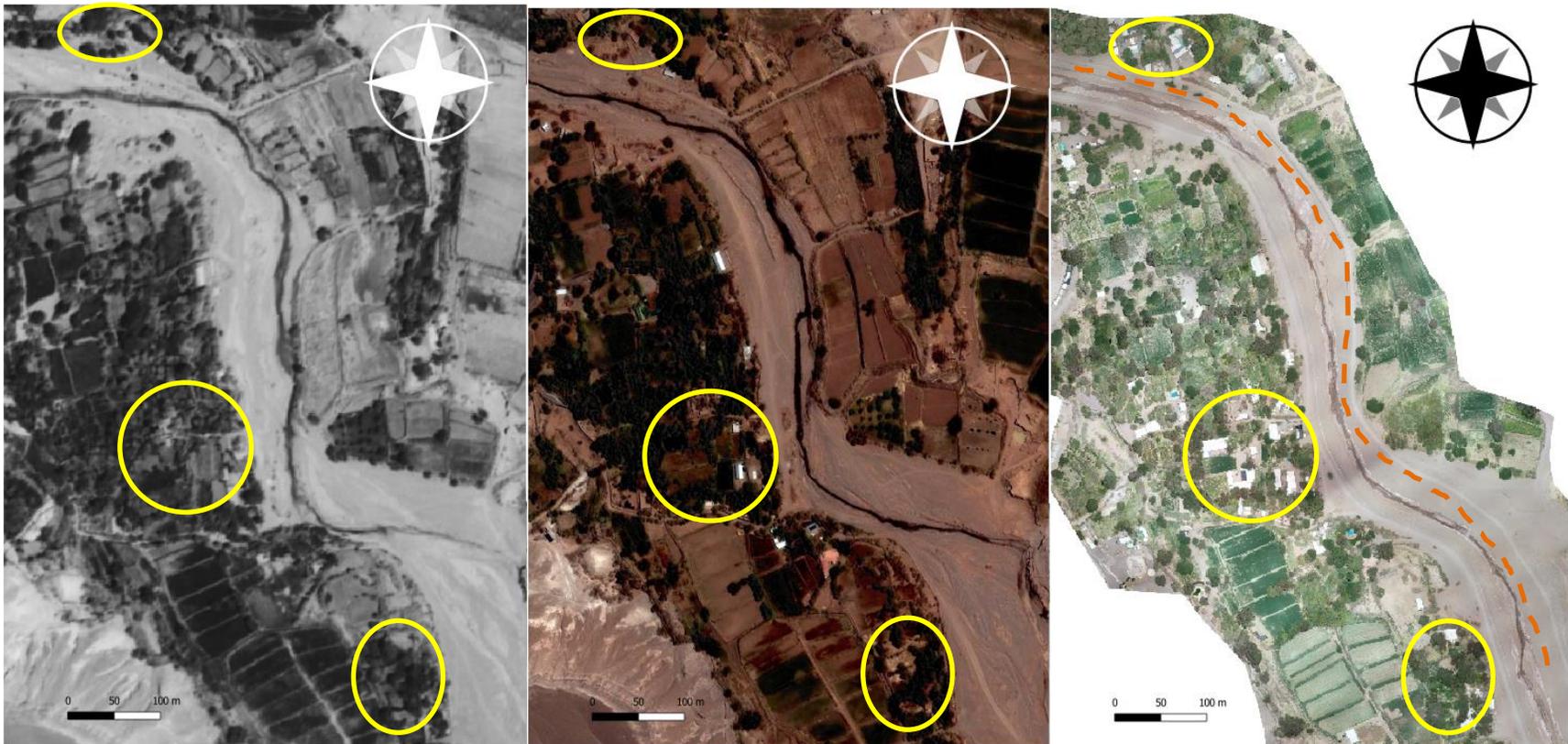


FIGURA 4-17: EVOLUCIÓN DE USO DE SUELO EN SAN PEDRO A LA ALTURA DE PUCARÁ DE QUITOR

Fuente: Elaboración Propia en base a imágenes del SAF 1997, Google Earth 2004 y Ortofoto del vuelo LIDAR del estudio correspondiente al año 2021.

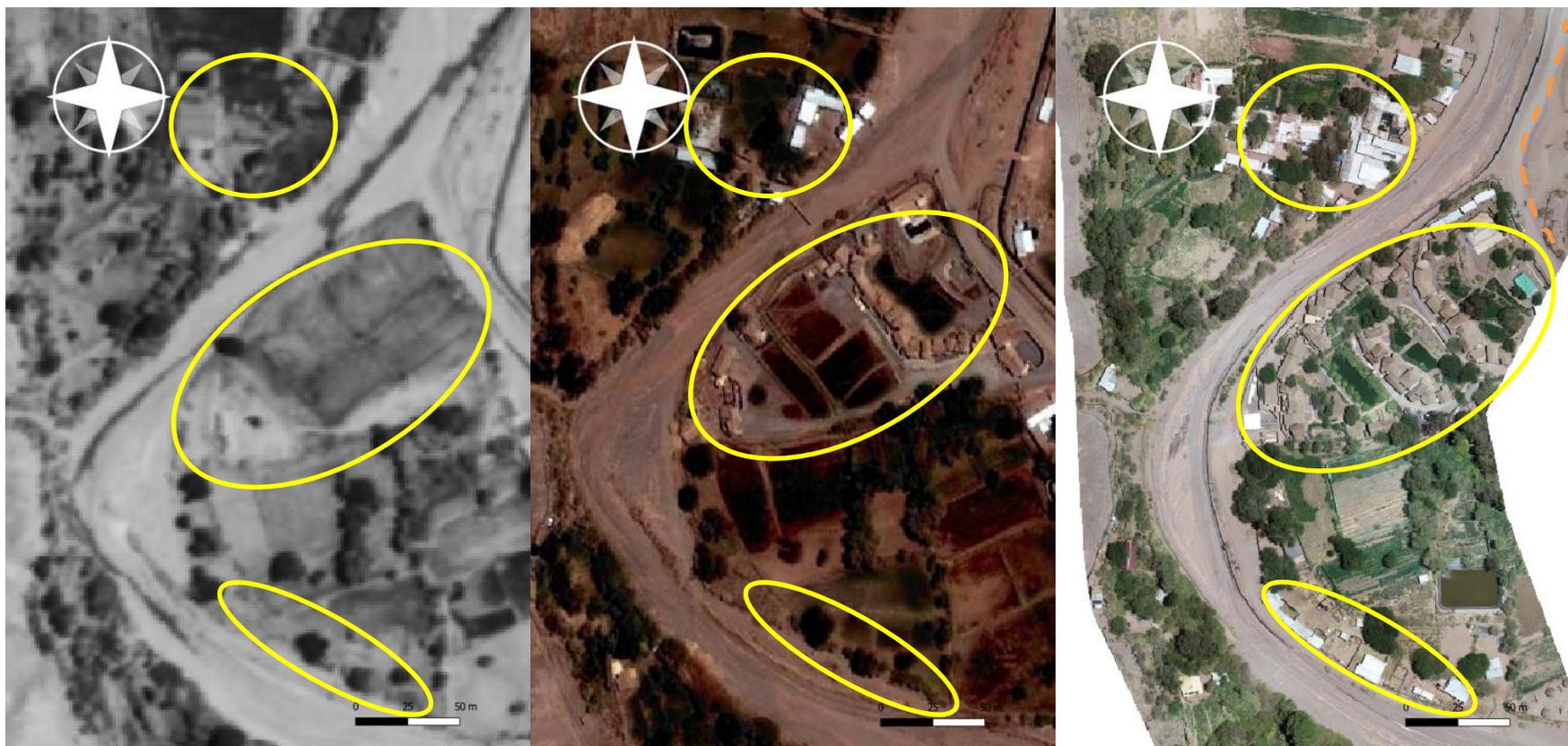


FIGURA 4-18: EVOLUCIÓN DE USO DE SUELO EN SAN PEDRO A LA ALTURA DE DOMINGO ATIENZA

Fuente: Elaboración Propia en base a imágenes del SAF 1997, Google Earth 2004 y Ortofoto del vuelo LIDAR del estudio correspondiente al año 2021.



FIGURA 4-19: EVOLUCIÓN DE USO DE SUELO A LA ALTURA DE PUENTE SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia en base a imágenes del SAF 1997, Google Earth 2004 y Ortofoto del vuelo LIDAR del estudio correspondiente al año 2021.

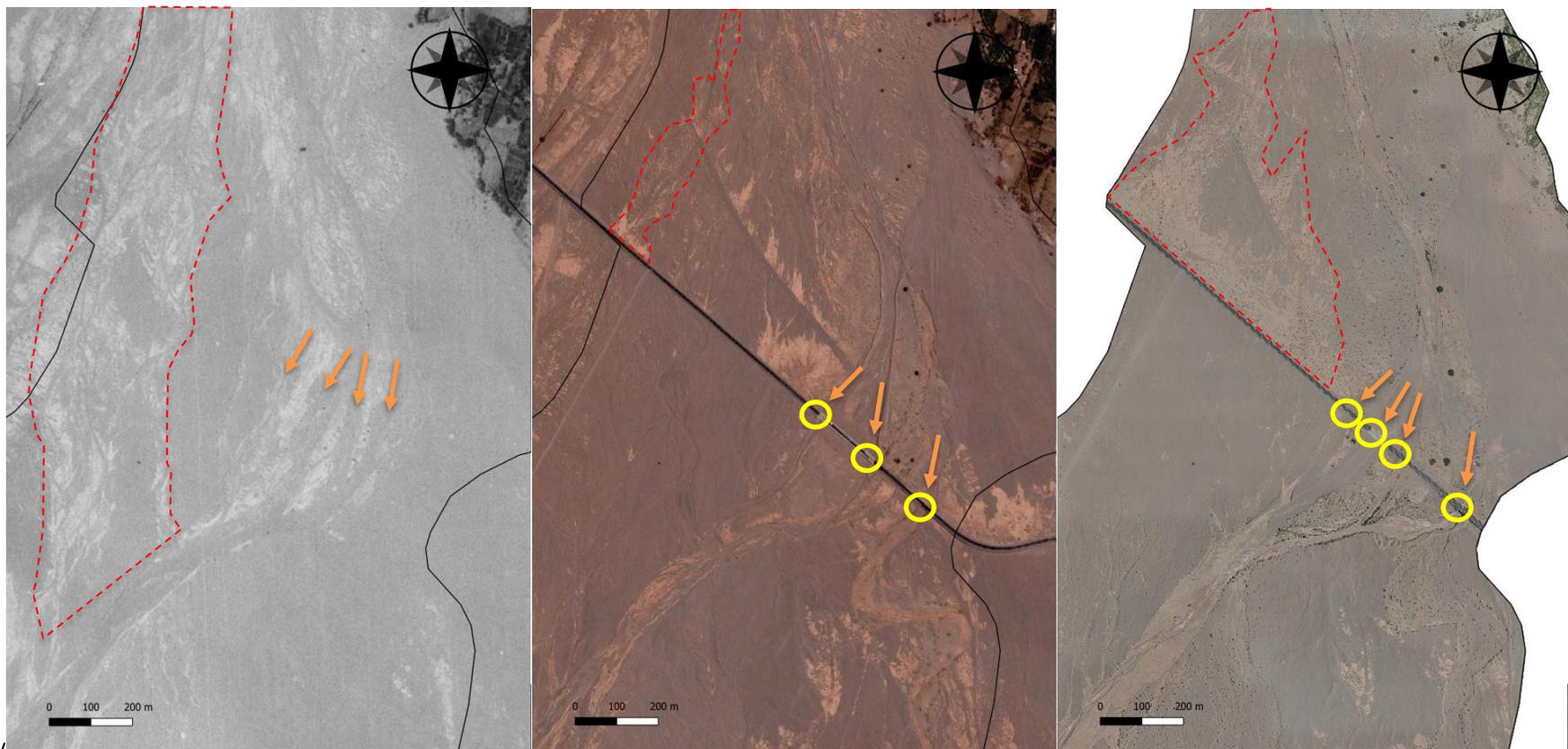


FIGURA 4-20: EVOLUCIÓN DE USO DE SUELO EN LA RUTA CIRCUNVALACIÓN

Fuente: Elaboración Propia en base a imágenes del SAF 1980, Google Earth 2004 y Ortofoto del vuelo LIDAR del estudio correspondiente al año 2021.

4.1.6. Identificación de Intervenciones de Origen Antrópico en el Cauce

Se entenderá por intervenciones de origen antrópico en este acápite, aquellas que no impliquen la construcción de infraestructura, ya que estas serán abordadas más adelante en el numeral 4.1.7. En este caso las intervenciones tratadas corresponderán principalmente a las del tipo agrícola.

Para identificar las intervenciones se utilizará la información del “Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro” (CNR 2014), este tiene un catastro de predios para el río San Pedro, donde se indica si estos poseen o no algún grado de utilización agrícola las que se contrastaran con la máxima extensión del cauce histórico para ver cuales predios se ven afectados en las eventuales crecidas.

En la Figura 4-21 y Figura 4-22 se presentan los terrenos aguas arriba de Catarpe y aguas abajo del puente San Pedro, estos presentan un uso principalmente agrícola e intervienen con el cauce, esto tiene efectos favorables considerando que a mayor rugosidad del lecho implica una mayor pérdida de energía para el escurrimiento, pero podría agregar elementos arrastrados por la crecida.

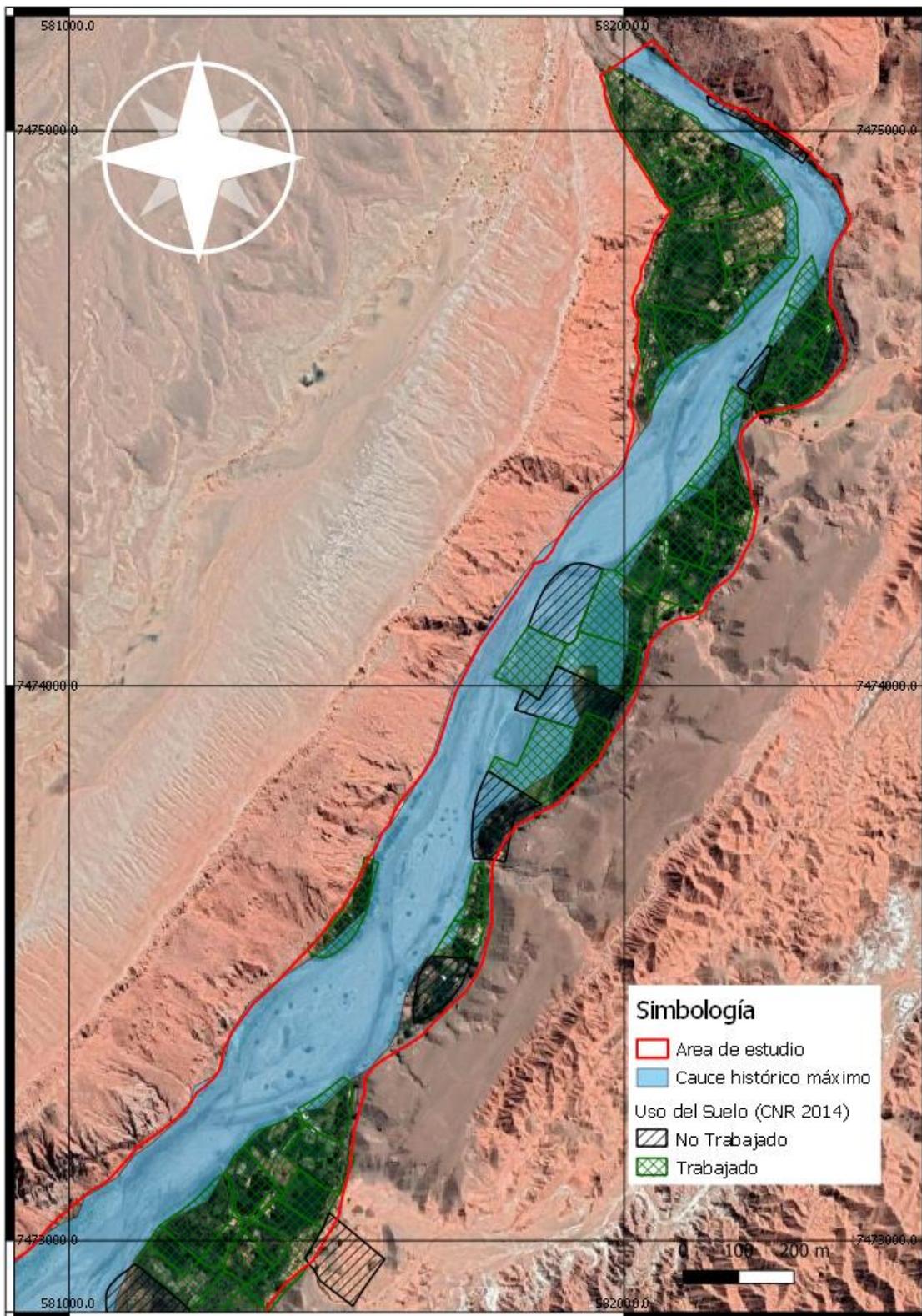


FIGURA 4-21: INTERVENCIONES ORIGEN ANTRÓPICO EN RIO SAN PEDRO A LA ALTURA DE CATARPE

Fuente: Elaboración Propia

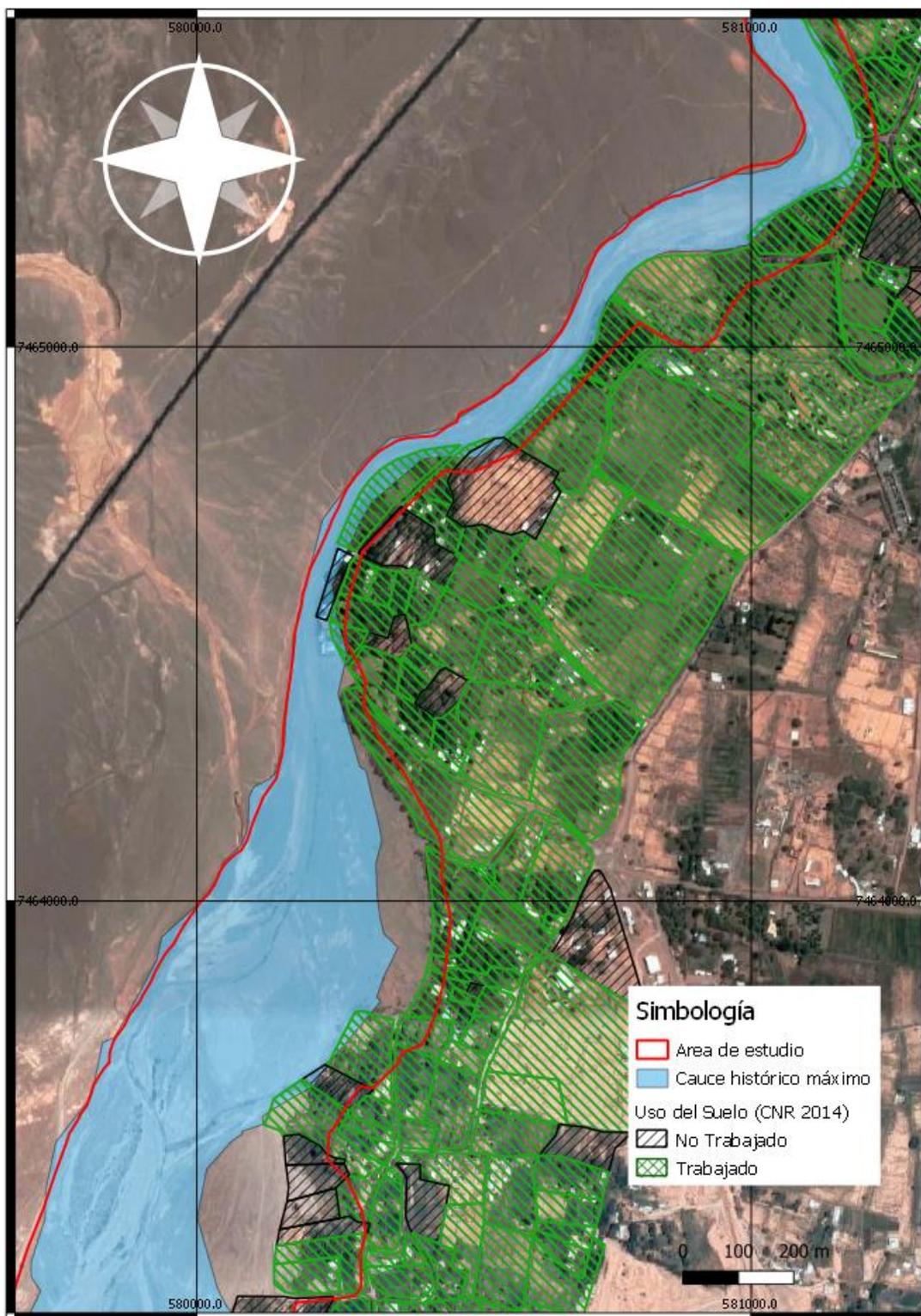


FIGURA 4-22: INTERVENCIONES ORIGEN ANTRÓPICO EN RIO SAN PEDRO AGUAS ABAJO DEL PUENTE SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

4.1.7. Identificación de intervenciones de la infraestructura asociada al espacio fluvial, y su impacto en la morfología del cauce

Las intervenciones de infraestructura realizado en el espacio fluvial corresponden principalmente a obras de defensa fluvial y atravesos, la identificación de estas y otras obras menos frecuentes se realizó durante el catastro que se presentó en la etapa 2C, a continuación, se discute la influencia de este sobre la morfología de los cauces en estudio.

Desde el inicio de la zona de estudio hasta aguas arriba del acceso a Catarpe se presentan escasas intervenciones en el cauce, estas corresponden a defensas fluviales las cuales tienen por objetivo proteger infraestructura puntual como viviendas o sedes sociales, al observar la Figura 4-23 se aprecia que estas defensas no modifican la forma del cauce ya que no buscan canalizar la sección.

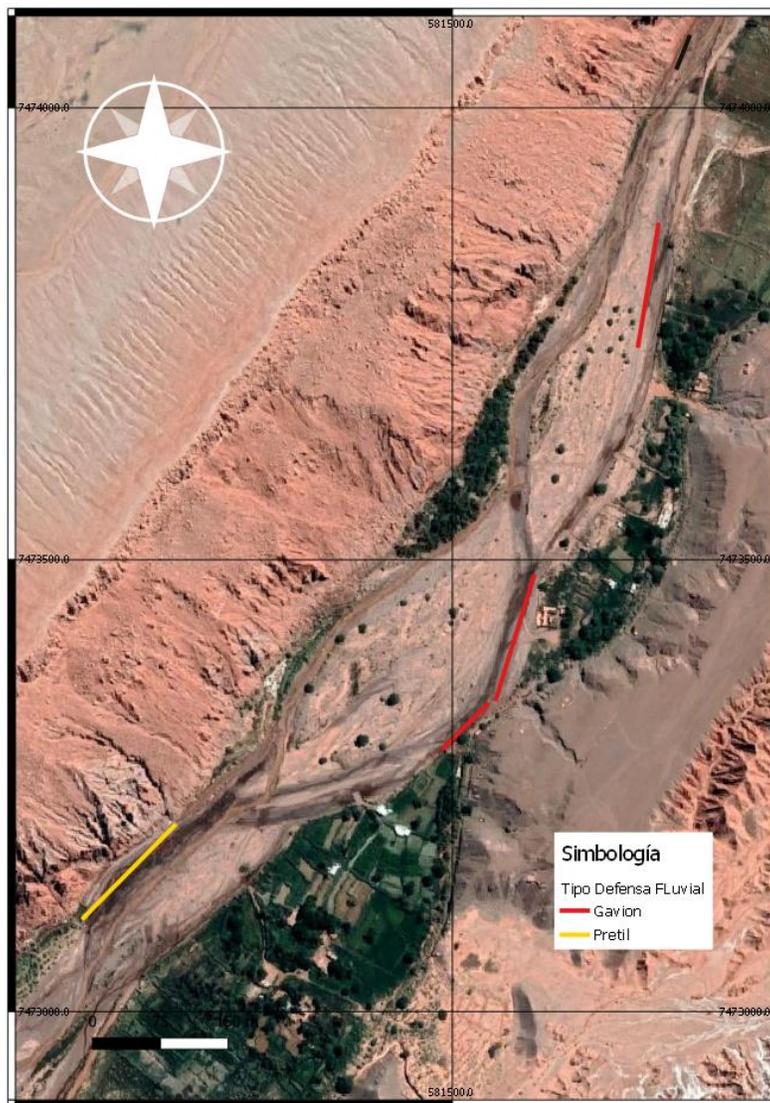


FIGURA 4-23: INTERVENCIONES EN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

Para la zona entre el acceso a Catarpe hasta 600 metros aguas abajo del puente San Pedro, el río presenta una alta canalización por medio de defensas fluviales del tipo gavión y pretil, como se puede observar en la Figura 4-25, estas tienen por objetivo evitar desbordes del río, que puedan afectar a la zona más habitada de San Pedro.

El problema de estas intervenciones es que disminuyen la sección transversal del río produciendo que este aumente su nivel y se incrementen las velocidades del escurrimiento, a esto se agrega que no siempre las defensas están instaladas de una forma solidaria a las líneas del flujo lo que podría producir la rápida destrucción de estas y el desvío del escurrimiento a sectores no deseados.

Dentro de las obras de atraveso llama la atención lo que acontece con la sección transversal del puente San Pedro, como se observa en la Figura 4-24 las defensas que se están instalando tienen como consecuencia una disminución significativa de su sección.



FIGURA 4-24: PUENTE SAN PEDRO DE ATACAMA

Fuente: Elaboración Propia

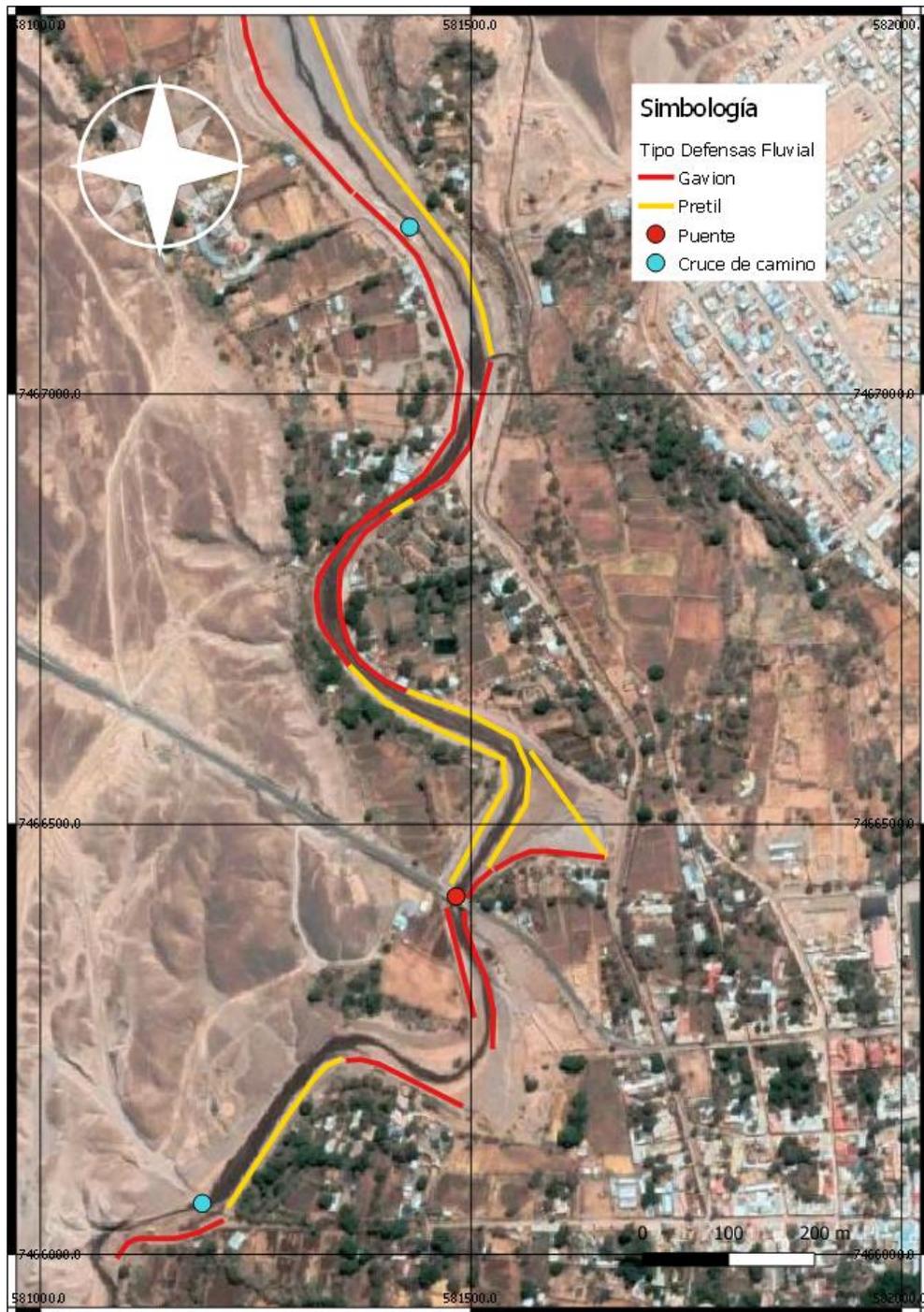


FIGURA 4-25: INTERVENCIONES EN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

Aproximadamente 700 metros aguas abajo del puente San Pedro el rio deja de presentar la gran canalización previamente observada, la sección de escurrimiento se vuelve mucho más amplia e irregular, lo que corresponde a la morfología natural del cauce, sin embargo, hay que considerar la presencia de postes de tendido eléctrico en el cauce, que si bien no debería afectar mucho el flujo podrían ser arrasados generando estragos aguas abajo, además de cortes en el servicio eléctrico.

El único punto donde se aprecia una alta intervención en este sector, es en el cruce con la ruta que se dirige a Paso Jama donde la carretera funciona como una barrera la cual ralentiza el flujo en caso que la crecida presente un caudal mayor al que los atravesos pueden transportar. Los atravesos existentes condicionan el paso de flujo por una dirección preferencial, incrementando la erosión de esos sectores a medidas que se avanza aguas abajo del cruce el cauce comienza a incrementar su sección.

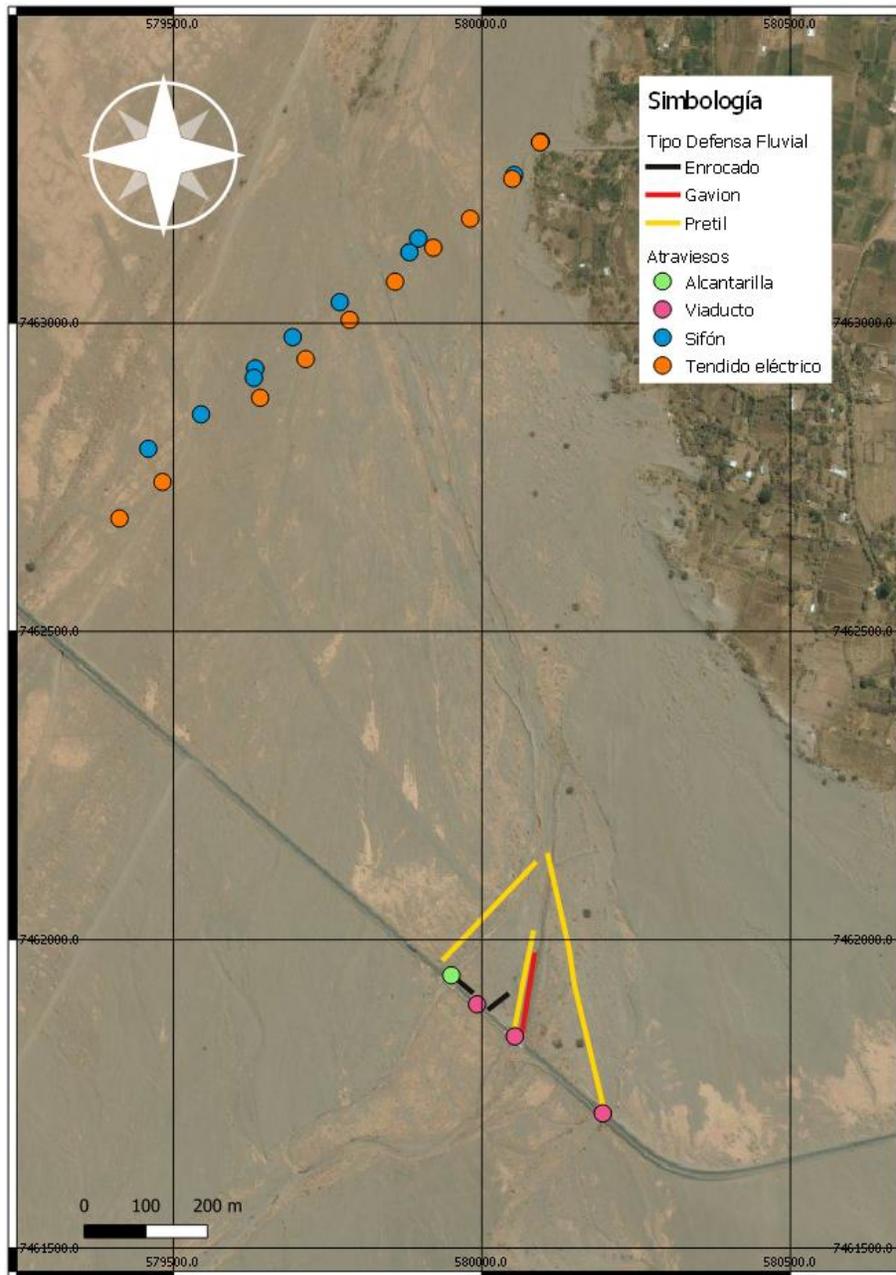


FIGURA 4-26: INTERVENCIONES EN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia

Respecto al río Vilama las intervenciones realizadas en este corresponden a obras de encauzamiento las cuales son pretiles de tierra y un enrocado improvisado para proteger el ayllu localizado en la ribera derecha, ambos están conformados material que se encuentra presente cauce. Estas defensas no alteran la morfología del cauce para caudales pequeños, ya que como se observa en la Figura 4-27 la canalización preserva la sección original con excepción de los últimos 200 metros donde el cauce naturalmente se expande, es importante mencionar que en crecidas de gran magnitud los pretiles de tierra e incluso el enrocado podrían ser erosionados incrementando la superficie del río.



FIGURA 4-27: INTERVENCIONES EN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia

4.1.8. Proposición de la línea geomorfológica de la ribera.

Se entenderá como línea geomorfológica de la ribera, la zona límite del sector aledaño al río, que no se ve afectada por el escurrimiento para ninguna crecida dentro de los registros que se dispongan.

Para estimar la línea geomorfológica de las riberas se utilizó el trabajo realizado en el acápite anterior donde se utilizan los límites que representan a la mayor extensión del cauce observado, en este caso corresponde al área asociada a un 8% de ocurrencia, con esto la línea es delimitada de forma exitosa salvo para la ribera izquierda del sector aguas abajo de la ruta de circunvalación en el río San Pedro, donde se produce un apozamiento que generó desbordes los cuales afectaron al Ayllu de Beter el análisis de esta ribera debe ser a través de un estudio que incorpore este sector evaluando los atravesos existentes y sus efectos aguas abajo .

En las Figura 4-28 y Figura 4-29 se presenta la ribera propuesta para el río san Pedro, mientras que en la Figura 4-30 se presenta la ribera propuesta para el río Vilama.

Se puede observar que para el caso del río San Pedro existen sitios habitados dentro de la zona correspondiente al cauce, estas se encuentran ubicadas en el sector de aguas arriba del puente de acceso a la localidad, esta zona siempre ha sido utilizada pero antes era con fines agrícola por lo que no suponía un riesgo para la población.



FIGURA 4-28: RIBERA PROPUESTA EN RIO SAN PEDRO ENTRE PUCARÁ DE QUITOR Y BADÉN DE ACCESO A SEQUITOR

Fuente: Elaboración Propia

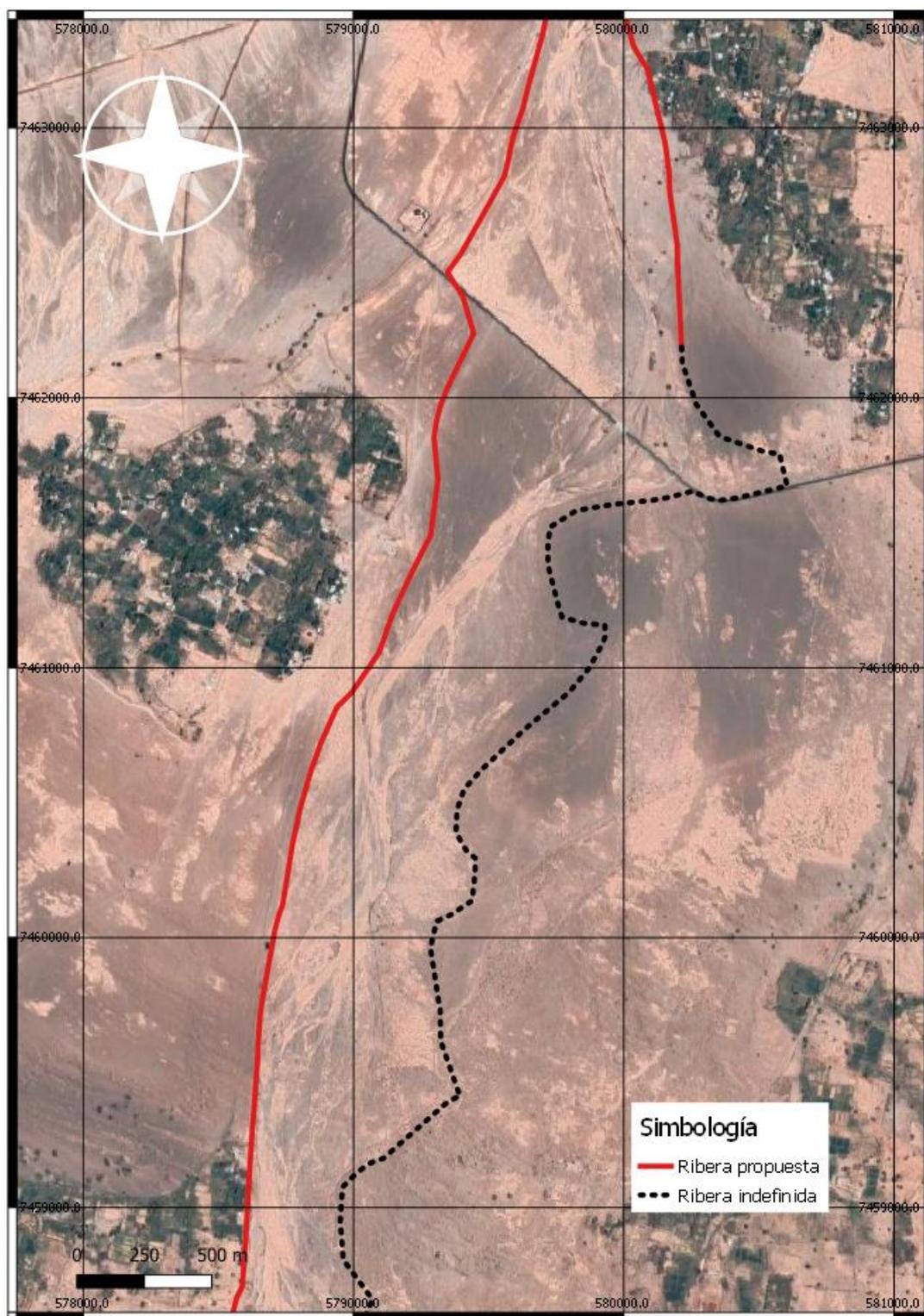


FIGURA 4-29: RIBERA PROPUESTA EN RIO SAN PEDRO ENTRE BADÉN DE ACCESO A SEQUITOR Y AYLLU DE TULOR

Fuente: Elaboración Propia

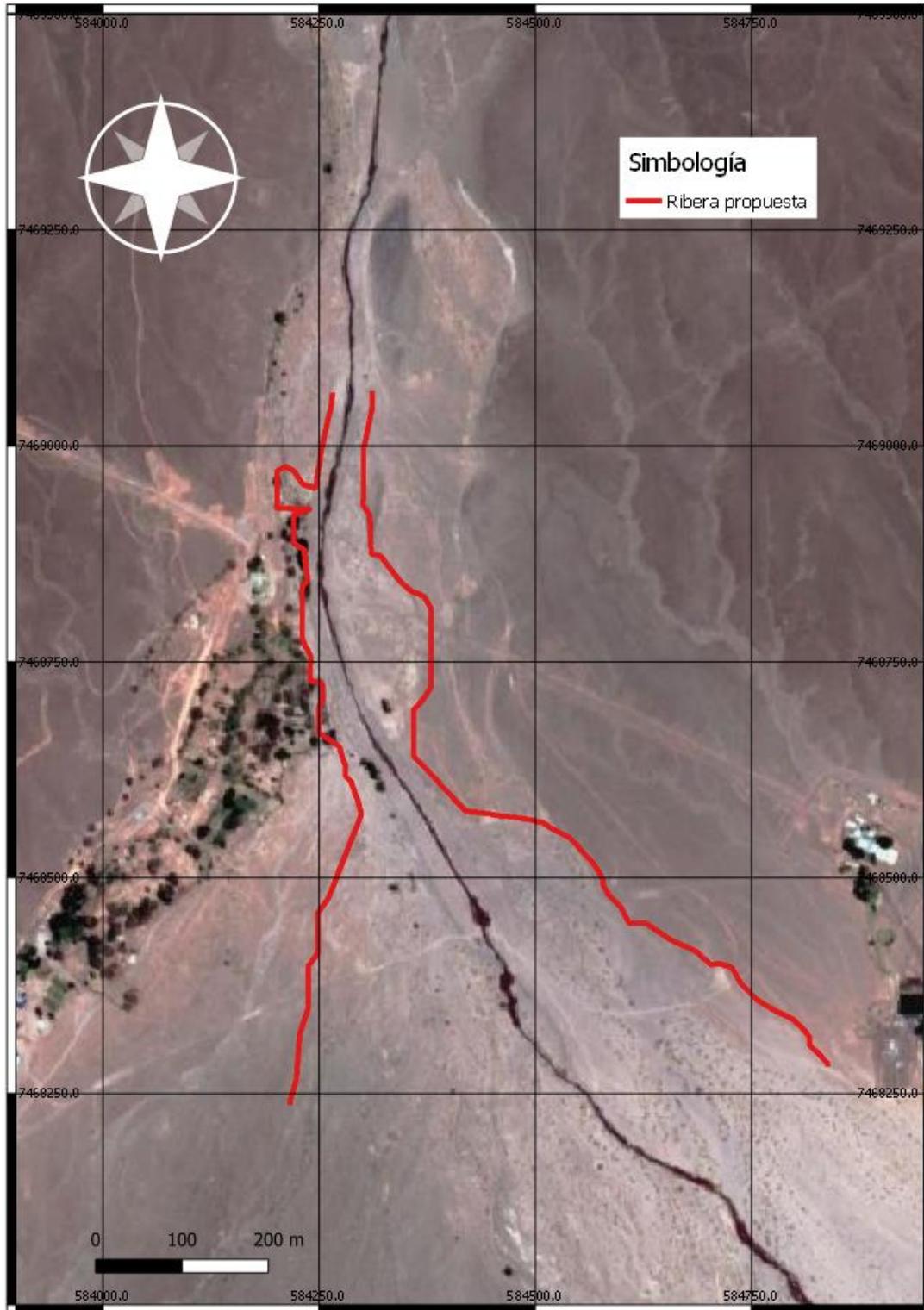


FIGURA 4-30: RIBERA PROPUESTA EN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia

4.1.9. Discusión y conclusiones.

Si bien para la elaboración del cauce histórico se hizo en función de múltiples fuentes de información, esta entrega un resultado bastante satisfactorio, indicando cuales zonas serían vulnerables antes las crecidas y estas superficies coinciden a la vez con la información recopilada en terreno. De los años donde se delimitó la superficie del cauce llama la atención el año 2019 donde su crecida tuvo consecuencias en el Ayllu de Beter, esta inundación pareciera no ser una característica natural del cauce sino más bien ser provocada por las obras que interfieren con el flujo, este sector al encontrarse fuera del área de estudio no se dispone de información suficiente para analizarlo, pero se indica que es necesario realizar un análisis de la interacción del río con la carretera en este sector.

Respecto a las obras de infraestructura las defensas fluviales existentes si bien no han modificado el eje del cauce si han cambiado la sección transversal del escurrimiento lo que tendrá como consecuencia mayores velocidades y altura de escurrimiento lo que para crecidas de gran magnitud podría tener consecuencias desastrosas, otras obras que llaman la atención son las localizadas en la ruta de circunvalación las cuales históricamente no han tenido buen comportamiento frente a las crecidas, si bien se han construido nuevas obras la efectividad de estas deberá ser comprobada a través de la modelación hidráulica.

Al analizar las fotos de históricas se ve un incremento de las construcciones en las riberas del cauce de casi un 1000% respecto a 1980, donde muchas de estas se verían afectadas a partir del análisis del cauce histórico, este análisis debe ser contrastado con la modelación hidráulica.

Referente a la actividad agrícola en las riberas del río, esta históricamente se ha desarrollado, pero deberían corresponder a cultivos estacionales asumiendo a que pueden ser afectadas por las crecidas. Se recomienda que los sectores aledaños a las riberas que presentan actividades agrícolas no cambien su uso del suelo ya que edificar estas zonas podría aumentar la situación de vulnerabilidad de la población, es por esto que la línea geomorfológica de la ribera propuesta indica que estos terrenos corresponden a zonas inundables.

4.2. Estudio Hidrológico

4.2.1. Introducción

El presente capítulo presenta el estudio hidrológico desarrollado para determinar los caudales de diseño de la cuenca de los ríos San Pedro y Vilama. Debido a la falta de antecedentes fluviométricos completos y confiables, se utilizaron también métodos hidrológicos basados en relaciones precipitación-escorrentía. Los métodos hidrológicos usados fueron la fórmula de Verni-King modificada (V-KM), la fórmula Racional Modificada (FRM), el método del Hidrograma Unitario Sintético (HUS) y el modelo Storm Water Management Model (SWMM), de la Environmental Protection Agency (EPA). Los objetivos de este capítulo del estudio son:

- Estimar los caudales que se presentaron en enero del 2019, con el objeto de efectuar un diagnóstico de funcionamiento de la zona.
- Estimar caudales máximos de crecidas, en distintos puntos de la zona de estudio, para distintos periodos de retorno.
- Estimar los caudales máximos detríticos, de crecidas, en distintos puntos de la zona de estudio y para distintos períodos de retorno.

Para lograr los objetivos señalados, se efectuaron los siguientes trabajos:

a) Estudio de Precipitaciones:

- Recopilación de Antecedentes.
- Análisis y Contraste de Datos.
- Extensión y Configuración de Series Definitiva
- Ajuste Probabilístico de Precipitaciones Máximas.
- Análisis de Frecuencia de Precipitaciones Máximas.
- Curvas Isoyetas de Precipitaciones Máximas en 24 horas.
- Precipitación Media Máxima en 24 horas sobre la Cuenca.
- Coeficientes de Duración y Frecuencia.
- Análisis de las precipitaciones de enero de 2019.

b) Estudio de Caudales

- Recopilación de antecedentes.
- Análisis y contraste de datos.
- Extensión y configuración de series definitiva
- Ajuste probabilístico.

- Análisis de frecuencia de caudales.
 - Caudales Máximos Instantáneos
- c) Cálculo de Caudales Máximos Instantáneos para distintos Períodos de Retorno
- En base a Precipitaciones.
 - En base a Caudales.
 - Valores Finales Propuestos.
- d) Cálculo de Caudales Detríticos para distintos Períodos de Retorno

4.2.2. Estudio de Precipitaciones Máximas

4.2.2.1. Aspectos Generales

En este apartado se presentan los antecedentes que serán utilizados para calcular, mediante distintas metodologías, los caudales de análisis y diseño, en distintos puntos de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama, en base a relaciones precipitación-escorrentía, incluyendo una modelación hidrológica de las cuencas de los ríos indicados con el modelo SWMM 5 de la EPA. Previo a estos cálculos se caracterizaron las precipitaciones, se configuraron tormentas de diseño que se usarán para analizar el comportamiento del sistema y se definieron los parámetros físicos de las cuencas, estableciéndose patrones de drenaje.

Para este análisis se realizaron las siguientes actividades:

- Recopilación de la información existente.
- Análisis relleno y extensión de datos.
- Definición de serie de precipitaciones máximas en 24 horas para las cuencas.
- Cálculo de precipitaciones máximas en 24 horas para distintos periodos de retorno.
- Definición de coeficientes de duración y de frecuencia.
- Confección de hietogramas de diseño.

4.2.2.2. Recopilación de antecedentes

Para el estudio se cuenta con antecedentes de precipitaciones para la localidad de nueve (9) estaciones pluviométricas, ubicadas en las cuencas o próximas a ellas, cuyos nombres y ubicaciones se pueden apreciar en la Figura 4-31. Del mismo modo, en el Cuadro 4-2.



FIGURA 4-31. UBICACIÓN ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DISPONIBLES

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-2. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICA E INFORMACIÓN DISPONIBLE

Decada	1970									1980									1990											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Linzor				2	12	12	12	12	11	8	12	12	12	11	12	11	12	12	12	7	12	7	11	12	12	12	12	12	12	12
El Tatio (DGA)								7	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Caspana (DGA)		12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	8	12	9	12	12	12	12	12	12	12	12
Toconao Reten					12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	1								
Toconao Experimental					2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	6	12	12	11	11	11	12	12	12
Toconao Pueblo																														
Toconao Quebrada 4																														
San Pedro d.A. (DGA)		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6	12	12	3										
Río Grande								12	9	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Decada	2000									2010										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Linzor	12	12	11	12	12	12	12	12	9	2	7	12	11	12	11	8	0	2	0	0
El Tatio (DGA)	12	12	11	8	8	12	0	12	10	12	11	12	12	12	11	10	10	5	0	0
Caspana (DGA)	12	12	12	12	11	12	12	12	9											
Toconao Reten																				
Toconao Experimental	12	12	12	12	12	12	12	12	12	2										
Toconao Pueblo																	4	6	0	3
Toconao Quebrada 4																	4	1	0	
San Pedro d.A. (DGA)											10	12	12	12	12	11	6			
Río Grande	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12

Fuente: Elaboración propia

Del Cuadro 4-2, de información disponible, se seleccionaron para el estudio las seis estaciones con mayores registros y que corresponden a:

- Linzor
- El Tatio (DGA)
- Caspana (DGA)
- Río Grande
- San Pedro de Atacama (DGA) y
- Toconao Experimental

En la Figura 4-31, también se observa que, de las estaciones seleccionadas, las estaciones con registros más extensos son: Linzor, El Tatio (DGA) y Río Grande. Dado que la más antigua es Linzor, se determinó como periodo de estudio, el período de esta estación comprendido entre el año 1974 hasta el año 2019, es decir, se fija una extensión para la estadística de precipitaciones de 46 años. Se descarta el año 1973 porque este año tiene sólo dos meses de información y dichos meses corresponden a los meses de noviembre y diciembre, meses que usualmente, en la zona, tienen precipitación nula.

4.2.2.3. Relleno, Extensión y Análisis de datos (Anual, Mensual y Diaria)

Selección de Estación Principal

En el Cuadro anterior (Cuadro 4-2), como se ha dicho, se observa que la estación Río Grande posee un registro muy completo, además se sitúa entre las estaciones San Pedro y Linzor, por lo que se elige esta estación como la estación principal del estudio. Otras estaciones, además de Río Grande, que se utilizarán para el estudio son: Linzor, El Tatio (DGA), Caspana (DGA), San Pedro (DGA) y Toconao Experimental. El resto de las estaciones se utilizarán como apoyo para el relleno de datos faltante (anual, mensual y diaria) en las estaciones mencionadas.

Metodología General de Relleno:

En general, se utilizó como estaciones base o patrón para efectuar los rellenos, las estaciones Río Grande, Toconao Experimental y Caspana (DGA), ya que estas estaciones presentan registros casi completos, destacando la estación Río Grande, por presentar un registro extenso entre los años 1977 y 2019.

- 1) El relleno de las precipitaciones anuales se efectuó mediante el relleno de las precipitaciones mensuales o mediante el relleno de las precipitaciones diarias, según fuese el caso.

- 2) Para el relleno de precipitaciones mensuales se consideró tres casos:
 - El primer caso, corresponde a una situación en la que hay pocos meses faltantes (entre 1 y 6 meses) entre la estación a rellenar y la estación correlacionada base. En este caso se rellena la estadística utilizando el método de Regresión Lineal Simple (RLS), siempre que se cumpla un coeficiente de correlación (R^2_{xy}) mayor a 0,7. Es necesario considerar que, debido a la gran cantidad de meses con precipitación nula, no siempre es posible o recomendable realizar una RLS. Usualmente se intenta una RLS si hay 4 o más valores no nulos.
 - En el segundo caso, se presenta cuando el R^2_{xy} es inferior a 0,7, que ocurre cuando hay demasiados valores nulos en la estadística, o cuando faltan muchos meses como para poder realizar una RLS. En este caso se utiliza el método de la Razón Promedio (RP), con las estaciones disponibles y prefiriendo siempre las más cercanas. Se trata de evitar, en lo posible rellenar valores entre Linzor/El Tatio, con Toconao, ya que hay más de 100 km de distancia entre ambas estaciones.
 - El tercer y último caso, corresponde al caso que se presenta cuando existen datos mensuales, pero faltan valores diarios. En este caso, se rellenó con una RLS, considerando las estaciones que tuvieran datos en esa fecha, siempre y cuando el valor de R^2_{xy} fuese mayor que 0,7. En el caso que no se cumpla lo anterior, se usa RP.

- 3) Para el relleno de las Precipitaciones Máximas Anuales (PMA) faltantes, en cuyos casos, normalmente, la falta del dato se debe a la existencia de meses vacíos sin información, se verificó con las estaciones vecinas si existían máximos que coincidieran, en fecha, con el mes faltante. En el caso de haberlos, se rellena el mes faltante con RP para ver si se producía un

valor máximo, pero no para generar la estadística faltante ya que esta podía no coincidir con las RLS realizadas para llenar las precipitaciones mensuales.

En los siguientes Cuadros (Cuadro 4-3 al Cuadro 4-8) se presenta un detalle de los rellenos realizados, para las estaciones Linzor, El Tatio (DGA), Caspana, Río Grande, San Pedro de Atacama (DGA) y Toconao Experimental.

CUADRO 4-3: RELLENO DE DATOS ESTACIÓN LINZOR

Fecha	Tipo	Linzor		Obs
		R ²	Metodo	
Marzo 1978	mensual	0.97	RLS	El Tatio (DGA)
Ene-Feb-Mar-Abr 1979	mensual	-	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Río Grande
Enero 1979	PMA	-	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Río Grande
Septiembre 1983	diario	-	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Río Grande
Junio 1985	mensual	0.98	RLS	El Tatio (DGA)
Jul-Ago-Sep-Oct-Nov 1989	mensual	0.99	RLS	Río Grande
Jul-Ago-Sep-Oct-Nov 1991	mensual	0.5	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Río Grande
Diciembre 1992	diario	0.04	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Río Grande
Julio 2002	diario	-	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Río Grande
Enero 2008	diario	0.25	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Ago-Sep 2008	mensuales	0.99	RLS	El Tatio (DGA)
Feb-Mar-Abr-Jun-Jul-Ago-Sep-Oct-Nov-Dic 2009	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Marzo 2009	PMA	-	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Ene-Feb-Mar-Abr-May 2010	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Febrero 2010	PMA	-	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Febrero 2012	diario	0.75	RLS	El Tatio (DGA)
Noviembre 2014	mensuales	0.99	RLS	Río Grande
Feb-Mar-Abr 2015	mensuales	-	RP	Río Grande, San Pedro (DGA)
Marzo 2015	PMA	-	RP	Río Grande, San Pedro (DGA)
Año 2016	mensual	-	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Febrero 2016	PMA	-	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Ene-Otc-Nov 2017	diario	-	RP	El Tatio (DGA), Río Grande
Abr-May-Jun-Jul-Ago-Sep 2017	mensuales	0.88	RLS	Río Grande
Ene-Feb-Mar-Abr-May-Jun-Jul 2018	diario	-	-	Río Grande
Sep-Oct-Nov-Dic 2018	mensuales	-	-	
Año 2019	mensuales	-	RP	Río Grande, Caspana (INIA)
Año 2019	PMA	-	RP	Río Grande, Caspana (INIA)

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-4: RELLENO DE DATOS ESTACIÓN EL TATIO (DGA)

El Tatio (DGA)				
Fecha	Tipo	R ²	Metodo	Obs
Ene-Feb-Mar-Abr-May 1977	mensual	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Febrero 1977	PMA	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Oct-Nov-Dic 1989	mensual	-	-	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Marzo 2002	diarios	0.78	RLS	Linzor
Sep-Oct-Nov-Dic 2003	mensual	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Ene-Feb-Mar-Abr 2004	mensual	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Febrero 2004	PMA	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Año 2006	mensual	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Febrero 2006	PMA	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Nov-Dic 2008	mensual	-	RP	Linzor, Caspana (DGA), Rio Grande
Febrero 2010	diarios	-	RP	Rio Grande
Noviembre 2014	mensual	-	RP	Rio Grande, San pedro (DGA)
Feb-Mar 2015	mensual	-	Rp	Rio Grande, San pedro (DGA)
Marzo 2015	PMA	-	RP	Rio Grande, San pedro (DGA)
Jul-Nov 2016	diarios	-	RP	Rio Grande, San pedro (DGA)
Jun-Jul-Ago-Sep-Oct-Nov-Dic 2017	diarios	-	-	Rio Grande, Toconao (DMC)
Ene-Feb-Mar-Abr-May-Jun-Jul-Ago 2018	diarios	-	-	Rio Grande, Linzor
Sep-Oct-Nov-Dic 2018	mensual	-	-	
Año 2019	mensual	-	RP	Rio Grande, Caspana (INIA)
Año 2019	PMA	-	RP	Rio Grande, Caspana (INIA)

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-5: RELLENO DE DATOS ESTACIÓN CASPANA

Caspansa (DGA)				
Fecha	Tipo	R ²	Metodo	Obs
Sep-Oct-Nov-Dic 1989	mensuales	-	-	Rio Grande
Oct-nov-Dic 1991	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande
Febrero 2004	diarios	-	RP	Linzor, Rio Grande
Enero 2008	diarios	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande
Jul-Ago 2008	Mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-6: RELLENO DE DATOS ESTACIÓN RÍO GRANDE

Río Grande				
Fecha	Tipo	R ²	Metodo	Obs
Sep-Oct-Nov 1978	mensuales	0.8	RLS	Caspansa (DGA)
Abril 1980	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), San Pedro (DGA)
Enero 2007	diario	-	RP	Linzor, El Tatio (DGA), Caspana (DGA)
Diciembre 2007	mensuales	-	-	Linzor, El Tatio (DGA), Caspana (DGA)
Nov-Dic 2018	mensuales	-	-	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-7: RELLENO DE DATOS ESTACIÓN SAN PEDRO DE ATACAMA (DGA)

San Pedro de Atacama (DGA)				
Fecha	Tipo	R ²	Metodo	Obs
Feb-Mar-Abr-May-Jun-Jul 1986	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande, Toconao Experimental
Abr-May-Jun-Jul-Ago-Sep-Oct-Nov-Dic 1989	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande, Toconao Experimental
Enero 2011	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande
Febrero 2011	diarios	0.4	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande
Abril 2016	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande, Toconao (DMC)
Abril 2016	PMA	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande, Toconao (DMC)
Ene-Feb-Mar-Abr-Jun-Nov 2017	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande, Toconao (DMC)
Febrero 2017	PMA	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande, Toconao (DMC)

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-8: RELLENO DE DATOS ESTACIÓN TOCONAO EXPERIMENTAL

Toconao Experimental				
Fecha	Tipo	R ²	Metodo	Obs
Ene-Feb 1990	diarios	-	-	Toconao Reten
Jul-Ago-Sep-Oct-Nov-Dic 1991	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande
Marzo 1994	diarios	0.006	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Rio Grande
Junio 1995	diarios	-	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Rio Grande
Enero 1996	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Rio Grande
Mar-Abr-May-Jun-Jul-Ago-Sep-Oct-Nov-Dic 2009	mensuales	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande
Marzo 2009	PMA	-	RP	El Tatio (DGA), Rio Grande

Fuente: Elaboración propia

El detalle de los rellenos efectuados, se presentan en Anexo 4-2-1: “Relleno Precipitaciones Mensuales-Anuales-MaxAnuales 24-48-72hr”.

Metodología General de Extensión de Datos:

Las estadísticas de las diferentes estaciones pluviométricas consideradas, una vez que se rellenaron, se extendieron para el período definido, que abarca 46 años para el período comprendido entre el año 1974 hasta el año 2019. El detalle del proceso estadístico de extensión se presenta en Anexo 4-2-1 “Rellenos Mensuales_Anuales_MáxAnuales 24-48-72”.

El procedimiento utilizado para este proceso es el siguiente:

a) Extensión de precipitaciones mensuales:

- Se efectúan regresiones lineales simples (RLS) y curvas dobles acumuladas (CDA) entre la estación que se quiere analizar y extender, con la estación patrón.
- La extensión de los valores mensuales se realiza, en primer lugar, a partir de regresiones lineales simples (RLS) efectuada de la estación que se quiere extender con las otras estaciones de estudio. Si el R²xy es mayor a 0,7, entonces se realiza la extensión en base a la regresión.

- Si ninguna de las RLS tiene un R^2_{xy} mayor a 0,7, entonces se escoge la que posea el valor más alto de R^2_{xy} y se comparan los valores extendidos mediante esta RLS, respecto a la obtenida al utilizar la relación de la Curva Doble Acumulad (C.D.A). Luego, se obtiene el error entre los valores extendidos y los originales, y se elige el método que presente menor error.

Los resultados obtenidos, se presentan desde el Cuadro 4-9 al Cuadro 4-13.

CUADRO 4-9: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN EL TATIO (DGA)

Extensión El Tatio (DGA)			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.88	Linzor	$y = 0.8928x + 0.2189$
RLS	0.75	Caspana (DGA)	
RLS	0.76	Rio Grande	
RLS	0.56	Toconao Exp.	
RLS	0.53	San pedro (DGA)	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-10: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN CASPANA

Extensión Caspana (DGA)			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.74	Linzor	
RLS	0.76	El Tatio (DGA)	
RLS	0.85	Rio Grande	$y = 0.7356x - 0.2245$
RLS	0.58	Toconao Exp.	
RLS	0.52	San pedro (DGA)	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-11: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN RÍO GRANDE

Extensión Rio Grande (DGA)			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.76	Linzor	
RLS	0.76	El Tatio (DGA)	
RLS	0.88	Caspana (DGA)	$y = 1.2257x + 1.4399$
RLS	0.65	Toconao Exp.	
RLS	0.65	San pedro (DGA)	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-12: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN SAN PEDRO DE ATACAMA (DGA)

Extensión San Pedro (DGA)			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.43	Linzor	
RLS	0.44	El Tatio (DGA)	
RLS	0.45	Caspana (DGA)	
RLS	0.64	Río Grande	$y = 2.9465 x + 3.7818$
RLS	0.38	Toconao Exp.	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-13: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN TOCONAO EXPERIMENTAL

Extensión Toconao Experimental			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.5	Linzor	
RLS	0.5	El Tatio (DGA)	
RLS	0.51	Caspana (DGA)	
RLS	0.62	Río Grande	$y = 0.143x + 0.1657$
RLS	0.41	San Pedro (DGA)	

Fuente: Elaboración propia

Se observa que la estación San Pedro y Toconao Experimental no tienen RLS con R^2_{xy} mayor a 0,7, por lo que se comparan los valores obtenidos mediante la RLS con mayor R^2_{xy} , respecto a los obtenidos de usar la CDA. Para San Pedro, la RLS de mayor R^2_{xy} es la obtenida con Río Grande ($R^2_{xy}=0,64$). Comparando los errores obtenidos de usar la RLS y la CDA se obtiene el siguiente resultado (Cuadro 4-14):

CUADRO 4-14: ERRORES OBTENIDOS SAN PEDRO Y RÍO GRANDE

San Pedro vs Río Grande	
Error RLS	Error C.D.A.
282,92	389,33

Fuente: Elaboración propia

Ya que la RLS entre San Pedro y Río Grande presenta menor error, se escoge este método para extender.

Para Toconao experimental, la RLS de mayor R^2_{xy} es la obtenida con Río Grande ($R^2=0,62$). Procediendo en forma análoga con la estación anterior, se obtiene el siguiente resultado (Cuadro 4-15):

CUADRO 4-15: ERRORES OBTENIDOS TOCONAO Y RÍO GRANDE

Toconao Exp. Vs Río Grande	
Error RLS	Error C.D.A.
333.12	400.85

Fuente: Elaboración propia

Ya que la RLS con Toconao Experimental y Río Grande presenta menor error, se escoge este método para extender.

i. Extensión de precipitaciones anual:

En este caso, se procede como sigue:

- La extensión de la estadística anual se obtiene sumando los valores mensuales obtenidos anteriormente.

ii. Extensión de precipitaciones máximas anuales:

- Al igual que la extensión de los valores mensuales, la extensión de las Precipitaciones Máximas Anuales, se efectúan a través de una regresión lineal simple (RLS) de la estación que se quiere extender con las otras estaciones de estudio. Si el R^2_{xy} es mayor que 0,7, entonces se realiza la extensión en base a la regresión. En este caso, en general las RLS no dan buenos R^2_{xy} , por lo que se debió efectuar una RLS entre las PMA de la estación, con las Precipitaciones Anuales de la misma, las cuales suelen dar mejores R^2_{xy} .
- Si ninguna de las RLS tiene un R^2_{xy} mayor a 0,7, entonces se escoge la que posea el valor más alto de R^2_{xy} , y se comparan los valores extendidos mediante esta RLS, respecto a utilizar el método de razón promedio (RP). Luego, se obtiene el error entre los valores extendidos y los originales, y se elige el método que presente menor error.

Los resultados obtenidos, se presentan desde el Cuadro 4-16 al Cuadro 4-20.

CUADRO 4-16: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN EL TATIO (DGA)

Extensión El Tatio (DGA)			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.42	Linzor	$y = 0.6992x + 6.1241$
RLS	0.28	caspana	
RLS	0.28	Río Grande	
RLS	0.22	san pedro	
RLS	0.17	Toconao Exp	
RLS	0.41	El Tatio (DGA) P.A.	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-17: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN CASPANA

Extensión Estación Caspana (DGA)			
Metodo	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.26	Linzor	
RLS	0.29	El Tatio	
RLS	0.55	Rio Grande	$y = 0.6572x + 4.5811$
RLS	0.34	San Pedro (DGA)	
RLS	0.19	Toconao Exp	
RLS	0.53	Caspana (DGA) P.A.	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-18: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN RÍO GRANDE

Extensión Rio Grande (DGA)			
Metodo	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.28	Linzor	
RLS	0.28	El Tatio	
RLS	0.55	Caspana	$y = 0.833x + 10.406$
RLS	0.12	San Pedro	
RLS	0.21	Toconao Exp	
RLS	0.51	Rio Grande P.A.	

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-19: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN SAN PEDRO DE ATACAMA (DGA)

Extensión San pedro (DGA)			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.33	Linzor	
RLS	0.22	El Tatio	
RLS	0.34	Caspana	
RLS	0.12	Rio Grande	
RLS	0.37	Toconao Exp	
RLS	0.45	San Pedro (DGA) P.A.	$y = 0.2235x + 3.3332$

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-20: EXTENSIÓN DATOS ESTACIÓN TOCONAO EXPERIMENTAL

Extensión Toconao Experimental			
Método	R2	Estación	Ecuación
RLS	0.29	Linzor	
RLS	0.17	El Tatio (DGA)	
RLS	0.22	Caspana (DGA)	
RLS	0.21	Rio Grande	
RLS	0.22	San Pedro (DGA)	
RLS	0.69	Toconao Exp P.anual	$y = 0.2672x + 1.5964$

Fuente: Elaboración propia

a) Metodología General de Análisis de Consistencia:

Con los datos rellenos y extendidos, se realiza las pruebas de consistencia, independencia, estacionariedad y homogeneidad de la muestra. En general, se observa que la consistencia de las estaciones no es muy buena, pues casi ninguna Curva Doble Acumulada (C.D.A) forma una recta sin desvíos.

Para el análisis de consistencia (detectar errores accidentales y sistemáticos) se tomó como Estación Patrón al promedio de las precipitaciones anuales de Linzor, El Tatio (DGA) y Rio Grande. Luego realizan las C.D.A de estas tres estaciones v/s el Patrón generado. Obteniendo las siguientes C.D.A. (Figura 4-32):

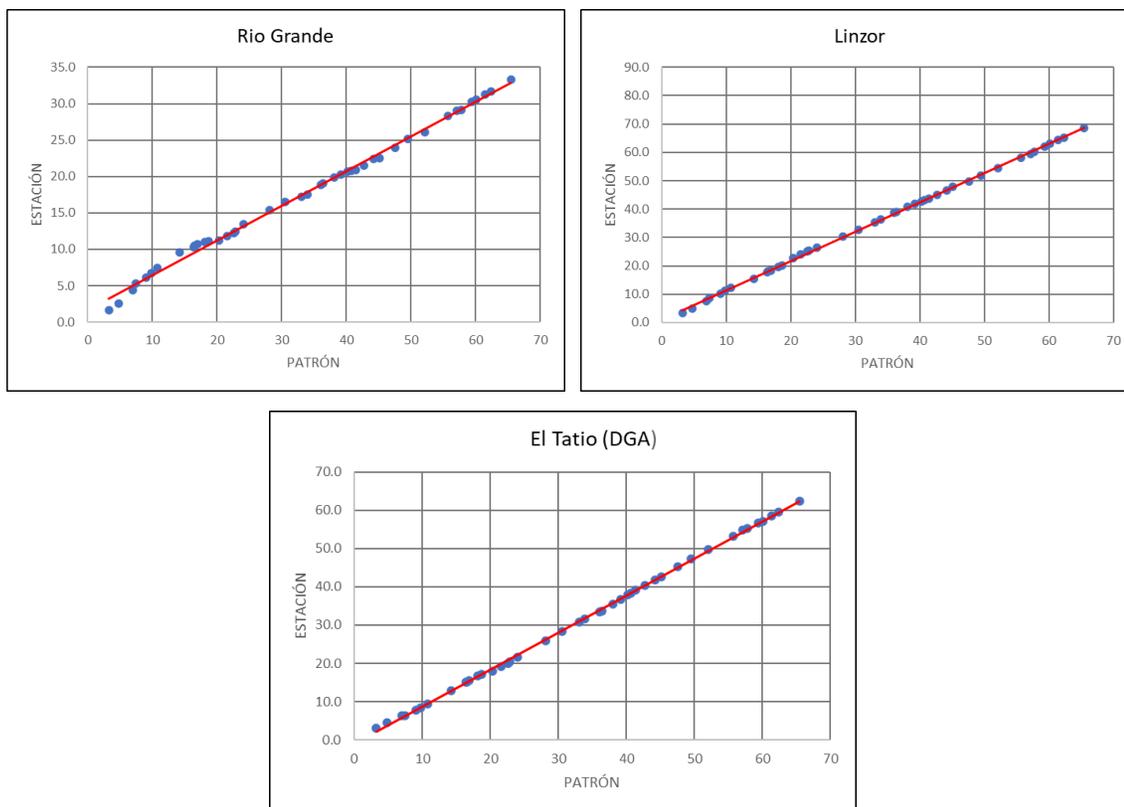


FIGURA 4-32: ANÁLISIS DE CONSISTENCIA ESTACIONES LINZOR, EL TATIO (DGA) Y RÍO GRANDE

Fuente: Elaboración propia

En general en estas estaciones no se observan errores accidentales y solo leves cambios de pendientes, por lo que se estima que la consistencia es buena. No obstante, con el objeto de mejorar el análisis ya que se observa que la estación Río Grande presenta una irregularidad en los primeros años, en comparación con las estaciones Linzor y El Tatio (DGA), que aparecen mejor ajustados, se retiró Río Grande de la conformación de la Estación Patrón. A continuación (Figura 4-33 a la Figura 4-36), se presentan los resultados del análisis de consistencia efectuado entre la Estación Patrón, Río Grande y las demás estaciones utilizadas para el estudio (Caspana DGA, San Pedro de Atacama DGA y Toconao Experimental).

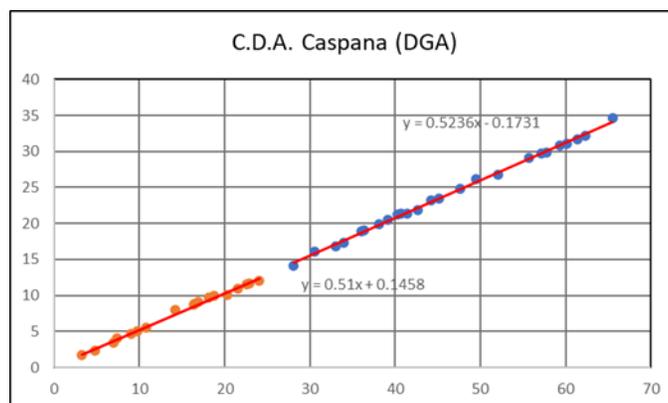


FIGURA 4-33: ANÁLISIS DE CONSISTENCIA ESTACIÓN CASPANA (DGA)

Fuente: Elaboración propia

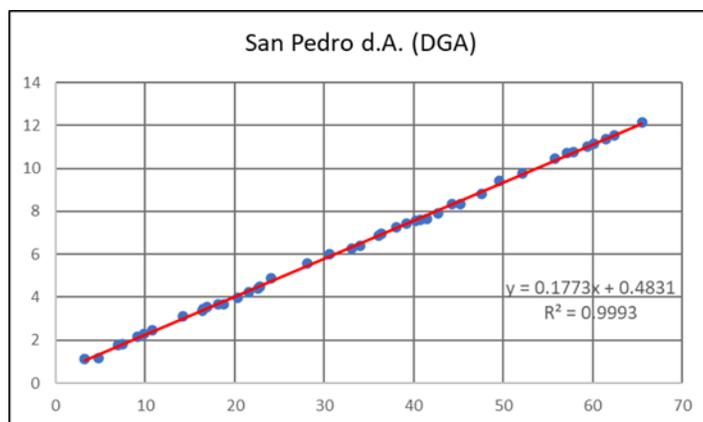


FIGURA 4-34. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA ESTACIÓN SAN PEDRO DE ATACAMA (DGA)

Fuente: Elaboración propia

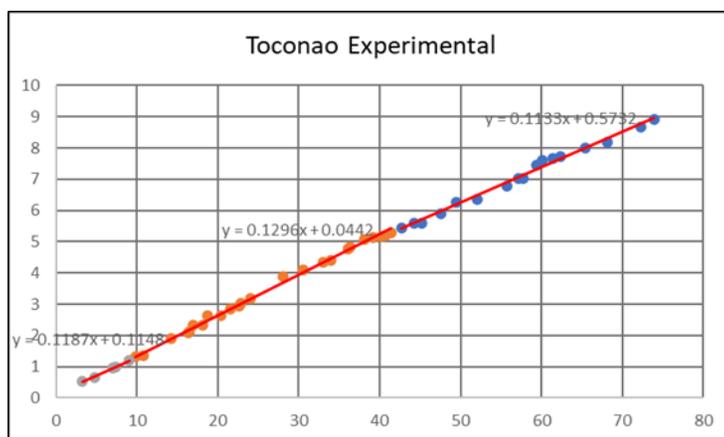


FIGURA 4-35. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA ESTACIÓN TOCONAO EXPERIMENTAL

Fuente: Elaboración propia

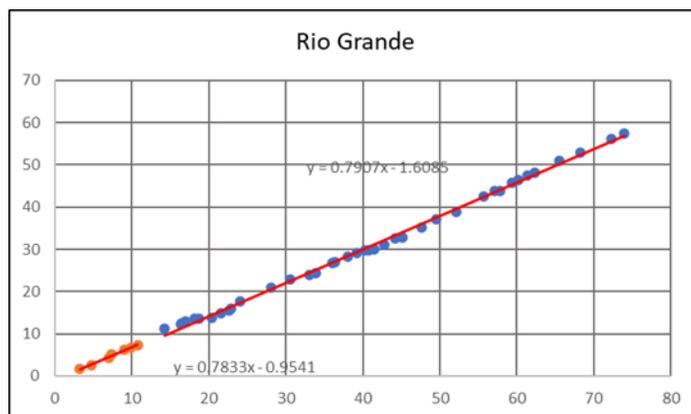


FIGURA 4-36. ANÁLISIS DE CONSISTENCIA ESTACIÓN RÍO GRANDE

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 4-21 y Cuadro 4-22, presentan los valores corregidos y extendidos de la precipitaciones totales anuales y precipitaciones máximas diarias para las estaciones seleccionadas para el estudio.

CUADRO 4-21: SERIES FINALES DE PRECIPITACIONES ANUALES

Año	Linzor	El Tatío (DGA)	Caspana (DGA)	Río Grande	San Pedro (DGA)	Toconao Experimental
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1974	173	156	103	136	3	21
1975	433	388	253	322	40	47
1976	285	256	151	192	39	18
1977	335	288	244	283	61	30
1978	97	91	52	60	18	4
1979	117	143	66	113	24	7
1980	98	56	19	61	13	16
1981	187	126	101	191	24	42
1982	71	58	15	15	8	2
1983	134	152	54	124	23	23
1984	382	342	233	372	71	41
1985	256	260	65	161	35	12
1986	202	187	139	195	60	36
1987	201	283	137	249	48	29
1988	110	76	21	15	0	0
1989	172	133	129	154	43	15
1990	131	128	55	108	25	44
1991	57	82	1	16	4	8
1992	53	45	7	13	5	2
1993	84	124	78	64	15	3
1994	104	117	60	71	16	7
1995	160	181	89	137	30	26
1996	43	21	11	34	9	6
1997	238	187	156	217	48	38
1998	103	80	51	51	12	4
1999	253	243	78	118	26	27
2000	245	245	194	190	43	20
2001	389	422	213	327	72	71
2002	112	128	157	170	39	14
2003	14	36	13	36	9	10
2004	116	91	58	72	16	10
2005	135	110	83	113	26	22
2006	244	81	15	8	29	0
2007	69	53	23	11	3	30
2008	113	124	25	60	13	0
2009	44	37	22	34	8	20
2010	22	9	18	28	7	4
2011	217	207	78	119	28	18
2012	338	353	245	371	62	54
2013	104	94	47	72	20	5
2014	82	63	36	56	13	12
2015	181	151	58	88	37	20
2016	87	0	58	88	1	3
2017	266	175	120	182	61	30
2018	147	157	59	89	6	14
2019	349	301	172	167	112	52

Nota: Valores en color corresponde a valores, corregidos, rellenados y extendidos.

CUADRO 4-22: SERIES FINALES DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS ANUALES DIARIAS

Año	Linzor		El Tatio (DGA)		Caspasa (DGA)		Rio Grande		San Pedro (DGA)		Tononao Experimental	
	(mm)	Día Mes	(mm)	Día Mes	(mm)	Día Mes	(mm)	Día Mes	(mm)	Día Mes	(mm)	Día Mes
1974	26.5	1 2	24.7	- -	35.3	1 2	39.8	- -	2.5	26 1	7.6	- -
1975	29.0	20 2	26.4	- -	25.0	23 1	31.3	- -	9.0	20 2	14.6	- -
1976	42.0	27 1	35.5	- -	43.3	29 1	46.5	- -	17.0	27 1	6.8	28 1
1977	50.0	21 2	58.4	20 2	65.6	20 2	87.5	20 2	16.0	20 2	13.2	18 2
1978	16.5	9 1	20.0	1 1	20.3	3 2	41.2	3 2	18.0	3 2	2.9	3 2
1979	15.4	7 1	13.0	27 3	10.8	16 6	32.3	18 1	8.5	16 6	4.3	16 6
1980	19.0	21 3	14.0	23 3	5.4	21 3	17.0	18 2	5.0	18 2	5.8	22 3
1981	38.5	9 2	17.0	26 2	48.7	22 2	71.2	21 2	11.5	21 2	10.3	26 2
1982	17.5	21 9	12.0	26 9	5.4	25 9	8.4	22 9	3.0	25 9	1.4	25 9
1983	14.6	6 1	21.0	30 12	10.8	10 9	20.2	10 6	7.0	11 6	7.8	11 6
1984	28.5	12 3	20.0	3 1	35.9	4 1	45.8	4 1	37.3	7 6	5.4	2 1
1985	45.0	18 2	32.0	17 2	12.9	28 2	33.0	7 3	9.5	4 3	6.2	27 2
1986	25.0	29 12	24.5	5 2	58.2	29 1	93.1	28 1	22.5	28 1	7.8	31 1
1987	30.0	4 1	56.0	4 1	24.4	4 1	38.5	22 1	12.5	11 3	7.8	7 3
1988	20.9	13 2	20.5	19 1	10.1	7 3	7.6	19 1	0.0	- -	0.0	- -
1989	28.5	10 2	14.5	9 2	35.9	4 2	21.7	6 2	11.0	6 2	4.1	4 2
1990	17.0	25 12	21.0	30 12	16.2	11 3	23.7	24 12	8.8	- -	10.0	24 12
1991	9.0	1 1	20.0	22 1	1.4	1 1	6.1	3 1	4.2	- -	2.1	4 1
1992	12.0	6 1	16.0	6 1	4.1	6 1	7.9	5 1	4.3	- -	1.5	29 5
1993	7.5	20 1	12.5	29 3	18.9	27 3	13.3	20 1	6.6	- -	2.0	27 3
1994	25.0	9 3	12.5	9 3	27.1	9 3	18.8	8 3	7.0	- -	6.3	10 3
1995	32.8	29 1	46.0	29 1	45.3	28 1	67.1	29 1	10.1	- -	10.6	29 1
1996	8.5	31 12	9.0	20 3	8.8	29 8	13.5	29 8	5.2	- -	3.0	6 3
1997	40.0	24 2	27.0	23 2	27.1	11 8	29.4	3 3	14.2	- -	22.0	1 3
1998	34.0	21 1	38.0	20 1	21.7	9 2	22.7	19 1	5.9	- -	2.0	8 2
1999	22.0	27 2	50.0	5 2	22.3	8 2	49.0	11 2	9.2	- -	5.5	12 3
2000	26.5	22 1	34.0	20 1	67.7	23 1	30.0	8 3	12.9	- -	11.5	23 1
2001	28.0	25 2	21.0	3 3	22.8	2 3	47.8	1 3	19.4	- -	23.0	28 2
2002	20.5	9 3	28.9	9 3	76.0	9 3	49.6	9 3	12.0	- -	8.1	9 3
2003	6.3	30 1	10.0	15 5	5.5	6 2	9.3	14 5	5.3	- -	3.8	5 2
2004	47.5	12 2	25.1	5 2	15.6	5 2	40.6	5 2	7.0	- -	6.7	23 8
2005	22.5	13 1	15.4	13 1	25.5	16 1	21.0	10 3	9.0	- -	11.7	25 4
2006	21.4	7 2	6.2	7 2	5.0	15 1	4.2	13 2	9.8	- -	0.0	- -
2007	31.8	14 1	9.5	14 1	10.0	14 1	10.8	1 1	3.9	- -	9.0	14 1
2008	13.2	17 1	17.6	17 1	15.2	14 1	17.0	14 1	6.3	- -	0.0	- -
2009	7.8	17 1	7.0	14 3	11.1	- -	9.9	11 3	5.2	- -	4.2	11 3
2010	6.9	25 2	8.7	25 2	11.3	- -	10.3	24 2	4.8	- -	2.8	- -
2011	23.5	3 2	31.6	1 2	17.2	- -	19.2	1 2	6.1	1 2	6.4	- -
2012	37.1	12 3	30.1	10 2	66.4	- -	94.1	9 2	7.0	9 2	16.0	- -
2013	24.5	9 2	26.9	9 2	21.3	- -	25.5	8 2	8.2	6 2	3.8	25 8
2014	25.7	16 1	25.5	17 1	37.6	- -	50.2	15 1	7.0	16 1	5.3	25 5
2015	32.6	21 4	28.2	21 3	22.5	- -	27.2	5 2	10.5	21 3	7.9	6 2
2016	22.6	26 2	0.0	- -	19.6	- -	22.9	23 2	0.6	19 4	1.38	23 2
2017	23.1	25 2	27.1	25 2	18.4	- -	21.1	23 2	7.8	23 2	5.4	25 2
2018	15.5	9 2	19.5	6 2	17.1	- -	19.1	6 2	4.8	- -	4.8	8 2
2019	68.1	31 1	58.9	31 1	52.2	31 1	37.9	28 3	42.1	31 1	15.5	31 1

Nota: Valores en color corresponde a valores, corregidos, rellenados y extendidos.

iii. Ajuste Probabilístico

En este apartado, se presenta la metodología seguida para los ajustes probabilísticos a las series de precipitaciones máximas anuales diarias elegidas para caracterizar la zona de estudio: Linzor, El Tatio (DGA), Caspana (DGA), Río Grande, San Pedro (DGA) y Toconao Experimental.

Para las estaciones que no presentaron datos nulos, Linzor, Caspana y Río Grande, se ajustaron distintas distribuciones probabilísticas a los datos de precipitaciones máximas anuales diarias, entre ellas las distribuciones Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Gumbel y Weibull.

En las estaciones de El Tatio, San Pedro y Toconao, que presentan valores nulos (El Tatio – Año 2016, San Pedro – Año 1988 y Toconao Experimental – Años 1988, 2006 y 2008), a pesar de que los años con información nulo son pocos, con el objeto de representar rigurosamente la verdadera distribución de las lluvias, se procedió a utilizar el siguiente procedimiento:

- Se diferenciaron los años con precipitación n_p de aquellos sin precipitación n_0 .
- Se ajustaron distribuciones probabilísticas al subconjunto de precipitaciones máximas anuales diarias, de años con precipitación no nula. Entre ellas las distribuciones Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Gumbel y Weibull.
- Los resultados obtenidos se afectaron por la probabilidad condicionada de que exista lluvia, para convertirlos en probabilidades absolutas. Se calcula el periodo de retorno corregido mediante el siguiente factor de corrección:

$$fc = 1 - \frac{n_0}{n}$$

- La forma de corregir un periodo de retorno para una precipitación “P” es multiplicando la probabilidad de excedencia correspondiente a dicha precipitación “ $P(X \geq x)$ ” por el factor de corrección “fc”, obteniendo así el valor corregido “ $P_c(X \geq x)$ ”.

$$P_c(X \geq x) = fc * P(X \geq x)$$

- Luego, el periodo de retorno corregido “ T_c ” será:

$$T_c = \frac{1}{P_c(X \geq x)} = \frac{1}{fc * P(X \geq x)} = \frac{T}{fc}$$

- Se asume que los periodos de retorno de diseño ($T= 2, 5, 10, 100, \dots$ etc) ya están corregidos y que son los verdaderos valores de periodo de retorno “ T_c ”. Entonces se debe encontrar el periodo de retorno sin corregir “ T ”, tal que al ser corregido por “fc”, entregue los valores de diseño “ T_c ”. Esto se logra multiplicando “ T_c ” por “fc”:

$$T = T_c * fc$$

- Con los valores resultante de T, se calcula el valor de la precipitación mediante el Factor de Frecuencia correspondiente.

Con el objeto de no recargar el presente informe, solo se presentará un resumen con los valores de precipitación para distintos períodos de retorno, con las distintas distribuciones ajustadas y el detalle de la distribución de mejor ajuste, definida con el test de bondad de ajuste Chi cuadrado. Sin embargo, en Anexo 4-2-1 se pueden consultar el detalle de todas las distribuciones analizadas.

a) Estación Linzor (No presenta datos nulos)

El Cuadro 4-23 presenta los resultados para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias, obtenidas para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

**CUADRO 4-23. PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T(AÑOS)
ESTACIÓN LINZOR**

T (años)	Pexc. (%)	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson*	Gumbel	weibull
2	50	25.2	22.0	23.2	20.7	23.2	23.6
5	20	35.9	31.0	34.8	30.1	35.7	36.0
10	10	41.5	37.1	42.2	38.0	44.0	43.3
25	4	47.5	45.0	51.0	50.2	54.5	51.6
50	2	51.3	50.9	57.3	61.2	62.2	57.1
100	1	54.8	56.8	63.4	74.1	69.9	62.3
200	0.5	58.0	62.9	69.4	89.3	77.6	67.1
500	0.2	61.8	71.2	77.0	113.4	87.8	73.1
1000	0.1	64.5	77.6	82.7	135.5	95.4	77.4

*Test rechazado

Fuente: Elaboración propia

En este caso los resultados de los tests Chi Cuadrado de las distintas distribuciones, se presentan en el Cuadro 4-24. De acuerdo con estos resultados, se elige la distribución de mejor ajuste a la distribución Gumbel.

CUADRO 4-24. RESULTADO DE LOS TESTS CHI-CUADRADO - ESTACIÓN LINZOR

Función	s	v = k-s-1	χ^2	X_{LIM}^2	$X_{LIM}^2 - \chi^2$	Observación
Normal	2	7	11.23	14.07	2.84	Cumple
Log-Normal	2	7	9.38	14.07	4.68	Cumple
Pearson	3	6	2.25	12.59	10.34	Cumple
Log-Pearson	3	6	24.22	12.59	-11.63	No Cumple
Gumbel	2	7	2.13	14.07	11.93	Cumple USAR
Weibull	3	6	2.78	12.59	9.81	Cumple

Fuente: Elaboración propia

- Estación Linzor: Distribución Gumbel:

Los principales parámetros de esta distribución y su ajuste gráfico se presentan a continuación.

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x - \eta)}}$$

con: $\alpha = 0,0906$; $\eta = 19,19$

El ajuste gráfico de esta distribución se presenta en la Figura 4-37.

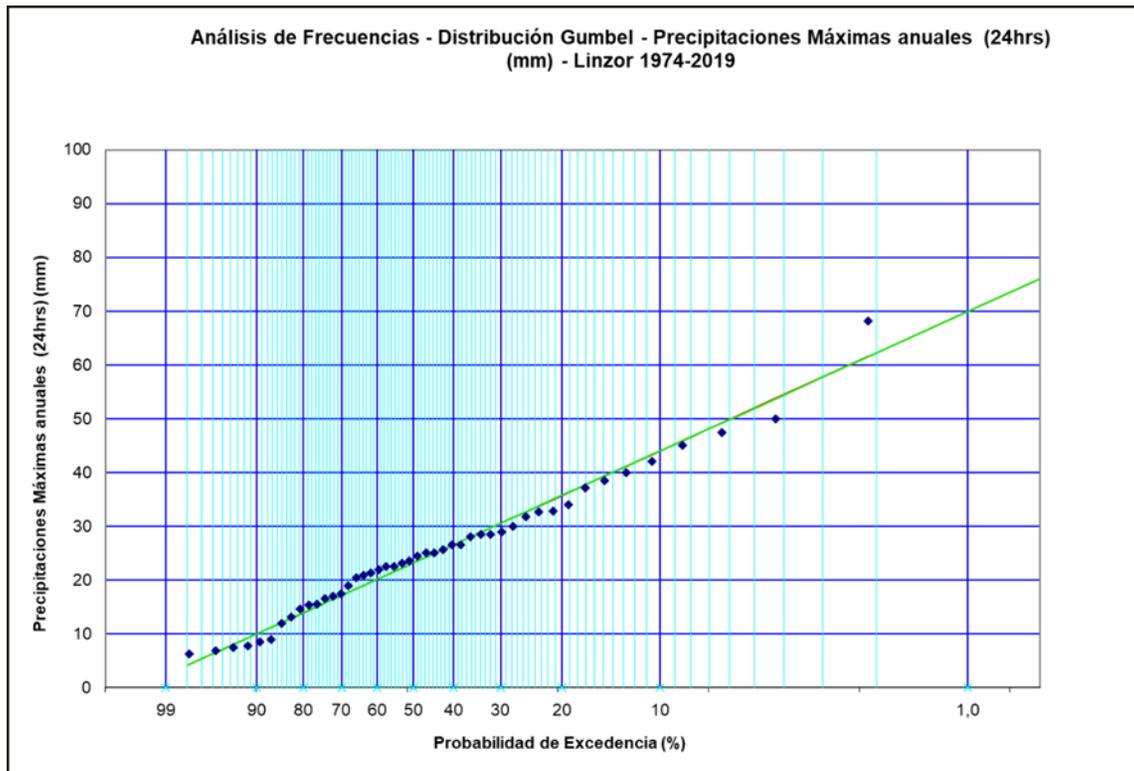


FIGURA 4-37: AJUSTE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL – ESTACIÓN LINZOR.

Fuente: Elaboración propia

b) Estación El Tatio DGA (Presenta datos nulos)

Esta estación presenta un dato nulo, el año 2016, y 45 datos no nulos. Por ello, la probabilidad de ocurrencia de un dato nulo es:

$$P(0) = \frac{1}{46} = 0,0217$$

y la probabilidad de ocurrencia de datos con lluvia es:

$$P(LL) = 1 - P(0) = 0,9783$$

A continuación, se procede al análisis de frecuencia de los valores no nulos. El Cuadro 4-25 presenta los resultados para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias no nulas, obtenidas para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

**CUADRO 4-25: PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T(AÑOS)
ESTACIÓN EL TATIO DGA – SIN DATOS NULOS**

T (años)	Pexc. (%)	Normal*	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson*	Gumbel	weibull
2	50	24.3	21.1	21.9	19.8	22.2	21.9
5	20	35.5	30.8	34.1	29.8	35.3	34.7
10	10	41.3	37.5	42.0	38.4	44.0	42.7
25	4	47.6	46.3	51.8	52.0	55.0	52.1
50	2	51.6	53.1	58.8	64.4	63.1	58.7
100	1	55.2	60.0	65.6	79.1	71.2	64.9
200	0.5	58.5	67.2	72.4	96.6	79.2	70.7
500	0.2	62.5	76.9	81.1	124.8	89.8	78.1
1000	0.1	65.4	84.7	87.7	150.8	97.8	83.4

Fuente: Elaboración propia

En este caso los resultados de los tests Chi Cuadrado de las distintas distribuciones, se presentan en el Cuadro 4-26. De acuerdo con estos resultados, se elige la distribución de mejor ajuste a la distribución Gumbel.

CUADRO 4-26: RESULTADO DE LOS TESTS CHI-CUADRADO - ESTACIÓN EL TATIO (DGA)

Función	s	v = k-s-1	χ^2	X_{LIM}^2	$X_{LIM}^2 - \chi^2$	Observación
Normal	2	7	17.22	14.07	-3.15	No Cumple
Log-Normal	2	7	7.84	14.07	6.22	Cumple
Pearson	3	6	4.15	12.59	8.44	Cumple
Log-Pearson	3	6	25.62	12.59	-13.03	No Cumple
Gumbel	2	7	4.27	14.07	9.79	Cumple USAR
Weibull	3	6	4.59	12.59	8.00	Cumple

Fuente: Elaboración propia

- Estación El Tatio DGA: Distribución Gumbel

Los principales parámetros de esta distribución y su ajuste gráfico se presentan a continuación.

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x - \eta)}}$$

con: $\alpha = 0,0865; \eta = 17,98$

El ajuste gráfico de esta distribución se presenta en la FIGURA 4-38.

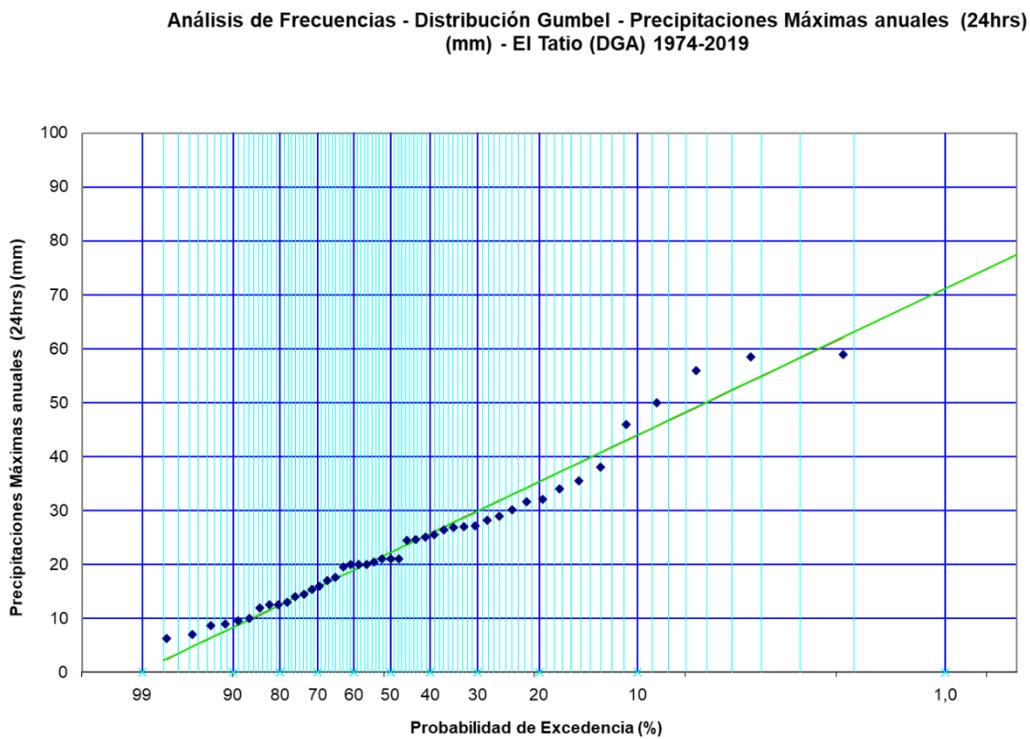


FIGURA 4-38: AJUSTE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL – ESTACIÓN EL TATIO DGA.

Fuente: Elaboración propia

- Corrección por datos nulos

En este caso el factor de corrección del periodo de retorno es 0,9783. Posteriormente se utiliza el Factor de frecuencia. Para el cálculo del Factor de Frecuencia para la distribución de Gumbel, se utilizará la siguiente expresión:

$$KT = (-Ln(\ln(\frac{T}{T-1}))) \frac{1}{\sigma n} - \frac{Yn}{\sigma n}$$

Donde:

KT = Factor de Frecuencia
 T = Período de Retorno (Años)
 σn = Desviación estándar de la variable reducida
 Yn = Valor esperado de la variable reducida

Conocido el Factor de Frecuencia KT, se calcula el valor de la nueva precipitación como:

$$XT = Xm + KT * Sx$$

Donde:

Xm = Valor esperado de la variable
 KT = Factor de Frecuencia
 Sx = Desviación estándar de la variable

El Cuadro 4-27 presenta los resultados finales para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias.

**CUADRO 4-27: PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTOS T(AÑOS)
 ESTACIÓN EL TATIO DGA**

T (Años)	T Corregido (Años)	KT Gumbel	Pp Gumbel (mm)
2	1.96	-0.183	21.8
5	4.89	0.809	35.0
10	9.78	1.463	43.7
25	24.46	2.288	54.7
50	48.91	2.900	62.8
100	97.83	3.507	70.9
200	195.65	4.112	78.9
500	489.13	4.910	89.5
1000	978.26	5.513	97.6

c) Estación Caspana DGA (No presenta datos nulos)

El Cuadro 4-28 presenta los resultados para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias, obtenidas para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

CUADRO 4-28: PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T ESTACIÓN CASPANA DGA

T (años)	Pexc. (%)	Normal*	Log-Normal*	Pearson	Log-Pearson*	Gumbel	weibull
2	50	25.6	19.1	22.2	17.2	22.7	21.8
5	20	41.6	32.2	39.6	30.5	41.3	39.4
10	10	49.9	42.4	50.9	43.8	53.7	50.7
25	4	58.8	56.8	64.8	68.0	69.3	64.1
50	2	64.6	68.5	74.8	93.2	80.9	73.5
100	1	69.7	81.2	84.5	126.4	92.4	82.5
200	0.5	74.5	94.9	94.1	170.3	103.8	91.0
500	0.2	80.2	114.5	106.5	250.3	118.9	101.8
1000	0.1	84.2	130.7	115.8	333.5	130.3	109.6

*Test rechazado

Fuente: Elaboración propia

En este caso los resultados de los tests Chi Cuadrado de las distintas distribuciones, se presentan en el Cuadro 4-29. De acuerdo con estos resultados, se elige la distribución de mejor ajuste a la distribución Gumbel.

CUADRO 4-29: RESULTADO DE LOS TESTS CHI-CUADRADO - ESTACIÓN CASPANA (DGA)

Función	s	v = k-s-1	χ^2	X_{LIM}^2	$X_{LIM}^2 - \chi^2$	Observación
Normal	2	7	15.68	14.07	-1.61	No Cumple
Log-Normal	2	7	15.15	14.07	-1.08	No Cumple
Pearson	3	6	7.79	12.59	4.80	Cumple
Log-Pearson	3	6	16.45	12.59	-3.86	No Cumple
Gumbel	2	7	8.58	14.07	5.49	Cumple USAR
Weibull	3	6	7.20	12.59	5.39	Cumple

Nota: Se elige Gumbel debido al excelente ajuste de los ultimo puntos de la serie.

Fuente: Elaboración propia

- Estación Caspana DGA: Distribución Gumbel

Los principales parámetros de esta distribución y su ajuste gráfico se presentan a continuación.

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x - \eta)}}$$

con:

$$\alpha = 0,04495; \eta = 16,65$$

El ajuste gráfico de esta distribución se presenta en la FIGURA 4-39.

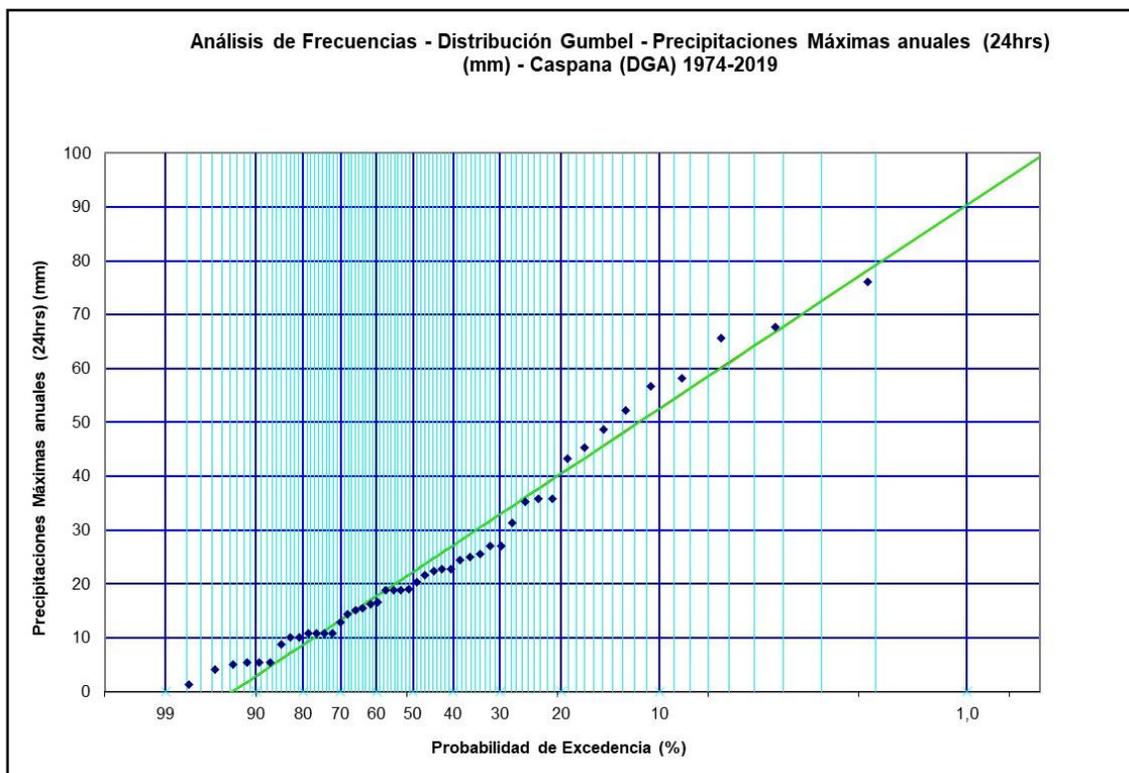


FIGURA 4-39: AJUSTE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL – ESTACIÓN CASPANA DGA.

Fuente: Elaboración propia

- c) Estación Río Grande (No presenta datos nulos)

El Cuadro 4-30 presenta los resultados para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias, obtenidas para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

**CUADRO 4-30: PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T(AÑOS)
ESTACIÓN RÍO GRANDE**

T (años)	Pexc. (%)	Normal*	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson*	Gumbel	weibull
2	50	31.6	24.6	27.0	22.6	28.1	26.5
5	20	50.6	40.4	47.7	38.7	50.3	48.0
10	10	60.5	52.4	61.6	54.1	65.0	62.3
25	4	71.1	69.2	79.0	80.8	83.5	79.9
50	2	77.9	82.7	91.7	107.4	97.3	92.4
100	1	84.0	97.1	104.2	141.1	110.9	104.4
200	0.5	89.7	112.5	116.6	184.0	124.5	116.0
500	0.2	96.5	134.5	132.8	258.8	142.5	130.9
1000	0.1	101.3	152.4	145.0	333.3	156.0	141.8

*Test rechazado

Fuente: Elaboración propia

En este caso los resultados de los tests Chi Cuadrado de las distintas distribuciones, se presentan en el Cuadro 4-31. De acuerdo con estos resultados, se elige la distribución de mejor ajuste a la distribución Gumbel.

CUADRO 4-31: RESULTADO DE LOS TESTS CHI-CUADRADO - ESTACIÓN RÍO GRANDE

Función	s	v = k-s-1	χ^2	X_{LIM}^2	$X_{LIM}^2 - \chi^2$	Observación
Normal	2	7	26.02	14.07	-11.95	No Cumple
Log-Normal	2	7	13.13	14.07	0.94	Cumple
Pearson	3	6	6.87	12.59	5.72	Cumple
Log-Pearson	3	6	24.19	12.59	-11.60	No Cumple
Gumbel	2	7	7.03	14.07	7.04	Cumple USAR
Weibull	3	6	6.50	12.59	6.09	Cumple

Fuente: Elaboración propia

- Río Grande: Distribución Gumbel

Los principales parámetros de esta distribución y su ajuste gráfico se presentan a continuación.

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\eta)}}$$

con: $\alpha = 0,03644$; $\eta = 20,93$

El ajuste gráfico de esta distribución se presenta en la Figura 4-40.

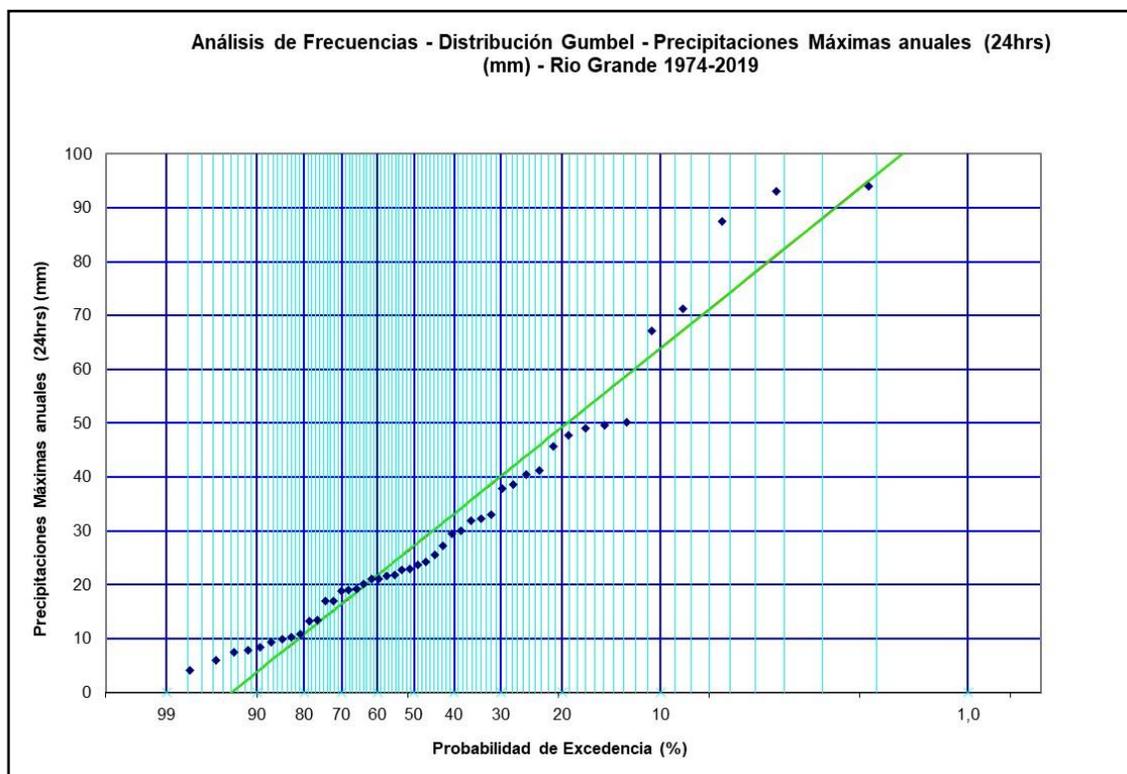


FIGURA 4-40: AJUSTE DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL – ESTACIÓN RÍO GRANDE.

Fuente: Elaboración propia

d) Estación San Pedro DGA (Presenta datos nulos)

Esta estación presenta un dato nulo, el año 1988, y 45 datos no nulos. Por ello, la probabilidad de ocurrencia de un dato nulo es:

$$P(0) = 1/46 = 0,0217$$

y la probabilidad de ocurrencia de datos con lluvia es:

$$P(Ll) = 1 - P(0) = 0,9783$$

A continuación, se procede al análisis de frecuencia de los valores no nulos. El Cuadro 5 30 presenta los resultados para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias no nulas, obtenidas para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

El Cuadro 4-32 presenta los resultados para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias, obtenidas para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

**CUADRO 4-32: PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T
ESTACIÓN SAN PEDRO DGA – SIN DATOS NULOS**

T (años)	Pexc. (%)	Normal*	Log-Normal*	Pearson	Log-Pearson	Gumbel*	weibull*
2	50	11.4	8.7	8.0	7.5	9.9	9.9
5	20	19.9	14.2	16.5	12.7	19.8	17.0
10	10	24.4	18.3	23.7	18.6	26.4	21.4
25	4	29.1	24.1	33.9	30.6	34.7	26.5
50	2	32.2	28.7	42.0	44.6	40.9	29.9
100	1	34.9	33.6	50.5	65.1	47.0	33.2
200	0.5	37.4	38.8	59.3	95.1	53.1	36.3
500	0.2	40.5	46.2	71.3	157.9	61.2	40.2
1000	0.1	42.6	52.2	80.7	232.5	67.2	42.9

*Test rechazado

Fuente: Elaboración propia

En este caso los resultados de los tests Chi Cuadrado de las distintas distribuciones, se presentan en el Cuadro 4-33. De acuerdo con estos resultados, se elige la distribución de Pearson.

CUADRO 4-33: RESULTADO DE LOS TESTS CHI-CUADRADO - ESTACIÓN SAN PEDRO DGA

Función	s	v = k-s-1	χ^2	X_{LIM}^2	$X_{LIM}^2 - \chi^2$	Observación	
Normal	2	7	147.99	14.07	-133.93	No Cumple	
Log-Normal	2	7	29.60	14.07	-15.54	No Cumple	
Pearson	3	6	9.00	12.59	3.59	Cumple	USAR
Log-Pearson	3	6	3.31	12.59	9.28	Cumple	
Gumbel	2	7	17.64	14.07	-3.57	No Cumple	
Weibull	3	6	96.26	12.59	-83.67	No Cumple	

Fuente: Elaboración propia

- Estación San Pedro DGA: Distribución Pearson

Los principales parámetros de esta distribución y su ajuste gráfico se presentan a continuación.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)}$$

con:

$$\alpha = 0,0770; \beta = 0,6037; \gamma = 3,6052$$

El ajuste gráfico de esta distribución se presenta en la Figura 4-41.

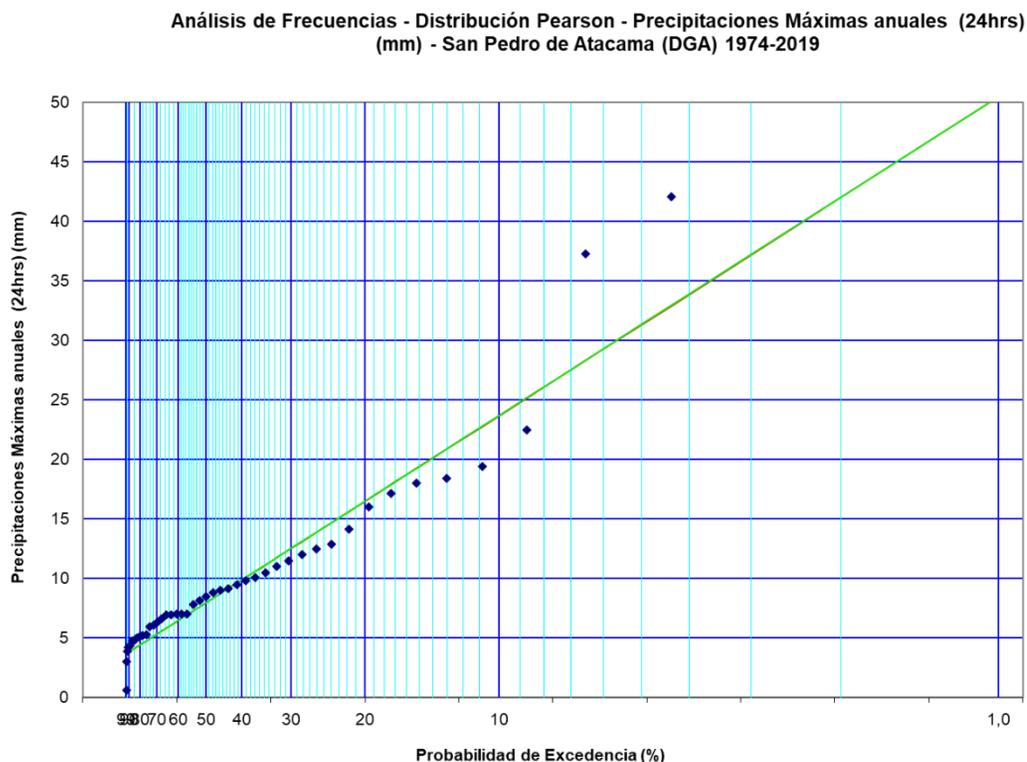


FIGURA 4-41: AJUSTE DISTRIBUCIÓN DE PEARSON – ESTACIÓN SAN PEDRO DGA.

Fuente: Elaboración propia

- Corrección por datos nulos

En este caso el factor de corrección del periodo de retorno es 0,9783. Posteriormente se utiliza el Factor de frecuencia. Para el cálculo del Factor de Frecuencia para la distribución de Pearson, se utilizará la siguiente expresión aproximada de Kite (1977).

$$KT = z + (z^2 - 1) k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z) k^2 - (z^2 - 1) k^3 + z k^4 + \frac{1}{3} k^5$$

Donde:

- KT = Factor de Frecuencia
- z = KT de la distribución Normal
- k = Coeficiente de asimetría/6 : Cs/6

Conocido el Factor de Frecuencia KT, se calcula el valor de la nueva precipitación como:

$$XT = Xm + KT * Sx$$

Donde:

- X_m = Valor esperado de la variable
 K_T = Factor de Frecuencia
 S_x = Desviación estándar de la variable

El Cuadro 4-34 presenta los resultados finales para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias.

**CUADRO 4-34: PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T(AÑOS)
ESTACIÓN SAN PEDRO DGA**

T (Años)	T Corregido (Años)	1/T	w	z	KT Log-P	PP Log-P (mm)
2	2	0.5	1.2	0	-0.4	7.8
5	4.9	0.2	1.8	0.8	0.5	16.3
10	9.8	0.1	2.1	1.3	1.2	23.4
25	24.5	0	2.5	1.7	2.2	33.6
50	48.9	0	2.8	2	3	41.8
100	97.8	0	3	2.3	3.8	50.2
200	195.7	0	3.2	2.6	4.7	59
500	489.1	0	3.5	2.9	5.9	71
1000	978.3	0	3.7	3.1	6.8	80.4

Fuente: Elaboración propia

e) Estación Toconao Experimental (Presenta datos nulos)

Esta estación presenta tres datos nulos, el año 1988, 2006 y 2008, y 43 datos no nulos. Por ello, la probabilidad de ocurrencia de un dato nulo es:

$$P(0) = 3/46 = 0,06521$$

y la probabilidad de ocurrencia de datos con lluvia es:

$$P(Ll) = 1 - P(0) = 0,9348$$

A continuación, se procede al análisis de frecuencia de los valores no nulos. El Cuadro 4-35 presenta los resultados para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias, obtenidas para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

**CUADRO 4-35: PP. MÁX. ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T
ESTACIÓN TOCONAO EXPERIMENTAL – SIN DATOS NULOS**

T (años)	Pexc. (%)	Normal*	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel	weibull
2	50	7.4	5.9	6.3	5.8	6.6	6.2
5	20	11.7	10.0	11.0	10.0	11.6	11.3
10	10	13.9	13.2	14.2	13.4	15.0	14.7
25	4	16.3	17.8	18.2	18.5	19.2	19.0
50	2	17.8	21.6	21.1	22.9	22.3	22.0
100	1	19.2	25.6	24.0	27.8	25.4	25.0
200	0.5	20.5	30.0	26.9	33.4	28.5	27.9
500	0.2	22.0	36.3	30.7	41.7	32.6	31.6
1000	0.1	23.1	41.5	33.6	48.9	35.6	34.3

*Test rechazado

Fuente: Elaboración propia

En este caso los resultados de los tests Chi Cuadrado de las distintas distribuciones, se presentan en el Cuadro 4-36. De acuerdo con estos resultados, se elige la distribución de mejor ajuste a la distribución Log Normal.

CUADRO 4-36: RESULTADO DE LOS TESTS CHI-CUADRADO - ESTACIÓN TOCONAO EXP.

Función	s	v = k-s-1	χ^2	X_{LIM}^2	$X_{LIM}^2 - \chi^2$	Observación
Normal	2	7	27.62	14.07	-13.55	No Cumple
Log-Normal	2	7	6.47	14.07	7.60	Cumple USAR
Pearson	3	6	6.49	12.59	6.11	Cumple
Log-Pearson	3	6	10.93	12.59	1.66	Cumple
Gumbel	2	7	7.05	14.07	7.01	Cumple
Weibull	3	6	6.29	12.59	6.30	Cumple

Fuente: Elaboración propia

- Estación Toconao Experimental: Distribución Log Normal

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2}$$

Los principales parámetros de esta distribución y su ajuste gráfico se presentan a continuación.

con: $\mu_y = 1,77$; $\sigma_y = 0,63$

El ajuste gráfico de esta distribución se presenta en la Figura 4-42.

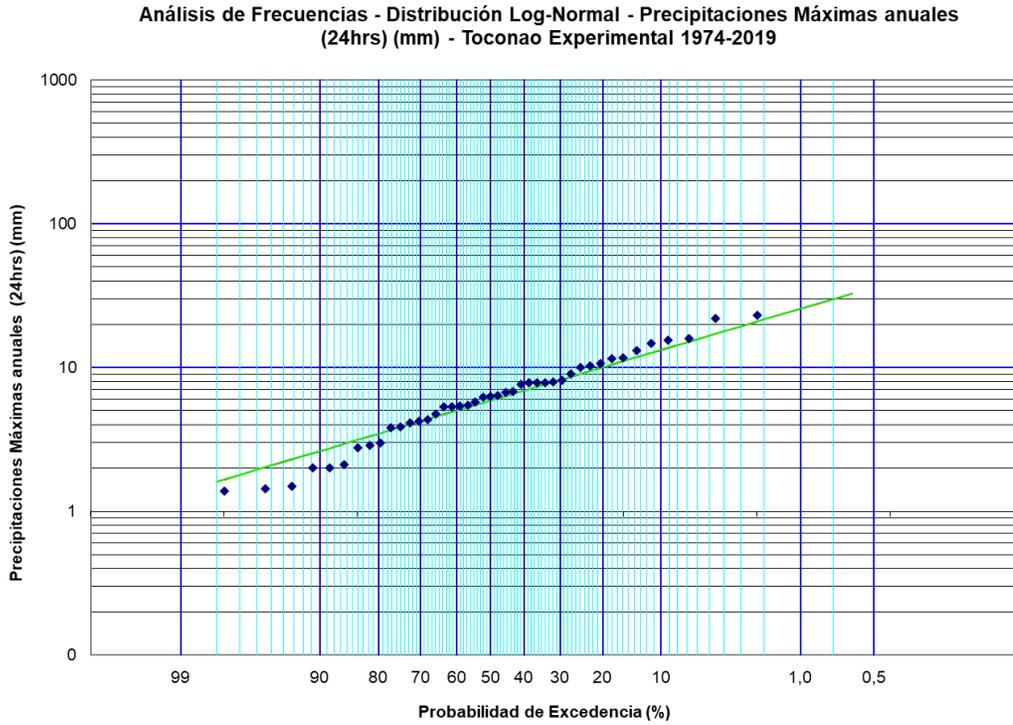


FIGURA 4-42: AJUSTE DISTRIBUCIÓN LOG NORMAL – ESTACIÓN TOCONAO EXPERIMENTAL

Fuente: Elaboración propia

- Corrección por datos nulos

En este caso el factor de corrección del periodo de retorno es 0,9348. Posteriormente se utiliza el Factor de frecuencia. Para el cálculo del Factor de Frecuencia para la distribución Log Normal, se utilizará la siguiente expresión presentada en Chow (1994):

$$KT = w - \frac{2.515517 + 0.802853 * w + 0.010328 * w^2}{1 + 1.432788 * w + 0.189269 * w^2 + 0.001308 * w^3}$$

Donde:

KT = Factor de Frecuencia

$$w = \left(\ln \left(\frac{1}{P(X \geq x)^2} \right) \right)^{0.5} \quad (0 < p \leq 0.5)$$

$P(X \geq x)$ es la probabilidad de excedencia ($P(X \geq x) = 1/T$). En el caso de " $P(X \geq x)$ " sea mayor a 0.5, entonces el valor de " $P(X \geq x)$ " debe ser sustituido por " $1 - P(X \geq x)$ ", y la ecuación para KT debe ser multiplicada por -1.

Conocido el Factor de Frecuencia KT , se calcula el valor de la nueva precipitación como:

$$X_T = X_m + KT * S_x$$

Donde:

- X_m = Valor esperado de la variable
- KT = Factor de Frecuencia
- S_x = Desviación estándar de la variable

El Cuadro 4-37 presenta los resultados finales para esta estación, de las precipitaciones máximas anuales diarias.

**CUADRO 4-37: PP. MÁXIMAS ANUALES DIARIAS PARA DISTINTO T(AÑOS)
ESTACIÓN TOCONAO EXPERIMENTAL**

Tc (Años)	Tc*fc = T (Años)	1/T	w	z	Pp Log-Normal (mm)
2	1.9	0.5	1.2	-0.1	5.6
5	4.7	0.2	1.8	0.8	9.7
10	9.3	0.1	2.1	1.2	12.9
25	23.4	0	2.5	1.7	17.5
50	46.7	0	2.8	2	21.2
100	93.5	0	3	2.3	25.2
200	187	0	3.2	2.6	29.6
500	467.4	0	3.5	2.9	35.8
1000	934.8	0	3.7	3.1	41

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.4. Análisis de frecuencia

Adoptando las distintas funciones de distribución para las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama de las estaciones analizadas, corregidas por datos nulos, se calculan los valores de precipitación máxima en 24 horas para diversos períodos de retorno, lo cual se muestra en el Cuadro 4-38.

**CUADRO 4-38: RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA
PERÍODOS DE RETORNO DE PMÁX. EN 24 HORAS**

T (Años)	P(X≥x) %	Linzor	El Tatio (DGA)	Caspana (DGA)	Rio Grande	San Pedro (DGA)	Toconao Exp.
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
		Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Pearson	Log Normal
2	50	23.2	21.8	22.7	28.1	7.8	5.6
5	20	35.7	35.0	41.3	50.3	16.3	9.7
10	10	44.0	43.7	53.7	65.0	23.4	12.9
25	4	54.5	54.7	69.3	83.5	33.6	17.5
50	2	62.2	62.8	80.9	97.3	41.8	21.2
100	1	69.9	70.9	92.4	110.9	50.2	25.2

Fuente: Elaboración propia

No se amplificó la precipitación máxima diaria para obtener la precipitación máxima en 24 horas, debido a que no se conoce dicho coeficiente, es decir en este caso $C = 1$.

En general, el análisis efectuado para series con valores nulos no afectó sustancialmente los resultados obtenidos.

4.2.2.5. Curvas Isoyetas

Con el objeto de analizar la distribución espacial de las precipitaciones se determinaron curvas isoyetas de Precipitaciones Máximas en 24 horas para las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama.

Para este trabajo se utilizaron las Precipitaciones Máximas en 24 horas con periodo de retorno $T=10$ años, obtenidas de las estaciones en estudio. El Cuadro 4-39 presenta los valores indicados anteriormente.

CUADRO 4-39: PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORA Y $T=10$ AÑOS

Estación	P_{24}^{10} [mm]
Linzor	44.0
El Tatio (DGA)	43.7
Caspana (DGA)	53.7
Rio Grande	65.0
San Pedro de Atacama	23.4
Toconao Experimental	12.9

Fuente: Elaboración propia

Con esta información, y utilizando las coordenadas de las estaciones, se obtienen las Isoyetas de Precipitaciones Máximas en 24 horas y 10 años de período de retorno (P_{24}^{10}) para las cuencas de estudio. Como se muestra a continuación.

La Figura 4-43 muestra los resultados del proceso realizado figura que se encuentra con mayor detalle en Anexo.

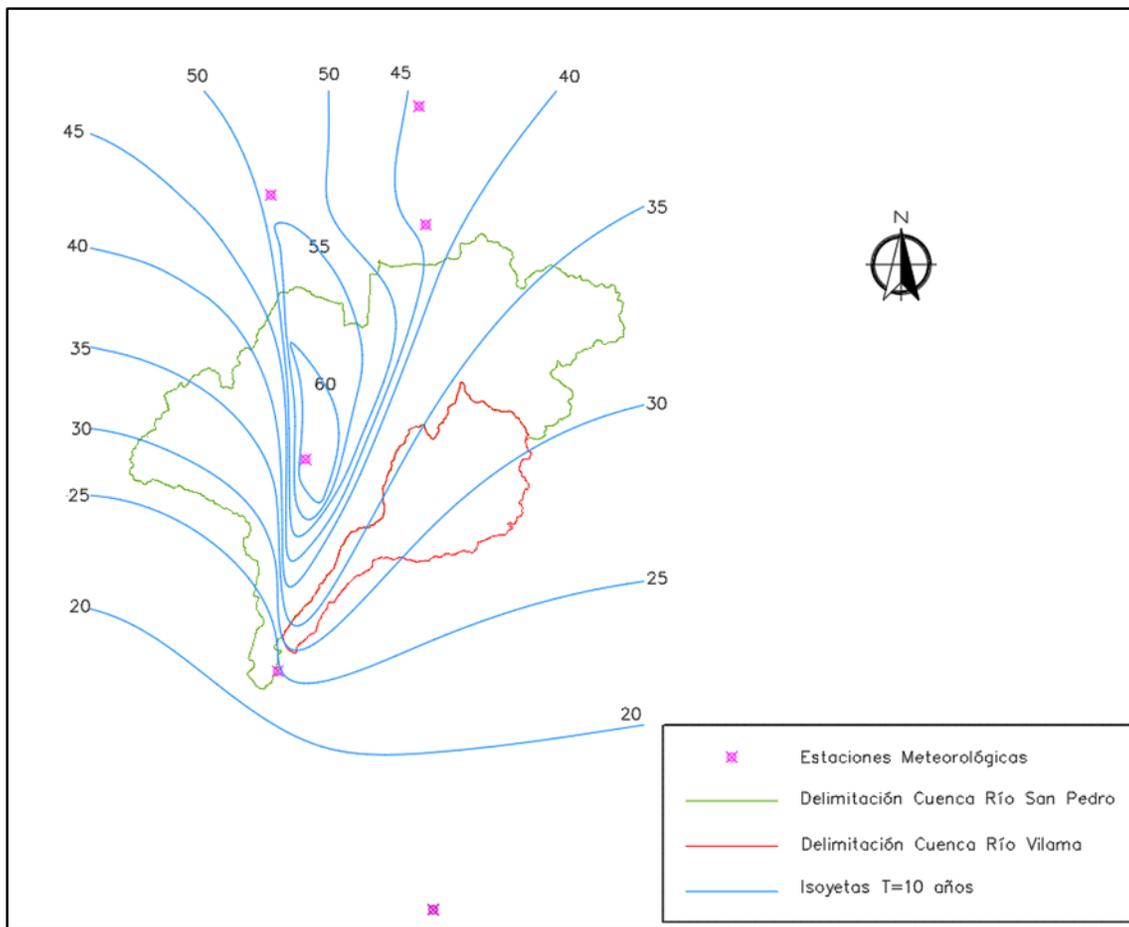


FIGURA 4-43: CURVAS ISOYETAS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS.

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.6. Precipitación Media Máxima sobre las cuencas

A partir de la Isoyetas de Precipitación Máxima en 24 hora y 10 años de período de retorno, se determinaron las Precipitaciones Medias Máximas sobre la cuenca, obteniéndose los siguientes resultados.

Cuenca Río San Pedro: $P_{\max_{24}^{10}} = 40,26 \text{ mm}$

Cuenca Río Vilama: $P_{\max_{24}^{10}} = 31.67 \text{ mm}$

4.2.2.7. Coeficientes de Duración y Frecuencia.

Para estimar precipitaciones con distintas duraciones y frecuencias, a partir de la información de precipitaciones máximas diarias para distintos períodos de retorno, se definieron Coeficientes de Duración y Frecuencia para la zona.

Para este propósito se calcularon los Coeficientes de Duración y Frecuencia a partir de la estación Río Grande. Se consideró esta estación por estar ubicada en el centro de la cuenca de estudio (como se aprecia en la Figura 4-31), y poseer el registro más completo. El proceso seguido fue el siguiente:

- A partir de las precipitaciones máxima diarias de la estación Río Grande, se obtuvieron las precipitaciones máximas en 48 y 72 horas. Para ello, se sumó la precipitación diaria del día con la siguiente o con las dos siguientes según fuese el caso (máx. 48 o 72 horas), para conformar un valor máximo en 48 o 72 horas. El Cuadro 5-41, presenta los valores obtenidos con este proceso.
- El relleno y extensión de estos máximos en 48 y 72 horas se realizó en base a RLS con los máximos en 24 horas, pues estos ya estaban rellenos/extendidos y la correlación es muy buena (sobre 0,77 en todos los casos, la RLS se encuentran también en el mismo Anexo 4-2-1 ya mencionado).
- Se efectuó un proceso de frecuencia de precipitaciones máximas en 24, 48 y 72 horas de la estación Río Grande, de cuyos resultados se obtuvieron los coeficientes de duración dividiendo las P_{\max} en 48 y 72 horas con $T=10$ años, por la P_{\max} en 24 horas con $T=10$ años, obteniendo los valores que se muestran en el Cuadro 4-40.

CUADRO 4-40: RÍO GRANDE – COEFICIENTES DE DURACIÓN

Duración	24 horas	48 horas	72 horas
CD	1.000	1.244	1.598

Fuente: Elaboración propia

- Del mismo modo, se calcularon coeficientes de frecuencia dividiendo las $P_{máx}$ en 24 horas para los diferentes periodos de retorno, por la $P_{máx}$ en 24 horas para $T=10$ años, obteniendo los siguientes resultados (Cuadro 4-41):

CUADRO 4-41: RÍO GRANDE – COEFICIENTES DE FRECUENCIA

T (Años)	CF
2	0.433
5	0.774
10	1.000
25	1.286
50	1.497
100	1.708
200	1.917
500	2.194
1000	2.403

Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 4-42 se presentan las series completas.

CUADRO 4-42: RÍO GRANDE – PRECIPITACIONES MÁXIMA EN 24, 48 Y 72 HORAS

Año	Linzor			El tatio (DGA)			Caspana (DGA)			Río Grande			San Pedro (DGA)			Toconao Experimental		
	24 hr (mm)	48 hr (mm)	72 hr (mm)	24 hr (mm)	48 hr (mm)	72 hr (mm)	24 hr (mm)	48 hr (mm)	72 hr (mm)	24 hr (mm)	48 hr (mm)	72 hr (mm)	24 hr (mm)	48 hr (mm)	72 hr (mm)	24 hr (mm)	48 hr (mm)	72 hr (mm)
1974	26.5	33	37	25	35.6	44.1	35	39	39	39.8	53.5	62.9	3	3	3	7.6	10.6	12.3
1975	29.0	45	58	26	37.9	46.9	25	44	58	31.3	42.7	50.1	9	16	19	14.6	19.8	23.1
1976	42.0	62	73	35	49.9	61.8	43	55	63	46.5	62.0	72.9	17	21	21	7	11	12
1977	50.0	76	93	58	58	58	66	112	154	88	137	180	16	29	45	13	19	23
1978	16.5	24	27	20	32	32	20	30	30	41	49	50	18	18	18	3	4	4
1979	15.4	15	15	13	21	27	11	14	14	32	36	37	9	9	9	4	5	5
1980	19.0	24	39	14	26	29	5	7	11	17	23	27	5	6	6	6	6	6
1981	38.5	39	48	17	22	31	49	64	79	71	91	91	12	12	13	10	18	27
1982	17.5	20	21	12	16	16	5	9	9	8	8	8	3	4	4	1	2	2
1983	14.6	23	27	21	33	49	11	13	17	20	39	39	7	7	7	8	8	8
1984	28.5	51	74	20	37	53	36	58	70	46	81	111	37	37	37	5	10	14
1985	45.0	75	86	32	53	75	13	23	23	33	40	67	10	16	16	6	7	7
1986	25.0	37	38	25	33	37	58	67	82	93	109	113	23	24	26	8	9	16
1987	30.0	51	62	56	73	83	24	35	43	39	48	54	13	15	15	8	9	10
1988	20.9	23	26	21	24	30	10	15	18	8	8	8	0	0	0	0	0	0
1989	28.5	41	48	15	23	31	36	37	49	22	43	46	11	15	15	4	7	8
1990	17.0	33	38	21	31	37	16	16	16	24	38	40	8.8	12.0	13.6	10	14	14
1991	9.0	11	18	20	24	27	1	1	1	6	7	9	4.2	7.4	8.3	2	4	6
1992	12.0	21	26	16	31	31	4	4	4	8	9	9	4.3	7.5	8.4	2	2	2
1993	7.5	10	15	13	20	30	19	38	46	13	16	22	6.6	9.8	11.1	2	3	3
1994	25.0	39	41	13	21	26	27	45	56	19	37	54	7.0	10.1	11.5	6	7	7
1995	32.8	58	71	46	80	88	45	52	58	67	103	105	10.1	13.3	15.1	11	18	20
1996	8.5	16	16	9	11	11	9	11	11	13	19	22	5.2	8.4	9.5	3	3	3
1997	40.0	61	79	27	54	67	27	43	46	29	37	46	14.2	17.3	19.9	22	22	31
1998	34.0	58	65	38	42	42	22	32	32	23	35	35	5.9	9.1	10.3	2	4	4
1999	22.0	31	34	50	50	73	22	25	30	49	51	51	9.2	12.4	14.1	6	10	13
2000	26.5	43	58	34	45	65	68	108	125	30	40	45	12.9	16.0	18.4	12	12	16
2001	28.0	41	54	21	32	46	23	30	31	48	74	95	19.4	22.6	26.0	23	35	40
2002	20.5	34	41	29	47	64	76	92	120	50	71	91	12.0	15.2	17.3	8	12	13
2003	6.3	6	6	10	16	16	6	9	9	9	14	19	5.3	8.5	9.5	4	5	6
2004	47.5	51	60	25	25	25	16	20	24	41	51	63	7.0	10.1	11.5	7	7	7
2005	22.5	28	40	15	19	29	26	35	43	21	21	27	9.0	12.2	13.9	12	12	12
2006	21.4	32	42	6	6	6	5	6	6	4	11	11	9.8	13.0	14.8	0	0	0
2007	31.8	33	36	10	14	19	10	12	12	11	11	11	3.9	7.1	7.9	9	30	30
2008	13.2	19	29	18	23	29	6	10	15	17	25	27	6.3	9.5	10.8	0	0	0
2009	7.8	8	8	7	11	12	11.1	15.5	17.0	10	13	13	5.2	8.3	9.4	4	6	6
2010	6.9	7	7	9	9	9	11.3	15.8	17.4	10	13	20	4.8	8.0	9.0	2.8	4.2	4.9
2011	23.5	42	56	32	51	63	17.2	23.8	27.6	19	37	45	6	8	11	6.4	9.0	10.5
2012	37.1	47	67	30	53	72	66.4	91.3	113.7	94	109	129	7	23	30	16.0	21.6	25.2
2013	24.5	38	54	27	40	44	21.3	29.5	34.9	26	39	40	8	12	16	3.8	5.6	6.5
2014	25.7	40	45	26	48	57	37.6	51.8	63.3	50	50	50	7	12	12	5.3	7.5	8.8
2015	32.6	33	33	28	49	59	22.5	31.0	36.8	27	35	39	11	12	12	7.9	10.9	12.8
2016	22.6	23	23	0	0	0	19.6	27.2	31.9	23	42	61	1	1	1	1.38	2.4	2.8
2017	23.1	43	51	27	37	51	18.4	25.5	29.8	21	37	52	8	13	21	5.4	7.6	8.9
2018	15.5	27	35	20	26	35	17.1	23.7	27.5	19	26	32	4.8	7.9	8.9	4.8	6.8	8.0
2019	68.1	113	148	59	98	128	52.2	71.9	88.9	38	40	51	42.1	45.3	52.5	15.5	20.9	24.4

Nota: Valores en color corresponde a valores, corregidos, rellenados y extendidos.

4.2.2.8. Curvas Intensidad - Duración – Frecuencia para la zona de San Pedro y Vilama

Con el objeto de establecer el comportamiento de las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama, bajo distintas precipitaciones, y calcular de esta manera los caudales de los hidrogramas de crecidas, bajo el supuesto que las precipitaciones generan una crecida del mismo período de retorno, se definen las tormentas de diseño.

Las tormentas de diseño quedan caracterizadas al fijar su duración, su magnitud y su distribución temporal. Para definir la magnitud y la duración de una tormenta en particular se utiliza las curvas IDF. En este caso se utilizaron las ecuaciones tipo Chow et al (1994) que se indica a continuación:

$$I = \frac{K * T^m}{D^n + b}$$

Donde:

- T = Perido de retorno (años)
- D = Duración de la Lluvia (minutos)
- K,m,n y b = Parámetros

Los valores para los coeficiente de la fórmula anterior, utilizados, fueron los establecidos en la memoria para optar a título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile del Sr. Eduardo Torres Quintana, guiada por la Sra. Ximena Vargas Meza, el año 2016, denominada “Determinación de Curvas IDF en la Región de Antofagasta, Chile”. Los coeficientes indicado se presentan en el Cuadro 4-43.

CUADRO 4-43: RÍO GRANDE – COEFICIENTES PARA CURVA IDF

Estación	Coeficiente	Periodo de Retorno (Años)					
		2	5	10	25	50	100
Río Grande	K	4.119	2.560	1.424	1.204	1.479	10.022
	m	2.396	0.768	0.728	0.616	0.504	0.027
	n	0.940	0.501	0.395	0.362	0.363	0.345
	b	11.888	2.047	1.145	1.011	1.085	0.978
Nota: Color Rojo, interpolación							

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.9. Precipitaciones de 30 de Enero y 01 de Febrero de 2019

Como es sabido, las precipitaciones estivales registradas en la comuna de San Pedro de Atacama, correspondiente al fenómeno meteorológico conocido como “Invierno Altiplánico” provocaron serios trastornos en las proximidades de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama. De acuerdo con información proporcionada por la Dirección Meteorológica de Chile, para la zona cordillerana de la Región de Antofagasta, dichos episodios de tormenta se caracterizaron por nubosidad e intensos chubascos con tormentas eléctricas. La Isotherma 0 °C se estimó ubicada cerca de los 4.900 metros sobre el nivel del mar. Las siguientes Figuras N°5-14 a 5-19, presentan una secuencia de las condiciones sinópticas durante el evento.

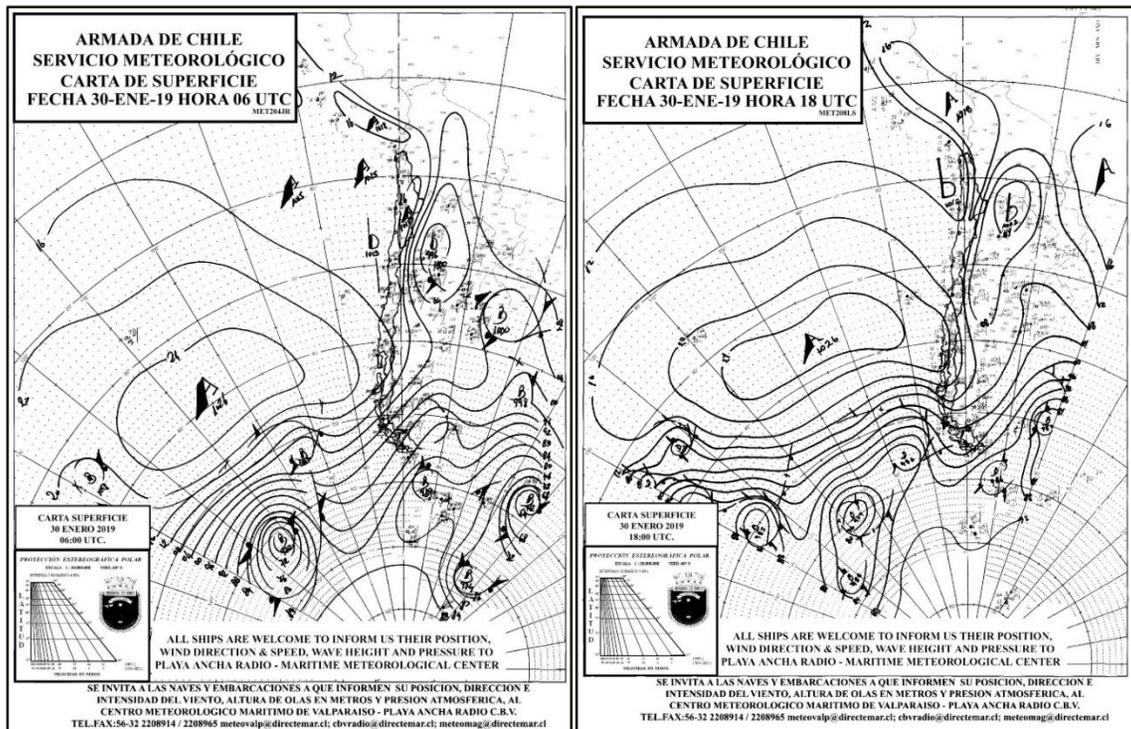


FIGURA 4-44: 30 DE ENERO 2019- 06 HR

FIGURA 4-45: 30 DE ENERO 2019-18 HR

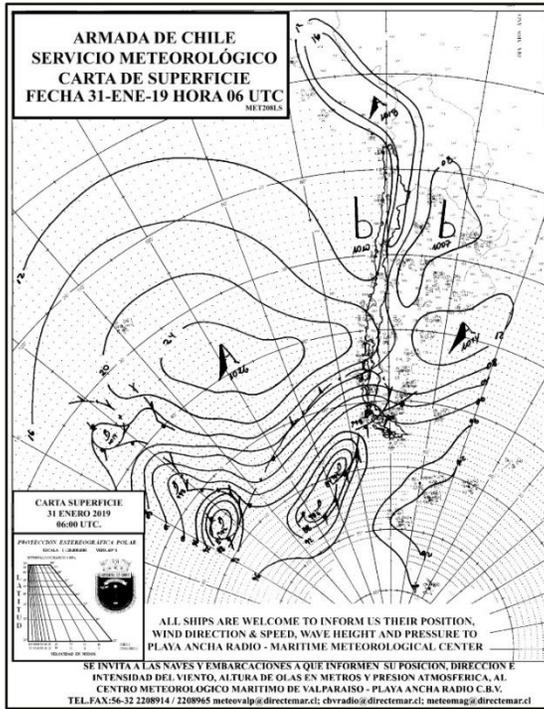


FIGURA 4-46: 31 DE ENERO 2019-06 HR

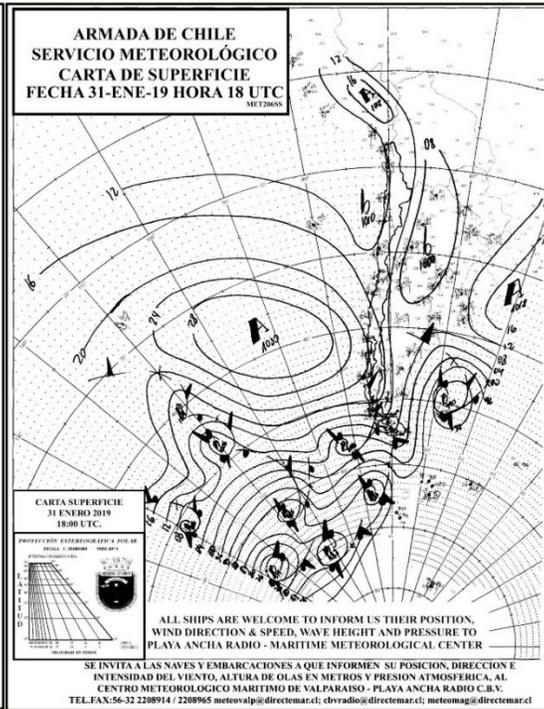


FIGURA 4-47: 31 DE ENERO 2019-18 HR

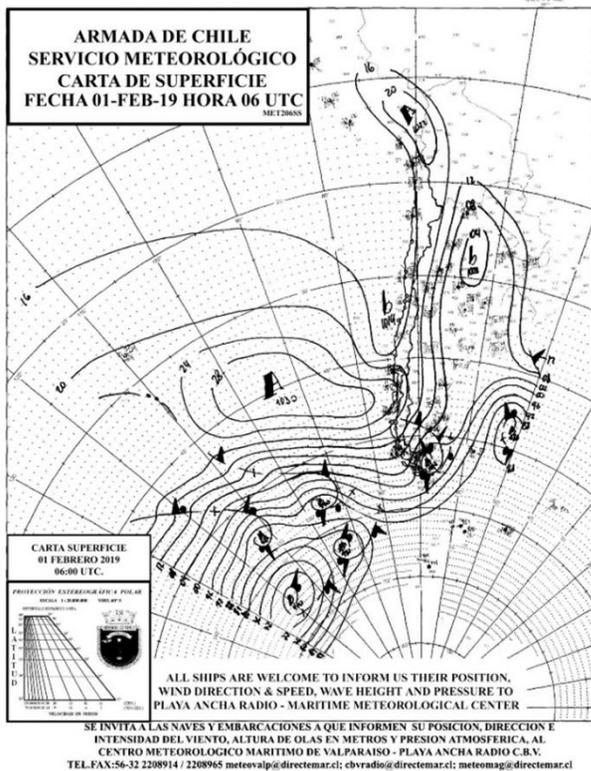


FIGURA 4-48: 01 FEBRERO 2019-06 HR

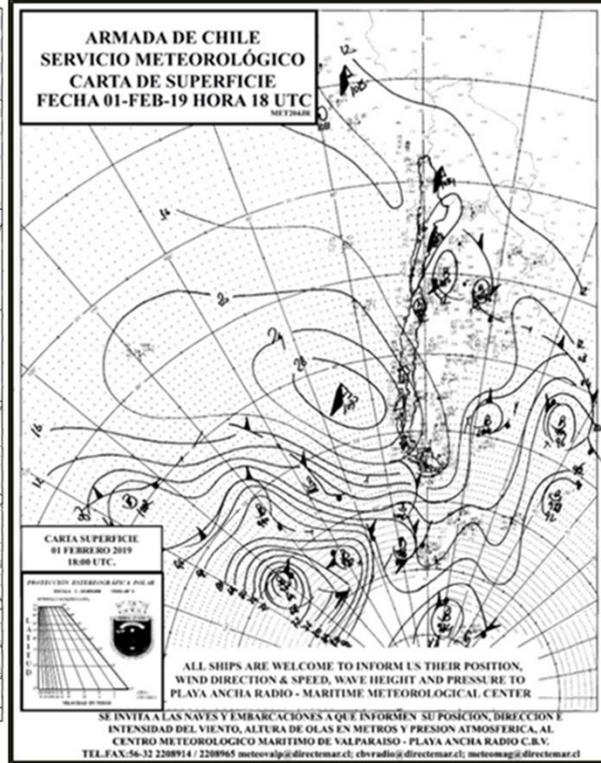


FIGURA 4-49: 01 FEBRERO 2019-18 HR

En las figuras se observa como una potente baja presión ingresa a la zona norte del país, afectando, especialmente a las regiones de Arica-Parinacota y Atacama.

Lo anterior generó un reposicionamiento de la alta (presión) de Bolivia, lo que a su vez provocó en la zona cordillerana de las cuencas de los Ríos San Pedro y Vilama un "arrastre humedad" desde el sector amazónico a la Cordillera de los Andes, en esa zona más alta de la misma, donde genera mucha nubosidad, precipitaciones y tormentas eléctricas. Lo anterior produjo una activación de las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama, produciendo importantes caudales para la zona, con fuerte arrastre de sedimento.

Con el objeto de efectuar un diagnóstico de lo ocurrido durante los eventos de precipitaciones del 31 mes de enero y 01 de febrero de 2019, se efectuó una recopilación de los antecedentes de las precipitaciones registradas en 11 estaciones pluviométricas que se encontraban operando, para los días indicados. El Cuadro 4-44, presenta los datos registrados.

CUADRO 4-44: PRECIPITACIONES DIARIAS DURANTE LOS EVENTOS DEL AÑO 2019

Nombre Estación	PP 31-ene	Coordenadas UTM		NOTA
		Norte (m)	Este (m)	
LINZOR	68	7541388	600714	Relleno
EL TATIO	59	7525730	601585	Relleno
CASPANA	52	7529664	581126	Relleno
CASPANA (INIA)	58	7529891	580923	
RIO GRANDE	14	7494705	585709	Valor muy bajo
SAN PEDRO DE ATACAMA (42	7466710	582019	Extensión
SAN PEDRO DE ATACAMA (42	7463716	580602	
TOCONAO PUEBLO	31	7435956	601953	
TOCONAO (DMC)	40	7435478	601716	
TOCONAO (INIA)	25	7434988	601543	
TOCONAO EXPERIMENTAL	15	7435152	602573	Corregido según C.D.A

Fuente: Elaboración propia

Con la información anterior se pudo construir un mapa de precipitaciones de la tormenta (mapa de isoyetas). La Figura 4-50 presenta el resultado obtenido.

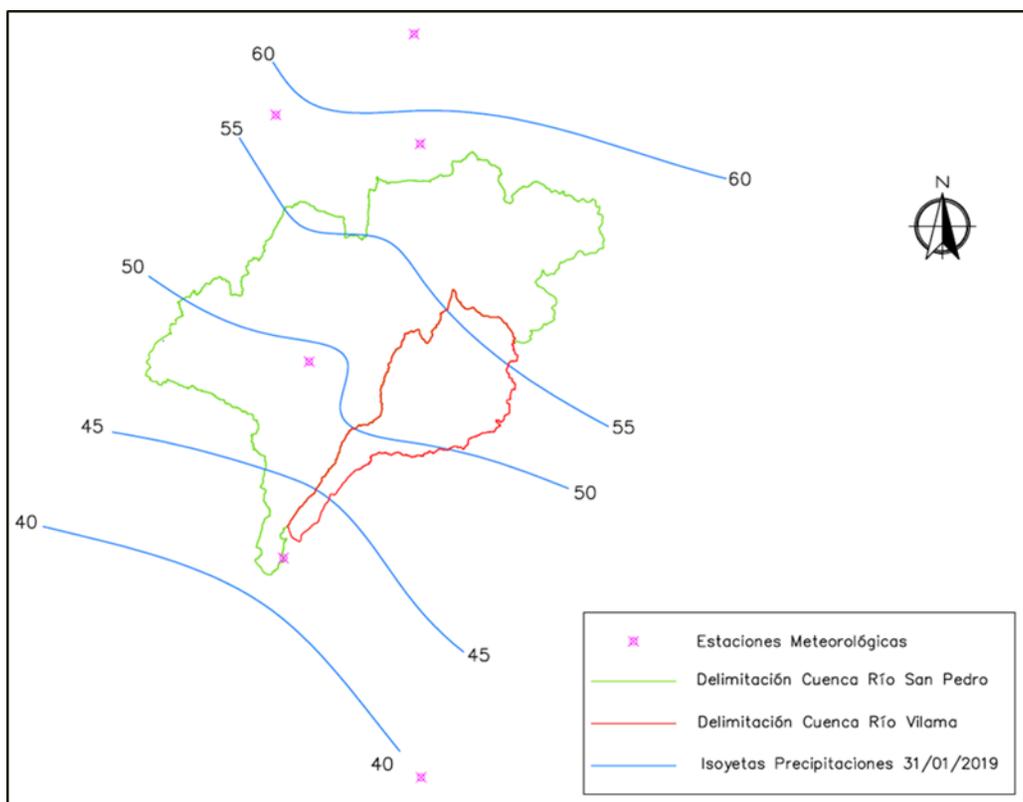


FIGURA 4-50: CURVAS ISOYETAS TORMENTA DEL 30 DE ENERO - 01 DE FEBRERO DE 2019.

Fuente: Elaboración propia

A partir del mapa de precipitaciones de la Tormenta del 2019, se calcularon las precipitaciones medias sobre la cuenca para el 31 de enero, cuyos valores se presentan en el Cuadro 4-45.

CUADRO 4-45: PRECIPITACIONES MEDIAS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA - EVENTOS AÑO 2019

Cuenca	PM (mm)
San Pedro	52.52
Vilama	51.81

Fuente: Elaboración propia

Los valores anteriores entregan los siguientes coeficientes de frecuencia:

$$\text{Cuenca Río San Pedro: CF} = 52,52/42,35 = 1,27$$

$$\text{Cuenca Río Vilama : CF} = 51,81/32,61 = 1,59$$

Utilizando los coeficientes de frecuencia determinados anteriormente, que se presentan en la Figura 4-51, se determinan los períodos de retorno de las precipitaciones observadas durante el evento del año 2017 en las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama.

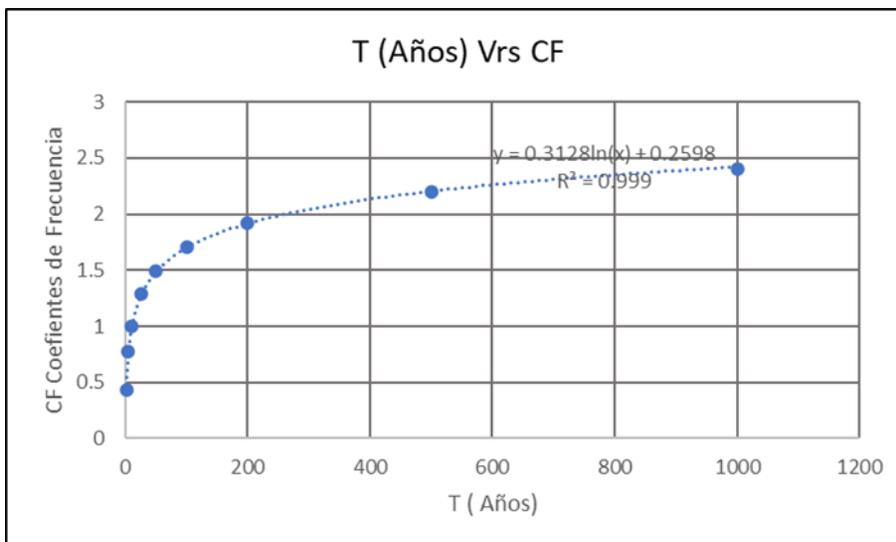


FIGURA 4-51: COEFICIENTES DE FRECUENCIA VS. PERÍODOS DE RETORNO (AÑOS)

Fuente: Elaboración propia

Cuenca Río San Pedro: CF= 1,27 ; Periodo de retorno T=28 años

Cuenca Río Vilama : CF= 1.59 : Período de retorno T=81 años

Se aprecia que la precipitación afectó en forma más importante a la cuenca del Río Vilama.

De las estaciones consultadas, se encontró que la estación Toconao (DMC), posee registro automático lo que permitió extraer información de precipitación cada 1 min, desde el 29 de Enero hasta el 1 de Febrero del 2019. La Figura 4-52 presenta el registro obtenido:



FIGURA 4-52: REGISTRO PLUVIOGRÁFICO DEL EVENTO DEL AÑO 2019.

Fuente: Elaboración propia

La figura anterior muestra que existieron dos pulsos de precipitación importantes, que corresponden a dos tormentas sucesivas, la primera ocurrida el día 29-01-2019, se inicia a las 21:30 horas con una duración aproximada de 7 horas y con una intensidad máxima, a las 22 horas, de 21,6/mm hora y con un volumen total aproximado de 23,0 mm, suficientes para saturar las cuencas.

La segunda tormenta se presenta el día 31-01-2019. Se inicia a las 22:30 horas, con 15 horas de duración presentando un máximo a las 24 horas del mismo día, con una intensidad máxima de 26,3 mm/hora y un volumen total de 52,3 mm.

También es necesario indicar que entre ambas tormentas se produjeron algunos chubascos aislados, especialmente el día 31-01-2019 a las 10:00 horas, con una intensidad baja de 3,8 mm/hora y un volumen de 6,9 mm. Esta precipitación mantuvo saturada la cuenca.

Para analizar el efecto, en términos de caudales, que produjeron las tormentas anteriores se utilizó el modelo SWMM5 desarrollado como parte de la metodología para el cálculo de los caudales de diseño para las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama. El procedimiento detallado del uso de este modelo, se detallará más adelante en los apartados correspondientes al cálculo del caudal de diseño.

Para el uso del modelo SWMM5, se requiere lo siguiente:

- Definición de las características físicas de las cuencas y su red de drenaje. Se detallará más adelante.
- Definición de los hietogramas de la tormenta del 2019. Se utilizó el registro pluviográfico disponible en la estación Toconao (DMC). Para ello, como un primer paso, se reorganizó el registro pluviográfico de modo de establecer un hietograma con bloques de precipitación cada 15 min. El Cuadro 4-46, Figura 4-53 y Figura 4-54, presenta los hietogramas obtenidos, siendo esta la distribución de precipitaciones que se usó para caracterizar el evento.

CUADRO 4-46: HIETOGRAMA TORMENTA AÑO 2019

Día	Horas Acum.	Hietograma San Pedro	Hietograma Vilama	Día	Horas Acum.	Hietograma San Pedro	Hietograma Vilama	Día	Horas Acum.	Hietograma San Pedro	Hietograma Vilama
		(mm/hora)	(mm/hora)			(mm/hora)	(mm/hora)			(mm/hora)	(mm/hora)
29-01-2019	20	0.0	0.0		35	0.0	0.0		50	0.0	0.0
	20.25	0.0	0.0		35.25	0.0	0.0		50.25	0.0	0.0
	20.5	0.0	0.0		35.5	0.0	0.0		50.5	0.0	0.0
	20.75	0.0	0.0		35.75	0.0	0.0		50.75	0.0	0.0
	21	0.0	0.0		36	0.0	0.0		51	0.0	0.0
	21.25	0.0	0.0		36.25	0.0	0.0		51.25	0.5	0.5
	21.5	0.0	0.0		36.5	0.0	0.0		51.5	0.0	0.0
	21.75	2.3	2.3		36.75	0.0	0.0		51.75	0.0	0.0
	22	21.6	21.3		37	0.0	0.0		52	0.5	0.5
	22.25	18.3	18.0		37.25	0.0	0.0		52.25	0.0	0.0
	22.5	10.3	10.2		37.5	0.0	0.0		52.5	0.0	0.0
	22.75	7.5	7.4		37.75	0.0	0.0		52.75	0.5	0.5
	23	5.2	5.1		38	0.0	0.0		53	0.0	0.0
	23.25	2.3	2.3		38.25	0.0	0.0		53.25	0.9	0.9
	23.5	6.6	6.5		38.5	0.0	0.0		53.5	0.5	0.5
	23.75	3.3	3.2		38.75	0.0	0.0		53.75	0.9	0.9
	24	3.8	3.7		39	0.0	0.0		54	0.5	0.5
30-01-2019	24.25	2.3	2.3		39.25	0.0	0.0		54.25	0.5	0.5
	24.5	2.8	2.8		39.5	0.0	0.0		54.5	0.0	0.0
	24.75	1.4	1.4		39.75	0.0	0.0		54.75	0.5	0.5
	25	0.0	0.0		40	0.0	0.0		55	0.0	0.0
	25.25	0.0	0.0		40.25	0.0	0.0		55.25	0.5	0.5
	25.5	0.5	0.5		40.5	0.0	0.0		55.5	1.9	1.9
	25.75	0.5	0.5		40.75	0.0	0.0		55.75	0.9	0.9
	26	0.9	0.9		41	0.0	0.0		56	0.5	0.5
	26.25	0.5	0.5		41.25	0.0	0.0		56.25	0.9	0.9
	26.5	0.5	0.5		41.5	0.0	0.0		56.5	0.5	0.5
	26.75	0.0	0.0		41.75	0.0	0.0		56.75	0.5	0.5
	27	0.0	0.0		42	0.0	0.0		57	0.9	0.9
	27.25	0.0	0.0		42.25	0.0	0.0		57.25	2.3	2.3
	27.5	0.0	0.0		42.5	0.0	0.0		57.5	1.4	1.4
	27.75	0.5	0.5		42.75	0.0	0.0		57.75	0.9	0.9
	28	0.5	0.5		43	0.0	0.0		58	0.9	0.9
	28.25	0.5	0.5		43.25	0.0	0.0		58.25	1.4	1.4
	28.5	0.0	0.0		43.5	0.0	0.0		58.5	3.8	3.7
	28.75	0.0	0.0		43.75	0.0	0.0		58.75	0.9	0.9
	29	0.0	0.0		44	0.0	0.0		59	0.5	0.5
	29.25	0.0	0.0		44.25	0.0	0.0		59.25	0.0	0.0
	29.5	0.0	0.0		44.5	0.0	0.0		59.5	0.5	0.5
	29.75	0.0	0.0		44.75	0.0	0.0		59.75	1.4	1.4
	30	0.0	0.0		45	0.0	0.0		60	0.9	0.9
	30.25	0.0	0.0		45.25	0.5	0.5		60.25	0.5	0.5
	30.5	0.0	0.0		45.5	0.0	0.0		60.5	0.0	0.0
	30.75	0.0	0.0		45.75	0.0	0.0		60.75	0.0	0.0
	31	0.0	0.0		46	0.0	0.0		61	0.5	0.5
	31.25	0.0	0.0		46.25	0.0	0.0		61.25	0.0	0.0
	31.5	0.0	0.0		46.5	0.0	0.0		61.5	0.0	0.0
	31.75	0.0	0.0		46.75	0.0	0.0		61.75	0.0	0.0
	32	0.0	0.0		47	0.0	0.0		62	0.0	0.0
	32.25	0.0	0.0		47.25	0.0	0.0		62.25	0.0	0.0
	32.5	0.0	0.0		47.5	0.0	0.0		62.5	0.0	0.0
	32.75	0.0	0.0		47.75	0.0	0.0		62.75	0.0	0.0
	33	0.0	0.0		48	0.0	0.0		63	0.0	0.0
	33.25	0.0	0.0	31-01-2021	48.25	0.0	0.0		63.25	0.0	0.0
	33.5	0.0	0.0		48.5	0.0	0.0		63.5	0.0	0.0
	33.75	0.0	0.0		48.75	0.0	0.0		63.75	0.0	0.0
	34	0.0	0.0		49	0.5	0.5		64	0.0	0.0
	34.25	0.0	0.0		49.25	0.0	0.0		64.25	0.0	0.0
	34.5	0.0	0.0		49.5	0.0	0.0		64.5	0.0	0.0
	34.75	0.0	0.0		49.75	0.0	0.0		64.75	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-47: HIETOGRAMA TORMENTA AÑO 2019 (CONT.)

Día	Horas Acum.	Hietograma San Pedro (mm/hora)	Hietograma Vilama (mm/hora)	Día	Horas Acum.	Hietograma San Pedro (mm/hora)	Hietograma Vilama (mm/hora)	Día	Horas Acum.	Hietograma San Pedro (mm/hora)	Hietograma Vilama (mm/hora)
	65	0.0	0.0		73.5	0.5	0.5		82	2.8	2.8
	65.25	0.0	0.0		73.75	2.3	2.3		82.25	3.8	3.7
	65.5	0.0	0.0		74	4.7	4.6		82.5	3.3	3.2
	65.75	0.0	0.0		74.25	0.9	0.9		82.75	0.5	0.5
	66	0.0	0.0		74.5	0.0	0.0		83	1.9	1.9
	66.25	0.0	0.0		74.75	0.0	0.0		83.25	5.6	5.6
	66.5	0.0	0.0		75	0.0	0.0		83.5	3.3	3.2
	66.75	0.0	0.0		75.25	0.0	0.0		83.75	5.6	5.6
	67	0.0	0.0		75.5	0.0	0.0		84	7.0	6.9
	67.25	0.0	0.0		75.75	0.0	0.0		84.25	5.2	5.1
	67.5	0.0	0.0		76	5.2	5.1		84.5	3.3	3.2
	67.75	0.0	0.0		76.25	3.3	3.2		84.75	3.8	3.7
	68	0.0	0.0		76.5	5.6	5.6		85	1.9	1.9
	68.25	0.0	0.0		76.75	2.8	2.8		85.25	0.5	0.5
	68.5	0.0	0.0		77	0.9	0.9		85.5	0.0	0.0
	68.75	0.0	0.0		77.25	2.3	2.3		85.75	0.9	0.9
	69	0.0	0.0		77.5	0.5	0.5		86	0.0	0.0
	69.25	0.0	0.0		77.75	3.8	3.7		86.25	0.0	0.0
	69.5	0.0	0.0		78	2.8	2.8		86.5	0.0	0.0
	69.75	0.0	0.0		78.25	1.4	1.4		86.75	0.0	0.0
	70	0.0	0.0		78.5	1.9	1.9		87	0.0	0.0
	70.25	0.0	0.0		78.75	2.3	2.3		87.25	0.0	0.0
	70.5	0.0	0.0		79	1.9	1.9		87.5	0.0	0.0
	70.75	0.0	0.0		79.25	3.8	3.7		87.75	0.0	0.0
	71	13.1	13.0		79.5	1.9	1.9		88	0.0	0.0
	71.25	16.9	16.7		79.75	11.3	11.1		88.25	0.0	0.0
	71.5	8.4	8.3		80	8.0	7.9		88.5	0.0	0.0
	71.75	26.3	25.9		80.25	6.1	6.0		88.75	0.0	0.0
	72	7.0	6.9		80.5	0.9	0.9		89	0.0	0.0
01-02-2019	72.25	1.4	1.4		80.75	1.9	1.9		89.25	0.0	0.0
	72.5	0.9	0.9		81	3.8	3.7		89.5	0.0	0.0
	72.75	0.9	0.9		81.25	0.0	0.0		89.75	0.0	0.0
	73	0.5	0.5		81.5	1.9	1.9				
	73.25	0.0	0.0		81.75	2.8	2.8				

Fuente: Elaboración propia

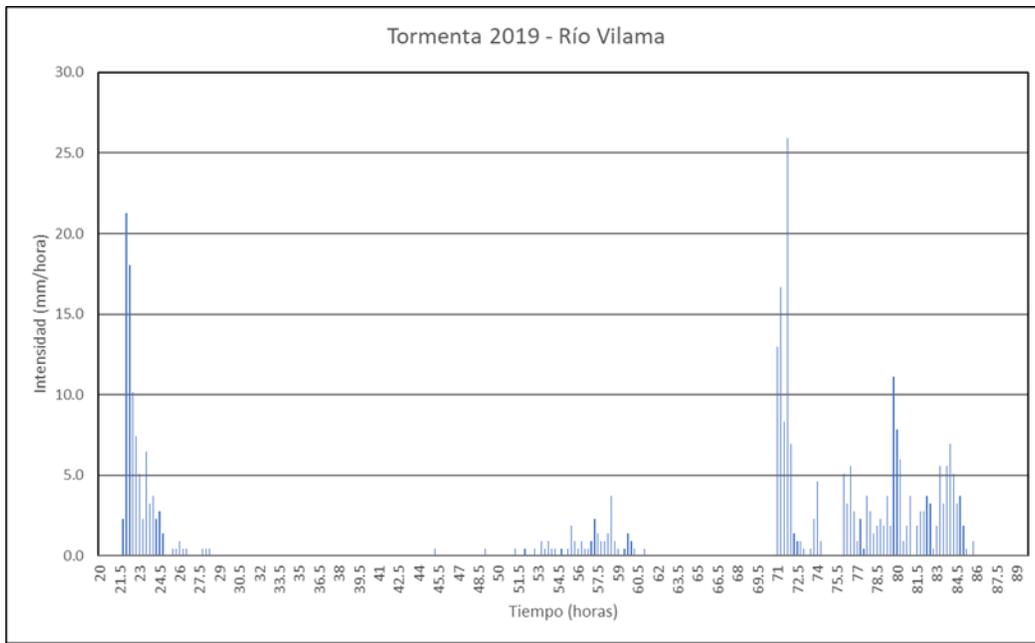


FIGURA 4-53: HIETOGRAMA DEL EVENTO DEL AÑO 2019 – RÍO VILAMA

Fuente: Elaboración propia

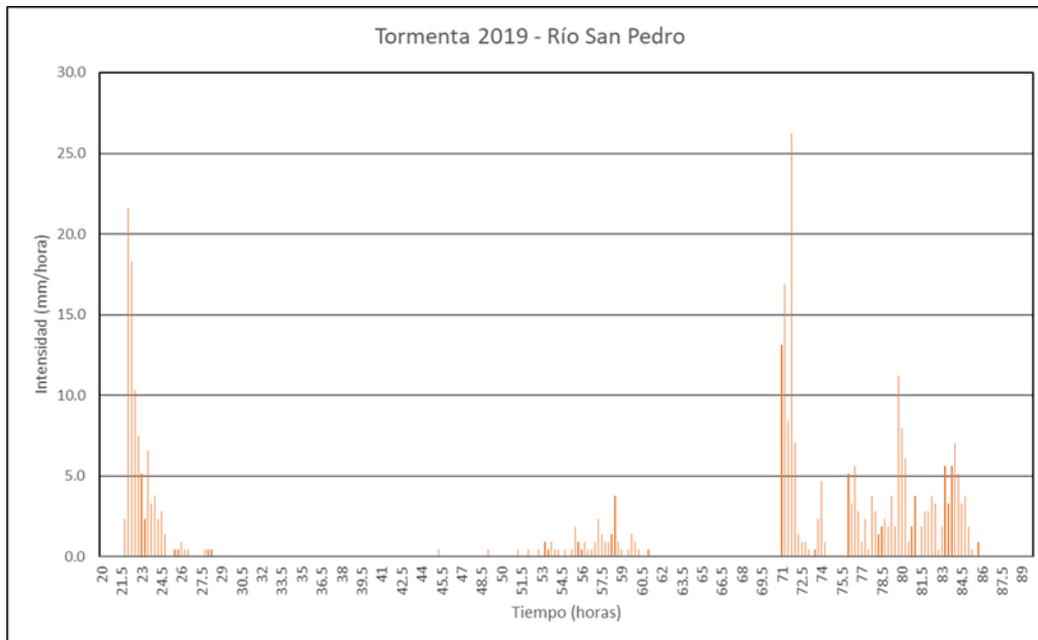


FIGURA 4-54: HIETOGRAMA DEL EVENTO DEL AÑO 2019 – RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de esta modelación, cuyos detalles se encuentran en Anexo 4-2-3, se presentan en el Cuadro 4-48. En dicha tabla se ha incluido una estimación del período de retorno del caudal producido, comparado con los valores calculados con otros métodos hidrológicos, que entrega un período de retorno en torno a los 25 años y con la curva de frecuencia de caudales medidos en Cuchabrací, que entrega un valor cercano a los 90 años.

CUADRO 4-48: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS – MODELO SWMM 5

CUENCA	Q (m ³ /s)	T (años)
San Pedro	220.5	25-108
Vilama	63.4	25

Fuente: Elaboración propia

Como conclusión del análisis del evento del año 2019, se puede indicar que los valores de precipitación que se presentaron corresponden a un período de retorno en torno a los 28 años. Lo anterior se puede verificar revisando el Cuadro 4-22, precipitaciones mayores que 56 mm en 24 horas, en la estación Río Grande, se han presentado en cinco ocasiones (años 1977-1981-1986, 1995 y 2012) en los 46 años de registro.

Finalmente, el caudal calculado con el modelo SWMM5, presenta un período de retorno concordante con el período de retorno de la precipitación, también de torno a los 25 años.

4.2.3. Estudio de Caudales de Crecidas Líquidas

En este apartado, se presenta el análisis efectuado a los antecedentes de caudales disponibles, medidos en las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama.

Una serie de caudales máximos instantáneos medidos, siendo suficientemente extensa y libre de errores, constituye una valiosa información estadística pues corresponde, directamente, a la respuesta de las cuencas frente a episodios de lluvias. Lamentablemente, como se presenta a continuación, lo anterior no ocurre en este caso ya que la información disponible se encuentra discontinuada por daños producidos en las estaciones de medición durante los eventos extremos.

Para este análisis se realizaron las siguientes actividades:

- Recopilación de la información existente.
- Definición de serie de caudales máximos instantáneos anuales para las cuencas.
- Análisis de datos, contraste, relleno y extensión de series.
- Análisis de frecuencia y cálculo de caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno.

4.2.3.1. Recopilación de Información existente.

Para el estudio se cuenta con antecedentes de caudales medidos en dos (2) estaciones fluviométricas:

- Estación Cuchabrache, ubicada en la cuenca del Río San Pedro (Estación San Pedro).
- Estación Canal Vilama, ubicada en la cuenca del Río Vilama.

Las ubicaciones de estas estaciones se pueden apreciar en la Figura 4-55 y su registro en la Figura 4-56.

La información de respaldo puede verse en el Anexo 4-2-2 (Fluviometría).

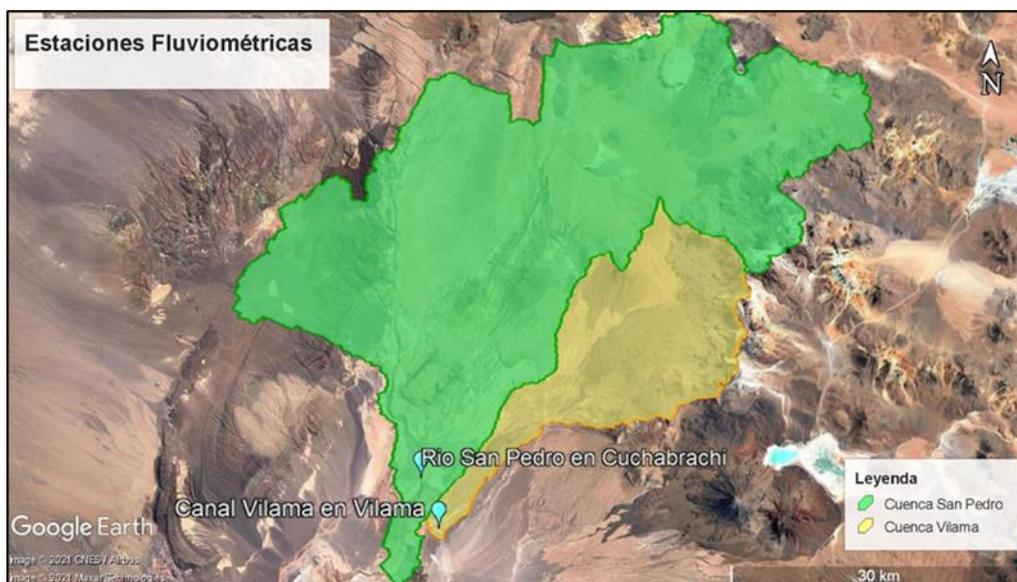


FIGURA 4-55: UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA

Fuente: Elaboración propia

Decada	1940				1950				1960				1970				1980																											
Estación/ año	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
Río San Pedro	7	12	12		12	12	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	10	6	12	12	9	5	6	9	12	3	2	0	0	0	12	1	12	12	12	11	4	11	12	12	9	12	12	11
Canal Vilama																									8	8	12	10	7	12	6	11	12	12	11	12	12	12						

Decada	1990				2000				2010				20															
Estación/ año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0							
Río San Pedro	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12	12	11	11	12	11	7	12	12	7	6	6	4	3		
Canal Vilama	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	11	12	12	12	11	

FIGURA 4-56: INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA DISPONIBLE RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.2. Relleno, Extensión y Análisis de datos (Anual, Mensual y Diaria)

A continuación, se efectúa una breve síntesis del proceso de análisis y contraste desarrollado para la información fluviométrica de las estaciones San Pedro en Cuchabrache y Canal Vilama.

i. Río San Pedro en Cuchabrache.

Los datos recopilados en la DGA, corresponde a datos máximos diarios, con registro de altura y caudal. En la figura anterior (Figura 4-56), se observa que la estación San Pedro en Cuchabrache presenta un registro más extenso, desde 1967 hasta el 2015, faltando el registro desde el 2016 hasta la fecha de hoy. No presenta información los años 1973 a 1975 y el año 1977. De acuerdo con el estudio de precipitaciones el período entre los años 1974 y 1977, el Río San Pedro recibió lluvias importantes, especialmente durante el año 1977. Según antecedentes históricos, dicho año la estación fue destruida por una crecida.

En el informe “Desarrollo de los Recursos de Agua en el Norte Grande, Chile efectuado por Harza Engineering Company International, para el Proyecto CHI-69/535 CORFO-D.G.A-CCC-P.N.U.D de las Naciones Unidas, para la crecida del año 1977, se calcula en el río San Pedro una altura de flujo H= 3,48 m y un caudal Q=218.15 m³/s.

También se cuenta con el informe “Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta” (2014). En este estudio mediante simulaciones de un perfil del río en Hec-Ras se calcula una curva de descarga para la estación de San Pedro en Cuchabrache.

El procedimiento de análisis seguido fue el siguiente:

- Con toda la información de alturas y caudales recopilados, a la que se le agregó la información calculada para 1977 por Harza, se confeccionó una curva de descarga, la que se presenta en la Figura 4-57.
- Se observa en dicha curva, tres valores fuera de la tendencia, los que fueron corregidos utilizando la ecuación de regresión obtenida.

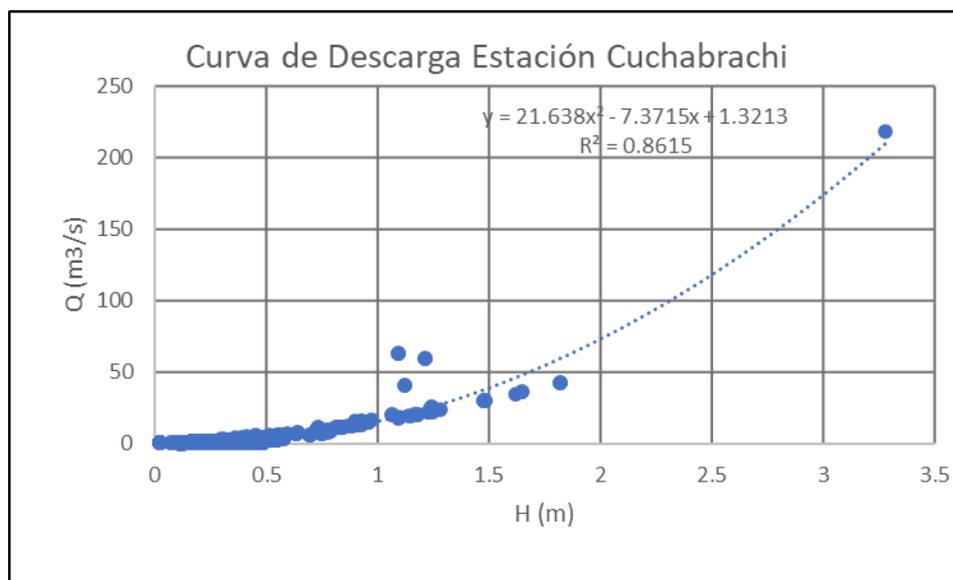


FIGURA 4-57: CURVA DE DESCARGA RÍO SAN PEDRO EN CUCHABRACHE

Fuente: Elaboración propia

- Con el objeto de comparar la curva de descarga obtenida con la curva definida en el estudio del año 2014, se compararon ambas curvas, incluyendo los valores medidos por la DGA. La Figura 4-58 muestra dicha comparación.

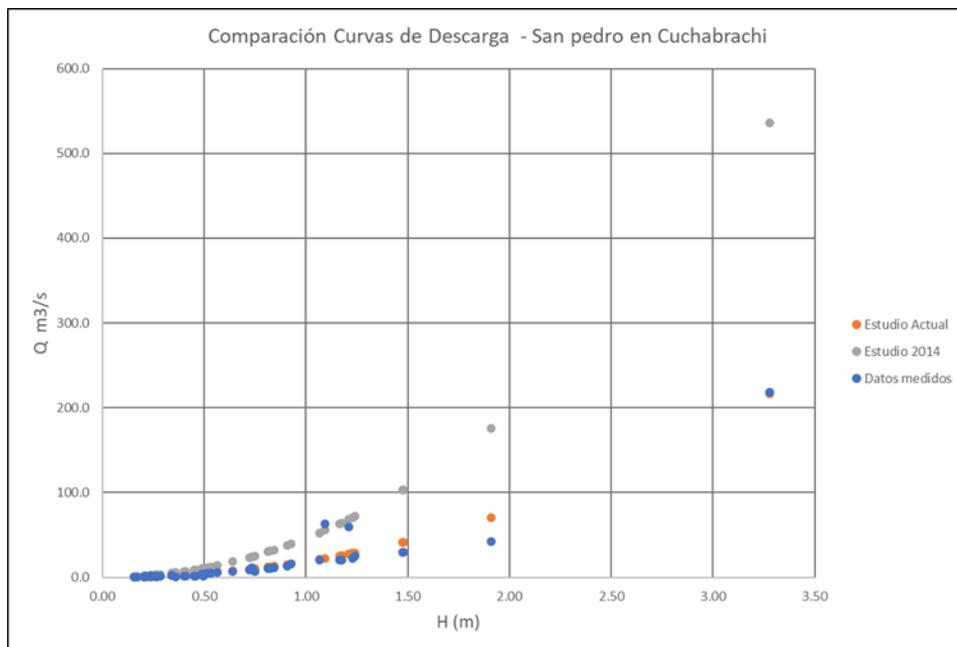


FIGURA 4-58: COMPARACIÓN CURVAS DE DESCARGA - SAN PEDRO EN CUCHABRACHE

Fuente: Elaboración propia

- En la figura se observa que la curva de descarga obtenida en el presente estudio se ajusta mejor a los datos desde el comienzo, separándose un poco en la zona intermedia, y luego convergiendo al final. Por otro lado, la curva obtenida en el estudio del 2014 sobre estima el valor de todas las mediciones, excepto los dos valores atípicos de los años 1972 y 1976. En base a estos resultados, se decidió utilizar la curva de descarga obtenida en el presente estudio, corrigiendo los valores atípicos de 1972 y 1976 y ajustando los valores de los años 2001, 2011 y 2012. El Cuadro 4-49 presenta la tabla final de Caudales Máximos Instantáneos de la estación Río San Pedro en Cuchabrache.

CUADRO 4-49: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS – RÍO SAN PEDRO EN CUCHABRACHE

Año	Q m ³ /s	Año	Q m ³ /s
1967	1.11	1993	4.53
1968	1.5	1994	5.03
1969	1.14	1995	29.99
1970	7	1996	1.26
1971	0.78	1997	10.99
1972	59.48	1998	9.19
1976	63.26	1999	13.21
1977	218.15	2000	11.42
1978	5.85	2001	70.6
1979	5.3	2002	20.15
1980	9	2003	10.89
1981	20.45	2004	16.19
1982	0.98	2005	20.29
1983	1.48	2006	25.18
1984	22.05	2007	0.96
1985	2.41	2008	11.75
1986	1.45	2009	1.09
1987	7.31	2010	1.6
1988	1.36	2011	51.1
1989	29.85	2012	50.9
1990	2.48	2013	1.13
1991	1.1	2014	1.18
1992	1.15	2015	0.77
		Valor Corregido	
		Valor Estimado	

Fuente: Elaboración propia

ii. Río Vilama en Canal Vilama.

Con relación a la estación Canal Vilama en Vilama, cuya información se presenta en el Cuadro 4-50 y Figura 4-59, se observa que presenta caudales muy bajos durante todo el año, el valor mayor registrado corresponde a 0,46 m³/s y el menor valor es 0,12 m³/s, valores muy alejados de los caudales observados en este río por lo que no corresponde efectuar un análisis más detallado.

CUADRO 4-50: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS – RÍO VILANA EN CANAL VILANA

Año	Q [m3/s]	Año	Q [m3/s]
1976	0.29	1997	0.19
1977	0.31	1998	0.38
1978	0.39	1999	0.16
1979	0.3	2000	0.46
1980	0.28	2001	0.38
1981	0.32	2002	0.45
1982	0.24	2003	0.19
1983	0.23	2004	0.29
1984	0.45	2005	0.38
1985	0.41	2006	0.23
1986	0.27	2007	0.15
1987	0.23	2008	0.37
1988	0.24	2009	0.16
1989	0.28	2010	0.12
1990	0.21	2011	0.14
1991	0.2	2012	0.28
1992	0.3	2013	0.19
1993	0.17	2014	0.13
1994	0.18	2015	0.28
1995	0.39	2016	0.44
1996	0.13		

Fuente: Elaboración propia

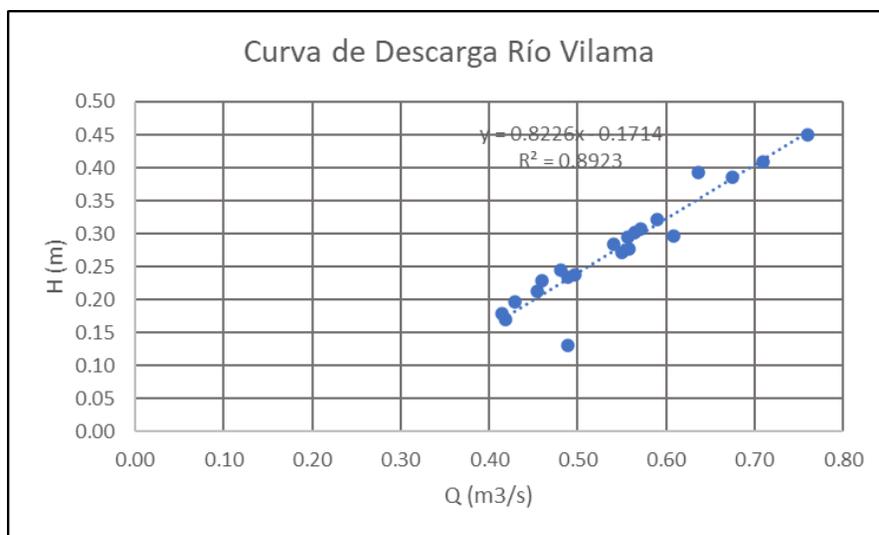


FIGURA 4-59: CURVA DE DESCARGA RÍO VILAMA EN VILAMA

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3. Análisis de Frecuencia Caudales Máximos Instantáneos Río San Pedro-Cuchabrache

Al igual que para el estudio de precipitaciones máximas, se ajustaron distintas distribuciones probabilísticas a los datos de caudales máximos instantáneos anuales, las distribuciones utilizadas fueron; Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson, Gumbel y Weibull.

El Cuadro 4-51 presenta los resultados para esta estación, de los caudales máximos instantáneos anuales, obtenidos para distintos períodos de retorno, según los modelos probabilísticos utilizados.

CUADRO 4-51: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS RÍO SAN PEDRO – AJUSTE PROBABILÍSTICO

T (años)	Pexc. (%)	Normal*	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel*	weibull
2	50	18.2	6.0	8.8	5.1	12.7	5.1
5	20	47.8	19.1	27.2	17.7	47.3	24.7
10	10	63.3	35.0	51.2	37.4	70.2	51.1
25	4	79.8	66.5	92.3	90.0	99.2	101.7
50	2	90.4	100.9	129.2	166.1	120.7	152.2
100	1	100.0	146.6	170.3	297.4	142.0	213.3
200	0.5	108.8	206.4	215.3	520.8	163.3	285.4
500	0.2	119.5	312.5	279.9	1064.2	191.3	397.5
1000	0.1	126.9	418.0	332.5	1799.0	212.5	495.2

*Test rechazado

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los tests Chi Cuadrado de las distintas distribuciones, se presentan en el Cuadro 4-52. De acuerdo con estos resultados, se elige la distribución de mejor ajuste a la distribución Weibull.

CUADRO 4-52: TEST CHI-CUADRADO - CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS RÍO SAN PEDRO

Función	s	v = k-s-1	χ^2	X_{LIM}^2	$X_{LIM}^2 - \chi^2$	Observación
Normal	2	7	106819.04	14.07	-106804.98	No Cumple
Log-Normal	2	7	7.94	14.07	6.13	Cumple
Pearson	3	6	5.50	12.59	7.09	Cumple
Log-Pearson	3	6	7.15	12.59	5.44	Cumple
Gumbel	2	7	20.75	14.07	-6.68	No Cumple
Weibull	3	6	4.68	12.59	7.91	Cumple USAR

Fuente: Elaboración propia

La ecuación y los principales parámetros de esta distribución y su ajuste gráfico se presentan a continuación.

$$f(x) = \lambda \alpha [\lambda(x - \theta)]^{\alpha-1} e^{-(\lambda(x-\theta))^\alpha}$$

con: $\lambda = 8,82; \alpha = 0,48; \theta = 0,48$

El ajuste gráfico de esta distribución se presenta en la Figura 4-60.

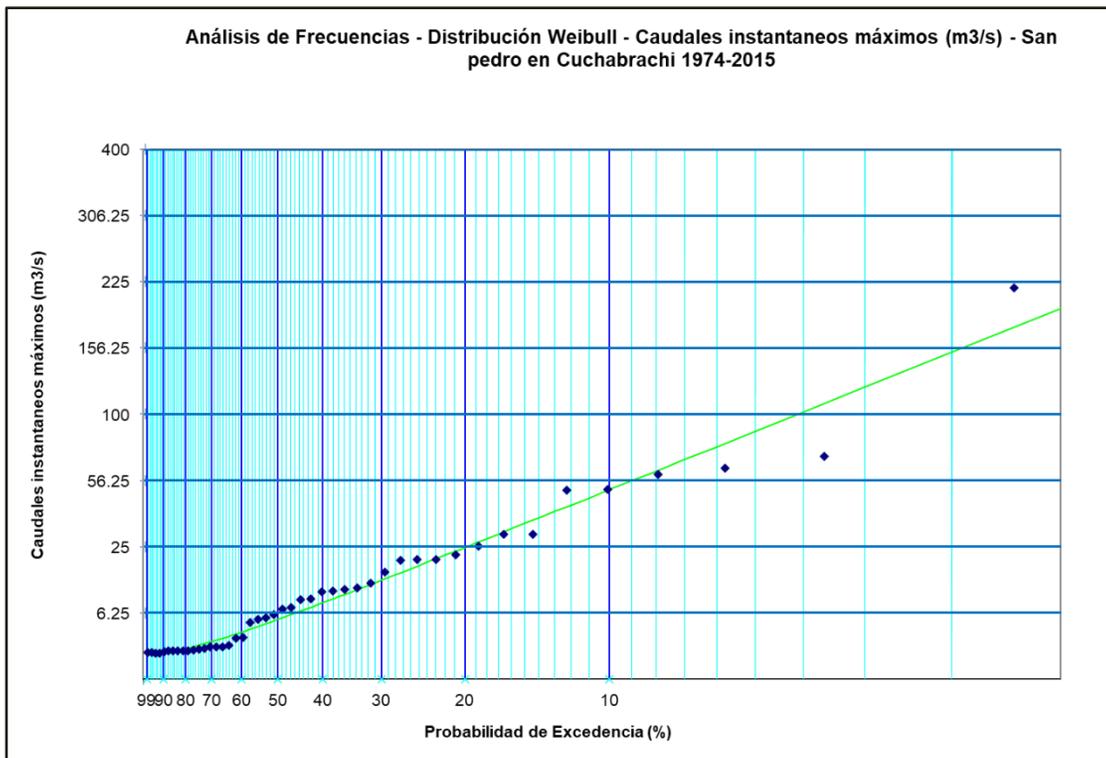


FIGURA 4-60: AJUSTE DISTRIBUCIÓN WEIBULL – ESTACIÓN SAN PEDRO EN CUCHABRACHE.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se calculan, con distintas metodologías, los caudales máximos instantáneos líquidos y su distribución temporal (hidrograma) a utilizar en los siguientes estudios hidráulicos y de mecánica fluvial, necesarios para la formulación del plan de manejo. Para ello se utilizan métodos directos y métodos indirectos basados en la relación precipitación-escorrentía.

4.2.3.4. Método Directo

Este método parte de la base que se cuenta con una estadística de caudales máximos instantáneos, extensa y confiable, que permita efectuar un análisis de frecuencia. De esa manera se obtienen los caudales asociados a distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 150 y 200 años), caudal formativo, etc.

La suposición anterior no se cumple completamente para las estaciones fluviométricas disponibles ya que la estación Río Vilama en Canal Vilama, no ha registrado los valores máximos observados y la estación Río San Pedro en Cuchabarache ha sido destruida, en varias ocasiones, por las mismas crecidas que no ha registrado. A pesar de lo anterior, se logró conformar una serie de caudales máximos instantáneos para el río San Pedro que permitió efectuar un análisis de frecuencia.

El Cuadro 4-53, presenta los valores de los caudales máximos instantáneos para la estación San Pedro en Cuchabarache, para distintos periodos de retorno, utilizando la distribución Log Pearson ajustada. El detalle de los cálculos puede verse en el Anexo 4-2-3 (Cálculo de Caudales).

**CUADRO 4-53: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS - SAN PEDRO CUCHABRACHE
PARA DISTINTOS T**

T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Q (m ³ /s)	5	25	51	102	152	213	285	397	495

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.5. Métodos Hidrológicos Basados en Pluviometría

Considerando las limitaciones que entrega, en este caso, el método directo basado en datos fluviométricos, el objetivo central de esta sección consiste en la validación de una relación Precipitación - Escorrentía, para obtener los caudales de crecida líquidas asociados a diferentes periodos de retorno, en las cuencas de San Pedro y Vilama.

Para lo anterior, los caudales máximos serán determinados en base a la aplicación de distintos métodos basados, como se ha dicho, en relaciones Precipitación-Escorrentía. Específicamente, para una estimación preliminar se usará la Fórmula Racional Modificada y la Fórmula de Verni-King Modificada. Para el estudio definitivo, se usará el Método del Hidrograma Unitario Sintético y la aplicación del Modelo Hidrológico SWMM-5 de la EPA.

Para la aplicación de estos métodos se requiere efectuar los siguientes cálculos previos:

- Definición de las cuencas aportantes.
- Determinación de la ubicación de la línea de Nieves.
- Definición de los parámetros morfométricos de las cuencas o áreas afluentes al punto de interés (Características Físicas):
 - Área.
 - Longitud del cauce principal.
 - Pendiente del cauce.
 - Diferencia de nivel.
- Cálculo de Caudales Líquidos.

Las planillas de respaldo de todos los métodos indirectos empleados pueden verse en el Anexo 4-2-3.

Definición de las cuencas aportantes.

Para lo anterior se confeccionó un plano de las cuencas, plano que se presenta en Anexo 4-2-4 (Planos).

En este plano, para la cuenca del río San Pedro, se definieron nueve (9) subcuencas y para la cuenca del río Vilama cuatro (4) subcuencas. La Figura 4-61 muestra las cuencas y subcuencas determinadas:

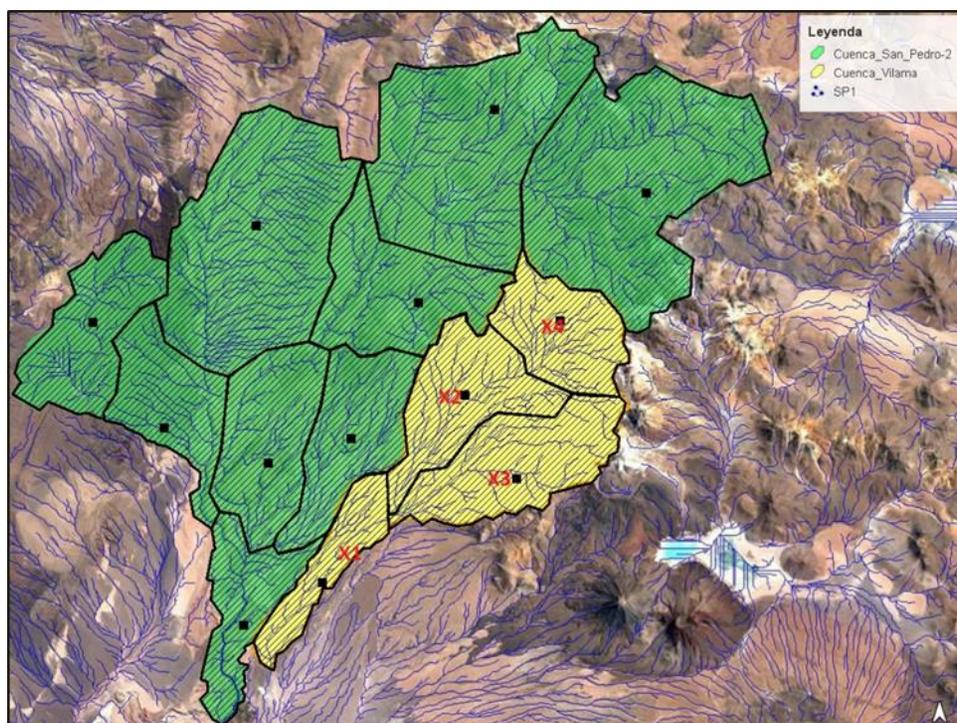


FIGURA 4-61: RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA – DEFINICIÓN DE CUENCAS Y SUBCUENCAS.

Fuente: Elaboración propia

Determinación de la ubicación de la línea de Nieves.

Para determinar la línea de nieve, que define la superficie efectiva de aportes pluviométricos, se utilizó el método desarrollado en la Universidad Técnica Federico Santa María (Covián, 2012) actualizado el año 2015 (Covian, 2015) (UTFSM).

Este método se basa en los resultados de la memoria de título “Variabilidad de La Línea de Nieves Durante Eventos de Tormenta - Utilizando Modelación Probabilística”, Covián (UTFSM, 2012)

En este estudio se obtienen expresiones para estimar las líneas de nieve en el país en función de la latitud del centro de gravedad de la cuenca a analizar, para las probabilidades de excedencia más representativas, diferenciando a su vez las expresiones para las épocas de invierno, otoño-primavera y verano.

Aplicada la metodología al presente caso, se obtienen las cotas de las líneas de acuerdo con las ecuaciones para una probabilidad de excedencia del 80 y 90%, que se indican a continuación:

- Línea de nieves invierno:

$$LN=46120*e^{(-0.11*LAT)}$$

- Línea de nieves otoño-primavera:

$$LN=53956 * e^{(-0.103 * LAT)}$$

- Línea de nieves verano:

$$LN=172539668 * [LAT]^{(-3.207)}$$

El trabajo de Covián (2012) fue actualizado el año 2015 (Covián, 2015), entregando nuevas ecuaciones las que se indican a continuación:

- Línea de nieves invierno, con $0,8 \geq P(X \geq x) > 0,5$.

$$LN=(646.5 * P(X \geq x) - 436.1) * \ln(LAT) - 3792.3 * P(X \geq x) + 17951$$

- Línea de nieves otoño-primavera, con $0,8 \geq P(X \geq x) > 0,5$.

$$LN=e^{(15.64 * \ln(1/P(X \geq x)))^{(-0.104)}} * LAT^{(0.5374 * \ln(\ln(1/P(X \geq x))) - 2.230)}$$

- Línea de nieves verano, con $0.8 \geq P_{exc} > 0.5$.

$$LN=(0.526 - 0.173 * \ln(1/P(X \geq x))) * LAT^3 + (20.798 * \ln(1/P(X \geq x)) - 56.863) * LAT^2 + (1885.6 - 823.2 * \ln(1/P(X \geq x))) * LAT + (10916 * \ln(1/P(X \geq x)) - 16228)$$

Donde LN es la cota de la línea de nieves en m.s.n.m., $P(X \geq x)$ es la probabilidad de excedencia en decimal, y LAT representa a la latitud en grados decimales del centro de la cuenca. Considerando las latitudes de los centros de masa de las cuencas, $22,58^\circ$ para San Pedro y $22,70^\circ$ para Vilama y las ecuaciones de Covián (2015), se obtiene los resultados que se presentan en el Cuadro 4-54.

CUADRO 4-54: UBICACIÓN LÍNEA DE NIEVE CUENCA RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA

Cuenca Río San Pedro					
Invierno		Otoño Primavera		Verano	
$P(X \geq x)$	Cota [m.s.n.m.]	$P(X \geq x)$	Cota [m.s.n.m.]	$P(X \geq x)$	Cota [m.s.n.m.]
0.8	3848	0.8	6746	0.8	7620
Cuenca Río Vilama					
Invierno		Otoño Primavera		Verano	
$P(X \geq x)$	Cota [m.s.n.m.]	$P(X \geq x)$	Cota [m.s.n.m.]	$P(X \geq x)$	Cota [m.s.n.m.]
0.9	3797	0.8	6638	0.8	7525

Fuente: Elaboración propia

En los cálculos de línea de nieve con la metodología de la UTFSM, por entregar resultados más conservadores para el invierno se utilizaron las fórmulas Covian 2012, para dicha estación. Es necesario tener presente que los resultados obtenidos para las líneas de nieve son solo referenciales,

ya que las fórmulas utilizadas no aplican estrictamente para el área de estudio, pues están calibradas para latitudes iguales o mayores a 28.5°.

Finalmente, considerando que las crecidas se producen en periodo estival (enero, febrero y quizás marzo), se considera que la cota de línea de nieve de la época de verano representa mejor las condiciones de crecida de las cuencas. De acuerdo con la ubicación de la línea de nieve en las condiciones indicadas, tanto la cuenca del río San Pedro como la del río Vilama, con la línea de nieve ubicada a 7.620 m.s.n.m. y 7.525 m.s.n.m, respectivamente, no reciben precipitación sólida, ya que sus alturas máximas no superan los 5.830 m.s.n.m. Esta es una condición más segura para el cálculo de los caudales líquidos de crecida ya que toda la cuenca está aportando.

Parámetros morfométricos de las cuencas (Características Físicas).

Las hoyas de los ríos San Pedro y Vilama (Figura 4-61), para efecto de la posterior modelación, se consideraron conformadas por una cuenca principal y nueve sub-cuencas principales, para el caso del río San Pedro y cuatro sub-cuencas para el caso del río Vilama.

Las características físicas que definen las cuencas, de interés y que se presentan en el Cuadro 4-55 y Cuadro 4-56, son:

- area total (km²)
- area pluvial (km²)
- cota superior (m)
- cota inferior (m)
- longitud cauce hasta el punto más alejado de la cuenca (LC)
- longitud del cauce hasta el centro de gravedad (LCg)
- pendiente del cauce principal (Sc)
- pendiente según Mociornita (So)

CUADRO 4-55: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO

Cuenca Río San Pedro			
Elemento	Notación	Valor	Unidad
Área total	A	1451.5	Km ²
Área pluvial	Ap	1452.5	Km ²
Pendiente cuenca (Mociornita)	So	0.183	m/m
Longitud del cauce hasta el centro de gravedad	LCg	51.4	Km
Longitud cauce hasta el punto más alejado de la cuenca	LC	99.4	Km
Pendiente cauce principal	Sc	0.026	m/m
Cota inferior	Hmin	2433	m.s.n.m
Cota superior	Hmax	5869	m.s.n.m

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-56: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA DEL RÍO VILAMA

Cuenca Río Vilama			
Elemento	Notación	Valor	Unidad
Área total	A	388.2	Km ²
Área pluvial	Ap	388.2	Km ²
Pendiente cuenca (Mociornita)	So	0.221	m/m
Longitud del cauce hasta el centro de gravedad	LCg	33.6	Km
Longitud cauce hasta el punto más alejado de la cuenca	LC	47.9	Km
Pendiente cauce principal	Sc	0.041	m/m
Cota inferior	Hmin	2489	m.s.n.m
Cota superior	Hmax	5936	m.s.n.m

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de Caudales Máximos Pluviales

Para estimar los caudales máximos instantáneos, en las cuencas, se utilizaron métodos hidrológicos basados en relaciones precipitación-escorrentía.

Se utilizaron tres métodos, ampliamente utilizados y que son recomendados por la Dirección General de Aguas (DGA) en la publicación "Manual de Cálculo de crecidas y caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica", Agosto 1995 y que son:

- Método basado en la fórmula de Verni-King Modificada (V-KM)
- Fórmula Racional (FRM)
- Método del Hidrograma Unitario Sintético (HUS)

A los métodos anteriores, se les agregó la aplicación del Modelo Hidrológico SWMM-5 de la EPA.

Método basado en la fórmula de Verni-King Modificada (V-KM)

Este método basado en la fórmula de Verni - King, relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación máxima en 24 horas y el área pluvial, a través de la siguiente relación:

$$Q = C(T) 0,00618 P_{24}^{1,24} A_p^{0,88}$$

donde:

Q : caudal instantáneo máximo asociado al período de retorno T (años), expresado en m³/s

C(T) : coeficiente empírico para el período de retorno T (años).

P₂₄ : precip, máxima en 24 horas, asociada al período de retorno T (años), expresada en mm.

A_p : área pluvial de la cuenca, expresada en km².

i. Cálculo del Coeficiente empírico C(T)

Según el estudio realizado para el Ministerio de Obras Públicas "Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica" (MOP 1995), se tiene que el coeficiente de escorrentía es dependiente de la ubicación geográfica y del período de retorno considerado.

Según la Tabla N°3.25 del "Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica", DGA N°1, MOP, 1995, se tiene que para la III Región, la más próxima a la zona de estudio, el valor del coeficiente empírico para T= 10 años, es:

$$C(T=10) = 0,27$$

Además, empleando la Tabla N°3.26 del mismo manual, se obtiene los valores para C(T) en función del período de retorno. El Cuadro 4-57, presenta los valores calculados.

CUADRO 4-57: COEFICIENTES EMPÍRICOS DE LA FÓRMULA DE VENI-KING MODIFICADA

T	C(T)/C(T=10)	C(T)
(Años)		
2	0.90	0.243
5	0.95	0.257
10	1.00	0.270
25	1.14	0.308
50	1.23	0.332
100	1.32	0.356

Fuente: Elaboración propia

ii. Cálculo de caudales

Aplicando la fórmula, con los coeficientes calculados, datos de precipitación y superficies indicadas, se obtienen los valores que se presentan en el Cuadro 4-58.

CUADRO 4-58: CÁLCULO DE CAUDALES MEDIANTE LA FÓRMULA DE VERNI-KING MODIFICADA

Cuenca	Área (Km ²)	T=2 Años		T=5 Años		T=10 Años		T=25 Años		T=50 Años		T=100 Años	
		Pmax 24 h	Q	Pmax 24 h	Q								
		(mm)	(m3/s)	(mm)	(m3/s)								
Río San Pedro	1451.5	17.9	32.5	31.2	68.4	40.3	98.9	51.8	154.0	60.3	200.6	68.8	253.5
Río Vilama	388	13.7	7.3	24.5	50.7	31.7	73.5	40.7	114.2	47.4	148.8	54.1	188.1

Fuente: Elaboración propia

Método basado en la Fórmula Racional Modificada (FRM)

Esta fórmula corresponde a una generalización de la Fórmula Racional, determinadas para condiciones de equilibrio de entradas y salidas en una cuenca y uniformidad y permanencia de los parámetros que la determina. Por lo indicado es solo aconsejable su uso en pequeñas áreas.

Sin embargo, la DGA en su Manual de Cálculo de Crecidas propone un método que generaliza su uso para cuencas mayores (hasta 10.000 Km²) introduciendo un coeficiente C(T) función del período de retorno, de la ubicación geográfica de la cuenca y de la intensidad de la lluvia de diseño. Lamentablemente, esta generalización sólo alcanza hasta la III Región del País, por lo que el área de estudio queda fuera de su alcance. Además, al aplicar la metodología utilizando los valores de la III Región, entendiéndose que es la zona más próxima, se recomienda el uso de un coeficiente C(T=10)=0.009, para 10 años de período de retotorno, lo que lleva a calcular caudales de crecida extremadamente bajos.

Por lo indicado precedentemente, el siguiente paso fue seguir las indicaciones del Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas, donde se indica que para determinar el caudal instantáneo máximo asociado a un período de retorno T, se debe calcular:

$$Q(T) = \frac{C(T) * i(t_c(T)) * A}{3.6} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Donde:

C (T): Coeficiente de escorrentía del terreno de la cuenca, función del periodo de retorno T.

i(t_c): Intensidad media de lluvia en mm/h, asociada a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial, t_c, dependiente del periodo de retorno T.

A : Área de la cuenca pluvial aportante en Km².

Coeficientes de Escorrentía:

En el Manual de Carreteras propone determina el coeficiente de escorrentía, según las características de las cuencas aportantes, a través del Cuadro 4-59.

Lo anterior supone que las características del terreno, tales como, su relieve, la capacidad de infiltración, la cobertura vegetal que poseen y la capacidad de almacenar agua superficialmente son factores que sumados aportan al coeficiente de escorrentía para un periodo de retorno de 10 años.

Para periodos de retorno mayores, se utilizan los factores multiplicativos indicados en la parte inferior del Cuadro 4-59 y para periodos de retorno mayores a 100 años se recomienda mantener el factor de 1,25. Como no existe relación con periodos de retorno menores a 10 años, se considera desfavorablemente que el coeficiente de escorrentía será el mismo que para 10 años.

CUADRO 4-59: COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA – MANUAL DE CARRETERAS

COEFICIENTES DE ESCORRENTIA (C) PARA T = 10 ANOS				
Factor	Extremo	Alto	Normal	Bajo
Relieve	0,28-0,35 Escarpado con pendientes mayores que 30%	0,20-0,28 Montañoso con pendientes entre 10 y 30%	0,14-0,20 Con cerros y pendientes entre 5 y 10%	0,08-0,14 Relativamente plano con pendientes menores al 5%
Infiltración	0,12-0,16 Suelo rocoso, o arcilloso con capacidad de infiltración despreciable	0,08-0,12 Suelos arcillosos o limosos con baja capacidad de infiltración, mal drenados	0,06-0,08 Normales, bien drenados, textura mediana, limos arenosos, suelos arenosos	0,04-0,06 Suelos profundos de arena u otros suelos bien drenados con alta capacidad de infiltración
Cobertura vegetal	0,12-0,16 Cobertura escasa, terreno sin vegetación o escasa cobertura	0,08-0,12 Poca vegetación, terrenos cultivados o naturales, menos del 20% del área con buena cobertura vegetal	0,06-0,08 Regular a buena; 50% del área con praderas o bosques, no más del 50% cultivado	0,04-0,06 Buena a excelente; 90% del área con praderas, bosques o cobertura equivalente
Almacenamiento Superficial	0,10-0,12 Despreciable, pocas depresiones superficiales, sin zonas húmedas	0,08-0,10 Baja, sistema de cauces superficiales pequeños bien definidos, sin zonas húmedas	0,06-0,08 Normal; posibilidad de almacenamiento buena, zonas húmedas, pantanos, lagunas y lagos	0,04-0,06 Capacidad alta, sistema hidrográfico poco definido, buenas planicies de inundación o gran cantidad de zonas húmedas, lagunas o pantanos.
Si T > 10 años Amplificar Resultado por: T = 25 ; C x 1,10 T = 50 ; C x 1,20 T = 100 ; C x 1,25				

Fuente: Manual de Carreteras

El Cuadro 4-60 muestra los valores de los factores considerados para las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama.

CUADRO 4-60: FACTORES PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA

Factor	Condición	Valor	Justificación
Relieve	Normal	0.08	Pendientes media cercanas al 3 %.
Infiltración	Normal	0.08	Suelos del tipo Limo-arenosos.
Cobertura Vegetal	Alto	0.08	Poca cobertura vegetal.
Almacenamiento Superficial	Normal	0.08	Baja

Fuente: Elaboración propia

Del análisis anterior, se concluye que el coeficiente de escorrentía a considerar asociado a un periodo de retorno de 10 años es $C=0,32$.

Para determinar la intensidad, primero es necesario estimar el tiempo de concentración (t_c), debido a que en este tiempo la tormenta proporciona el mayor caudal en la sección de salida de esta. Se recomienda que este tiempo no sea inferior a 10 min y se proponen los métodos de Kirpich, California Culvert Practice y Manual de Drenaje Urbano para su cálculo.

Kirpich:

La fórmula de Kirpich para determinar el tiempo de concentración de una cuenca es:

$$t_c = 0,06628 \left(\frac{LC^2}{S_o} \right)^{0.385} \quad [hr]$$

Donde:

- t_c: Tiempo de concentración de la cuenca en horas.
- LC: Longitud del cauce principal en la cuenca en Km.
- So: Pendiente media de la cuenca en m/m.

California Culvert Practice:

La fórmula de California Culvert Practice para determinar el tiempo de concentración de una cuenca de montaña es:

$$t_c = 0.95 \left(\frac{LC^3}{H} \right)^{0.385} \quad [hr]$$

Donde:

- t_c: Tiempo de concentración de la cuenca en horas.
- LC: Longitud del cauce principal en la cuenca en Km.
- H: Desnivel máximo de la cuenca en m.

MDU:

Finalmente, se utilizará la fórmula presentada en el Manual de Drenaje de Aguas Lluvias de la Dirección de Obras Hidráulicas (MDU) para cauces naturales:

$$t_c = 0.3 \left(\frac{LC}{S_c^{0.25}} \right)^{0.76} \quad [hr]$$

Donde:

- t_c: Tiempo de concentración de la cuenca en horas.
- LC: Longitud del cauce principal en la cuenca en Km.
- Sc: Pendiente media del cauce principal en m/m.

Los tiempos de concentración, en horas, mediante cada método y los tiempos de concentración adoptados se presentan en el Cuadro 4-61:

CUADRO 4-61: CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Cuenca	LC	So	H	Sc	Kirpich	California	MDU	Adoptado
	Km	m/m	m	m/m	tc	tc	tc	tc
					Horas	Horas	Horas	Horas
San Pedro	99.4	0.183	3436	0.026	4.4	8.4	19.8	11.0
Vilama	47.9	0.221	3447	0.041	2.3	3.6	10.4	6.0

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la precipitación de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, se utilizará la fórmula de Grunsky.

$$P_t^T = P_{24}^T \sqrt{\frac{t}{24}}$$

Donde:

P_t^T : Precipitación diaria en mm, asociada al periodo de retorno T.

t : Duración de la precipitación en horas.

Finalmente, los caudales líquidos de crecida, en m³/s, determinados mediante el método Racional se presentan en el Cuadro 4-62:

CUADRO 4-62: CAUDALES MÁXIMOS PLUVIALES - MÉTODO RACIONAL MODIFICADO

T (Años)	C(T)/C(T=10)	C(T)	Río San Pedro			Río Vilama		
			I ₂₄ (mm/hora)	I _{tc} (mm/hora)	Q (m3/s)	I ₂₄ (mm/hora)	I _{tc} (mm/hora)	Q (m3/s)
2	0.90	0.288	0.75	1.10	128	0.57	1.14	35
5	0.95	0.304	1.30	1.92	235	1.02	2.04	67
10	1.00	0.320	1.68	2.48	320	1.32	2.64	91
25	1.14	0.352	2.16	3.19	452	1.70	3.39	129
50	1.23	0.384	2.51	3.71	575	1.98	3.95	164
100	1.32	0.400	2.87	4.23	683	2.25	4.51	194

Fuente: Elaboración propia

Método Hidrograma Unitario Sintético (HUS)

En este método se establecen relaciones entre las propiedades que definen el hidrograma y las características físicas de la cuenca. Para desarrollar un hidrograma unitario sintético se requiere conocer los siguientes parámetros:

- tiempo de desfase o retardo “ tp ”. Es el tiempo que transcurre entre el centro de masas del hietograma que genera la crecida y el momento en que se produce el caudal máximo o peak “ qp ”.
- caudal máximo o peak “ qp ”. Es el caudal máximo del hidrograma unitario de crecida o por unidad de área de la cuenca.
- tiempo base “ Tb ”. Es el tiempo que transcurre entre el comienzo del hidrograma unitario de la crecida y su término.

Considerando que no existen formulaciones para la Región de Atacama, se optó por seguir, por proximidad, las recomendaciones del manual de crecidas de la DGA (1995) para la III Región, Dicha publicación recomienda el uso de un hidrograma sintético tipo Linsley, el cual se construye en base a las siguientes relaciones:

$$tp = 0,323 * \left(\frac{LC \times LCg}{\sqrt{S}} \right)^{0,422}$$

$$qp = 144,141 \times tp^{-0,796}$$

$$Tb = 5,377 \times tp^{0,805}$$

tp está en (horas), qp en (l/s/km²) y Tb en (horas).

donde:

- LC : longitud de la cuenca a lo largo del cauce principal en km.
- LCg : distancia entre la sección de salida de la cuenca y su centro de gravedad, en km.
- S : pendiente media de la cuenca en tanto por uno, calculada por la fórmula de Mociornita.

con S dado por:

$$S = \frac{h}{A} \times \left[\frac{1}{2} \times l_0 + \sum_1^{n-1} li + \frac{1}{2} \times l_n \right]$$

donde:

A	:	área de la cuenca en (m ²)
h	:	diferencia de cota entre curvas de nivel (m)
li	:	longitud de la curva de nivel de cota i en (m)

Además, si el tiempo de lluvia “*tu*” no es igual a “*tp/ 5,5*”, se debe corregir mediante la siguiente expresión:

$$tp' = tp + \frac{tr - tu}{4}$$

donde:

<i>t'_p</i>	:	tiempo de desfase corregido
<i>tr</i>	:	la duración real de la lluvia

El caudal total de la cuenca se obtiene amplificando el “*q_p*” por el valor del área de la cuenca. Una vez calculado el H.U.S., el escurrimiento de cualquier tormenta de duración igual a la correspondiente al H.U.S., se obtiene amplificando las ordenadas del H.U.S. por el valor de la lluvia efectiva asociado al período de retorno deseado.

Para la duración de la tormenta de diseño, en este caso se consideró una duración de la precipitación igual 24 horas y para determinar la precipitación efectiva se utilizó el método de la Curva Número.

Río San Pedro

a) Determinación de las pérdidas de precipitación (abtracciones).

Para la determinación de las pérdidas de precipitación (abtracciones) se utilizó el método de la curva número (CN) para las cuencas.

Curva Número:

Para la dereminación de una curva número (CN) para la cuenca se consideraron los valores propuestos por el Soil Conservation Service (SCS) para distintos tipos de suelos según lo que se indic en el MDU. El suelo de la zona corresponde a una proporción entre suelos del tipo “*limos arcillosos con algo de arena*” (Grupo c) y a “*arcillas y limos*” (Grupo B). Además la cuenca no presenta áreas de pasto. El Cuadro 4-63, muestra los valores propuestos para las condicones indicadas por el SCS.

CUADRO 4-63: VALORES DE CURVA NÚMERO SEGÚN EL SCS

DESCRIPCION DEL USO DEL SUELO	A	B	C	D
Pastos ≤ 50%	68	79	86	89

Fuente: Elaboración propia a partir de Soil Conservation Service.

De acuerdo con lo indicado precedentemente, se define un valor de curva número para la cuenca igual CN=86.

Por otra parte, de acuerdo con lo recomendado en el artículo “Cálculo y Análisis Crítico del Método de la Curva Número para Cuencas del País”, de C. Saavedra y L. Stowhas, publicado en el Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica del año 200, la curva número de la zona más al norte del país se debe calcular como:

$$CN=40 +60 \text{ Exp } (-0.0200P) \quad \text{Condición II Normal}$$

Donde: P = Precipitación total de la tormenta.

Los valores calculados con la expresión anterior, tienden a subestimar los valores de la Curva Número para periodos de retorno elevado, por lo que se considerará, en estos casos, que la cuenca se encuentra en condiciones húmedas, por los que se aplicará la siguiente corrección sugerida por el SCS.

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)}$$

Donde:

$CN(II)$: Curva Número para una condición normal.

$CN(III)$: Curva Número para una condición húmeda.

Aplicando la expresión anterior a la cuenca del río San Pedro, se obtienen las Curvas Números, para cada periodo de retorno anlizado, que se presenta en el Cuadro 4-64.

CUADRO 4-64: VALORES DE CURVAS NÚMERO ADOPTADOS – CUENCA RÍO SAN PEDRO

T	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Precipitación en 24 h (mm)	17.4	31.2	40.3	51.8	60.3	68.8	77.2	88.3	96.7
lo (abstracción inicial) (mm)	4.7	8.5	11.0	13.9	16.0	17.9	19.7	21.9	23.3
CN (II) de tabla SCS	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0
CN (II) variable (saavedra y Stowhas)	82.4	72.2	66.8	61.3	58.0	55.2	52.8	50.3	48.7
CN (III) variable (saavedra y Stowhas)	91.5	85.6	82.2	78.5	76.0	73.9	72.0	69.9	68.6
Valor adoptado para CN	91.5	85.6	82.2	78.5	76.0	73.9	72.0	69.9	68.6

Fuente: Elaboración propia

b) Hietogramas de Diseño

Se utilizará como hietograma de diseño la denominada Distribución Centrada de Endesa (Benítez, 1969), cuyos valores y su aplicación a la cuenca del río San Pedro, para distintos períodos de retorno, se presenta en el Cuadro 4-65.

CUADRO 4-65: VALORES PRECIPITACIÓN ACUMULADA (ENDESA) – CUENCA RÍO SAN PEDRO

%tiempo acumulado	% Pp acumulada	Precipitación (mm)								
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	6.9	1.2	2.2	2.8	3.6	4.2	4.7	5.3	6.1	6.7
20	15.2	2.6	4.7	6.1	7.9	9.2	10.5	11.7	13.4	14.7
30	25.6	4.5	8.0	10.3	13.2	15.4	17.6	19.8	22.6	24.8
40	38.2	6.7	11.9	15.4	19.8	23.0	26.3	29.5	33.7	36.9
50	51.9	9.0	16.2	20.9	26.9	31.3	35.7	40.1	45.8	50.2
60	66.1	11.5	20.6	26.6	34.2	39.8	45.4	51.0	58.4	63.9
70	77.7	13.5	24.2	31.3	40.2	46.8	53.4	60.0	68.6	75.2
80	87.2	15.2	27.2	35.1	45.1	52.6	60.0	67.3	77.0	84.3
90	94.7	16.5	29.5	38.1	49.0	57.1	65.1	73.1	83.6	91.6
100	100.0	17.4	31.2	40.3	51.8	60.3	68.8	77.2	88.3	96.7

Fuente: Elaboración propia

Al extender la tabla anterior para una lluvia de duración igual a 24 horas, considerando las abstracciones iniciales y aplicada en toda la cuenca, se obtienen los hietogramas, para distintos periodos de retorno, que se presentan en el Cuadro 4-66.

CUADRO 4-66: HIETOGRAMAS DE DISEÑO – CUENCA RÍO SAN PEDRO

Tiempo	% Pp efectiva	Precipitación efectiva (mm*Km2)								
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años
0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	3.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	3.46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	3.63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	4.33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	4.33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9
8	5.07	12.6	19.9	27.6	45.0	67.3	101.5	152.2	253.5	358.9
9	5.25	96.5	166.9	219.8	302.0	378.6	471.0	581.9	760.4	921.5
10	5.43	191.0	335.7	438.2	584.3	709.4	851.3	1012.8	1260.1	1474.9
11	5.71	290.1	512.4	666.9	879.8	1055.9	1249.6	1464.2	1783.8	2054.9
12	5.71	372.0	659.0	856.3	1123.6	1340.2	1574.4	1829.4	2202.4	2513.9
13	5.92	463.1	821.6	1066.7	1395.0	1657.6	1938.0	2239.8	2675.8	3035.6
14	5.92	534.0	948.5	1230.5	1605.5	1902.6	2217.1	2552.7	3032.7	3425.3
15	5.27	529.2	940.7	1219.9	1589.1	1879.6	2185.2	2509.2	2969.3	3342.9
16	4.83	526.4	936.3	1213.7	1579.2	1865.4	2165.1	2481.3	2927.8	3288.6
17	4.66	541.3	963.2	1248.4	1622.8	1914.9	2219.6	2539.9	2990.2	3352.5
18	3.96	484.4	862.2	1117.2	1451.2	1711.0	1981.3	2264.4	2661.2	2979.3
19	3.96	505.3	899.7	1165.6	1513.3	1783.0	2063.0	2355.5	2764.2	3091.0
20	3.29	435.3	775.2	1004.1	1303.0	1534.4	1774.1	2024.1	2372.4	2650.3
21	3.13	425.2	757.4	981.0	1272.6	1497.9	1731.0	1973.6	2311.0	2579.6
22	2.76	384.6	685.2	887.4	1150.7	1354.0	1563.9	1782.1	2085.0	2325.8
23	2.21	313.9	559.4	724.4	939.1	1104.7	1275.4	1452.8	1698.6	1893.8
24	2.21	319.1	568.6	736.3	954.4	1122.4	1295.5	1475.1	1723.7	1920.9

Fuente: Elaboración propia

c) Cálculo de los hidrogramas unitarios y totales para distintos períodos de retorno

A partir de las relaciones para el HUS se calculó el hidrograma unitario sintético para la cuenca del río San Pedro. El Cuadro 4-67 presenta los parámetros característicos del HUS determinado.

CUADRO 4-67: PARÁMETROS CARCATERÍSTICOS HUS – CUENCA RÍO SAN PEDRO

Datos		Parámetros HUS		Parámetros HUS - Corregidos	
A (Km2)	1451	tp [hr]	16.98	tp [hr]	16.46
So	0.183	tb [hr]	52.6	tb [hr]	51.2
LCg (Km)	51.4	qp [lt/s/mm*km2)	15.13	qp [lt/s/mm*km2)	15.51
LC (Km)	99.4	tu [hr]	3.09	tu [hr]	1.00

Fuente: Elaboración propia

A partir de los valores de la tabla anterior y con la distribución de valores del hidrograma adimensional, se define la forma del HUS, la que se muestra en el Cuadro 4-68.

CUADRO 4-68: HUS – CUENCA RÍO SAN PEDRO

Hidrograma Adimensional		HUS- San Pedro	
t/tp	q/qp	t (Horas)	qp (lt/s/mm*km2)
0	0	0	0
0.3	0.2	4.9	3.1
0.5	0.4	8.2	6.2
0.6	0.6	9.9	9.3
0.75	0.8	12.3	12.4
1	1	16.5	15.5
1.3	0.8	21.4	12.4
1.5	0.6	24.7	9.3
1.8	0.4	29.6	6.2
2.3	0.2	37.8	3.1
2.7	0.1	44.4	1.6
3.1	0	51.2	0.0

Fuente: Elaboración propia

Los valores anteriores extendidos a nivel horario y corregidos por volumen se presentan en el Cuadro 4-69 y la Figura 4-62.

CUADRO 4-69: HU CORREGIDO – CUENCA RÍO SAN PEDRO

t (horas)	q lt/s/mm*km2	q corr lt/s/mm*km2	HU [m3/s/mm/km2]	t (horas)	q lt/s/mm*km2	q corr lt/s/mm*km2	HU [m3/s/mm/km2]
0	0.000	0.000	0.000	27	7.850	6.780	0.007
1	0.628	0.543	0.001	28	7.222	6.237	0.006
2	1.257	1.085	0.001	29	6.594	5.695	0.006
3	1.885	1.628	0.002	30	6.061	5.234	0.005
4	2.513	2.171	0.002	31	5.684	4.909	0.005
5	3.162	2.730	0.003	32	5.307	4.583	0.005
6	4.104	3.544	0.004	33	4.930	4.258	0.004
7	5.047	4.358	0.004	34	4.553	3.932	0.004
8	5.989	5.172	0.005	35	4.176	3.606	0.004
9	7.659	6.615	0.007	36	3.799	3.281	0.003
10	9.465	8.174	0.008	37	3.422	2.955	0.003
11	10.721	9.260	0.009	38	3.066	2.648	0.003
12	11.978	10.345	0.010	39	2.831	2.445	0.002
13	12.904	11.145	0.011	40	2.595	2.241	0.002
14	13.658	11.796	0.012	41	2.359	2.038	0.002
15	14.412	12.447	0.012	42	2.124	1.834	0.002
16	15.166	13.098	0.013	43	1.888	1.631	0.002
17	15.168	13.100	0.013	44	1.652	1.427	0.001
18	14.539	12.557	0.013	45	1.421	1.228	0.001
19	13.911	12.014	0.012	46	1.194	1.031	0.001
20	13.283	11.472	0.011	47	0.966	0.835	0.001
21	12.654	10.929	0.011	48	0.739	0.638	0.001
22	11.835	10.221	0.010	49	0.511	0.442	0.000
23	10.893	9.408	0.009	50	0.284	0.245	0.000
24	9.950	8.594	0.009	51	0.056	0.049	0.000
25	9.107	7.865	0.008	51.3	0.000	0.000	0.000
26	8.479	7.323	0.007				

Fuente: Elaboración propia

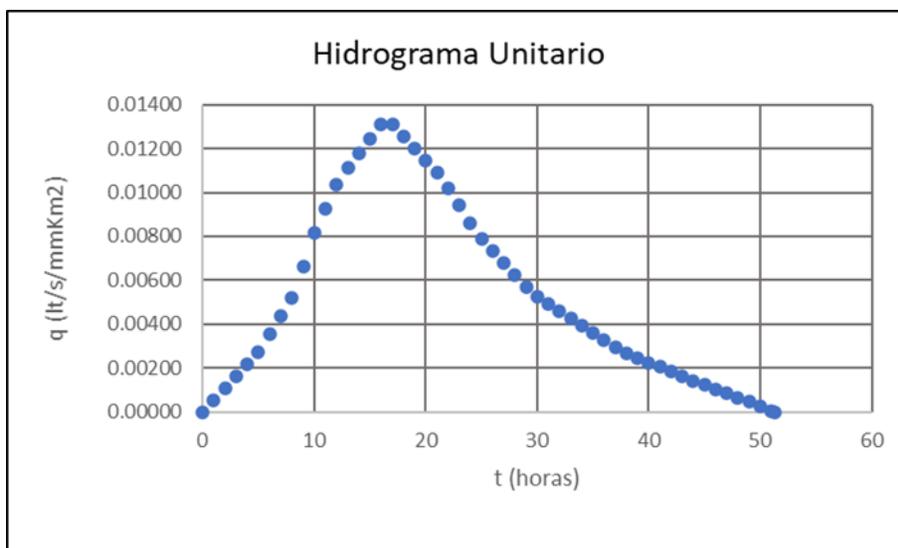


FIGURA 4-62: HUS – CUENCA RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia

Con el hidrograma unitario definido y el hietograma establecido para distinto periodos de retorno, se calculó mediante un proceso de convolución el hietograma total que se presenta en el Cuadro 4-70 y Cuadro 4-71.

CUADRO 4-70: HIDROGRAMA TOTAL PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO – CUENCA RÍO SAN PEDRO

t (Horas)	Precipitación efectiva (mm*Km2)									t (Horas)	Precipitación efectiva (mm*Km2)								
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24	27.9	49.5	64.3	84.4	100.7	118.4	137.8	166.4	190.6
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25	33.3	58.9	76.6	100.4	119.7	140.6	163.3	196.8	224.9
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26	38.7	68.6	89.1	116.7	139.1	163.1	189.3	227.5	259.6
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	27	44.1	78.3	101.7	133.1	158.4	185.6	215.1	258.1	293.9
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28	49.4	87.7	113.9	149.0	177.1	207.3	239.9	287.3	326.7
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29	54.4	96.6	125.3	163.9	194.7	227.7	263.2	314.6	357.3
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30	59.0	104.6	135.8	177.5	210.7	246.1	284.2	339.3	384.7
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31	62.8	111.6	144.8	189.1	224.3	261.8	302.1	360.0	407.8
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32	66.0	117.1	152.0	198.4	235.3	274.4	316.3	376.5	426.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	33	68.2	121.2	157.3	205.2	243.2	283.4	326.4	388.1	438.7
11	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	34	69.5	123.4	160.1	208.8	247.4	288.2	331.7	393.9	444.9
12	0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4	1.9	2.4	35	69.7	123.8	160.6	209.3	247.9	288.6	331.9	393.9	444.6
13	0.5	1.0	1.3	1.7	2.1	2.6	3.2	4.1	5.0	36	69.0	122.6	159.0	207.2	245.3	285.5	328.2	389.2	439.0
14	1.1	1.9	2.5	3.3	4.0	4.9	5.9	7.5	9.0	37	67.5	119.9	155.5	202.7	239.9	279.0	320.7	380.0	428.4
15	1.8	3.3	4.2	5.7	6.9	8.3	9.9	12.5	14.7	38	65.3	116.1	150.6	196.2	232.1	269.9	310.1	367.3	413.9
16	2.9	5.2	6.8	9.0	10.9	13.0	15.5	19.2	22.6	39	62.6	111.3	144.3	188.0	222.4	258.6	297.0	351.6	396.1
17	4.4	7.7	10.1	13.3	16.1	19.2	22.7	28.0	32.7	40	59.4	105.6	137.0	178.4	211.0	245.3	281.7	333.4	375.5
18	6.2	10.9	14.2	18.8	22.6	26.9	31.7	39.0	45.3	41	55.8	99.3	128.7	167.7	198.3	230.5	264.7	313.2	352.7
19	8.5	14.9	19.5	25.7	30.9	36.6	43.0	52.7	61.1	42	52.2	92.7	120.3	156.6	185.2	215.3	247.2	292.5	329.3
20	11.2	19.9	25.9	34.1	40.9	48.4	56.8	69.4	80.2	43	48.6	86.4	112.0	145.8	172.4	200.4	230.1	272.2	306.5
21	14.6	25.8	33.6	44.2	53.0	62.6	73.3	89.3	103.0	44	45.1	80.2	103.9	135.4	160.1	186.0	213.6	252.7	284.5
22	18.5	32.8	42.6	56.1	67.1	79.1	92.4	112.2	129.1	45	41.7	74.2	96.2	125.3	148.2	172.2	197.7	233.9	263.3
23	23.0	40.7	52.9	69.5	83.0	97.8	114.0	138.0	158.4	46	38.5	68.5	88.9	115.7	136.8	159.0	182.6	216.0	243.1

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-71: (CONT.): HIDROGRAMA TOTAL PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO – CUENCA RÍO SAN PEDRO

t (Horas)	Precipitación efectiva (mm*Km2)										t (Horas)	Precipitación efectiva (mm*Km2)									
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años	T=2 años		T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años		
47	35.5	63.2	81.9	106.7	126.2	146.7	168.3	199.2	224.2	70	1.3	2.2	2.9	3.8	4.4	5.1	5.8	6.8	7.6		
48	32.8	58.3	75.6	98.4	116.4	135.2	155.2	183.6	206.7	71	0.8	1.5	1.9	2.5	2.9	3.4	3.8	4.5	5.0		
49	30.2	53.8	69.7	90.8	107.3	124.7	143.2	169.3	190.6	72	0.5	0.9	1.1	1.5	1.7	2.0	2.3	2.7	3.0		
50	27.9	49.6	64.3	83.7	99.0	115.0	132.0	156.1	175.7	73	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.5		
51	25.7	45.6	59.2	77.1	91.1	105.9	121.5	143.7	161.7	74	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6		
52	23.6	42.0	54.4	70.8	83.8	97.3	111.7	132.1	148.6	75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		
53	21.7	38.5	50.0	65.1	76.9	89.4	102.6	121.3	136.4	76	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
54	19.9	35.4	45.9	59.7	70.6	82.0	94.1	111.2	125.1	77	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
55	18.2	32.4	42.0	54.7	64.6	75.1	86.1	101.8	114.5	78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
56	16.6	29.5	38.3	49.9	58.9	68.4	78.5	92.7	104.3	79	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
57	15.1	26.8	34.8	45.2	53.4	62.1	71.2	84.0	94.5	80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
58	13.6	24.2	31.3	40.8	48.2	55.9	64.1	75.7	85.0	81	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
59	12.2	21.7	28.1	36.5	43.1	50.1	57.4	67.7	76.0	82	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
60	10.8	19.2	24.9	32.4	38.3	44.4	50.9	60.0	67.3	83	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
61	9.5	16.9	21.9	28.5	33.7	39.0	44.7	52.6	59.0	84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
62	8.3	14.7	19.1	24.8	29.3	33.9	38.8	45.7	51.2	85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
63	7.1	12.7	16.4	21.3	25.1	29.1	33.3	39.1	43.8	86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
64	6.0	10.7	13.8	18.0	21.2	24.5	28.0	32.9	36.8	87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
65	5.0	8.8	11.4	14.8	17.5	20.2	23.1	27.1	30.3	88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
66	4.0	7.1	9.2	12.0	14.1	16.3	18.6	21.9	24.5	89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
67	3.2	5.6	7.3	9.5	11.1	12.9	14.7	17.2	19.2	90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
68	2.4	4.3	5.6	7.2	8.5	9.8	11.2	13.2	14.7	91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
69	1.8	3.2	4.1	5.3	6.3	7.3	8.3	9.7	10.8	92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el Cuadro 4-72 y la Figura 4-63, presenta los resultados de caudales máximos instantáneos e hidrogramas, para duraciones de lluvias iguales a 24 horas y periodos de retorno T=2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, obtenidos con el método del HUS.

CUADRO 4-72: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS MÉTODO HUS – RÍO SAN PEDRO

T (Años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Qmax [m3/s]	69.66	123.78	160.55	209.33	247.86	288.58	331.94	393.90	444.86
t Qmax [hr]	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	34.00

Fuente: Elaboración propia

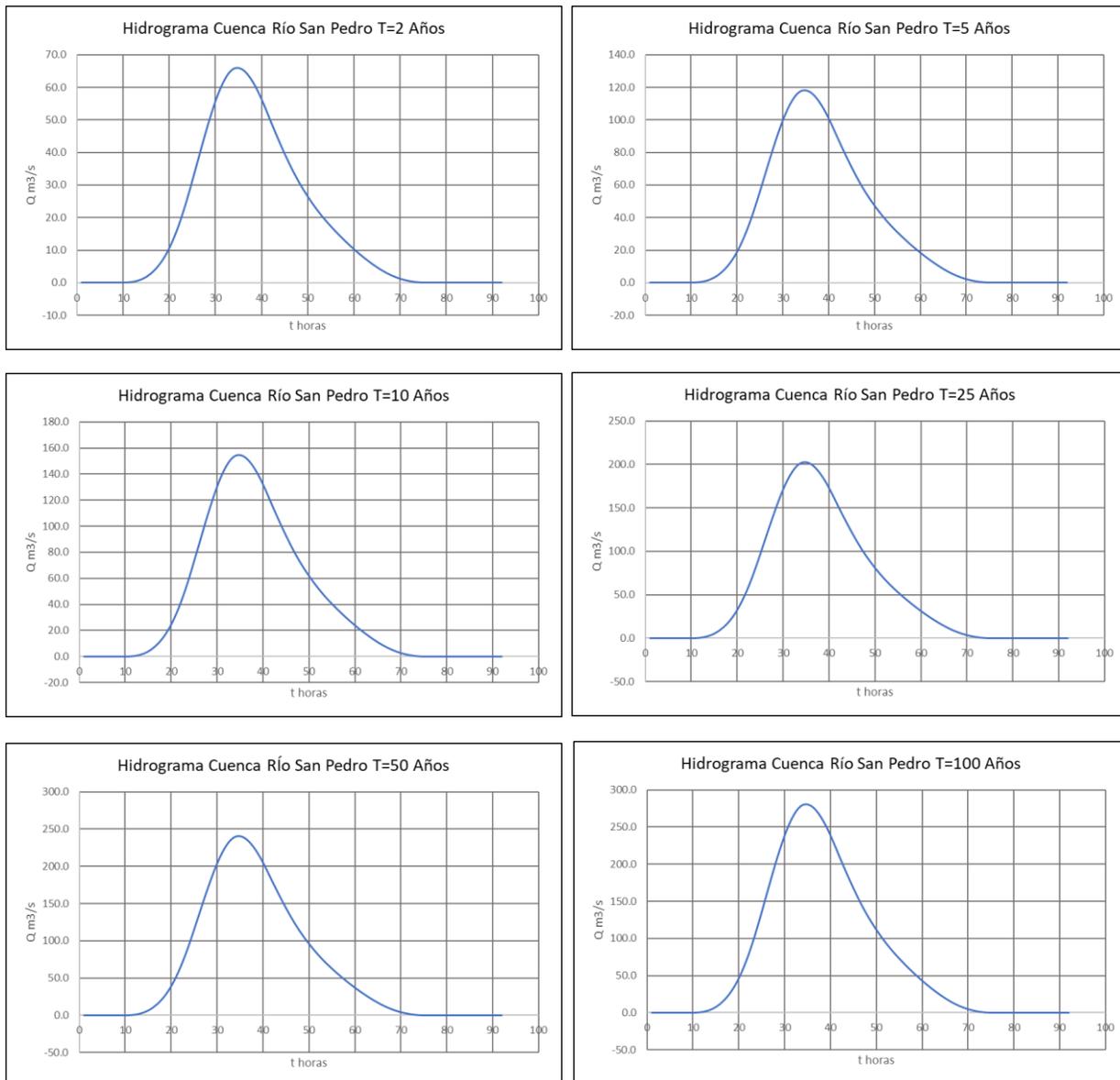


FIGURA 4-63: HIDROGRAMAS PARA DISTINTOS T(AÑOS) – CUENCA RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia

Río Vilama

A continuación, se desarrolla para el río Vilama un procedimiento similar al efectuado del río San Pedro para calcular los hidrogramas de crecida por el método del HUS.

a) Determinación de las pérdidas de precipitación (abstracciones).

Aplicando la expresión para la determinación de la Curva Número utilizada anteriormente en la cuenca del río San Pedro, esta vez para la cuenca del río Vilama, se obtienen las Curvas Números, para cada periodo de retorno analizado, que se presenta en el Cuadro 4-73.

CUADRO 4-73: VALORES DE CURVAS NÚMERO ADOPTADOS – CUENCA RÍO VILAMA

T	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Precipitación en 24 h (mm)	13.7	24.5	31.7	40.7	47.4	54.1	60.7	69.5	76.1
Io (abstracción inicial) (mm)	3.7	6.7	8.7	11.1	12.8	14.5	16.1	18.1	19.5
CN (II) de tabla SCS	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0	86.0
CN (II) variable (saavedra y Stowhas)	85.6	76.7	71.8	66.6	63.2	60.3	57.8	55.0	53.1
CN (III) variable (saavedra y Stowhas)	93.2	88.4	85.4	82.1	79.8	77.8	75.9	73.7	72.3
Valor adoptado para CN	93.2	88.4	85.4	82.1	79.8	77.8	75.9	73.7	72.3

Fuente: Elaboración propia

b) Hietogramas de Diseño

En este caso el hietograma de diseño utilizando la Distribución Centrada de Endesa (Benítez, 1969), aplicada a la cuenca del río Vilama, para distintos períodos de retorno, se presenta en el Cuadro 4-74.

CUADRO 4-74: VALORES PRECIPITACIÓN ACUMULADA (ENDESA) – CUENCA RÍO VILAMA

%tiempo acumulado	% Pp acumulada	Precipitación (mm)								
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	6.9	0.9	1.7	2.2	2.8	3.3	3.7	4.2	4.8	5.2
20	15.2	2.1	3.7	4.8	6.2	7.2	8.2	9.2	10.6	11.6
30	25.6	3.5	6.3	8.1	10.4	12.1	13.8	15.5	17.8	19.5
40	38.2	5.2	9.4	12.1	15.6	18.1	20.7	23.2	26.5	29.1
50	51.9	7.1	12.7	16.4	21.1	24.6	28.1	31.5	36.1	39.5
60	66.1	9.1	16.2	20.9	26.9	31.3	35.7	40.1	45.9	50.3
70	77.7	10.6	19.0	24.6	31.6	36.8	42.0	47.2	54.0	59.1
80	87.2	11.9	21.4	27.6	35.5	41.4	47.2	52.9	60.6	66.3
90	94.7	13.0	23.2	30.0	38.6	44.9	51.2	57.5	65.8	72.1
100	100.0	13.7	24.5	31.7	40.7	47.4	54.1	60.7	69.5	76.1

Fuente: Elaboración propia.

Con la tabla anterior extendida para una lluvia de duración igual a 24 horas, considerando las abstracciones iniciales y aplicada en toda la cuenca, se obtienen los hietogramas, para distintos periodos de retorno, que se presentan en el Cuadro 4-75.

CUADRO 4-75: HIETOGRAMAS DE DISEÑO – CUENCA RÍO VILAMA

Tiempo	% Pp efectiva	Precipitación efectiva (mm*Km2)								
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años
0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	3.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	3.46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	3.63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	4.33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	4.33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	5.07	2.9	4.3	5.4	7.5	9.9	13.4	18.4	28.1	38.6
9	5.25	20.7	35.4	45.4	59.6	71.8	86.0	102.4	128.3	151.5
10	5.43	40.7	70.9	91.3	118.6	140.8	165.0	191.6	231.2	264.9
11	5.71	61.5	108.1	139.3	180.5	213.1	247.7	284.9	338.9	383.8
12	5.71	78.8	138.9	179.1	231.7	272.8	315.9	361.5	426.7	480.1
13	5.92	98.0	173.2	223.4	288.6	339.2	391.8	447.0	525.0	588.2
14	5.92	112.9	199.8	257.8	333.0	390.8	450.6	513.0	600.4	670.7
15	5.27	111.8	198.2	255.7	330.1	387.1	445.8	506.8	591.7	659.5
16	4.83	111.2	197.2	254.5	328.4	384.9	442.9	502.9	586.1	652.4
17	4.66	114.3	202.9	261.8	337.8	395.7	455.0	516.2	600.8	667.9
18	3.96	102.2	181.6	234.4	302.2	354.0	406.8	461.2	536.2	595.6
19	3.96	106.7	189.5	244.6	315.4	369.2	424.1	480.6	558.3	619.6
20	3.29	91.9	163.2	210.7	271.7	318.0	365.1	413.6	480.1	532.5
21	3.13	89.7	159.5	205.9	265.4	310.6	356.6	403.8	468.4	519.2
22	2.76	81.1	144.3	186.3	240.1	280.9	322.4	365.0	423.2	468.9
23	2.21	66.2	117.8	152.1	196.0	229.3	263.1	297.7	345.1	382.3
24	2.21	67.3	119.7	154.6	199.2	233.0	267.4	302.5	350.5	388.2

Fuente: Elaboración propia

c) Cálculo de los hidrogramas unitarios y totales para distintos períodos de retorno

En este caso, el Cuadro 4-76 presenta los parámetros característicos del HUS determinado para la cuenca del río Vilama.

CUADRO 4-76: PARÁMETROS CARCATERÍSTICOS HUS – CUENCA RÍO VILAMA

Datos		Parámetros HUS		Parámetros HUS - Corregidos	
A (Km2)	1451	tp [hr]	16.98	tp [hr]	16.46
So	0.183	tb [hr]	52.6	tb [hr]	51.2
LCg (Km)	51.4	qp [lt/s/mm*km2]	15.13	qp [lt/s/mm*km2]	15.51
LC (Km)	99.4	tu [hr]	3.09	tu [hr]	1.00

Fuente: Elaboración propia

A partir de los valores de la tabla anterior y con la distribución de valores del hidrograma adimensional, se define la forma del HUS para la cuenca del río Vilama, la que se muestra en el Cuadro 4-77.

CUADRO 4-77: HUS – CUENCA RÍO VILAMA

Hidrograma Adimensional		HUS- Vilama	
t/tp	q/qp	t (Horas)	qp (lt/s/mm*km2)
0	0	0	0
0.3	0.2	2.9	4.7
0.5	0.4	4.9	9.4
0.6	0.6	5.9	14.0
0.75	0.8	7.4	18.7
1	1	9.8	23.4
1.3	0.8	12.8	18.7
1.5	0.6	14.7	14.0
1.8	0.4	17.7	9.4
2.3	0.2	22.6	4.7
2.7	0.1	26.5	2.3
3.4	0	33.8	0.0

Fuente: Elaboración propia

Los valores anteriores extendidos a nivel horario y corregidos por volumen se presentan en el Cuadro 4-78 y Figura 4-64.

CUADRO 4-78: HU CORREGIDO – CUENCA RÍO VILAMA

t	q	q corr	HU	t	q	q corr	HU
(horas)	lt/s/mm*km2	lt/s/mm*km2	[m3/s/mm/km2]	(horas)	lt/s/mm*km2	lt/s/mm*km2	[m3/s/mm/km2]
0	0.000	0.000	0.000	17	10.414	9.872	0.010
1	1.590	1.508	0.002	18	9.040	8.569	0.009
2	3.181	3.015	0.003	19	8.085	7.665	0.008
3	4.816	4.566	0.005	20	7.131	6.760	0.007
4	7.202	6.827	0.007	21	6.177	5.855	0.006
5	9.812	9.302	0.009	22	5.222	4.951	0.005
6	14.404	13.655	0.014	23	4.423	4.193	0.004
7	17.585	16.670	0.017	24	3.827	3.628	0.004
8	19.950	18.912	0.019	25	3.230	3.062	0.003
9	21.859	20.721	0.021	26	2.634	2.497	0.002
10	23.108	21.906	0.022	27	2.178	2.065	0.002
11	21.518	20.398	0.020	28	1.857	1.761	0.002
12	19.927	18.890	0.019	29	1.537	1.457	0.001
13	18.142	17.198	0.017	30	1.217	1.153	0.001
14	15.756	14.936	0.015	31	0.896	0.850	0.001
15	13.595	12.888	0.013	32	0.576	0.546	0.001
16	12.005	11.380	0.011	33	0.256	0.242	0.000

Fuente: Elaboración propia

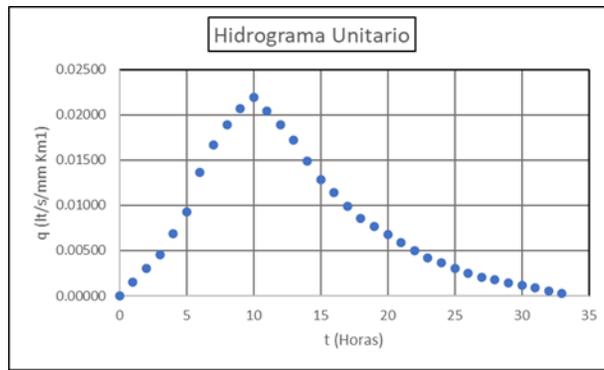


FIGURA 4-64: HUS – CUENCA RÍO VILAMA

Fuente: Elaboración propia

Con el hidrograma unitario definido y el hietograma establecido para distinto periodos de retorno, se calculó mediante un proceso de convolución el hidrograma total para la cuenca del río Vilama, que se presenta en la Figura 4-65 y Cuadro 4-79.

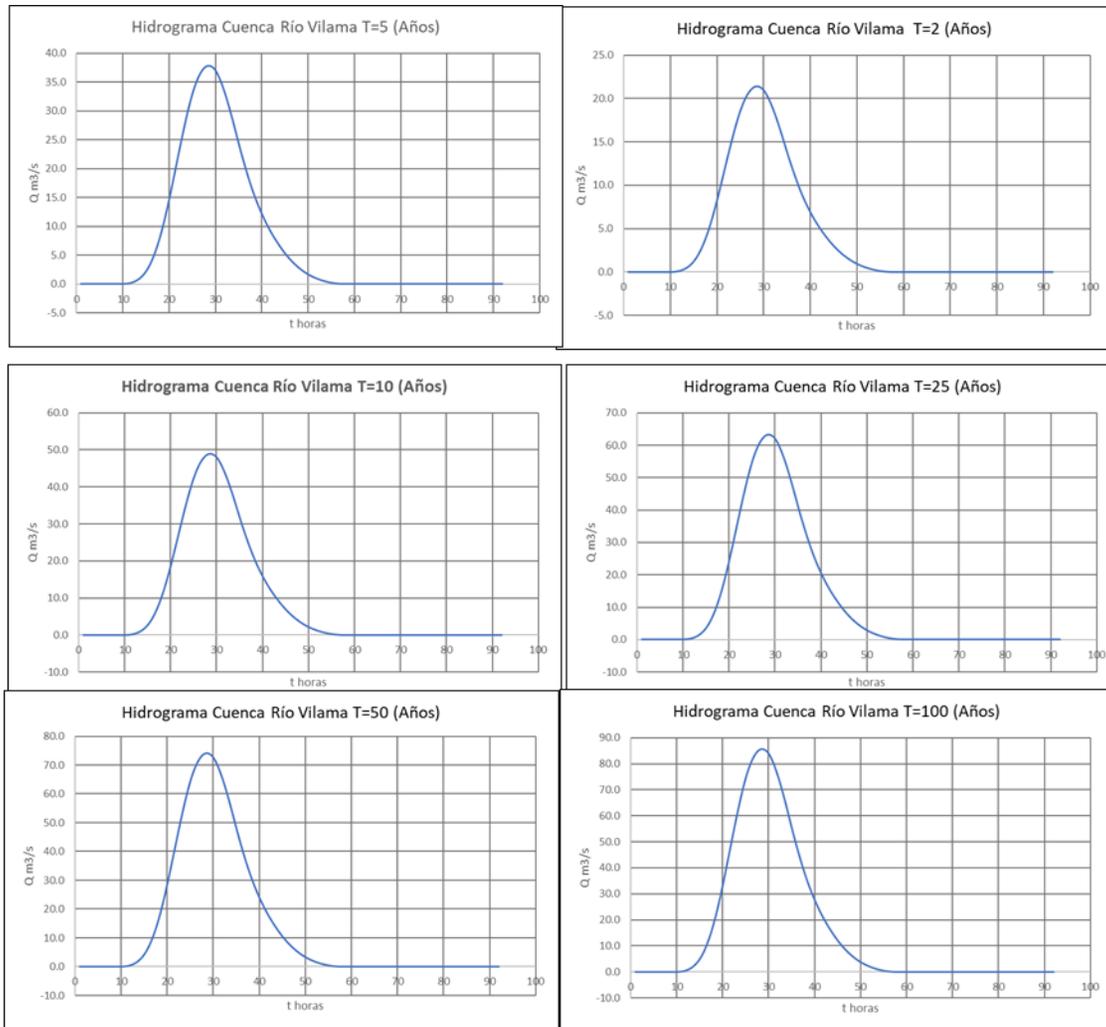


FIGURA 4-65: HIDROGRAMAS PARA DISTINTOS T(AÑOS) – CUENCA RÍO VILAMA

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-79: HIDROGRAMA TOTAL PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO – CUENCA RÍO VILAMA

t (Horas)	Precipitación efectiva (mm*Km2)									t (Horas)	Precipitación efectiva (mm*Km2)								
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años	T=500 años	T=1000 años
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31	19.5	34.6	44.6	57.6	67.5	77.7	88.2	102.9	114.6
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32	18.3	32.4	41.9	54.0	63.3	72.8	82.7	96.5	107.4
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33	16.8	29.9	38.5	49.7	58.3	67.0	76.1	88.7	98.8
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34	15.2	27.0	34.8	44.9	52.6	60.5	68.7	80.1	89.1
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35	13.5	23.9	30.9	39.8	46.7	53.7	60.9	71.0	79.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	36	11.9	21.0	27.2	35.0	41.1	47.2	53.6	62.5	69.5
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37	10.4	18.4	23.7	30.6	35.9	41.2	46.8	54.5	60.7
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38	9.0	15.9	20.6	26.5	31.1	35.8	40.6	47.3	52.6
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	39	7.8	13.8	17.8	23.0	27.0	31.0	35.2	41.0	45.6
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	40	6.7	11.9	15.4	19.9	23.3	26.8	30.4	35.4	39.4
11	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	41	5.8	10.3	13.3	17.1	20.1	23.1	26.2	30.5	33.9
12	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	42	5.0	8.8	11.4	14.7	17.2	19.8	22.4	26.1	29.0
13	0.3	0.6	0.7	1.0	1.1	1.4	1.6	2.0	2.3	43	4.2	7.5	9.7	12.5	14.6	16.8	19.1	22.2	24.7
14	0.7	1.1	1.5	1.9	2.3	2.7	3.1	3.9	4.5	44	3.6	6.3	8.1	10.5	12.3	14.1	16.0	18.6	20.7
15	1.2	2.0	2.6	3.4	4.1	4.8	5.6	6.8	7.8	45	2.9	5.2	6.8	8.7	10.2	11.7	13.3	15.5	17.2
16	2.0	3.4	4.4	5.7	6.8	7.9	9.2	11.1	12.8	46	2.4	4.3	5.5	7.1	8.4	9.6	10.9	12.6	14.0
17	3.0	5.3	6.8	8.8	10.5	12.2	14.1	17.0	19.4	47	2.0	3.5	4.5	5.8	6.8	7.8	8.8	10.2	11.3
18	4.4	7.7	9.9	12.9	15.2	17.7	20.4	24.5	27.8	48	1.6	2.8	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	8.1	9.0
19	6.1	10.6	13.7	17.8	21.0	24.4	28.1	33.5	38.0	49	1.2	2.2	2.8	3.6	4.2	4.8	5.5	6.3	7.0
20	8.0	14.1	18.1	23.5	27.7	32.1	36.9	43.8	49.5	50	0.9	1.6	2.1	2.7	3.2	3.7	4.2	4.8	5.4
21	10.1	17.8	22.9	29.7	35.0	40.5	46.5	55.0	62.0	51	0.7	1.2	1.6	2.0	2.4	2.7	3.1	3.6	4.0
22	12.3	21.6	27.9	36.0	42.4	49.1	56.2	66.3	74.6	52	0.5	0.9	1.1	1.5	1.7	2.0	2.2	2.6	2.9
23	14.4	25.3	32.7	42.3	49.7	57.5	65.7	77.3	86.8	53	0.3	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.5	1.8	2.0
24	16.3	28.8	37.2	48.1	56.5	65.3	74.5	87.5	98.1	54	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.3
25	18.0	31.9	41.1	53.1	62.4	72.0	82.1	96.3	107.7	55	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7
26	19.3	34.2	44.1	57.0	66.9	77.2	87.9	102.9	115.1	56	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
27	20.2	35.8	46.2	59.7	70.0	80.7	91.8	107.4	120.0	57	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
28	20.7	36.7	47.3	61.1	71.7	82.6	93.9	109.8	122.5	58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	20.7	36.8	47.4	61.2	71.8	82.7	94.0	109.8	122.4	59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	20.4	36.1	46.6	60.1	70.5	81.2	92.2	107.6	119.9	60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el Cuadro 4-80, presenta los resultados de caudales máximos instantáneos, para duraciones de lluvias iguales a 24 horas y periodos de retorno T=2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, obtenidos con el método del HUS.

CUADRO 4-80: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS

T (Años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Qmax [m3/s]	20.74	36.76	47.43	61.22	71.80	82.70	94.02	109.78	122.48
t Qmax [hr]	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	28.00	28.00

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.6. Método basado en el modelo SWMM-5

Este método utilizando el modelo SWMM-5 de la EPA, se basa en estructurar la cuenca en sub-cuencas, nodos y ductos (cauces). Lo anterior de efectuó, tanto para el río San Pedro como para el río Vilama.

En este caso, para definir la distribución temporal de las tormentas se utilizó el método de los Bloques Alternos o Método de Chicago (US Corp of Engineers) con un intervalo de 15 minutos y una duración total de 24 horas.

También es necesario definir otros parámetros tales como: las características de los sistemas de abstracciones o pérdidas de precipitación, rugosidades de las superficies, alturas de los almacenamientos, etc.

A continuación se detallarán la forma como se aplicó, en forma semi-agregada, el modelo para las cuencas de los ríos San Pedro y Vilma.

a) Características de las Subcuencas de los ríos San Pedro y Vilama

La Figura 4-66, presenta un esquema de la red de drenaje de las cuencas estudiadas. Del mismo modo el Cuadro 5-80, presenta, para cada cuenca, las subcuencas consideradas, con sus superficies y demás relaciones geométricas requeridas por el modelo.

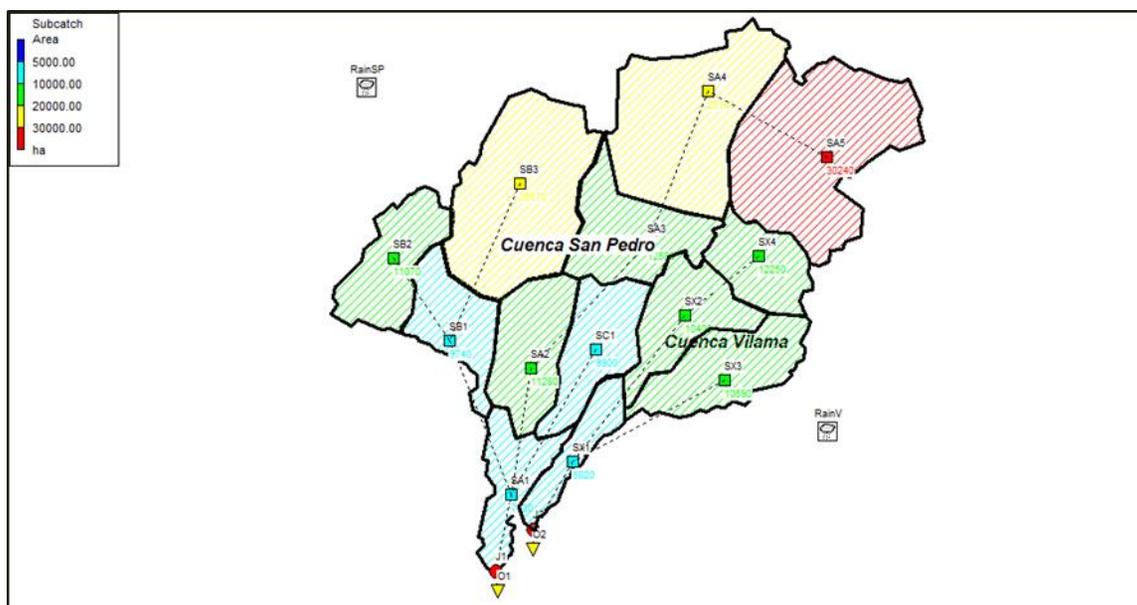


FIGURA 4-66: REPRESENTACIÓN CUENCAS RÍOS SAN PEDRO Y VILAMA – MODELO SWMM

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-81: CARACTERÍSTICAS DE LAS SUBCUENCAS RÍOS SAN PEDRO Y VAILAMA - SWMM

Cuenca Río San Pedro							
Subcuenca	Salida	Area	Ancho	Pendiente	% Imperm.	N-Imperm.	N-Perm.
Nº	Nº	(Ha)	(m)	(%)	(%)		
SA1	J1	7530	3980	13.7	5	0.04	0.025
SA2	SA1	11280	4490	26.3	5	0.04	0.025
SA3	SA2	12580	7800	24.1	5	0.04	0.025
SA4	SA3	26180	8870	15.1	5	0.04	0.025
SA5	SA4	30240	11970	22.7	5	0.04	0.025
SB1	SA1	9740	5270	18.2	5	0.04	0.025
SB2	SB1	11070	7160	10.6	5	0.04	0.025
SB3	SB1	26670	5170	16.1	5	0.04	0.025
SC1	SA1	9900	6330	14.2	5	0.04	0.025
Cuenca Río Vilana							
Subcuenca	Salida	Area	Ancho	Pendiente	% Imperm.	N-Imperm.	N-Perm.
Nº	Nº	(Ha)	(m)	(%)	(%)		
SX1	J2	5820	2940	13.1	5	0.04	0.025
SX2	SX1	10400	5860	17.5	5	0.04	0.025
SX3	SX1	10590	6350	26.4	5	0.04	0.025
SX4	SX2	12250	12400	26.3	5	0.04	0.025

Fuente: Elaboración propia

Las Curvas Número utilizadas para la modelación, se presentan en el Cuadro 4-82. Estos valores corresponde a los calculados mediante la expresión propuesta por C. Saavedra y L. Stowhas, 2003, variables con el periodo de retorno y bajo la condición de humedad (CN(II)).

CUADRO 4-82: CURVAS NÚMERO UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN SWMM

Cuenca	CN					
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Río San Pedro	82.35	72.17	66.82	61.31	57.97	55.17
Río Vilama	85.62	76.75	71.85	66.58	63.24	60.34

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presentarán los hietogramas utilizados en cada cuenca y los resultados de la aplicación del modelo SWMM para las cuencas separadas.

Cuenca río San Pedro

a) Hietogramas de diseño

En las Figura 4-67 hasta la Figura 4-72 se presentan las formas de los hietogramas definidos. Del mismo modo, en el Cuadro 4-83 se presentan los valores horarios de los hietogramas.

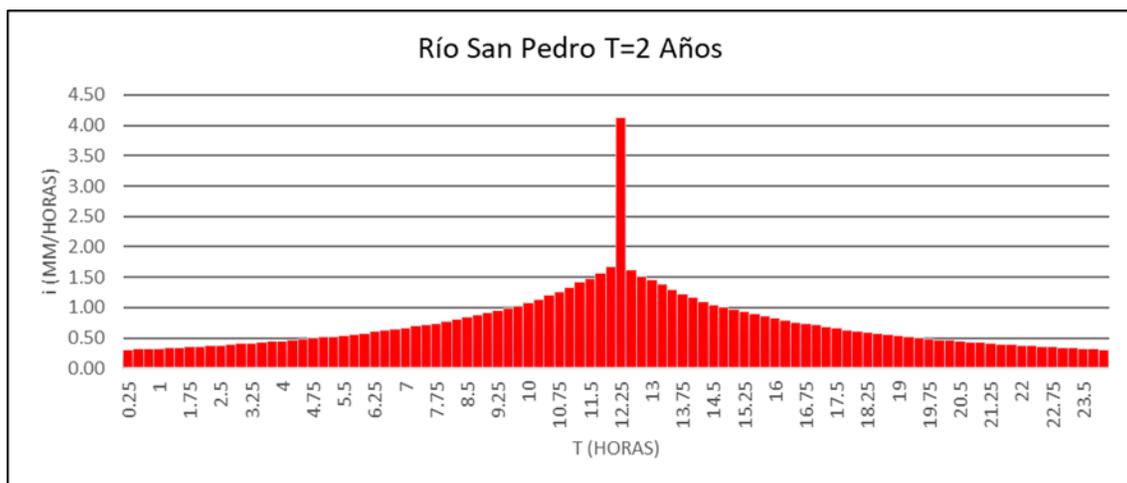


FIGURA 4-67: RÍO SAN PEDRO - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=2 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

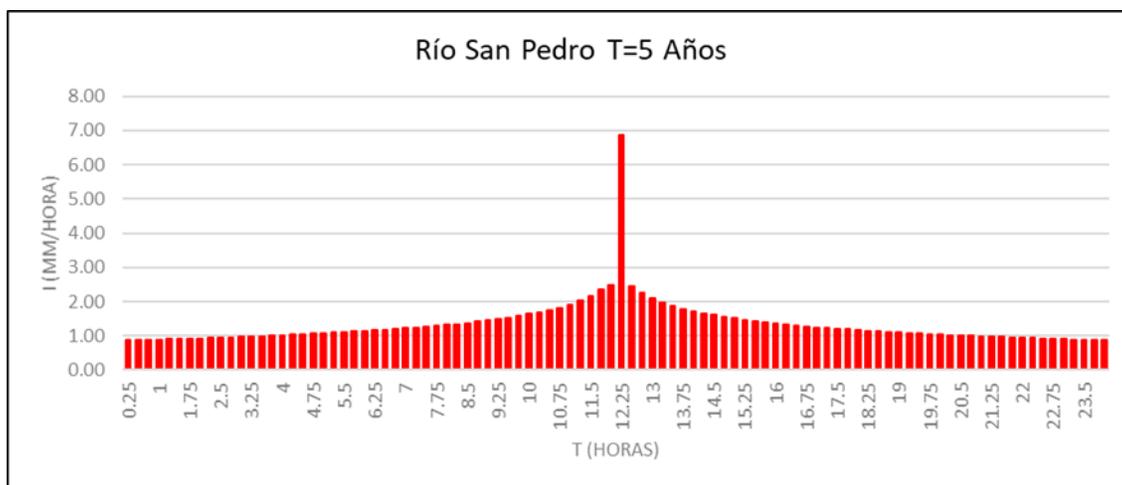


FIGURA 4-68: RÍO SAN PEDRO - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=5 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

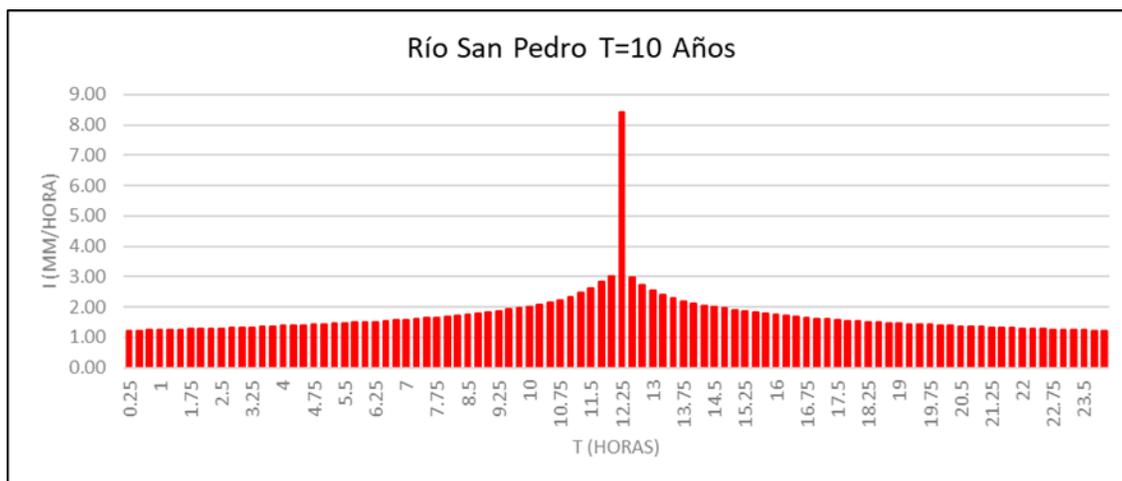


FIGURA 4-69: RÍO SAN PEDRO - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=10 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

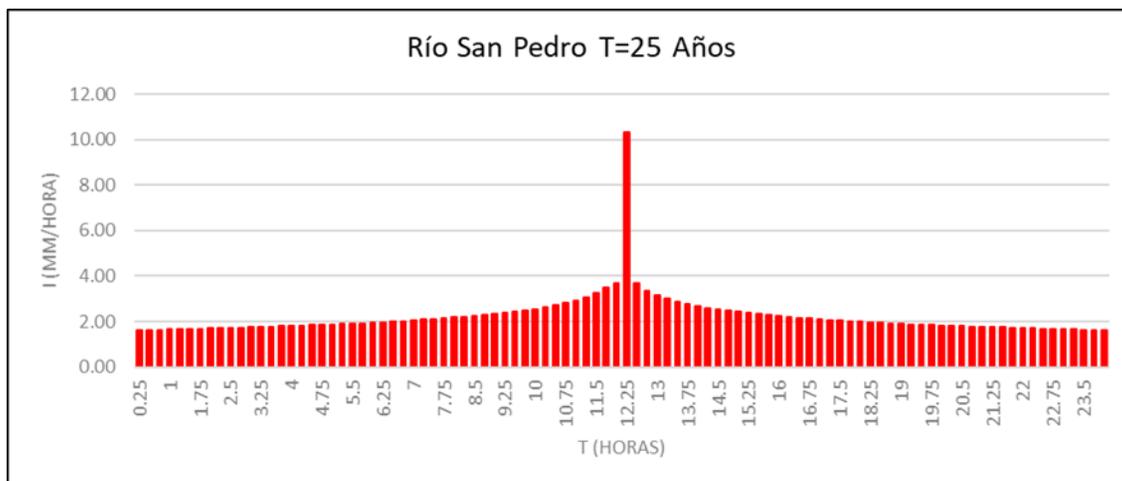


FIGURA 4-70: RÍO SAN PEDRO - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=25 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

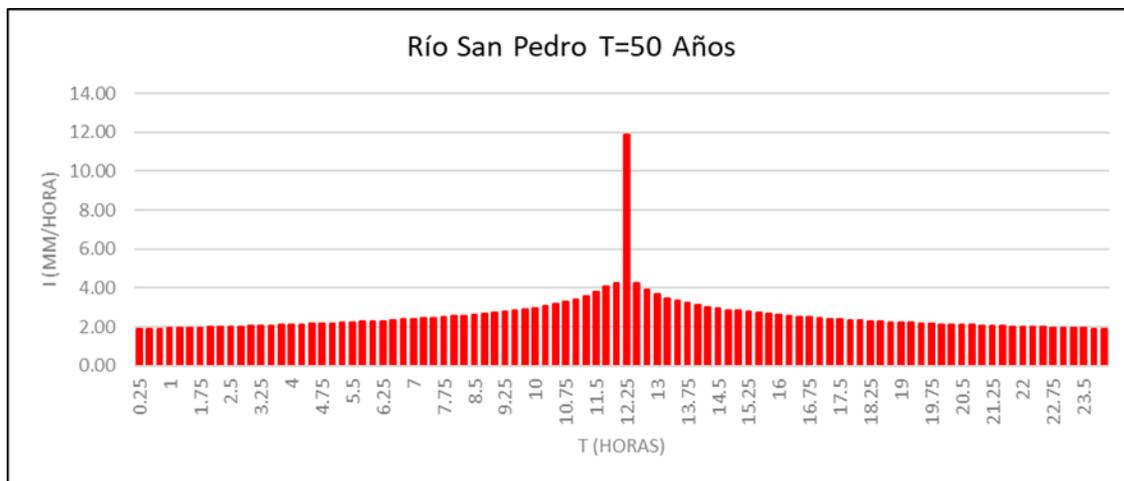


FIGURA 4-71: RÍO SAN PEDRO - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=50 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

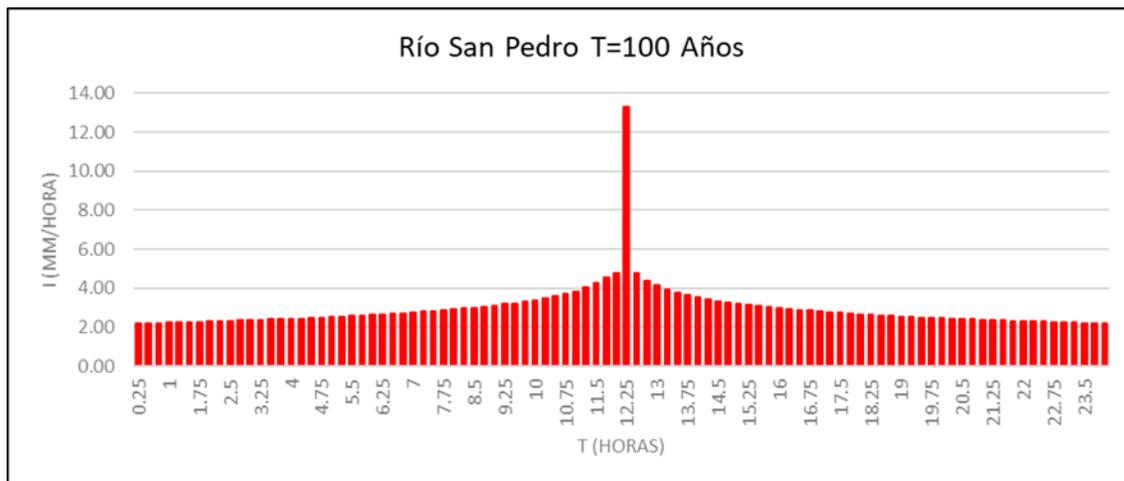


FIGURA 4-72: SAN PEDRO - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=100 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-83: RÍO SAN PEDRO - VALORES HORARIOS DE LOS HIETOGRAMAS

T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
t (horas)	I (mm/hora)									t (horas)	I (mm/hora)								
0.25	0.301	0.841	1.180	1.569	1.836	2.123	2.262	2.588	2.835	12.25	4.021	6.677	8.192	10.055	11.538	12.946	15.707	17.971	19.683
0.50	0.308	0.849	1.188	1.579	1.847	2.136	2.279	2.607	2.855	12.50	1.573	2.386	2.890	3.571	4.123	4.626	5.541	6.340	6.944
0.75	0.315	0.857	1.197	1.589	1.860	2.149	2.295	2.626	2.876	12.75	1.473	2.198	2.641	3.281	3.801	4.273	5.064	5.794	6.345
1.00	0.323	0.865	1.206	1.600	1.872	2.163	2.313	2.646	2.898	13.00	1.427	2.041	2.465	3.076	3.568	4.018	4.725	5.406	5.921
1.25	0.331	0.873	1.215	1.611	1.885	2.177	2.330	2.666	2.920	13.25	1.343	1.918	2.329	2.919	3.390	3.822	4.466	5.110	5.596
1.50	0.339	0.882	1.225	1.623	1.898	2.192	2.348	2.687	2.943	13.50	1.267	1.818	2.220	2.792	3.245	3.665	4.257	4.871	5.335
1.75	0.347	0.891	1.235	1.634	1.912	2.207	2.367	2.708	2.966	13.75	1.198	1.734	2.130	2.687	3.125	3.533	4.084	4.672	5.117
2.00	0.356	0.900	1.245	1.646	1.926	2.222	2.386	2.731	2.991	14.00	1.135	1.662	2.053	2.597	3.022	3.421	3.936	4.503	4.932
2.25	0.365	0.910	1.255	1.659	1.940	2.238	2.406	2.753	3.016	14.25	1.077	1.600	1.986	2.519	2.933	3.324	3.807	4.356	4.771
2.50	0.375	0.920	1.266	1.672	1.955	2.255	2.427	2.777	3.041	14.50	1.025	1.570	1.955	2.451	2.854	3.238	3.749	4.289	4.698
2.75	0.385	0.930	1.277	1.685	1.971	2.271	2.448	2.801	3.068	14.75	0.976	1.518	1.900	2.409	2.784	3.161	3.642	4.168	4.564
3.00	0.395	0.941	1.288	1.699	1.987	2.289	2.470	2.826	3.096	15.00	0.953	1.471	1.850	2.361	2.751	3.102	3.547	4.058	4.445
3.25	0.406	0.952	1.300	1.713	2.003	2.307	2.493	2.853	3.124	15.25	0.910	1.428	1.805	2.308	2.691	3.059	3.461	3.960	4.337
3.50	0.418	0.963	1.313	1.728	2.020	2.326	2.517	2.879	3.154	15.50	0.870	1.389	1.764	2.261	2.636	2.999	3.382	3.870	4.238
3.75	0.430	0.975	1.325	1.743	2.038	2.335	2.541	2.907	3.184	15.75	0.832	1.354	1.727	2.217	2.585	2.944	3.310	3.787	4.148
4.00	0.442	0.988	1.339	1.759	2.056	2.355	2.566	2.936	3.216	16.00	0.798	1.321	1.692	2.176	2.538	2.893	3.244	3.712	4.065
4.25	0.455	1.000	1.352	1.775	2.075	2.375	2.593	2.967	3.249	16.25	0.765	1.290	1.660	2.138	2.495	2.846	3.183	3.641	3.988
4.50	0.469	1.014	1.367	1.792	2.085	2.397	2.620	2.998	3.284	16.50	0.735	1.262	1.630	2.103	2.455	2.801	3.125	3.576	3.917
4.75	0.484	1.028	1.382	1.810	2.105	2.419	2.649	3.031	3.319	16.75	0.720	1.236	1.602	2.071	2.417	2.760	3.072	3.515	3.850
5.00	0.499	1.042	1.397	1.819	2.126	2.442	2.679	3.065	3.357	17.00	0.693	1.211	1.576	2.040	2.382	2.722	3.022	3.458	3.787
5.25	0.515	1.057	1.413	1.838	2.148	2.465	2.710	3.100	3.396	17.25	0.667	1.199	1.552	2.011	2.348	2.685	2.975	3.404	3.728
5.50	0.532	1.073	1.430	1.857	2.170	2.490	2.742	3.138	3.436	17.50	0.643	1.177	1.529	1.984	2.317	2.651	2.931	3.354	3.673
5.75	0.549	1.090	1.448	1.878	2.194	2.516	2.776	3.177	3.479	17.75	0.620	1.156	1.507	1.958	2.287	2.618	2.889	3.306	3.621
6.00	0.568	1.108	1.467	1.899	2.219	2.544	2.812	3.217	3.524	18.00	0.598	1.136	1.486	1.934	2.259	2.587	2.850	3.261	3.571
6.25	0.588	1.126	1.476	1.922	2.245	2.572	2.831	3.239	3.547	18.25	0.578	1.117	1.476	1.911	2.232	2.558	2.830	3.238	3.546
6.50	0.609	1.146	1.497	1.946	2.273	2.603	2.869	3.283	3.596	18.50	0.559	1.099	1.457	1.889	2.206	2.530	2.794	3.197	3.501
6.75	0.631	1.166	1.518	1.971	2.302	2.634	2.910	3.329	3.646	18.75	0.540	1.082	1.439	1.868	2.182	2.503	2.759	3.157	3.457
7.00	0.655	1.188	1.540	1.997	2.332	2.668	2.953	3.379	3.700	19.00	0.523	1.065	1.422	1.847	2.159	2.478	2.726	3.119	3.416
7.25	0.680	1.203	1.564	2.025	2.365	2.703	2.998	3.431	3.757	19.25	0.507	1.050	1.405	1.828	2.137	2.453	2.694	3.082	3.376
7.50	0.707	1.223	1.589	2.055	2.399	2.741	3.047	3.486	3.818	19.50	0.491	1.035	1.389	1.812	2.115	2.430	2.664	3.048	3.338
7.75	0.724	1.249	1.616	2.087	2.436	2.780	3.098	3.545	3.883	19.75	0.476	1.021	1.374	1.801	2.095	2.407	2.634	3.014	3.301
8.00	0.750	1.276	1.645	2.121	2.475	2.823	3.154	3.608	3.952	20.00	0.462	1.007	1.359	1.783	2.079	2.386	2.606	2.982	3.266
8.25	0.781	1.305	1.676	2.157	2.516	2.869	3.213	3.676	4.026	20.25	0.449	0.994	1.345	1.767	2.065	2.365	2.580	2.951	3.232
8.50	0.815	1.337	1.709	2.196	2.561	2.918	3.276	3.749	4.106	20.50	0.436	0.981	1.332	1.751	2.047	2.345	2.554	2.922	3.200
8.75	0.851	1.371	1.745	2.238	2.610	2.971	3.345	3.828	4.192	20.75	0.424	0.969	1.319	1.735	2.029	2.333	2.529	2.893	3.169
9.00	0.889	1.408	1.784	2.284	2.663	3.028	3.421	3.914	4.286	21.00	0.412	0.958	1.306	1.720	2.011	2.316	2.505	2.866	3.139
9.25	0.931	1.449	1.827	2.334	2.720	3.091	3.503	4.008	4.389	21.25	0.401	0.946	1.294	1.706	1.995	2.298	2.482	2.839	3.110
9.50	0.963	1.494	1.874	2.389	2.764	3.125	3.593	4.111	4.503	21.50	0.390	0.936	1.283	1.692	1.979	2.280	2.459	2.814	3.082
9.75	1.000	1.543	1.927	2.419	2.818	3.198	3.694	4.227	4.629	21.75	0.380	0.925	1.271	1.678	1.963	2.263	2.438	2.789	3.055
10.00	1.050	1.599	1.963	2.484	2.892	3.279	3.763	4.306	4.716	22.00	0.370	0.915	1.261	1.665	1.948	2.246	2.417	2.765	3.028
10.25	1.106	1.629	2.018	2.557	2.976	3.371	3.869	4.427	4.849	22.25	0.361	0.905	1.250	1.653	1.933	2.230	2.396	2.742	3.003
10.50	1.166	1.697	2.090	2.641	3.072	3.475	4.007	4.584	5.021	22.50	0.352	0.896	1.240	1.640	1.919	2.214	2.377	2.719	2.978
10.75	1.232	1.774	2.173	2.738	3.183	3.596	4.167	4.767	5.221	22.75	0.343	0.887	1.230	1.628	1.905	2.199	2.358	2.698	2.955
11.00	1.304	1.866	2.272	2.853	3.314	3.740	4.356	4.984	5.459	23.00	0.335	0.878	1.220	1.617	1.892	2.185	2.339	2.676	2.931
11.25	1.384	1.976	2.393	2.993	3.474	3.914	4.588	5.249	5.749	23.25	0.327	0.869	1.211	1.606	1.878	2.170	2.321	2.656	2.909
11.50	1.437	2.114	2.546	3.171	3.676	4.136	4.882	5.586	6.118	23.50	0.319	0.861	1.202	1.595	1.866	2.156	2.304	2.636	2.887
11.75	1.521	2.296	2.753	3.412	3.949	4.435	5.279	6.040	6.615	23.75	0.311	0.853	1.193	1.584	1.853	2.143	2.287	2.617	2.866
12.00	1.627	2.412	2.927	3.593	4.129	4.633	5.612	6.422	7.033	24.00	0.304	0.845	1.184	1.574	1.841	2.129	2.270	2.598	2.845

Fuente: Elaboración propia

b) Hidrogramas y caudales de crecida

El modelo se ejecutó para las condiciones físicas indicadas, para las tormentas de diseño, de 24 horas de duración definidas anteriormente y para los distintos períodos de retorno de interés. De este modo se pudieron obtener los valores de los caudales máximos instantáneos y los hidrogramas correspondientes, los que se presentan en la Figura 4-73 hasta la Figura 4-77.

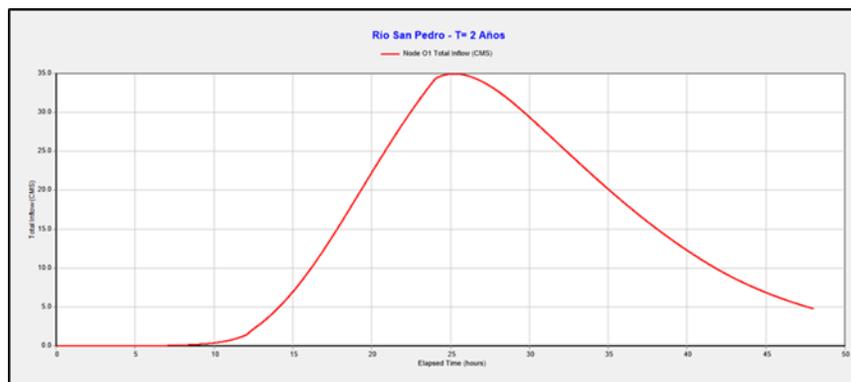


FIGURA 4-73: RÍO SAN PEDRO – HIDROGRAMA - T=2 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

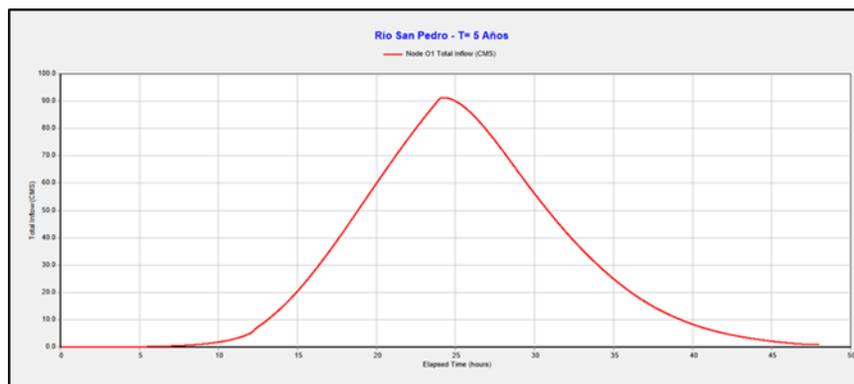


FIGURA 4-74: RÍO SAN PEDRO – HIDROGRAMA - T=5 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

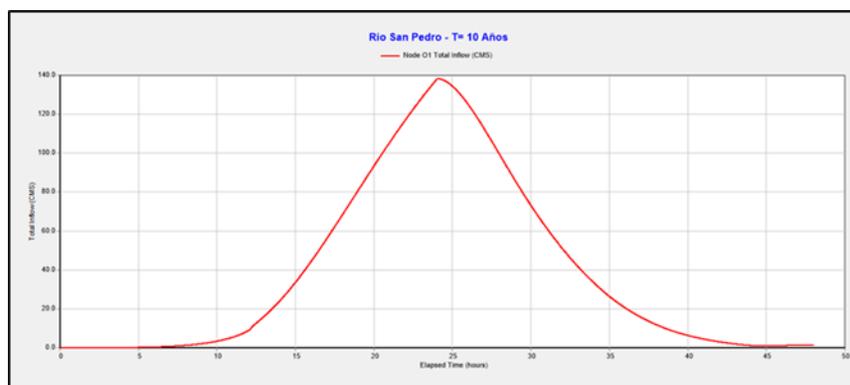


FIGURA 4-75: RÍO SAN PEDRO – HIDROGRAMA - T=10 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

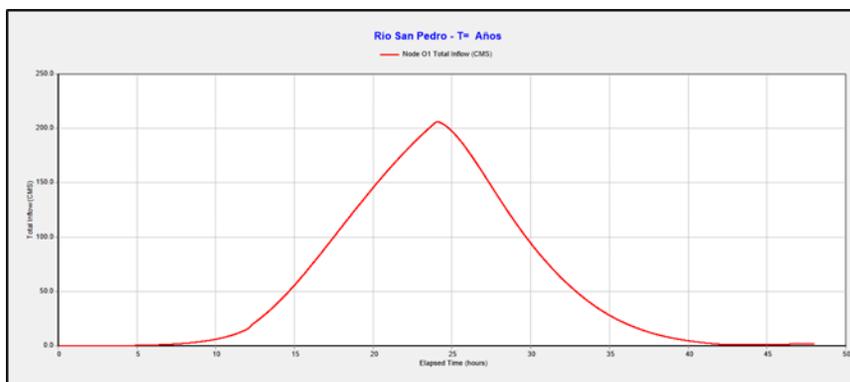


FIGURA 4-76: RÍO SAN PEDRO – HIDROGRAMA - T=25 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

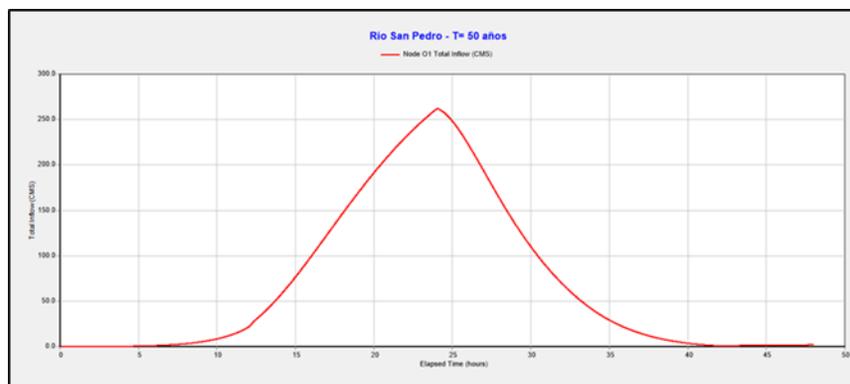


FIGURA 4-77: RÍO SAN PEDRO – HIDROGRAMA - T=50 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en el Cuadro 4-84 se presentan los valores máximos instantáneos, calculados para el río San Pedro por este método.

CUADRO 4-84: RÍO SAN PEDRO – CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS – MODELO SWMM5

T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Qmax (m3/s)	33	87	133	198	252	309	369	453	521

Fuente: Elaboración propia

Cuenca río Vilana

a) Hietogramas de diseño

La Figura 4-78 a Figura 4-83 muestran los hietogramas usas, para la cuenca del río Vilama con el modelo SWMM5.

Del mismo modo, el , presenta mas adelante los valores de los hietogramas para todos los períodos de retorno analizados.

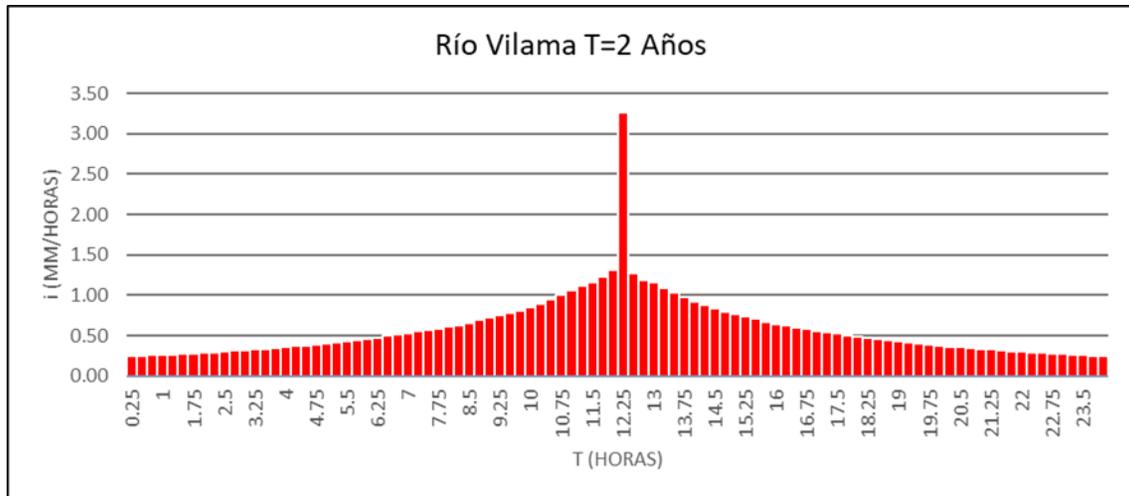


FIGURA 4-78: RÍO VILAMA - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=2 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

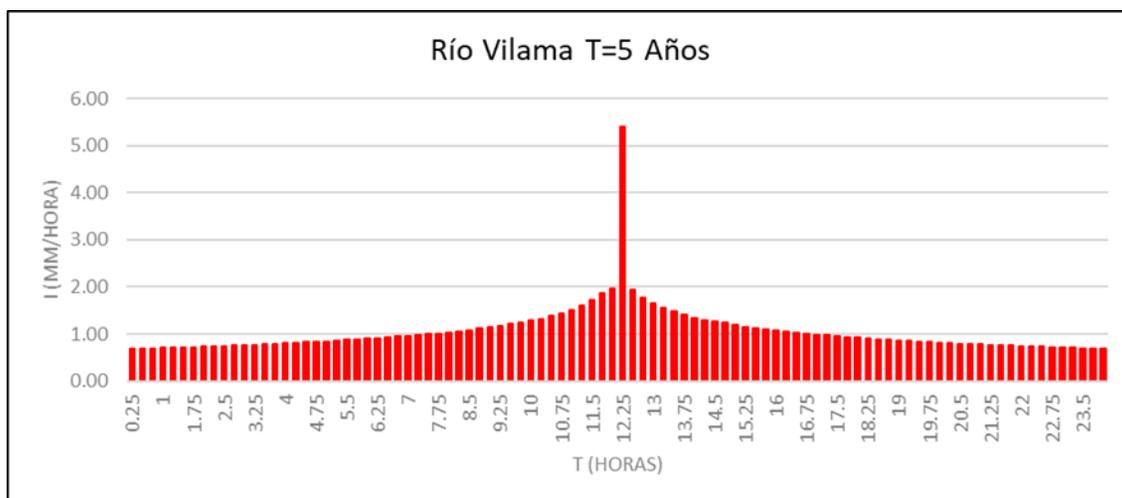


FIGURA 4-79: RÍO VILAMA - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=5 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

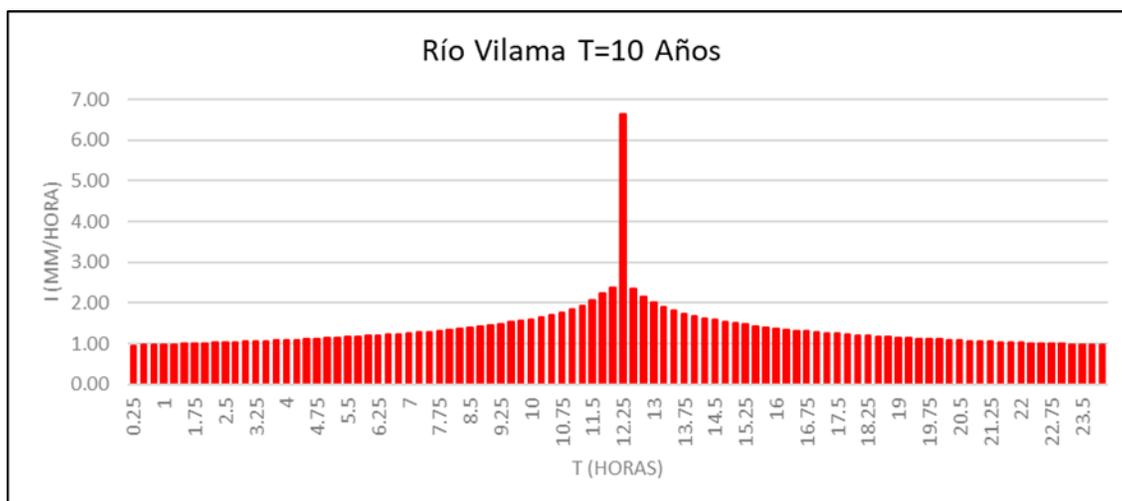


FIGURA 4-80: RÍO VILAMA - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=10 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

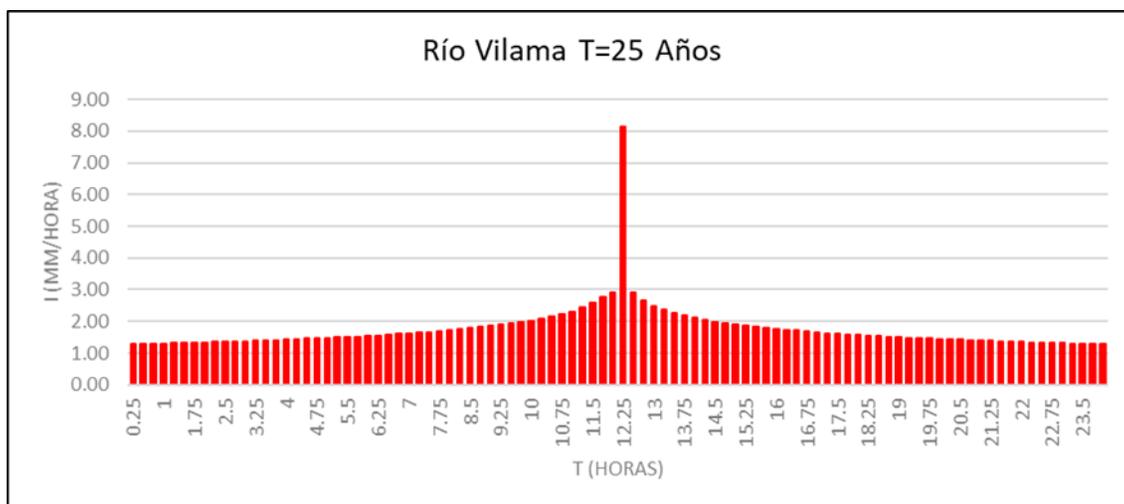


FIGURA 4-81: RÍO VILAMA - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=25 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

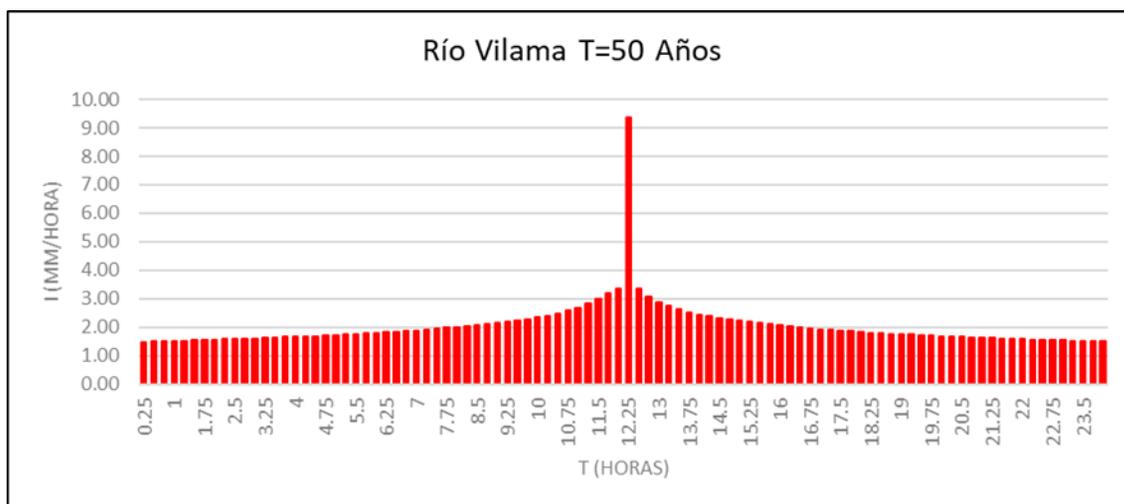


FIGURA 4-82: RÍO VILAMA - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=50 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

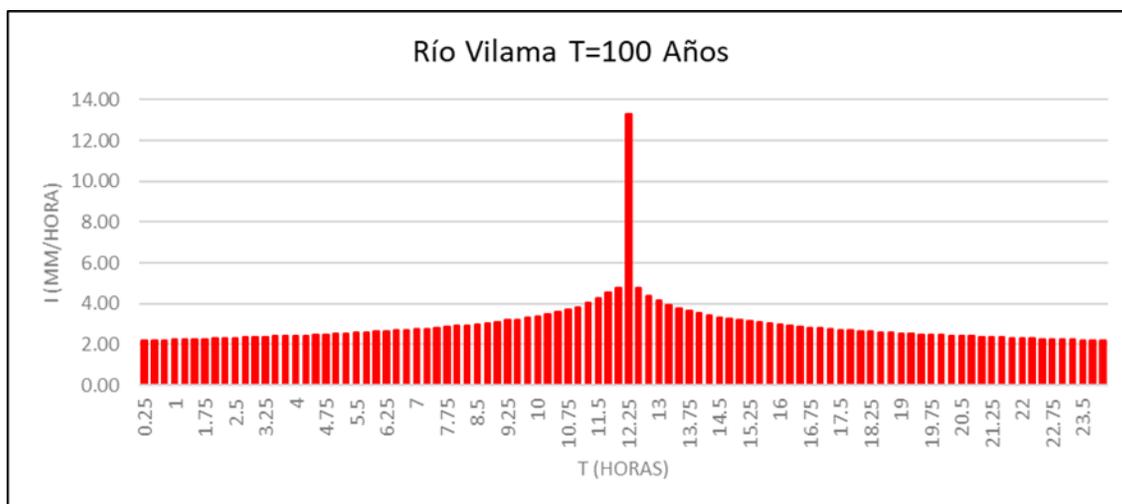


FIGURA 4-83: RÍO VILAMA - HIETOGRAMA DE DISEÑO - T=100 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

c) Hidrogramas y caudales de crecida

Al igual que para la cuenca del río San Pedro, en este caso también se ejecutó el modelo para las condiciones físicas indicadas precedentemente, para los hietogramas de diseño presentados anteriormente de 24 horas de duración, definidos anteriormente y para los distintos períodos de retorno de interés.

De este modo pudo obtener los hidrogramas correspondientes, los que se presentan en las Figura 4-84 a Figura 4-89.

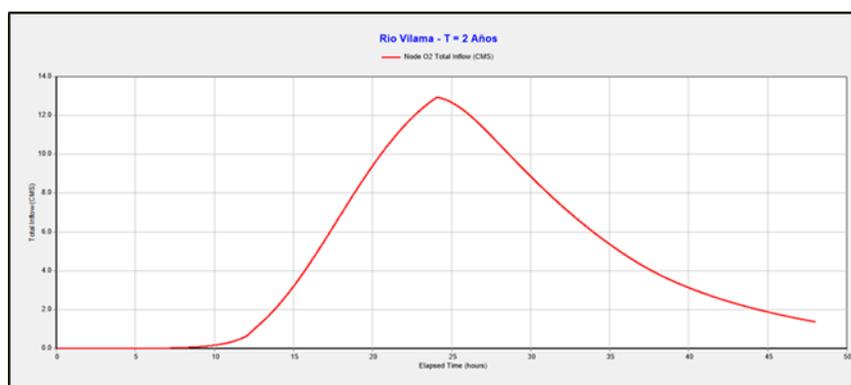


FIGURA 4-84: RÍO VILAMA – HIDROGRAMA - T=2 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-85: RÍO VILAMA - VALORES HORARIOS DE LOS HIETOGRAMAS

T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
t (horas)	I (mm/hora)									t (horas)	I (mm/hora)								
0.25	0.237	0.662	0.928	1.234	1.444	1.670	1.780	2.036	2.230	12.25	3.163	5.252	6.444	7.909	9.076	10.184	12.355	14.136	15.483
0.50	0.242	0.668	0.935	1.242	1.453	1.680	1.792	2.051	2.246	12.50	1.237	1.877	2.273	2.809	3.243	3.639	4.359	4.987	5.462
0.75	0.248	0.674	0.942	1.250	1.463	1.691	1.806	2.066	2.263	12.75	1.159	1.729	2.078	2.581	2.990	3.361	3.983	4.557	4.991
1.00	0.254	0.680	0.949	1.259	1.473	1.702	1.819	2.081	2.280	13.00	1.123	1.606	1.939	2.420	2.807	3.161	3.717	4.253	4.658
1.25	0.260	0.687	0.956	1.267	1.483	1.713	1.833	2.097	2.297	13.25	1.056	1.509	1.832	2.296	2.666	3.007	3.513	4.019	4.402
1.50	0.266	0.694	0.964	1.276	1.493	1.724	1.847	2.114	2.315	13.50	0.997	1.430	1.747	2.197	2.553	2.883	3.349	3.832	4.196
1.75	0.273	0.701	0.971	1.286	1.504	1.736	1.862	2.131	2.333	13.75	0.942	1.364	1.675	2.114	2.458	2.779	3.212	3.675	4.025
2.00	0.280	0.708	0.979	1.295	1.515	1.748	1.877	2.148	2.352	14.00	0.893	1.307	1.615	2.043	2.377	2.691	3.096	3.542	3.879
2.25	0.287	0.716	0.987	1.305	1.526	1.761	1.893	2.166	2.372	14.25	0.848	1.258	1.562	1.982	2.307	2.614	2.995	3.427	3.753
2.50	0.295	0.724	0.996	1.315	1.538	1.773	1.909	2.184	2.392	14.50	0.806	1.235	1.538	1.928	2.245	2.547	2.949	3.374	3.696
2.75	0.303	0.732	1.005	1.325	1.550	1.787	1.926	2.204	2.413	14.75	0.768	1.194	1.494	1.895	2.190	2.486	2.865	3.278	3.590
3.00	0.311	0.740	1.014	1.336	1.563	1.800	1.943	2.223	2.435	15.00	0.750	1.157	1.455	1.857	2.164	2.440	2.790	3.192	3.496
3.25	0.320	0.749	1.023	1.347	1.576	1.815	1.961	2.244	2.458	15.25	0.716	1.123	1.420	1.816	2.117	2.406	2.722	3.115	3.411
3.50	0.329	0.758	1.033	1.359	1.589	1.829	1.980	2.265	2.481	15.50	0.684	1.093	1.388	1.778	2.073	2.359	2.660	3.044	3.334
3.75	0.338	0.767	1.043	1.371	1.603	1.837	1.999	2.287	2.505	15.75	0.655	1.065	1.358	1.744	2.034	2.316	2.604	2.979	3.263
4.00	0.348	0.777	1.053	1.383	1.617	1.852	2.019	2.310	2.530	16.00	0.627	1.039	1.331	1.712	1.997	2.276	2.552	2.920	3.198
4.25	0.358	0.787	1.064	1.396	1.632	1.868	2.040	2.334	2.556	16.25	0.602	1.015	1.306	1.682	1.963	2.238	2.503	2.864	3.137
4.50	0.369	0.797	1.075	1.410	1.640	1.885	2.061	2.358	2.583	16.50	0.578	0.993	1.282	1.655	1.931	2.204	2.459	2.813	3.081
4.75	0.380	0.808	1.087	1.424	1.656	1.902	2.084	2.384	2.611	16.75	0.567	0.972	1.260	1.629	1.901	2.171	2.417	2.765	3.028
5.00	0.392	0.820	1.099	1.431	1.672	1.921	2.107	2.411	2.640	17.00	0.545	0.953	1.240	1.605	1.873	2.141	2.377	2.720	2.979
5.25	0.405	0.832	1.112	1.446	1.689	1.939	2.131	2.439	2.671	17.25	0.525	0.943	1.221	1.582	1.847	2.112	2.340	2.678	2.933
5.50	0.418	0.844	1.125	1.461	1.707	1.959	2.157	2.468	2.703	17.50	0.506	0.926	1.203	1.561	1.822	2.085	2.306	2.638	2.889
5.75	0.432	0.857	1.139	1.477	1.726	1.979	2.184	2.499	2.737	17.75	0.488	0.909	1.185	1.540	1.799	2.059	2.273	2.600	2.848
6.00	0.447	0.871	1.154	1.494	1.746	2.001	2.212	2.531	2.772	18.00	0.471	0.893	1.169	1.521	1.777	2.035	2.242	2.565	2.809
6.25	0.463	0.886	1.161	1.512	1.766	2.024	2.227	2.548	2.790	18.25	0.455	0.878	1.161	1.503	1.756	2.012	2.226	2.547	2.790
6.50	0.479	0.901	1.177	1.531	1.788	2.047	2.257	2.582	2.828	18.50	0.439	0.864	1.146	1.486	1.736	1.990	2.198	2.515	2.754
6.75	0.497	0.917	1.194	1.550	1.811	2.072	2.289	2.619	2.868	18.75	0.425	0.851	1.132	1.469	1.716	1.969	2.170	2.483	2.720
7.00	0.515	0.935	1.212	1.571	1.835	2.098	2.323	2.658	2.911	19.00	0.411	0.838	1.118	1.453	1.698	1.949	2.144	2.453	2.687
7.25	0.535	0.946	1.230	1.593	1.860	2.126	2.359	2.699	2.956	19.25	0.399	0.826	1.105	1.438	1.681	1.930	2.119	2.425	2.656
7.50	0.556	0.962	1.250	1.617	1.887	2.156	2.397	2.742	3.003	19.50	0.386	0.814	1.093	1.425	1.664	1.911	2.095	2.397	2.626
7.75	0.570	0.982	1.271	1.642	1.916	2.187	2.437	2.789	3.054	19.75	0.375	0.803	1.081	1.416	1.648	1.894	2.072	2.371	2.597
8.00	0.590	1.004	1.294	1.668	1.947	2.221	2.481	2.838	3.109	20.00	0.363	0.792	1.069	1.403	1.635	1.877	2.050	2.346	2.569
8.25	0.614	1.027	1.318	1.697	1.979	2.257	2.527	2.892	3.167	20.25	0.353	0.782	1.058	1.390	1.625	1.860	2.029	2.322	2.543
8.50	0.641	1.052	1.344	1.727	2.015	2.295	2.577	2.949	3.230	20.50	0.343	0.772	1.048	1.377	1.610	1.845	2.009	2.298	2.517
8.75	0.669	1.079	1.373	1.761	2.053	2.337	2.632	3.011	3.298	20.75	0.333	0.762	1.038	1.365	1.596	1.835	1.989	2.276	2.493
9.00	0.700	1.108	1.403	1.797	2.095	2.382	2.691	3.079	3.372	21.00	0.324	0.753	1.028	1.353	1.582	1.822	1.970	2.254	2.469
9.25	0.732	1.140	1.437	1.836	2.140	2.432	2.755	3.153	3.453	21.25	0.315	0.744	1.018	1.342	1.569	1.808	1.952	2.234	2.446
9.50	0.758	1.175	1.474	1.880	2.174	2.458	2.827	3.234	3.542	21.50	0.307	0.736	1.009	1.331	1.556	1.794	1.934	2.213	2.424
9.75	0.786	1.214	1.516	1.903	2.217	2.516	2.906	3.325	3.641	21.75	0.299	0.728	1.000	1.320	1.544	1.780	1.917	2.194	2.403
10.00	0.826	1.258	1.544	1.954	2.275	2.580	2.960	3.387	3.710	22.00	0.291	0.720	0.992	1.310	1.532	1.767	1.901	2.175	2.382
10.25	0.870	1.282	1.588	2.011	2.341	2.651	3.044	3.482	3.814	22.25	0.284	0.712	0.983	1.300	1.521	1.754	1.885	2.157	2.362
10.50	0.917	1.335	1.644	2.077	2.416	2.734	3.152	3.606	3.950	22.50	0.277	0.705	0.975	1.290	1.509	1.742	1.870	2.139	2.343
10.75	0.969	1.396	1.710	2.153	2.504	2.829	3.278	3.750	4.107	22.75	0.270	0.697	0.967	1.281	1.498	1.730	1.855	2.122	2.324
11.00	1.026	1.468	1.787	2.244	2.607	2.942	3.427	3.921	4.294	23.00	0.263	0.691	0.960	1.272	1.488	1.718	1.840	2.105	2.306
11.25	1.089	1.555	1.882	2.354	2.733	3.079	3.609	4.129	4.522	23.25	0.257	0.684	0.952	1.263	1.478	1.707	1.826	2.089	2.288
11.50	1.130	1.663	2.003	2.494	2.892	3.253	3.840	4.394	4.812	23.50	0.251	0.677	0.945	1.254	1.468	1.696	1.812	2.074	2.271
11.75	1.197	1.806	2.166	2.684	3.106	3.489	4.152	4.751	5.203	23.75	0.245	0.671	0.938	1.246	1.458	1.685	1.799	2.058	2.254
12.00	1.280	1.897	2.303	2.826	3.248	3.645	4.415	5.051	5.532	24.00	0.239	0.665	0.932	1.238	1.449	1.675	1.786	2.043	2.238

Fuente: Elaboración propia

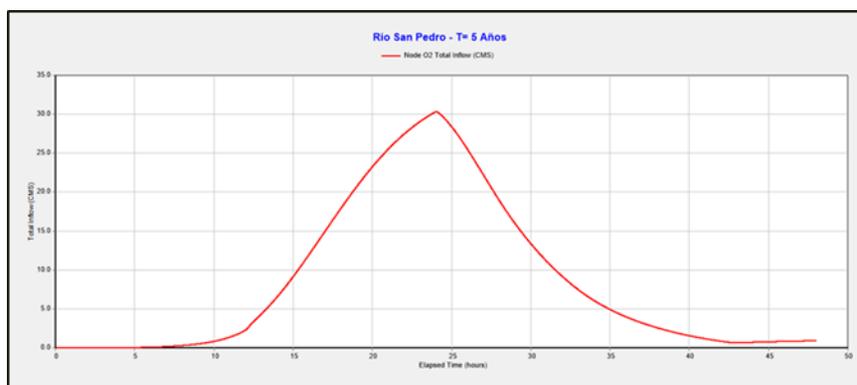


FIGURA 4-85: RÍO VILAMA – HIDROGRAMA - T=5 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

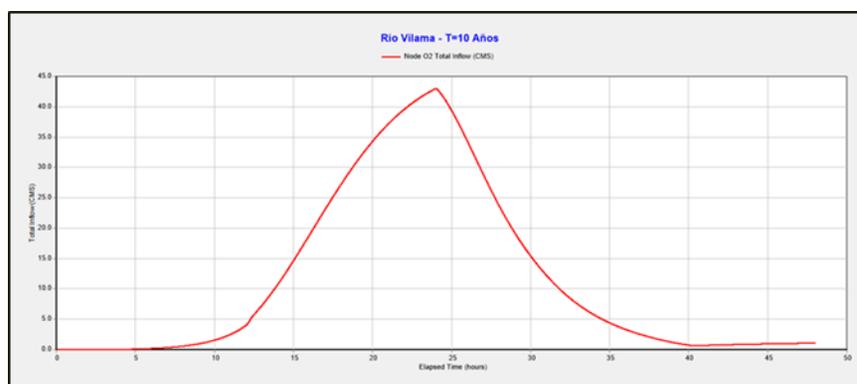


FIGURA 4-86: RÍO VILAMA – HIDROGRAMA - T=10 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

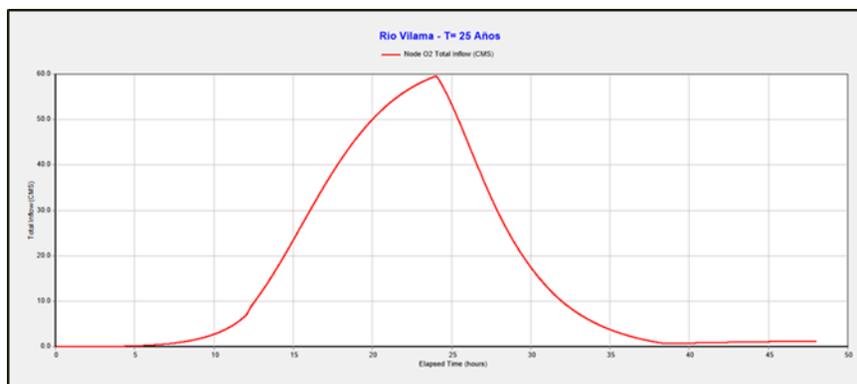


FIGURA 4-87: RÍO VILAMA – HIDROGRAMA - T=25 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

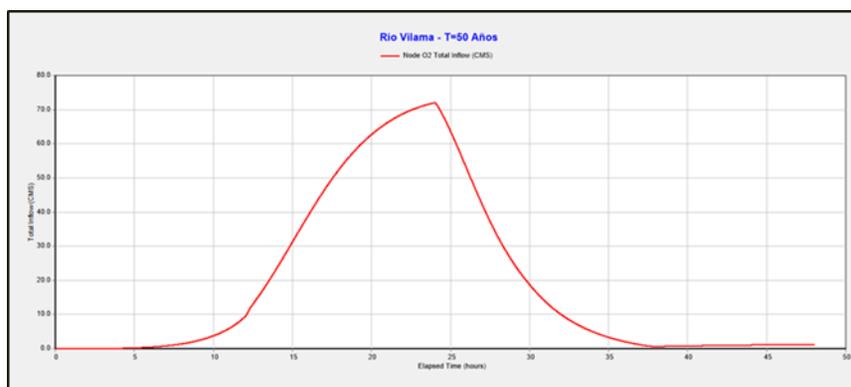


FIGURA 4-88: RÍO VILAMA – HIDROGRAMA - T=50 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

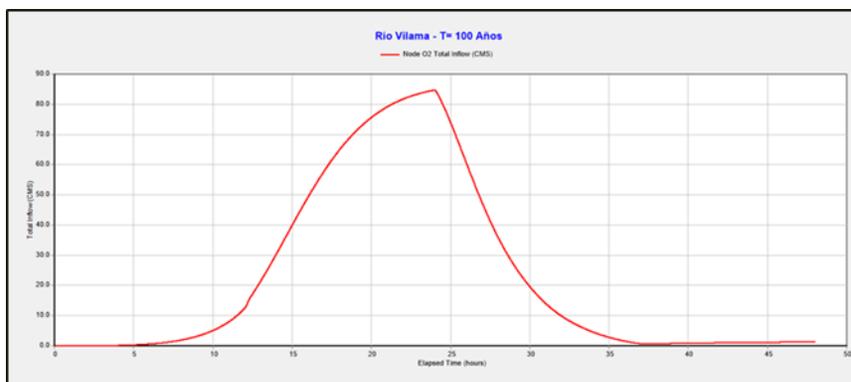


FIGURA 4-89: RÍO VILAMA – HIDROGRAMA - T=100 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en el Cuadro 4-86 se presentan los valores máximos instantáneos, calculados para el río Vilama por este método.

CUADRO 4-86: RÍO VILAMA – CAUDALES MÁXIMOS INSTANTANEOS – MODELO SWMM5

T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Qmax (m3/s)	12	29	41	57	70	82	93	110	123

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.7. Comparación de Resultados

En el Cuadro 4-87 y Cuadro 4-88 se presenta una comparación de los resultados obtenidos con los distintos métodos empleados, para los ríos San Pedro y Vilama respectivamente.

CUADRO 4-87: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS CALCULADOS PARA EL RÍO SAN PEDRO

T(Años)	Cuenca	Directo	Verni-King M	Racional M	HUS	SWMM
		(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)
2	San Pedro	5	32.5	127.9	69.7	33.0
5	San Pedro	25	68.4	235.4	123.8	87.0
10	San Pedro	51	98.9	320.0	160.6	133.0
25	San Pedro	102	154.0	452.5	209.3	198.0
50	San Pedro	152	200.6	574.6	247.9	252.0
100	San Pedro	213	253.5	682.9	288.6	309.0

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-88: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS CALCULADOS PARA EL RÍO VILAMA

T(Años)	Cuenca	Verni-King M	Racional M	HUS	SWMM
		(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)
2	Vilama	7.3	35.5	20.7	12.0
5	Vilama	50.7	66.9	36.8	29.0
10	Vilama	73.5	91.2	47.4	41.0
25	Vilama	114.2	128.7	61.2	57.0
50	Vilama	148.8	163.6	71.8	70.0
100	Vilama	188.1	194.5	82.7	82.0

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.8. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

Río San Pedro

- Para todos los períodos de retorno analizado, la Fórmula Racional Modificada (FRM) entrega valores por exceso. Lo anterior se debe a que por la extensión y tamaño de la cuenca no se cumplen las hipótesis del método y no se cuentan con parámetros validados para esta zona del país.
- Dejando de lado la FRM, se observa que los métodos entregan valores, relativamente semejantes en magnitud y para períodos de retorno inferiores a 25 años, los resultados mayores se obtienen con el método del HUS.
- Para períodos de retorno superiores a 25 años, el método HUS se asemeja en resultados al modelo SWMM5, siendo mayores los valores que calcula el modelo SWMM5.

- En general se observa una buena concordancia entre los resultados del método HUS y el modelo SWMM5.

Río Vilama

- En este caso también la Fórmula Racional Modificada, entrega los mayores valores, sin embargo en este caso los valores calculados por dicho método concuerda bastante bien con los calculados con la fórmula de Verni King Modificada (VKM).
- En todos los casos se observa una buena concordancia entre los resultados entregados por el método del HUS y el modelo SWMM5.

Finalmente, considerando que:

- La estadística de caudales registrados no está completa ya que la estación de medición se destruye para crecidas de importancia.
- La aplicación de la Fórmula Racional no es segura, ya que no se cumplen, plenamente, las hipótesis que la sustentan.
- La Fórmula de Verni-King modificada, es un método empírico no validado para la latitud de la zona en estudio.
- El método HUS, da buenos resultados por lo general, en la cuenca del río San Pedro da resultados menos conservadores.
- El modelo SWMM-5, es un modelo distribuido que representa mejor el proceso precipitación-escorrentía y es ampliamente utilizado.

Se adoptan los resultados de dicha modelación como caudales máximos para los diseños.

4.2.3.9. Caudales finales de diseño

El Cuadro 4-89 presenta los valores de caudales máximos instantáneos, en función del período de retorno, definidos para efectuar los diseños fluviales.

CUADRO 4-89: CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS DE DISEÑO

T (Años)	Río San Pedro (m ³ /s)	Río San Vilama (m ³ /s)
2	33.0	12.0
5	87.0	29.0
10	133.0	41.0
25	198.0	57.0
50	252.0	70.0
100	309.0	82.0

Figura 4-90 y Figura 4-91, presentan las curvas de frecuencia de los caudales máximos instantáneos mencionados.

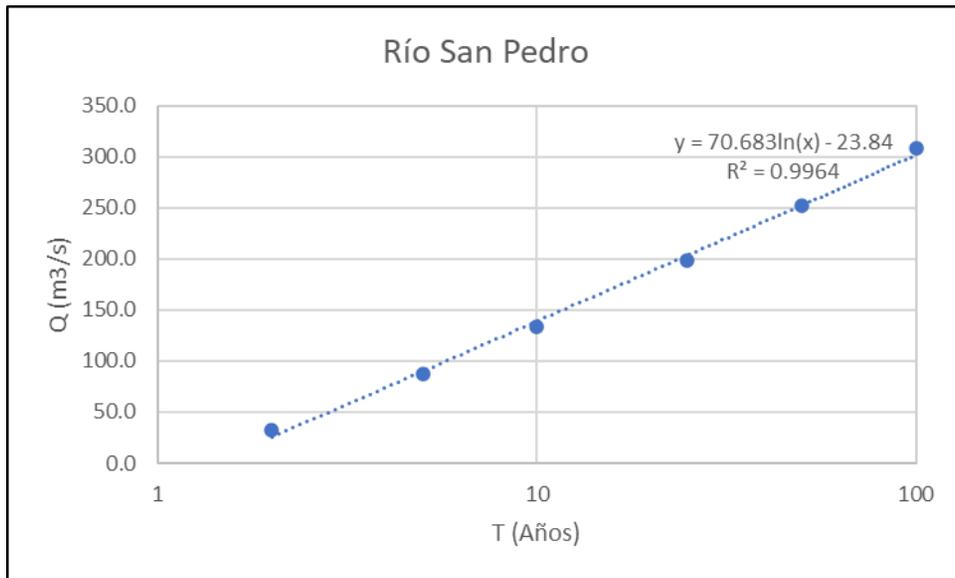


FIGURA 4-90: CURVA DE FRECUENCIA PARA EL RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia

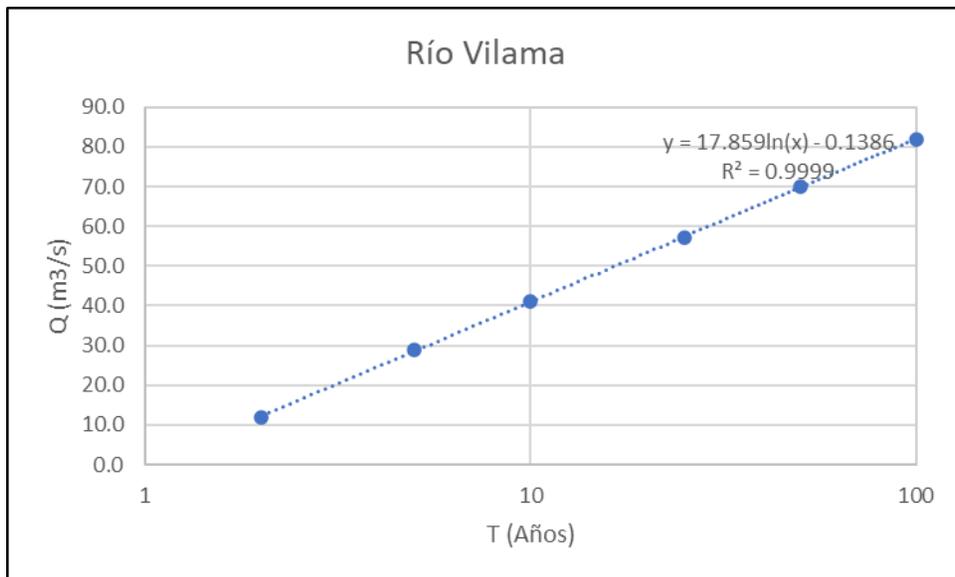


FIGURA 4-91: CURVA DE FRECUENCIA PARA EL RÍO VILAMA

Fuente: Elaboración propia

4.2.3.10. Caudales en Punto de Interés para el Estudio Fluvial

Para el estudio fluvial, estudio que permitirá definir el Plan de Manejo para los ríos San Pedro y Vilama, se requieren caudales en distintos puntos al definido como punto de salida de las cuencas de ambos ríos. Los puntos de interés se sitúan, en general en el río San Pedro y se presentan

en la siguiente Figura 4-92. A partir de dicha figura se construyó el Cuadro 4-90 y la Figura 4-93. donde se incorporan al esquema de modelación del modelo SWMM5.

En la tabla indicada, se presenta la denominación del punto, su ubicación en términos coordenadas Este y Oeste y la superficie del área total dominada por dicho punto.



FIGURA 4-92: PUNTOS DE INTERÉS EN ZONA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 4-90: PUNTOS DE INTERÉS PARA CÁLCULO DE CAUDALES

Punto	Coordenadas		Area Total [km2]
	E	S	
RSP A1	582006.0	7475147.0	1419.7
RSP A2	581114.4	7473063.2	1425.2
RSP A3	580173.1	7470859.2	1440.9
RSP A4	580075.1	7469627.4	1444.6
RSP C1	581108.7	7467908.6	1450.3
RSP C2	581469.0	7466910.0	1452.0
RSP C3	581489.0	7466422.0	1452.3
RSP C4	580175.0	7464422.0	1454.4
RSP C5	579892.0	7463497.0	1455.2
RSP B1	579074.0	7461002.0	1458.0
RSP B2	579046.1	7459684.6	1460.6

Fuente: Elaboración propia

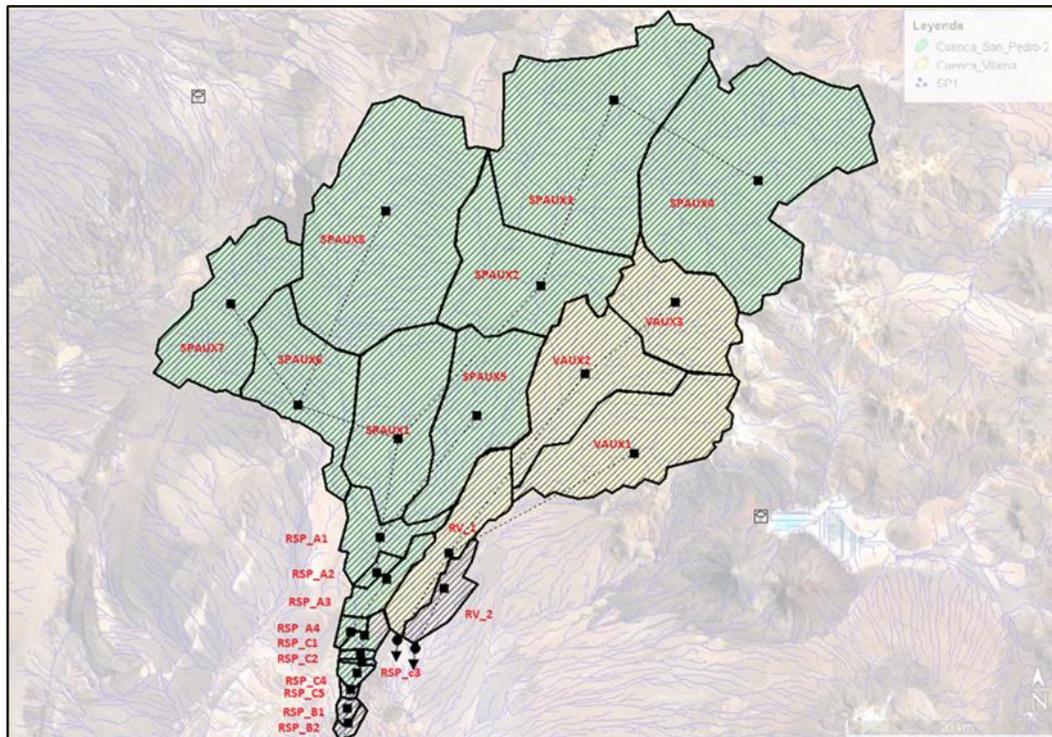


FIGURA 4-93: UBICACIÓN PUNTOS DE INTERÉS

Fuente: Elaboración propia

Dado que los puntos de interés para el análisis fluvial se encuentran muy próximos a la ubicación de la salida de las cuencas determinadas en el estudio hidrológico, se recomienda utilizar los caudales definidos en dicho estudio. No obstante, en caso de requerir una mayor precisión para las ubicaciones definidas, se utilizarán dos procedimientos. El primero se basa en la trasposición de información hidrológica en una misma cuenca, a la relación entre superficies dominadas por dichos

puntos, suponiendo que se verifica el principio de proporcionalidad. Si se cumple lo anterior, se verifica la siguiente relación:

$$\frac{Q1}{A1} = \frac{Q2}{A2}$$

Donde: Q1 : Caudal en un punto conocido.

Q2 : Caudal en un punto a determinar.

A1 : Área dominada por el punto conocido.

A2 : Área dominada por el punto a determinar.

Utilizando la relación anterior, los valores de caudales calculados mediante el modelo SWMM5 y los valores de las superficies indicadas en el Cuadro 5-89, se determina los caudales que se presentan en el Cuadro 4-91.

CUADRO 4-91: CAUDALES EN PUNTOS DE INTERÉS CALCULADOS POR TRASPOSICIÓN

Punto / T	Caudales Transpuestos con SWMM [m3/s]								
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
RSP A1	32.6	85.4	129.6	193.6	246.1	301.8	360.7	443.3	509.3
RSP A2	32.7	85.8	130.1	194.3	247.0	303.0	362.1	445.0	511.2
RSP A3	33.1	86.7	131.5	196.5	249.7	306.3	366.1	449.9	516.9
RSP A4	33.2	86.9	131.9	197.0	250.4	307.1	367.0	451.0	518.2
RSP C1	33.3	87.3	132.4	197.8	251.4	308.3	368.5	452.8	520.2
RSP C2	33.4	87.4	132.6	198.0	251.7	308.7	368.9	453.3	520.8
RSP C3	33.4	87.4	132.6	198.1	251.7	308.8	369.0	453.5	521.0
RSP C4	33.4	87.5	132.8	198.3	252.1	309.2	369.6	454.1	521.7
RSP C5	33.4	87.6	132.8	198.4	252.2	309.4	369.7	454.3	522.0
RSP B1	33.5	87.7	133.1	198.8	252.7	310.0	370.5	455.2	523.0
RSP B2	33.6	87.9	133.3	199.2	253.2	310.5	371.1	456.0	523.9

Fuente: Elaboración propia

El segundo método consiste en agregar nodos, en los lugares de interés, en el modelo SWMM5 y correr el modelo para extraer el resultado del cálculo de caudal en dichos nodos agregados. En el Cuadro 4-92 se presentan los resultados de dicho proceso.

CUADRO 4-92: CAUDALES EN PUNTOS DE INTERÉS CALCULADOS CON SWMM5

Punto / T	Caudales simulados en SWMM [m3/s]								
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
RSP A1	33.9	89.0	134.8	200.8	254.4	311.0	370.8	453.7	519.8
RSP A2	33.6	88.1	133.4	198.8	252.4	308.8	368.8	451.7	518.4
RSP A3	32.4	85.0	129.3	193.7	246.8	302.9	364.2	449.5	517.6
RSP A4	32.3	84.5	130.6	192.8	245.7	301.7	362.8	448.0	516.0
RSP C1	31.9	83.6	128.4	191.3	243.9	299.7	360.6	445.5	513.5
RSP C2	31.8	83.3	127.7	190.8	243.4	299.1	360.0	444.7	512.7
RSP C3	31.8	83.3	127.7	190.7	243.3	299.0	359.9	444.5	512.6
RSP C4	31.7	82.9	126.9	190.0	242.5	298.2	359.1	443.3	511.5
RSP C5	31.6	82.8	126.7	189.7	242.2	297.9	358.8	443.0	511.2
RSP B1	31.4	82.1	125.8	188.7	241.1	296.5	357.6	441.6	509.6
RSP B2	31.2	81.7	125.1	187.9	240.2	295.7	356.6	440.5	508.4
RV_1	12.9	30.0	42.3	58.3	70.4	82.6	94.1	110.6	123.8
RV_2	0.9	1.5	2.0	2.6	3.0	3.5	4.2	5.0	5.6

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Cálculo de Caudales de Crecidas Detríticas

Para la determinación de los caudales detríticos en las cuencas de la zona de estudio, se utilizaron dos métodos de cálculo.

- Método de Yablonskiy, Oficina de Planificación Municipal de Pekín
- Método de Takahashi.

4.2.4.1. Método de Yablonskiy

Yablonskiy et al. (1992) proponen la siguiente fórmula utilizada en regiones montañosas de Ucrania:

$$U_d = 6,06 \cdot R^{0,667} \cdot i^{0,25} \cdot \frac{2,675 - \rho_{dmx}}{2,454 - 0,798 \cdot \rho_{dmx}}$$

Donde:

U_d : Velocidad media de la corriente en detritos, en m/s.

R : Radio hidráulico, en m.

i : Pendiente del lecho, en tanto por uno.

ρ_{dmx} : Densidad máxima de la corriente de detritos, en gr/cm³

Para obtener ρ_{dmx} , se propone la siguiente expresión:

$$\frac{\rho_{dmx}}{\rho} = 1 + c_{vmx} \cdot (s - 1)$$

Siendo ρ la densidad del agua, c_{vmx} la concentración volumétrica máxima de sólidos (estructural compacta) y s la densidad relativa de los sólidos ($s = 2,65$).

El caudal total de las corrientes de detritos se calcula como:

$$Q_d = \frac{Q}{1 - c_{vmx}}$$

Para los cálculos del caudal detrítico se utilizó la información de terreno y los siguientes valores:

CUADRO 4-93: DATOS PARA CÁLCULO CAUDAL DETRÍTICO

Datos	
ρ agua [T/m ³]	1
ρ solido [T/m ³]	2.65
% agua (vol)	0.8
%solido (vol)	0.2

Fuente: Elaboración propia

Con los datos anteriores es posible calcular la densidad máxima de la corriente de detritos (ρ_{dmx}) y la concentración volumétrica máxima de sólidos (c_{vmv}), resultando :

$$\rho_{dmx} = 1.33 \text{ Ton/m}^3$$

$$c_{vmv} = 0,20$$

Con dicho valor y la expresión para el cálculo del caudal detrítico, tanto para la cuenca del río San Pedro como para la cuenca del río Vilama, El siguiente Cuadro 4-94 presenta los resultados obtenidos.

CUADRO 4-94: CAUDALES DETRÍTICO SEGÚN MÉTODO DE YABLOSKIY

Cuenca Rio San Pedro									
T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Q detrítico (m3/s)	42	109	166	247	314	386	461	566	651
Cuenca Rio Vilama									
T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Q detrítico (m3/s)	15	36	52	72	87	102	117	137	153

Fuente: Elaboración propia

4.2.4.2. Método de Takahashi

Takahashi (1978, 1981) determina el caudal máximo de la corriente de detritos mediante la siguiente expresión:

$$Q_d = Q_0 \cdot P = Q_0 \cdot \frac{C^\circ}{C^\circ - C_d}$$

Donde:

Q_d : Caudal máximo del flujo detrítico (m3/s)

Q_0 : Caudal máximo líquido (m3/s)

P : Corresponde a un coeficiente de amplificación.

C_d : Concentración volumétrica de sólidos (T/m3)

C° : Concentración máxima de los sólidos (o la concentración de empaquetamiento) (T/m3)

Generalmente C° toma valores del orden del 65%. C_d puede ser estimada como sigue:

$$C_d = \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\phi) - \tan(\alpha)}$$

Donde:

α : Corresponde al ángulo de inclinación del lecho.

ϕ : Ángulo de fricción interna el material depositado (entre 30° y 70°) (Ayala, 1996; Armanini et al., 2000),

ρ_s : Densidad de los sólidos (Ton/m3)

C_d : Concentración de equilibrio.

Según Takahashi la concentración de equilibrio como la concentración de equilibrio el flujo, la cual se alcanza en condiciones estacionarias.

Luego, el cálculo del caudal total de la corriente de detritos se puede calcular como:

$$Q_d = \text{Caudal líquido} + \text{Caudal sólido} = \frac{Q_0}{1 - c_{vmx}}$$

Donde c_{vmx} es la concentración volumétrica máxima de sólidos (estructural compacta).

Para los cálculos del caudal detrítico, por este método, se utilizó la información de terreno y los siguientes valores:

CUADRO 4-95: DATOS PARA CÁLCULO CAUDAL DETRÍTICO

Datos	
C°	0.65
ρ agua [T/m3]	1
ρ solido [T/m3]	2.65
φ [°]	30

Fuente: Elaboración propia

Con los datos anteriores y una pendiente del cauce $i = 1,5 \%$, es posible la concentración volumétrica máxima de sólidos (c_{vmv}), resultando :

$$c_{vmv} = 0,028$$

Con dicho valor y la expresión para el cálculo del caudal detrítico, tanto para la cuenca del río San Pedro como para la cuenca del río Vilama, La siguiente Cuadro 4-96 presenta los resultados obtenidos.

CUADRO 4-96: CAUDALES DETRÍTICO SEGÚN MÉTODO DE TAKAHASHI

Cuenca Rio San Pedro									
T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Q detrítico (m3/s)	34	90	136	204	259	318	379	466	536
Cuenca Rio Vilama									
T (años)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
Q detrítico (m3/s)	13	30	43	59	72	84	96	113	126

Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Conclusiones

Terminado el estudio hidrológico es posible indicar que, en términos generales, se cumplieron los objetivos perseguido dentro de los alcances de la consultoría. El estudio desarrollado permitió definir las principales variables que inciden en la caracterización hidrológica de las cuencas estudiadas y de su análisis se puede concluir lo siguiente:

- 1) La información hidrológica disponible espacialmente permitió cubrir las cuencas en estudio, sin embargo, solo se ubica una estación dentro de la cuenca del río San Pedro y ninguna en la cuenca del río Vilana.
- 2) La extensión de la información es adecuada para un estudio hidrológico como el de la presente consultoría, sin embargo, no está completa, requiriendo procedimientos estadísticos para su relleno y extensión.
- 3) Las estaciones de El Tatio, San Pedro y Toconao, presentaron valores nulos (El Tatio – Año 2016, San Pedro – Año 1988 y Toconao Experimental – Años 1988, 2006 y 2008), a pesar de que los años con información nulo son pocos, con el objeto de representar rigurosamente la verdadera distribución de las lluvias, se procedió a utilizar un procedimiento de corrección.
- 4) Conformada la serie de datos estadísticos de precipitación máxima diaria, se procedió a su ajuste probabilístico para las funciones de distribución utilizadas comúnmente en hidrología, calificando los ajustes logrados mediante el test de Chi-cuadrado y el método gráfico de Weibull.
- 5) De este modo se logró definir las precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno de la cuenca, que se muestran en la siguiente tabla:

CUADRO 4-97: PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS

T (Años)	P(X≥x) %	Linzor	El Tatio (DGA)	Caspana (DGA)	Rio Grande	San Pedro (DGA)	Toconao Exp.
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
		Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Pearson	Log Normal
2	50	23.2	21.8	22.7	28.1	7.8	5.6
5	20	35.7	35.0	41.3	50.3	16.3	9.7
10	10	44.0	43.7	53.7	65.0	23.4	12.9
25	4	54.5	54.7	69.3	83.5	33.6	17.5
50	2	62.2	62.8	80.9	97.3	41.8	21.2
100	1	69.9	70.9	92.4	110.9	50.2	25.2

Fuente: Elaboración propia

- 6) También fue posible determinar la distribución espacial de la precipitación y calcular una precipitación media para la cuenca mediante el método de las isoyetas.
- 7) Finalmente, mediante coeficientes duración y una curva IDF para la zona, fue posible establecer la distribución temporal de la precipitación y definir hietogramas de diseño.
- 8) Terminado el estudio de las precipitaciones se estuvo en condiciones de analizar la tormenta del enero-febrero del año 2019. Dicho análisis permitió concluir que la precipitación tuvo un período de retorno de 28 años.

- 9) El análisis del hietograma de la tormenta del 2019 mostró que existieron dos pulsos de precipitación importantes, que corresponden a dos tormentas sucesivas. La primera ocurrida el día 29-01-2019, se inicia a las 21:30 horas con una duración aproximada de 7 horas y con una intensidad máxima, a las 22 horas, de 21,6/mm hora y con un volumen total aproximado de 23,0 mm, suficientes para saturar las cuencas. La segunda tormenta se presentó el día 31-01-2019 y se inició a las 22:30 horas, con 15 horas de duración presentando un máximo a las 24 horas del mismo día, con una intensidad máxima de 26,3 mm/hora y un volumen total de 52,3 mm.
- 10) La precipitación máxima en 24 horas (media para la cuenca) estimada en la cuenca del río San Pedro para el evento del año 2019, es de 52,52 mm. De acuerdo con los registros históricos de la estación Río Grande (única estación ubicada al interior de la cuenca) esta precipitación, en 56 años de registro, ha sido superada en 5 oportunidades: el año 1977 (87,5 mm), el año 1981 (71,2 mm), el año 1986 (93,1 mm), el año 1995 (67,1 mm) y el año 2012 (94,1 mm). Esto reafirma la conclusión que lo ocurrido el año 2019 no fue una situación meteorológica excepcional, correspondiendo más bien a una situación de baja ocurrencia, pero enmarcada dentro un un régimen hidrológico normal.
- 11) En relación a la serie estadística de caudales, estos presentan más interrupciones, ya sea por no operación de la estación fluviométrica o porque se destruyó durante la crecida misma. Lo anterior obligó a un doble esfuerzo para complementar la estadística con estimaciones efectuadas después de los eventos destructivos. De esta forma se conformó una serie de caudales para el río San Pedro que permitió una estimación de los caudales de crecida para distintos períodos de retorno. No ocurrió lo mismo con el río Vilama ya que sus datos son extremadamente bajos, lo que impidió efectuar un análisis de frecuencia.
- 12) Los caudales calculados para la crecida del año 2019, por métodos hidrológicos, también entregaron, para dicha crecida, un período de retorno entorno a los 25 años. Lo anterior permite concluir que los daños observados no se debieron a una crecida excepcional sino, más bien, a un mal uso de los espacios cercanos a los cursos fluviales. Por la naturaleza de las precipitaciones de la zona, que permiten espacios prolongados de tiempos sin actividad, es importante definir y respetar los espacios reservados para el escurrimiento fluvial.
- 13) Debido a la poca confianza de la estadística de caudales, se recurrió a los métodos hidrológicos basados en la relación precipitación-escorrentía. Se utilizó la Fórmula de Verni-King Modificada, la Fórmula Racional Modificada, el Hidrograma Unitario Sintético y el modelo SWMM5 de la EPA.
- 14) Los métodos hidrológicos que mejor resultado dieron fueron el Hidrograma Unitario Sintético y la modelación con el modelo SWMM5, recomendándose los resultados obtenidos con este último método para el cálculo de crecida líquidas. La siguiente tabla presenta los caudales recomendados para los diseños:

CUADRO 4-98: CAUDALES RECOMENDADOS

T (Años)	Río San Pedro (m3/s)	Río San Vilama (m3/s)
2	33.0	12.0
5	87.0	29.0
10	133.0	41.0
25	198.0	57.0
50	252.0	70.0
100	309.0	82.0

Fuente: Elaboración propia

- 15) Para determinar el caudal detrítico, se emplearon dos metodologías, la fórmula de Yabloskiy y la fórmula de Takahashi obteniéndose concentraciones de sólidos de un 20% y un 2,8%, respectivamente.

Por otro lado, sobre la base de los registros capturados por la DOH para el evento de febrero del año 2019, mediante la grabación de un vuelo con dron en el río San Pedro, se logró apreciar predominantemente un comportamiento de crecida líquida en el cauce. En consecuencia, acorde a los resultados del estudio hidrológico, se tiene que el evento de febrero del 2019 se puede asimilar a un evento de periodo de retorno de 25 años, por lo que **se propone considerar una concentración de un 20% las crecidas de 25 años de periodo de retorno e inferiores.**

Por otro lado, **para eventos de crecida mayores a 50 años de período de retorno** por la magnitud de los caudales se esperaría que predominara la componente de flujo de barro. Sobre la base de la inspección de terreno no existen grandes vestigios de embanques de material fino, se puede pensar que el valor de la concentración es moderado. De acuerdo a la comparación de cuencas similares donde este Consultor ha realizado estudios, la Concentración Cv debe estar comprendida entre un 25% y 30%. Considerando un valor medio **se establece en este estudio un valor de Cv de 28%.**

4.3. Modelación Numérica de Crecidas

4.3.1. Generalidades

4.3.1.1. Introducción

En el presente capítulo se presenta el análisis hidráulico fluvial desarrollado para los siguientes cauces:

- Río San Pedro: Desde la estación fluviométrica Cuchabrachi hasta el ayllu de Tulo, abarcando una longitud de alrededor de 21 Km.
- Río Vilama: Frente al Ayllu de Vilama, con una longitud de 1 Km.

El objetivo del análisis es representar el comportamiento del cauce para diversos períodos de retorno entre 2 a 200 años, poniendo especial atención a las crecidas y las superficies de inundación que estas generan. A partir de los resultados obtenidos, se desarrollan los estudios de socavación y de transporte de sedimentos en los siguientes capítulos. Además, con las imágenes de inundaciones calculadas y traspasadas a planos de planta, es posible determinar la infraestructura presente en el cauce, como pozos APR, bocatomas, puentes y otros, que se verían afectados por las crecidas.

Para realizar el análisis, se caracterizan los cauces hidráulicamente a través de su rugosidad, caudales disponibles y se establecen condiciones de borde, para posteriormente realizar la modelación unidimensional utilizando el software HEC-RAS y bidimensional utilizando el software FLO-2D.

4.3.2. Antecedentes Básicos Utilizados

4.3.2.1. Topografía

La información topográfica empleada para realizar la modelación hidráulica corresponde al MDT elaborado en base a la información recolectada del vuelo LIDAR realizado sobre los ríos San Pedro y Vilama, abarcando una superficie de 900 ha. para el río San Pedro y una superficie de 66 ha. para el río Vilama. Para complementar esta información se utilizará la topografía proveniente del "Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro" (CNR, 2014) con el fin de extender los límites del vuelo LIDAR realizado, no se pudo utilizar información de productos satelitales para realizar esto, ya que dada la baja pendiente transversal del cauce y la extensa planicie que presenta en varios sectores, no se logra un buen ajuste.

En la Figura 4-94 se presenta en verde la extensión del vuelo LIDAR y en amarillo la superficie disponible para completar.

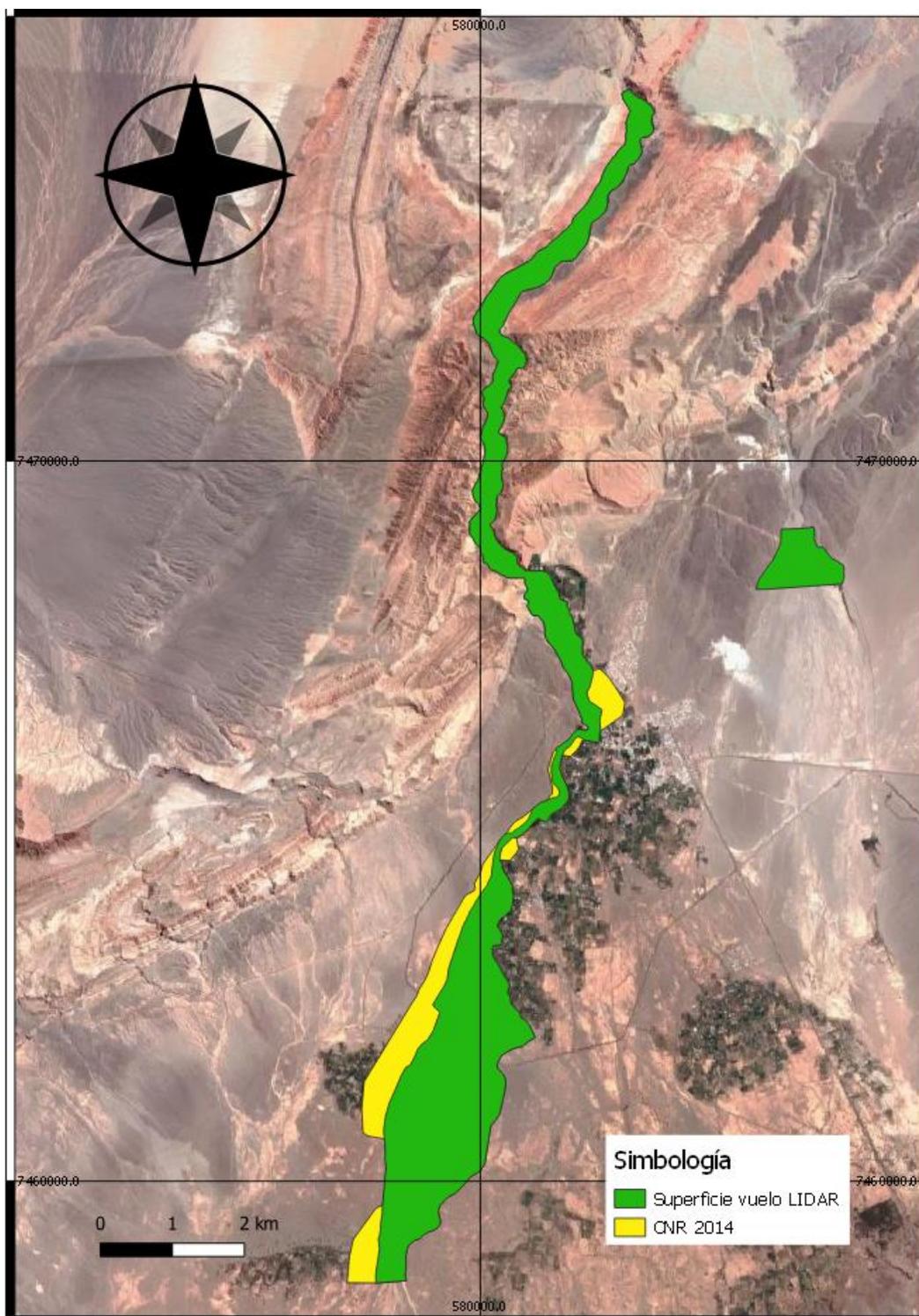


FIGURA 4-94: TOPOGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2.2. Hidrología

La información hidrológica necesaria para realizar las modelaciones respectivas fue obtenida a partir del “Estudio Hidrológico” entregado en la etapa 2C.

4.3.2.3. Infraestructura Existente

La infraestructura presente en el área de estudio corresponde principalmente a defensas fluviales, atraviesos y puentes, los primeros se subdividen en pretilos gaviones y enrocados, mientras que los segundos corresponden a alcantarillas y cajones de hormigón.

En la modelación hidráulica se procederá a caracterizar 2 obras que se encuentran ubicadas en el río San Pedro, la primera corresponde al puente de acceso a San Pedro presentado en la Figura 4-95 y la segunda son las obras de atraveso en la ruta de circunvalación donde destacan el paso bajo nivel en la ruta de circunvalación y los cajones de atraveso que fueron repuestos posterior a la crecida del año 2019, las que se presentan en la Figura 4-96 y Figura 4-97.



FIGURA 4-95: PUENTE SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 4-96: PASO BAJO NIVEL EN RUTA CIRCUNVALACIÓN

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 4-97: OBRAS DE ATRAVIESO EN RUTA DE CIRCUNVALACIÓN

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.3. Procedimiento de Cálculo

4.3.3.1. Modelo Unidimensional

A continuación, se presenta la base teórica, sobre la cual se realiza el cálculo del eje hidráulico en 1D.

Los perfiles de agua se calculan resolviendo la ecuación de la energía y utilizando un procedimiento llamado “paso a paso” o “paso estándar” entre una sección transversal y otra, que viene dado por la expresión:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Donde:

- WS_1, WS_2 : Elevaciones de la superficie del agua en las secciones transversales 1 y 2.
- V_1, V_2 : Velocidades promedio (caudal/área de flujo).
- α_1, α_2 : Coeficientes para ponderar las velocidades
- g : Aceleración de gravedad.
- h_e : Pérdida de carga

Los términos de la ecuación se presentan siguiente figura.

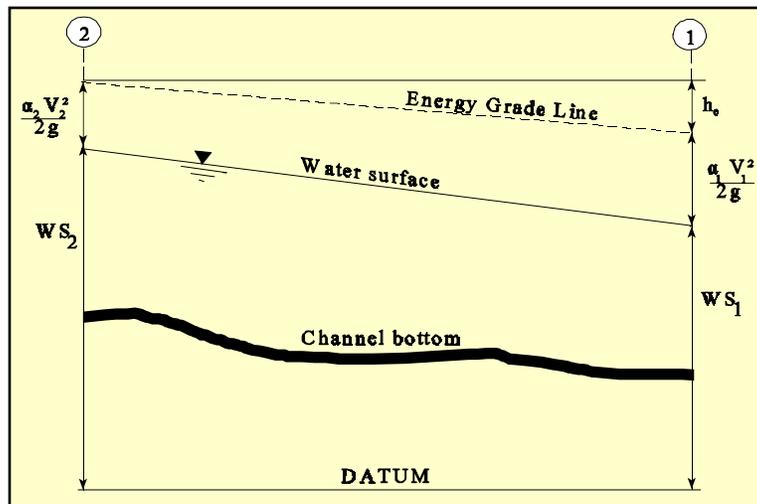


FIGURA 4-98: DIAGRAMA DE VARIABLES ANALIZADAS

Fuente: Elaboración Propia.

La pérdida de carga (h_e) entre dos secciones transversales está compuesta de la pérdida por fricción y la pérdida por contracción o expansión. La ecuación para calcular la pérdida total de energía es:

$$h_e = L\overline{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Donde se tiene que:

- L : Longitud del tramo equivalente
- Sf : Pendiente de fricción representativa entre dos secciones.
- C : Coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

La longitud equivalente, L, se calcula:

$$L = \frac{L_{lob} \overline{Q}_{lob} + L_{ch} \overline{Q}_{ch} + L_{rob} \overline{Q}_{rob}}{\overline{Q}_{lob} + \overline{Q}_{ch} + \overline{Q}_{rob}}$$

Donde:

- L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : Largo del tramo entre secciones para flujo en la planicie de la izquierda, el canal principal y la planicie derecha, respectivamente.
- Q_{lob}, Q_{ch}, Q_{rob} : Promedio aritmético de los flujos en las dos secciones en la planicie de la izquierda, el canal principal y la planicie derecha, respectivamente.

La capacidad de transporte se calcula para cada subdivisión usando la siguiente ecuación (En el Sistema métrico de unidades):

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3}$$

Donde:

- K Capacidad de transporte de una sección
- n Coeficiente de rugosidad de Manning de una subdivisión
- A Área de flujo de una subdivisión
- R Radio hidráulico de una subdivisión

El programa suma todas las capacidades incrementales para obtener la capacidad total de las planicies de la izquierda y la derecha. Normalmente la capacidad del canal principal se calcula como un solo elemento (sin subdivisión). La capacidad total de una sección se obtiene al sumar las tres capacidades de las subdivisiones (izquierda, canal, y derecha).

Las ecuaciones deben resolverse sección a sección por aproximaciones sucesivas, para lo cual se ha empleado el Software HEC-RAS versión 5.0.1.

Estos programas, contienen subrutinas que calculan las características hidráulicas de secciones irregulares, incluyendo brazos. Asimismo, se consideran las pérdidas de carga asociadas a la convergencia y divergencia de las secciones sucesivas.

4.3.3.2. Modelo Bidimensional

El FLO-2D es un simple modelo de conservación de volumen. Se mueve el volumen de inundación alrededor de una serie de elementos para el flujo 2D sobre el terreno o por medio de segmentos para el enrutamiento de canal. La progresión de la onda de avenida sobre el dominio de modelación es controlada por la topografía y la resistencia al flujo. El enrutamiento en dos dimensiones se logra a través de una integración numérica de las ecuaciones de movimiento y la conservación del volumen de líquido, ya sea para una inundación de agua o un flujo de sedimento hiperconcentrado. Una presentación de las ecuaciones que gobiernan es seguida por una discusión sobre la metodología de modelado.

Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones constitutivas generales de fluidos incluyen la ecuación de continuidad, y la ecuación del movimiento (ecuación de movimiento de la onda):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV}{\partial x} = i$$

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$$

donde h es la profundidad de flujo y V es la velocidad promediada en vertical en una de las ocho direcciones x de flujo. La intensidad de la lluvia (i) puede ser distinta de 0 en la superficie del flujo. La componente de la pendiente de fricción Sf se basa en la ecuación de Manning. Los otros términos incluyen la pendiente del lecho (So), gradiente de presión y términos de aceleración local y convectiva. La ecuación unidimensional representa el flujo de canal promediado en profundidad.

FLO-2D es un modelo de flujo multi-dirección en la zona de inundación. En este caso las ecuaciones de movimiento se aplican mediante el cálculo de la velocidad del flujo a través de la frontera de un elemento de malla para una dirección a la vez. Hay ocho direcciones potenciales del flujo: los cuatro puntos cardinales (norte, este, sur y oeste) y las cuatro direcciones diagonales (noreste, sureste, suroeste y noroeste). Cada cálculo de la velocidad es esencialmente de naturaleza unidimensional y se resuelve de forma independiente de las otras siete direcciones. La estabilidad de este esquema numérico explícito se basa en criterios estrictos que controlan la magnitud de un paso de tiempo computacional variable.

La magnitud relativa de las componentes de aceleración respecto a los términos de pendiente del fondo y de la presión importante.

La experiencia demuestra que la aplicación en pendientes moderadamente empinadas de la ecuación para la onda cinemática ($S_o=S_f$) es suficiente para modelar la progresión de la onda de avenida. En tal caso la contribución del gradiente de presión y los términos de aceleración se pueden despreciar. También se ha visto que la simulación de flujo con topografía compleja mejora con la adición del término de gradiente de presión (creándose la ecuación de onda difusiva), siendo importante para la atenuación de la onda de avenida y el almacenamiento en la llanura de inundación. Los términos de aceleración (local y convectiva) son importantes para el tránsito de avenidas con pendientes planas o adversas, pendientes muy pronunciadas o condiciones de flujo inestable. De cualquier forma, sólo la ecuación de onda completa se aplica en el modelo FLO-2D.

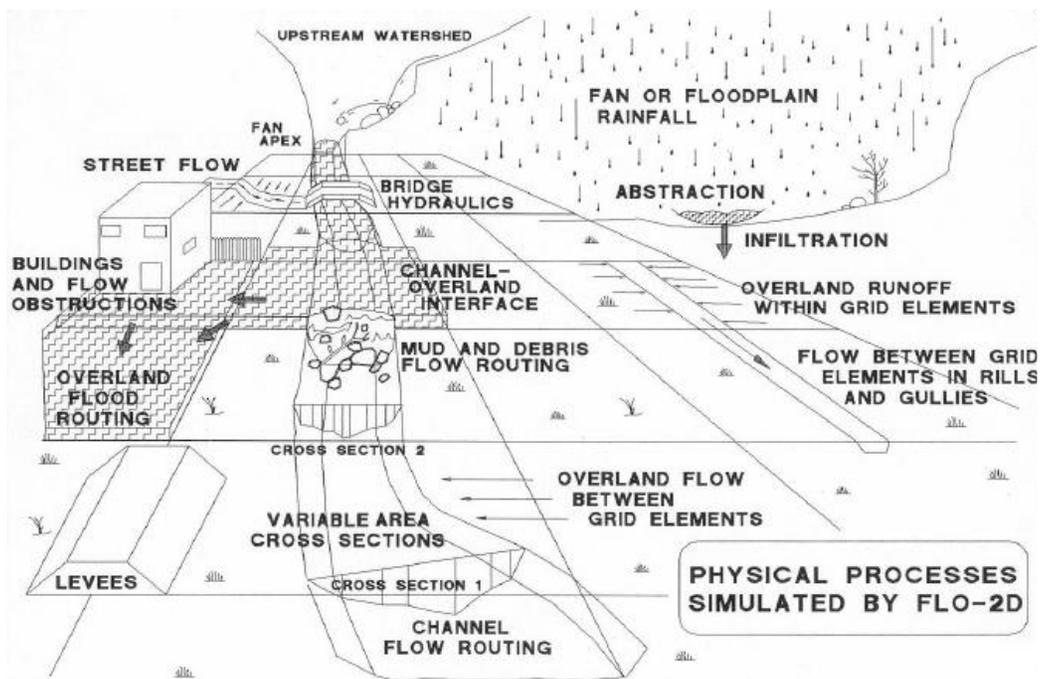


FIGURA 4-99: PROCESOS FÍSICOS SIMULADOS POR 2D

Fuente: Manual para la modelación de flujos en FLO 2D.

Funcionamiento del modelo

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y momentum en el modelo FLO-2D se resuelve con un esquema numérico de diferencias finitas centrales. El algoritmo explícito resuelve la ecuación de momento para la velocidad de flujo a través de la frontera de los elementos de malla de un elemento a la vez. La solución de la forma diferencial de la ecuación de momentum resulta de una representación discreta de la ecuación cuando se aplica en un solo punto. Los esquemas explícitos son fáciles de formular, pero por lo general se limitan a pequeños pasos de tiempo para satisfacer los estrictos criterios de estabilidad numérica. Los esquemas de diferencias finitas pueden requerir gran esfuerzo de computador para simular cuencas muy escarpadas ondas de avenida de crecimiento muy lento, canales con secciones transversales muy variables, cambios bruscos de pendiente, flujo dividido y áreas de flujo estancado.

El dominio de solución en el modelo FLO-2D se discretiza en elementos uniformes y cuadrados. El procedimiento de cálculo para el flujo superficial implica el cálculo de la descarga a través de cada uno de los límites en las ocho posibles direcciones de flujo y comienza con una estimación lineal de la profundidad de flujo en el elemento frontera

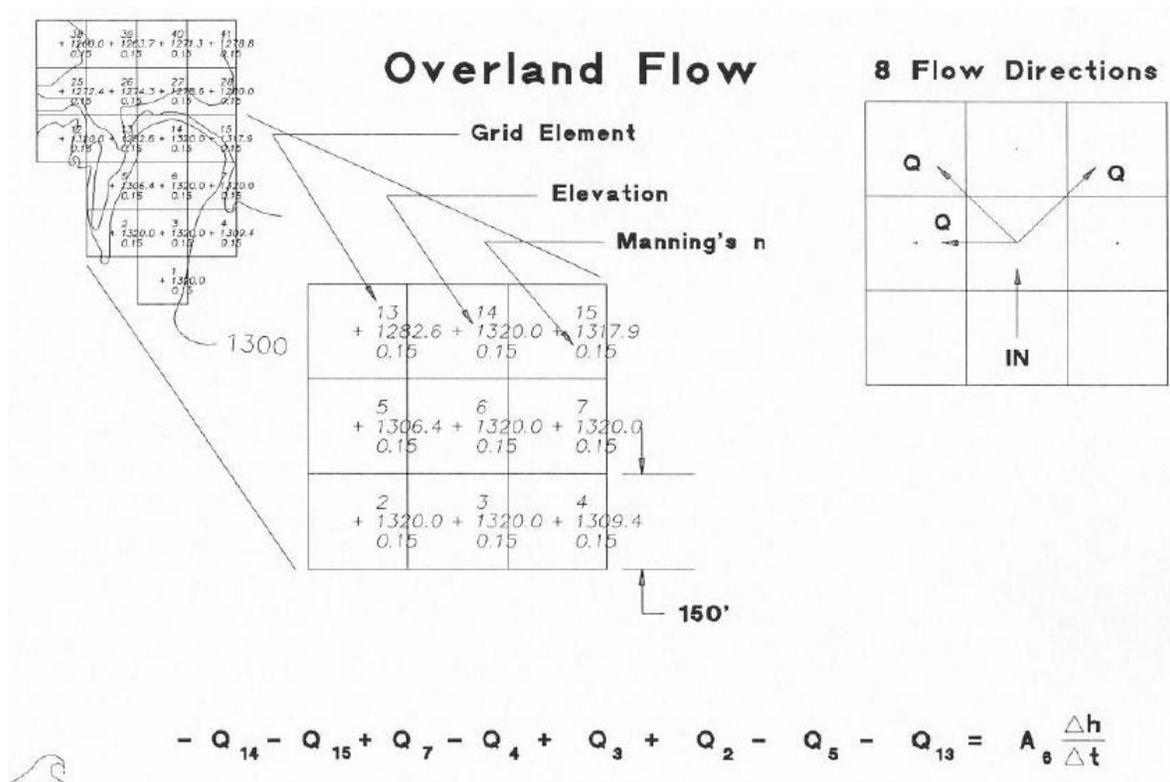


FIGURA 4-100: FLUJO A TRAVÉS DE LA FRONTERA DE ELEMENTOS

Fuente Manual para la modelación de flujos en FLO 2D.

La profundidad del flujo en la frontera es estimada como un promedio de las profundidades de flujo en los dos elementos de la malla que comparten la descarga en una de las ocho direcciones. En versiones anteriores del modelo se intentaron estimaciones no lineales, pero no mejoraron significativamente los resultados. Otros parámetros hidráulicos también se promedian entre los dos elementos de la malla para calcular la velocidad de flujo, incluyendo la resistencia de flujo (valor n de Manning), el flujo de área, pendiente, elevación de la superficie del agua y perímetro mojado. La velocidad de flujo (dependiente variable) a través de la frontera se calcula a partir de la solución de la ecuación de momento (discutido más abajo). Usando el área de flujo promedio entre los dos elementos, se determina la descarga para cada paso de tiempo multiplicando el área de flujo por la velocidad.

La ecuación de onda dinámica completa es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, no lineal. Para resolver la ecuación para la velocidad de flujo en la frontera de un elemento de la malla, inicialmente se calcula la velocidad de flujo con la ecuación de onda difusiva utilizando la pendiente de la superficie del agua promedio (pendiente del fondo más gradiente de presión). Esta velocidad se utiliza entonces como una primera estimación (o una semilla) en el método de Newton-Raphson de segundo orden con el fin de determinar las raíces de la ecuación dinámica completa de onda (James, et. Al., 1977). La ecuación de Manning se aplica para calcular la pendiente de fricción. Si la solución de Newton-Raphson no converge después de 3 iteraciones, los valores por defecto utilizados por el algoritmo son aportados por la solución de onda difusiva.

En la ecuación de momentum completa, el término de aceleración local es la diferencia en la velocidad para la dirección de flujo dada en el paso de tiempo anterior. El término de aceleración convectiva se evalúa como la diferencia en la velocidad de flujo a través del elemento de la malla en el paso de tiempo anterior. Por ejemplo, el término aceleración local ($1/g * \partial V/\partial t$) para el elemento de malla 251 en la dirección este (elemento 2) se convierte en:

$$\Delta(V_t - V_{t-1})_{251}/(g * \Delta t)$$

donde V_t es la velocidad en la dirección este para el elemento de malla 251 en el momento t , V_{t-1} es la velocidad en el paso de tiempo anterior ($t-1$) en dirección este, Δt es el paso de tiempo en segundos, y g es la aceleración de gravedad. Una construcción similar para el término de aceleración convectiva ($V_x/g * \partial V/\partial x$) se puede hacer donde V_2 es la velocidad en la dirección este y V_4 es la velocidad en la dirección oeste para el elemento de malla 251:

$$V_2 * \Delta(V_2 - V_4)_{251}/(g * \Delta x)$$

La descarga a través de la frontera de los elementos de la malla se calcula multiplicando la velocidad por el área de la zona de flujo transversal. Después de obtenida la descarga, para las ocho direcciones posibles, el cambio neto en la descarga (suma de la descarga en las ocho direcciones de flujo) se multiplica por el paso de tiempo para determinar el cambio neto en el volumen de agua del elemento. Este cambio neto en volumen es entonces dividido por el área de superficie disponible (A_{surf} = área de almacenamiento) en el elemento de malla para obtener el aumento o disminución de la profundidad del flujo para dicho paso de tiempo.

$$\sum Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} = A_{surf} \Delta h / \Delta t$$

donde:

Q_x = descarga a través de una frontera

A_{surf} = área de superficie de un elemento de cuadrícula

$\Delta h / \Delta t$ = variación de profundidad de flujo en un elemento de malla durante un paso de tiempo

En resumen, el algoritmo de solución incorpora los siguientes pasos:

- 1- se calculan el flujo medio, rugosidad y la pendiente entre dos elementos de la malla.
- 2- La profundidad del flujo d_x para el cálculo de la velocidad a través de una frontera de un elemento de la cuadrícula para el siguiente paso de tiempo ($i + 1$) se estima a partir del paso de tiempo anterior (i) utilizando una estimación lineal (la profundidad media entre dos elementos).

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i$$

- 3- La primera estimación de la velocidad se calcula utilizando la ecuación de onda difusiva. La única incógnita en la ecuación de onda difusiva es la velocidad por tierra, canal o flujo calle.
- 4- La velocidad de la onda difusiva prevista para el paso de tiempo actual se utiliza como una semilla en la solución de Newton-Raphson para resolver la ecuación de onda completa. Cabe señalar que, para los flujos de sedimentos hiperconcentrados tales como flujos de lodo y detríticos, los cálculos de velocidad incluyen adicionalmente los términos de la viscosidad y de tensión cohesiva.
- 5- La descarga Q a través de la frontera se calcula multiplicando la velocidad por el área de la sección transversal de flujo. Para el flujo superficial, la anchura de flujo se ajusta mediante los factores de reducción de anchura (WRF).
- 6- La descarga incrementales para el paso de tiempo a través de las ocho fronteras (o elementos de canal de aguas arriba y aguas abajo) son sumadas,

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw}$$

y el cambio en volumen (descarga neta x paso de tiempo) se distribuye en el área de almacenamiento disponible dentro del elemento de la malla para determinar el aumento incremental en la profundidad del flujo.

$$\Delta d_x^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} \Delta t / A_{surf}$$

donde ΔQ_x es el cambio neto en el flujo en las ocho direcciones posibles para el elemento de la malla para el paso de tiempo Δt entre los tiempos i y $i+1$.

- 7- Los criterios de estabilidad numérica se revisan para la nueva profundidad del flujo en el elemento de la malla. Si se excede cualquiera de los criterios de estabilidad, el tiempo de simulación se restablece en el tiempo de simulación anterior, el incremento de paso de tiempo se reduce, todos los cálculos anteriores de paso de tiempo se descartan y los cálculos de velocidad de comienzan de nuevo.
- 8- La simulación progresa con el correspondiente aumento de los pasos de tiempos hasta que se excedan los criterios de estabilidad.

En la versión más actual del modelo se mejoró la eficiencia numérica mediante la creación de un algoritmo de enrutamiento para las subrutinas computacionalmente más costosas. El reparto de la descarga entre los elementos de la malla se basa en los lados o fronteras en vez de celdas contiguas (véase la Figura 4-101). El nuevo modelo no busca en las 8 direcciones para encontrar, los elementos para compartir la descarga. En tiempo de ejecución, el modelo establece una serie de conexiones laterales a las que sólo se accede solo una vez por paso de tiempo en lugar del algoritmo dual requerido para la búsqueda de los elementos disponibles. Este enfoque simplifica los barridos computacionales y facilita la paralelización de los códigos.

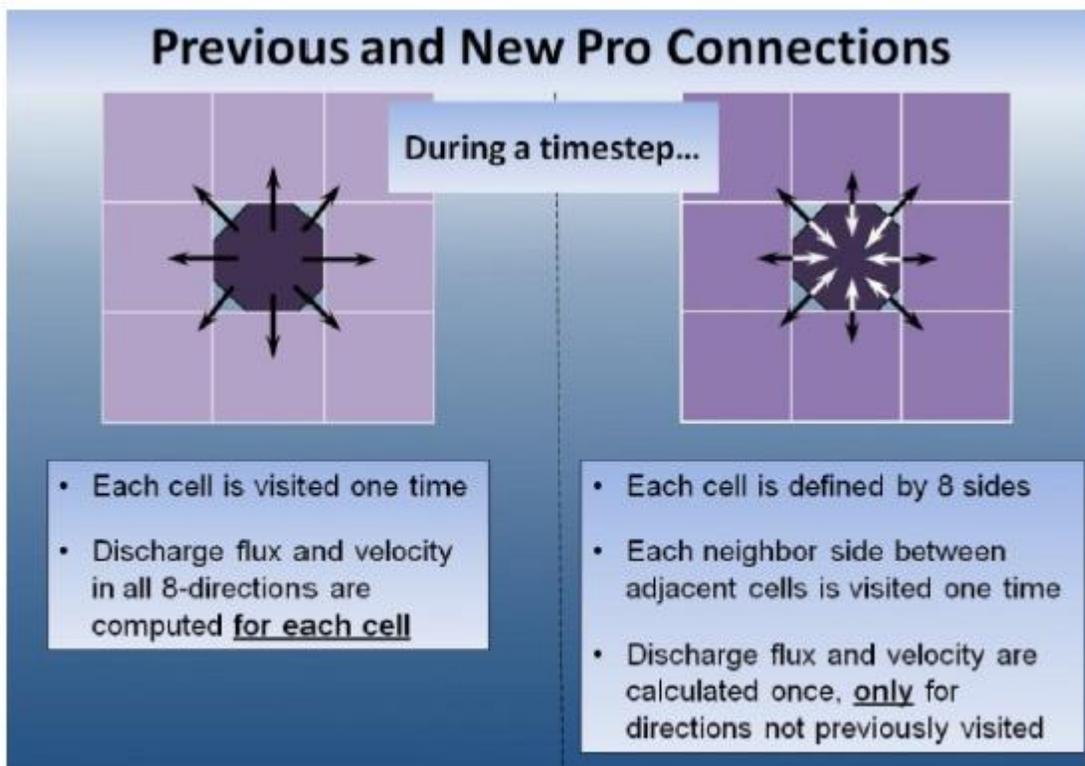


FIGURA 4-101: TRATAMIENTO DE LAS CONECTIVIDADES ENTRE ELEMENTOS

Fuente: Manual para la modelación de flujos en FLO 2D

Este nuevo algoritmo de cálculo tiene la ventaja de:

- La eliminación del barrido de 8 direcciones en el algoritmo del flujo.
- La reducción en un 40% de los cálculos de descarga para aumentar la velocidad del modelo.
- Mejora de las capacidades de procesamiento en paralelo.
- Se ignoran los lados completamente bloqueados.

Después que todo el enrutamiento de flujo se ha completado, los criterios numéricos de estabilidad se verifican para cada elemento. Si se exceden los criterios de estabilidad de cualquier elemento, el paso de tiempo se reduce en dependiendo de la historia previa de la estabilidad y la secuencia de cálculo se reinicia. Si se cumplen satisfactoriamente todos los criterios de estabilidad numérica, el paso de tiempo se incrementa para los próximos barridos computacionales.

El volumen de flujo de entrada, el volumen de flujo de salida, y el cambio en el almacenamiento de la zona se resumen al final de cada paso de tiempo y se calcula la conservación del volumen. Los resultados se escriben en los archivos de salida y/o en la pantalla de salida a intervalos de tiempo especificados por el usuario.

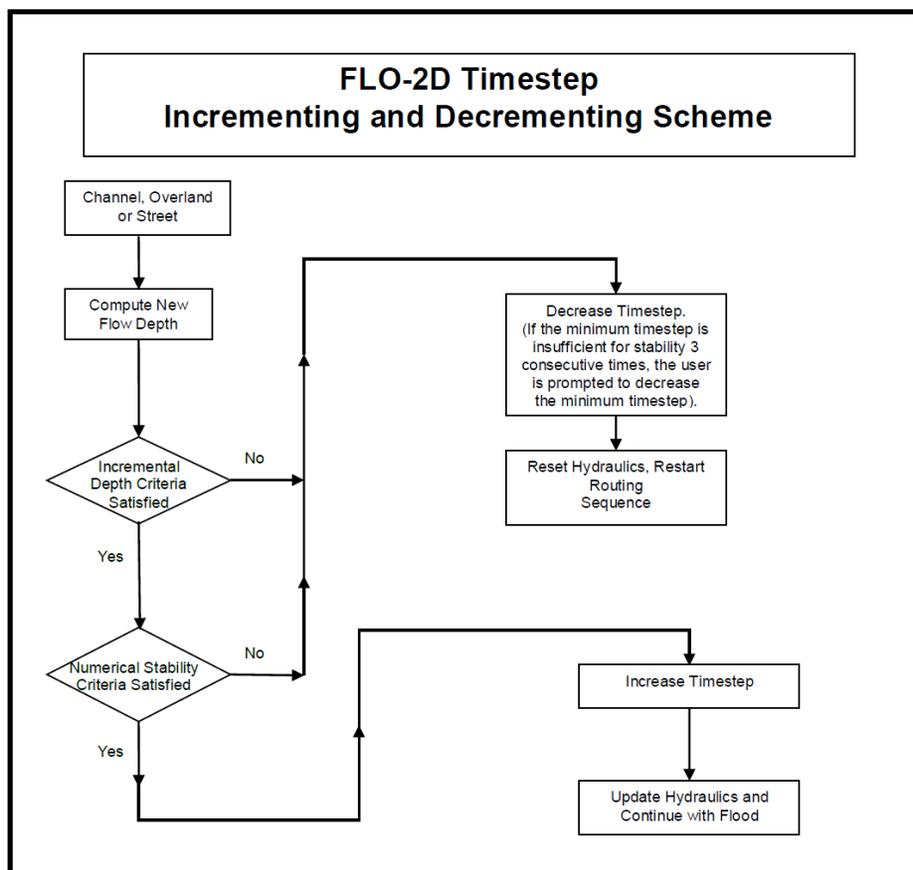


FIGURA 4-102: CRITERIO DE ESTABILIDAD EN FLO 2D

Fuente: Manual para la modelación de flujos en FLO 2D

El esquema de direccionamiento de las inundaciones de FLO-2D se apoya sobre la base de que el paso de tiempo es suficientemente pequeño para asegurar la estabilidad numérica (es decir, sin inestabilidades numéricas). La clave de la eficiencia del esquema en diferencia finita es que los criterios de estabilidad numérica limitan el paso de tiempo para evitar inestabilidades, y sin embargo permite pasos de tiempos suficientes para completar la simulación en un tiempo razonable. FLO-2D tiene un paso de tiempo variable que varía en función de si los criterios de estabilidad numérica se superan o no. Los criterios numéricos de estabilidad se comprueban para cada elemento de la malla en cada paso de tiempo para asegurar que la solución es estable. Si se exceden los criterios de estabilidad numérica, el paso de tiempo se reduce y todos los cálculos hidráulicos anteriores para ese paso de tiempo se descartan.

Lewy (CFL) condition for numerical stability (Jin and Fread, 1997). The CFL condition relates the floodwave celerity to the model time and spatial increments. The physical interpretation of the CFL condition is that a particle of fluid should not travel more than one spatial increment Δx in one timestep

La mayoría de los esquemas explícitos están sujetos a la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL) para la estabilidad numérica (Jin y Fread, 1997). La condición CFL relaciona la celeridad de la onda de avenida a los incrementos espaciales y temporales del modelo. La interpretación física de la condición CFL es que una partícula de fluido no debe viajar más de un incremento espacial Δx en un paso de tiempo Δt (Fletcher, 1990). FLO-2D utiliza la condición CFL para el enrutamiento limitando el paso de tiempo Δt por:

$$\Delta t = C \Delta x / (\beta V + c)$$

donde:

C es el número de Courant ($C \leq 1.0$)

Δx es el ancho del elemento de la malla

V es la velocidad de la sección transversal media

β es un coeficiente dependiente de la geometría

c es la celeridad de la onda computarizada

Mientras que el coeficiente C puede variar de 0,2 a 1,0 dependiendo del tipo de algoritmo, un valor predeterminado de 0,6, se recomienda en el modelo FLO-2D. Cuando C se ajusta a 1,0, la difusividad artificial o numérica es teóricamente cero para una ecuación lineal convectiva (Fletcher, 1990). Si la simulación tiene alguna inestabilidad numérica por velocidades irrazonablemente altas o púas en los hidrogramas de caudal de salida, el número de Courant debe reducirse en un 0,1 hasta que se alcanza un valor de 0,2 o 0,3. El número de Courant es espacialmente variable dentro de un pequeño rango. Si se excede el número de Courant, el valor es disminuido en 0.002 hasta que se alcanza el valor asignado. El Courant asignado es el valor mínimo permitido.

Para las ecuaciones no lineales, puede que no sea posible evitar por completo la difusividad artificial o dispersión numérica (Fletcher, 1990). En este caso se puede aplicar el desarrollado por Ponce

y Theurer (1982). Este criterio es una función de pendiente del lecho, caudal específico y el tamaño del elemento de malla. Se expresa como:

$$\Delta t < \zeta S_0 \Delta x^2 / q_0$$

donde q_0 es la unidad de descarga, S_0 es la pendiente del lecho y ζ es un coeficiente empírico. El coeficiente ζ fue creado como una variable única para el elemento de la malla y es ajustado en tiempo de ejecución por el modelo dentro de un rango mínimo y máximo establecido por el usuario. Al igual que los criterios de SFC, cuando se supera esta estabilidad numérica, los cálculos hidráulicos para el paso de tiempo se revierten y el paso de tiempo se disminuye.

El número de Courant es el criterio de estabilidad primario utilizado en el modelo. Si la reducción del número de Courant no puede lograr la estabilidad numérica, un cambio porcentual en profundidad (DEPTOL) y todos los criterios de estabilidad de onda dinámica (WaveMax) se pueden activar. El porcentaje de cambio en profundidad se comprueba primero y si se sobrepasa se impone una nueva evaluación de los criterios de estabilidad numérica. Si el cambio porcentual en la profundidad es mayor que la especificada por el usuario, el paso de tiempo se reduce y todos los cálculos hidráulicos para el paso de tiempo quedan anulados. Para configuraciones complejas, con confluencias o división de flujo, puede ser necesario invocar el parámetro de estabilidad onda dinámica WaveMax. Para la mayoría de simulaciones de inundación, la variación del número de Courant será suficiente para eliminar cualquier inestabilidad numérica.

Los pasos de tiempos generalmente varían de 0,1 segundos a 30 segundos. El modelo comienza con el paso de tiempo un mínimo igual a 1 segundo y aumenta hasta que el criterio de estabilidad numérica sea excedido. Si los criterios de estabilidad siguen siendo superados, el paso de tiempo se disminuye hasta que se alcanza un paso de tiempo mínimo. Si el paso de tiempo mínimo no es lo suficientemente pequeño como para conservar el volumen o mantener la estabilidad numérica, entonces el paso de tiempo mínimo puede ser reducido, los coeficientes numéricos de estabilidad se pueden ajustar o los datos de entrada se pueden modificar. Los pasos de tiempos son una función del flujo para un tamaño de elemento de malla dado. Elementos de malla pequeño con un hidrograma de pendiente muy pronunciada y descarga peak grande requiere de pasos de tiempos pequeños. La precisión no se ve comprometida si se utilizan pequeños pasos de tiempos, pero el tiempo de cálculo puede ser largo si el dominio de cálculo es grande.

El tratamiento del paso de tiempo en el modelo fue rediseñado para aumentar el papel del número de Courant y disminuir la magnitud de los incrementos / decrementos del paso de tiempo. Se determinó que la variación del Courant dentro de un cierto rango del valor original redujo el número de descensos ineficaces. Además, los incrementos y decrementos del paso de tiempo se redujeron para permitir ajustar de forma más gradual los criterios numéricos de estabilidad. Esto reemplaza el método consistente en una gran disminución de paso de tiempo seguido por pequeños pero numerosos aumentos del paso de tiempo. Los resultados muestran que hay un aumento significativo en la velocidad de ejecución del modelo hasta de 15 a 40%. Los aspectos más destacados de esta mejora modelo fueron:

- Automatización de variación espacial número Courant dentro de un intervalo especificado según el excedieron si los criterios de número de Courant se ha superado o no.
- Dependencia Eliminado en DEPTOL (% de cambio en profundidad de flujo) y WaveMax (onda dinámica) los criterios de estabilidad.

4.3.4. Variables de Entrada a la Modelación

4.3.4.1. Modelo Topográfico o Malla de Modelación

Dominio del modelo 2D y construcción en malla de la modelación

Para la representación del río San Pedro y río Vilama se han definido dos áreas medidas con LIDAR que han permitido construir mallas reticuladas de celdas cuadradas, las cuales contienen la información topográfica del dominio de cálculo.

En el siguiente cuadro se muestra la información de la ubicación, tamaño de celdas de las distintas mallas construidas:

CUADRO 4-99: DATOS DE LAS DISTINTAS MALLAS DE CÁLCULO

Malla	Ubicación en Coordenadas UTM				Tamaño de celdas (m)
	Esquina Superior Izquierda		Esquina Inferior Derecha		
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	
Grilla 1a	579571	7475420	582519	7471039	3x3
Grilla 1b	579854	7471202	580861	7468208	3x3
Grilla 2	580525	7468843	582142	7465634	2x2
Grilla 3	579427	7465893	581848	7462836	2x2
Grilla 4	577906	7463527	580403	7458540	3x3
Villama	583751	7469430	584959	7468356	3x3

Fuente: Elaboración propia.

Modelo 1D y Perfiles transversales Considerados

Para representar el río San Pedro en toda el área de estudio, se construye un modelo que consta de 435 perfiles transversales los que son extraídos del MDT elaborado con la información topográfica disponible, el espaciamiento entre perfiles es de una distancia aproximada de 50 m, con excepción de zonas que necesitan mayor detalle entre perfiles como lo es el puente San Pedro, la ruta de circunvalación, u otro sector de sección poco regular.

En la Figura 4-103 se presenta la distribución de los perfiles transversales y el eje del cauce definido para el río San Pedro.



FIGURA 4-103: MODELO 1D RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

Para representar el Río Vilama se construye un modelo que consta de 22 perfiles transversales los que son extraídos del del MDT elaborado con la información topográfica disponible, el espaciamiento entre perfiles es de una distancia aproximada de 50 m, con excepción de zonas que necesitan mayor detalle entre perfiles.

En la Figura 4-104 se presenta la distribución de los perfiles transversales y el eje del cauce definido para el río Vilama. Cabe mencionar que, debido a que el eje del cauce no es completamente recto, para evitar que los perfiles transversales se crucen entre sí, se debió realizar quiebres en ellos intentando que la sección central del cauce sea lo más representativa posible.

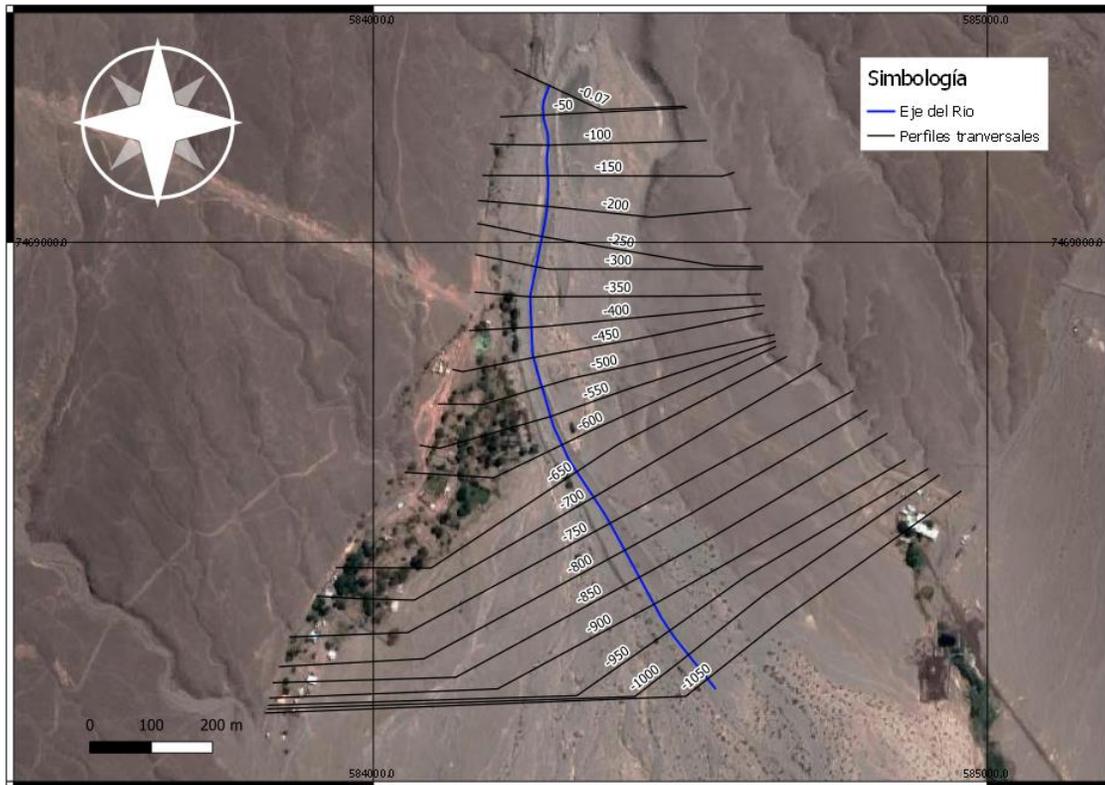


FIGURA 4-104: MODELO 1D RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.4.2. Coeficientes de Rugosidad

Introducción

En este ítem se caracterizan las rugosidades del sector en estudio a través del “n” de Manning. Como el área en estudio posee una gran extensión, se opta por dividirlo en sectores de características hidráulicas similares. De esta manera se tiene para los tramos de río San Pedro un total de 3 tramos, y para el río Vilama 1 tramo, donde a cada uno de estos tramos se le asigna un coeficiente de rugosidad propio.

Para estimar el coeficiente de rugosidad en la caja del río, se aplicó la expresión de Strickler en los tramos donde existe la presencia de calicatas. No obstante, como éstas no se disponen homogéneamente a través de todos los tramos definidos, y con el objeto de obtener otro valor que permita contrastar los coeficientes de rugosidad, se emplea, a la vez, el método de inspección visual propuesto por Cowan.

Para las zonas colindantes al cauce que puedan ser eventualmente afectadas por las crecidas, como los sectores urbanos o rurales se utilizaran valores de rugosidad encontrado en la literatura los cuales se presentan en el Cuadro 4-100

CUADRO 4-100: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD RIO SAN PEDRO

Clasificación	Fuente	Valor
Vegetación Baja	Matorrales dispersos, mucha maleza. (V.TChow)	0.05
Edificación Rural	IBER	0.08
Edificación Urbana	IBER	0.15
Ruta	Infraestructura (conservador) IBER	0.02

Fuente: Elaboración propia.

Método de Strickler

La ecuación de Strickler permite determinar el coeficiente de rugosidad del lecho de un cauce a partir del diámetro característico de sus asperezas, a través de la siguiente expresión

$$n_s = d_{90}^{1/6}/26.4$$

Donde n_s es el coeficiente de rugosidad de Manning y d_{90} corresponde al tamaño del material del lecho en que el 90% del material es menor.

En el Cuadro 4-101 se puede observar un resumen del coeficiente de rugosidad para cada uno de los sectores en que se dividió el área de estudio.

CUADRO 4-101: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD RIO SAN PEDRO

Sector	Calicata	D90 (mm)	n Strickler	n Strickler adoptado
S1	CA SP 01	5.7	0.016	0.024
	CA SP 02	0.4	0.010	
	CA SP 03	1.0	0.012	
	CA SP 04	60.5	0.024	
	CA SP 05	0.5	0.011	
	CA SP 06	15.0	0.019	
S2	CA SP 07	41.3	0.022	0.024
	CA SP 08	64.4	0.024	
	CA SP 09	58.3	0.024	

CUADRO 4-101: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD RIO SAN PEDRO

Sector	Calicata	D90 (mm)	n Strickler	n Strickler adoptado
	CA SP 10	1.6	0.013	
	CA SP 11	4.6	0.015	
	CA SP 12	4.2	0.015	
	CA SP 13	0.9	0.012	
	CA SP 14	1.7	0.013	
S3	CA SP 15	59.5	0.024	0.024
	CA SP 16	0.1	0.008	
	CA SP 17	64.4	0.024	
	CA SP 18	14.9	0.019	
S4	CA VL-01	67.45	0.024	0.024
	CA VL-02	1.81	0.013	

Fuente: Elaboración Propia.

Método de Cowan

La fórmula de Cowan consiste en la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning, a partir de la separación de factores de incidencia¹:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5$$

Donde:

- n_0 : Valor base de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales comprendidos, valor que puede determinarse con la fórmula de Strickler
- n_1 : Valor agregado a n_0 para corregir el efecto de irregularidades de superficie
- n_2 : Valor para variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal.
- n_3 : Valor de obstrucciones
- n_4 : Valor para la vegetación y condiciones de flujo.
- m_5 : Factor de corrección para los meandros presentes en el canal.

Los valores adecuados a seleccionar según las características correspondientes se presentan en el Cuadro 4-102.

¹Según los términos establecidos en el texto “Hidráulica de los Canales Abiertos”, Ven Te Chow, 1982

CUADRO 4-102: PARÁMETROS UTILIZADOS PARA DETERMINAR COWAN

Condiciones del Canal		Valores	
Material Involucrado	Tierra	n0	0,020
	Corte en Roca		0,025
	Grava Fina		0,024
	Grava Gruesa		0,028
Grado de Irregularidad	Suave	n1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de la sección Transversal	Gradual	n2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010 – 0,015
Efecto Relativo de las Obstrucciones	Insignificante	n3	0,000
	Menor		0,010 – 0,015
	Apreciable		0,020 – 0,030
	Severo		0,040 – 0,060
Vegetación	Baja	n4	0,005 – 0,010
	Media		0,010 – 0,025
	Alta		0,025 – 0,050
	Muy Alta		0,050 – 0,100
Grado de los Efectos por Meandros	Menor	m5	1,000
	Apreciable		1,150
	Severo		1,300

Fuente: Hidráulica De Canales Abiertos Ven Te Chow.

A continuación, se presenta el n de Manning estimado para cada uno de los sectores del estudio.

Sector 1: Río San Pedro sector alto

Este sector del río San Pedro contempla desde aguas abajo de la estación fluviométrica Cuchabrachi hasta el acceso norte a la localidad de San Pedro, el sector se caracteriza por presentar prácticamente nula intervención humana, salvo por defensas fluviales ubicadas que buscan proteger puntualmente infraestructura de interés.



FIGURA 4-105: RIO SAN PEDRO EN SECTOR ALTO

Fuente: Elaboración Propia.

El material del lecho este compuesto por gravas redondeadas de tamaño medio, la sección presenta cierta irregularidad acorde a la geología del sector existe vegetación nativa. En el Cuadro 4-103, se observan los resultados de la rugosidad de Manning para el sector.

CUADRO 4-103: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD RIO SAN PEDRO

Parámetros	Coficiente	Cauce principal
Material considerado	n_0	0.026
Grado de Irregularidad	n_1	0.005
Variaciones de la Sección Transversal del canal	n_2	0.005
Efectivo relativo de obstrucciones	n_3	0.00
Vegetación	n_4	0.005
Cantidad de Meandros	m_5	1.1
	n	0.045

Fuente: Elaboración propia.

Sector 2: Río San Pedro en zona poblada

Este sector comprende la zona urbana de San Pedro, desde el acceso norte a la altura de Pucara de Quito hasta la altura del Baden de Acceso a Sequitor, en este sector el río se ve ampliamente intervenido producto de las defensas fluviales construidas para proteger a la población que se ubica en las riberas.



FIGURA 4-106: RIO SAN PEDRO EN SECTOR URBANO

Fuente: Elaboración Propia.

El material del lecho este compuesto por gravas pequeñas y material fino, la sección transversal presenta ciertas variaciones en función de las defensas fluviales con irregularidades menores donde no se observa vegetación al centro del cauce. En el Cuadro 4-104, se observan los resultados de la rugosidad de Manning para el sector.

CUADRO 4-104: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD RIO SAN PEDRO

Parámetros	Coficiente	Cauce principal
Material considerado	n_0	0.024
Grado de Irregularidad	n_1	0.005
Variaciones de la Sección Transversal del canal	n_2	0.005
Efectivo relativo de obstrucciones	n_3	0.00
Vegetación	n_4	0.00
Cantidad de Meandros	m_5	1.1
	n	0.034

Fuente: Elaboración propia.

Sector 3: Río San Pedro sector bajo

Este sector abarca desde el baden de acceso Sequitor hasta el Ayllu de Tulor, donde la sección transversal del cauce se ensancha en forma importante presentando un comportamiento trezado.



FIGURA 4-107: RIO SAN PEDRO SECTOR BAJO

Fuente: Elaboración Propia.

El material del lecho está compuesto por gravas pequeñas y material fino, el cauce presenta irregularidades menores, donde no se observa vegetación en el lecho del río a diferencia de las zonas del cauce que solo presentan escurrimiento para las crecidas considerables.

En el Cuadro 4-105, se observan los resultados de la rugosidad de Manning para el sector.

CUADRO 4-105: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD RIO SAN PEDRO

Parámetros	Coficiente	Ribera (Cauce inactivo)	Cauce principal
Material considerado	n_0	0.024	0.024
Grado de Irregularidad	n_1	0.005	0.005
Variaciones de la Sección Transversal del canal	n_2	0	0.005
Efectivo relativo de obstrucciones	n_3	0.01	0
Vegetación	n_4	0.005	0
Cantidad de Meandros	m_5	1	1.1
	n	0.044	0.037

Fuente: Elaboración propia.

Sector 4: Río Vilama

Este sector comprende el tramo del río Vilama ubicado frente al Ayllu por una longitud de 1 Kilometro, el sector paralelo al Ayllu presenta un sector bastante intervenido por medio de una canalización con defensas fluviales la cual desaparece aguas abajo del Ayllu donde se desarrolla un río trezado con forma de abanico.



FIGURA 4-108: RIO VILAMA AGUAS ABAJO DEL AYLLU DE VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

El material del lecho está compuesto por gravas redondeadas de tamaño pequeño y medio donde no se observa vegetación al centro del cauce. En el Cuadro 4-106, se observan los resultados de la rugosidad de Manning para el sector.

CUADRO 4-106: CÁLCULO DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD RIO SAN PEDRO

Parámetros	Coficiente	Cauce Principal
Material considerado	n_0	0.026
Grado de Irregularidad	n_1	0.005
Variaciones de la Sección Transversal del canal	n_2	0.005
Efectivo relativo de obstrucciones	n_3	0
Vegetación	n_4	0
Cantidad de Meandros	m_5	1
	n	0.036

Fuente: Elaboración propia.

Rugosidades asignadas

En la Figura 4-109 se presenta la distribución de las rugosidades propuestas en este acápite, las cuales se utilizarán como dato de entrada en los distintos tipos de modelación hidráulica.

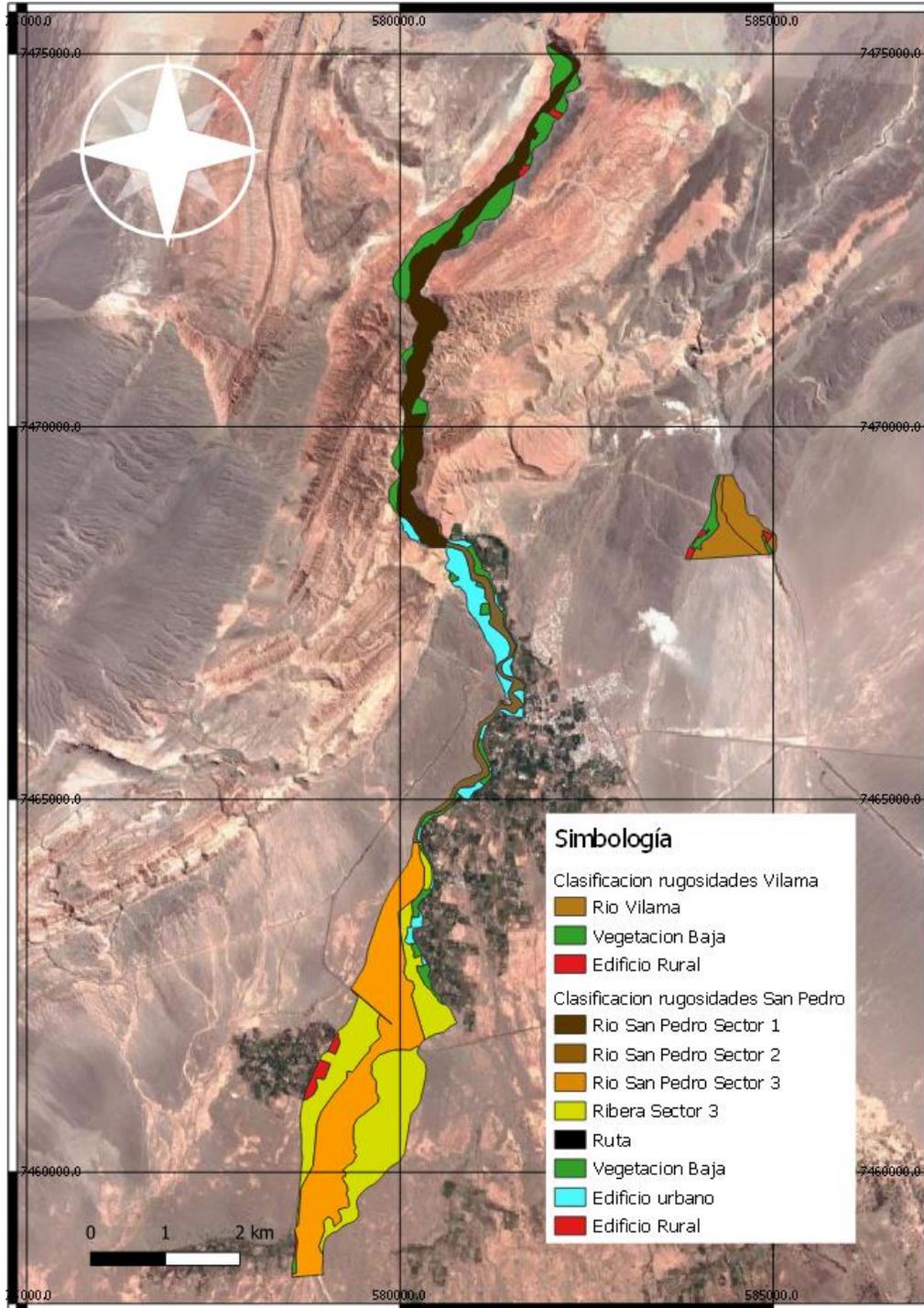


FIGURA 4-109: RUGOSIDADES ASIGNADAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.4.3. Concentración de Sólidos

Visita a terreno

Sobre la base de la visita de terreno a continuación se presentan aspectos relacionados con el transporte de sedimentos, la matriz del lecho y la producción de sedimentos que ayuden a definir la estrategia para establecer la concentración de sedimentos.

Rio San Pedro

En este caso desde aguas abajo hacia arriba se puede decir lo siguiente:

- Aguas abajo del pueblo se aprecia una amplia llanura de inundación con disponibilidad de mucho sedimento que puede ser transportado, que se traduce en que el río se comporte trezado con secciones poco definidas y de riberas bajas. Con cauces principales y cauces secundarios muy dinámicos que por la ribera derecha incluso se acercan peligrosamente al camino que une San Pedro con el ayllu de Coyo, que de acuerdo a información entregada por los lugareños en el evento del 2019 culminó en cortes del camino y en sectores inundados del mencionado ayllu.
En este tramo aguas abajo de San Pedro el lecho está conformado por grava con matriz arenosa y en algunos sectores en los estratos superficiales se aprecia la existencia de una costra de espesor variable conformada por limo y arcillas. El mecanismo que se observa es que en las zonas donde se produce apozamiento de las aguas, principalmente en cauces secundarios, se produce la sedimentación de este material fino conformando esta costra superficial dura conformada por material fino.
- Dado que en los días en que se realizó la visita a terreno hubo precipitaciones en la parte alta de la cuenca, incluso en el mismo San Pedro, el río San Pedro presentaba un escurrimiento asociado a un caudal bajo, con un color de aguas coincidente con las tonalidades de los estratos limo – arcillosos.
- En este sentido podemos decir que el recorrido que se realizó aguas arriba del sector urbano, es decir aguas arriba del Pucará de Quito, hacia el sector de Catarpe, se aprecia la existencia de cerros con nula vegetación, y mucha disponibilidad de limos y arcillas, que producto de la escorrentía, explican el color de las aguas. Se aprecian también en sectores puntuales sectores con abundante producción de matriz arenosa, que aparecen en algunos casos como estratos intermedios o superficiales de estratos limo-arcillosos.
En cambio, en el lecho del cauce predominan las gravas y gravillas en matriz arenosa de tamaño medio a grueso. En el sector próximo a los límites aguas arriba de la zona de estudio se apreciaron sectores puntuales con presencia de bolones de tamaños medios a grandes.

Rio Vilama

En todo el tramo se aprecia la presencia de abundante arena gruesa en el lecho con presencia de gravilla y gravas de tamaños medio a grande, con presencia de una cantidad moderada de bolones de tamaño medio.

No se aprecian vestigios de embanques conformados por limos en ningún lugar del área de estudio, lo que demuestra que en este escurrimiento el transporte de sedimentos es aluvial, no detrítico, lo que calza con la información entregada por lugareños que manifiestan que el color de las aguas no coincide con el color anaranjado de limos o arcillas.

Como se mencionó anteriormente aguas abajo de la zona de estudio, el Río no presenta un cauce definido, transformándose por lo tanto en un cauce más bien trenzado, que termina incidiendo en el sector de la ruta que une San Pedro con Toconao en diversos puntos, existiendo el riesgo que se embalse producto de la presencia de la plataforma del camino y se encauce hacia sectores más bajos con el consiguiente riesgo de inundación.

Literatura técnica

Dado que no se tienen mediciones de terreno que permitan establecer con precisión la concentración de sedimentos asociadas a eventos hidrológicos, se debe recurrir a las recomendaciones que establece la literatura técnica para ayudar a entender los distintos procesos que pueden ocurrir en los sectores en estudio frente a eventos de crecida. Para esto un aspecto fundamental es caracterizar el tipo de flujo que se puede generar en la cuenca.

Para esto la literatura ofrece distintas clasificaciones. Una de las más destacadas es la que establece que los flujos de sedimentos hiperconcentrados se definen como eventos de inundación con concentraciones de sedimentos que superan el 20% en volumen. Flujos con concentraciones de sedimentos menores que 20% en volumen son esencialmente inundaciones de agua con alta carga de transporte de fondo y suspensión, donde la carga de fondo puede verse afectada por la alta concentración de la carga en suspensión (por ejemplo, la carga de lavado de sedimentos finos).

Con el aumento de la concentración de sedimentos, una inundación de agua se convertirá en una avalancha de lodo o "mud flood". El intervalo general de concentración de sedimentos en la inundación de lodo es de 20% a 40 - 45% en volumen. Las inundaciones de lodo pueden ser difíciles de distinguir de las inundaciones de agua y se presentan comportamientos de flujo muy similares como se indica en la tabla, pero las propiedades de los fluidos de las inundaciones de lodo son definitivamente diferentes a la de las inundaciones de agua, con mucha mayor viscosidad y densidad. La tabla recoge las cuatro categorías diferentes de flujos de sedimentos hiperconcentrados y presenta sus características de conducción. Esta tabla fue desarrollada a partir de los datos de laboratorio utilizando los depósitos de flujos de lodo reales de Glenwood Springs, Colorado. Sin embargo, alguna variación en la delimitación de las diferentes categorías de eventos de flujo se debe esperar sobre la base de la geología de la cuenca.

	Sediment Concentration		Flow Characteristics
	by Volume	by Weight	
Landslide	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	Will not flow; failure by block sliding
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Block sliding failure with internal deformation during the slide; slow creep prior to failure
Mudflow	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flow evident; slow creep sustained mudflow; plastic deformation under its own weight; cohesive; will not spread on level surface
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Flow spreading on level surface; cohesive flow; some mixing
Mud Flood	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	Flow mixes easily; shows fluid properties in deformation; spreads on horizontal surface but maintains an inclined fluid surface; large particle (boulder) setting; waves appear but dissipate rapidly
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Marked settling of gravels and cobbles; spreading nearly complete on horizontal surface; liquid surface with two fluid phases appears; waves travel on surface
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separation of water on surface; waves travel easily; most sand and gravel has settled out and moves as bedload
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Distinct wave action; fluid surface; all particles resting on bed in quiescent fluid condition
Water Flood	< 0.20	< 0.41	Water flood with conventional suspended load and bedload

FIGURA 4-110: COMPORTAMIENTO DE FLUJOS DE LODO COMO FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS

Fuente: Manual para la modelación de flujos en FLO 2D.

Conclusiones

Como en el río Vilama no se aprecian vestigios de embanques conformados por limos en ningún lugar del área de estudio, se concluye que el principal mecanismo de transporte de sedimentos es aluvial, por lo tanto, no detrítico, lo que calza con la información entregada por lugareños que manifiestan que el color de las aguas no coincide con el color anaranjado de limos o arcillas. Por lo tanto, su concentración Cv debiera ser menor o igual a 20%. Siguiendo un criterio conservador se ha adoptado acá un Cv igual a un 20%, tomando el valor máximo de manera de maximizar los caudales.

En el caso del río San Pedro se aprecia que la variación del comportamiento del flujo tiene una fuerte componente espacial, pues aguas abajo de San Pedro parece predominar el transporte de sedimentos de fondo y suspensión de arenas. Aguas arriba aparecen depósitos moderados de limos y arenas, lo que demuestra que aparece una componente medianamente importante de flujo detrítico, lo que va en concordancia con la composición del lecho fundamentalmente arenoso y de la cuenca, predominantemente limo-arcilloso.

Esto permite concluir que San Pedro tiene un comportamiento bifásico donde convive un “flujo de agua” y un flujo detrítico, cuya componente principal dependerá de la magnitud de la crecida y del tipo de sedimentos que predominará en ese momento.

Dado que no existe un modelo comercial que permita modelar este comportamiento bifásico del flujo, es que se plantea determinar el transporte de sedimentos aluvial, fondo y suspensión, aplicando formulaciones a los resultados de los parámetros obtenidos con el modelo unidimensional.

Sobre la base de los registros capturados por la DOH para el evento de febrero del año 2019, mediante la grabación de un vuelo con dron en el río San Pedro, se logra apreciar predominantemente un comportamiento de crecida líquida en el cauce. En consecuencia, acorde a los resultados del estudio hidrológico, se tiene que el evento de febrero del 2019 se puede asimilar a un evento de periodo de retorno de 25 años, por lo que se propuso estudiar mediante un modelo 1D y considerando una concentración de un 20% las crecidas de 25 años de periodo de retorno e inferiores. Por otro lado, para caracterizar la componente detrítica se planteó utilizar el modelo Flo 2D para eventos de crecida mayores a 50 años de período de retorno, donde por la magnitud de los caudales se esperaría que predominara la componente de flujo de barro.

Sobre la base de la inspección de terreno no existen grandes vestigios de embanques de material fino, se puede pensar que el valor de la concentración es moderado. De acuerdo a la comparación de cuencas similares donde este Consultor ha realizado estudios, la Concentración Cv debe estar comprendida entre un 25% y 30%. Considerando un valor medio se establece en este estudio un valor de Cv de 28%.

Adicionalmente, se estudiará la crecida asociada al caudal formativo de ambos cauces mediante el modelo 2D, considerando una concentración del 20% y adoptando un periodo de retorno de 2años.

4.3.4.4. Criterios de modelación

Viscosidad y tensión cohesiva

A menos que se disponga de un análisis reológico del material sedimentario del sitio estudiado, las siguientes relaciones empíricas se pueden utilizar para calcular la viscosidad y la tensión cohesiva:

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$$

donde α_i y β_i son coeficientes empíricos definidos por experimento de laboratorio (O'Brien y Julien, 1988). Se demuestra que la viscosidad η y la tensión cohesiva τ_y son funciones de la concentración volumétrica del sedimento C_v de limos, arcillas y, en algunos casos, de las arenas finas y no incluyen material clástico mayor, arrastrado por el flujo. La viscosidad de la matriz fluida es también una función de la temperatura del fluido y de los porcentajes y tipo de las arcillas y limos que componen el sedimento. Flujos de lodo muy viscosos tienen altas concentraciones de sedimentos y en consecuencia las tensiones cohesivas y puede resultar en un flujo laminar (extremadamente raros en la naturaleza). Flujos menos viscosos (inundaciones de lodo) son siempre turbulentos.

Como en la mayoría de los casos, la viscosidad local y datos de tensión de cohesiva no está disponible y dichas variables deben ser elegidas para simular un flujo de lodo viscoso, se recomienda utilizar Glenwood 4. Las variables para esta muestra darán como resultado una alta viscosidad y tensión cohesivas moderadas con altas concentraciones de sedimentos. Esta concentración de sedimentos volumétrica se puede asignar a las descargas de agua incrementales asociada a un paso de tiempo determinado del hidrograma de entrada. El volumen de sedimentos entrante puede representar socavación de la quebrada, erosión de las orillas o el desprendimiento de laderas.

Source	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$	
	α	β	α	β
Field Data				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relationships Available from the Literature				
Iida (1938)*	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-

*See O'Brien (1986) for the references.

Conversion: Shear Stress: 1 Pascal (PA) = 10 dynes/cm²
Viscosity: 1 PAs = 10 dynes-sec/cm² = 10 poises

FIGURA 4-111: TENSIÓN COHESIVA Y VISCOSIDAD DEL FLUÍDO EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS

Fuente: Manual para la modelación de flujos en FLO 2D.

4.3.4.5. Hidrogramas de Crecidas

Los caudales peak e hidrogramas fueron obtenidos del Estudio Hidrológico. En el caso de los caudales peak utilizados se presentan en el siguiente cuadro

CUADRO 4-107: CAUDALES PEAK

	Tr=2	Tr=5	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100	Tr=150	Tr=200
San Pedro	33.9	89	134.8	200.8	254.4	311	340.9	370.8
Vilama	12.9	30	42.3	58.3	70.4	82.6	88.35	94.1

Fuente: Elaboración propia.

La forma de los hidrogramas del río San Pedro, son caracterizado por un tiempo base de 40 hrs y Tiempo del Peak de 24hrs. Un ejemplo se presenta a continuación.

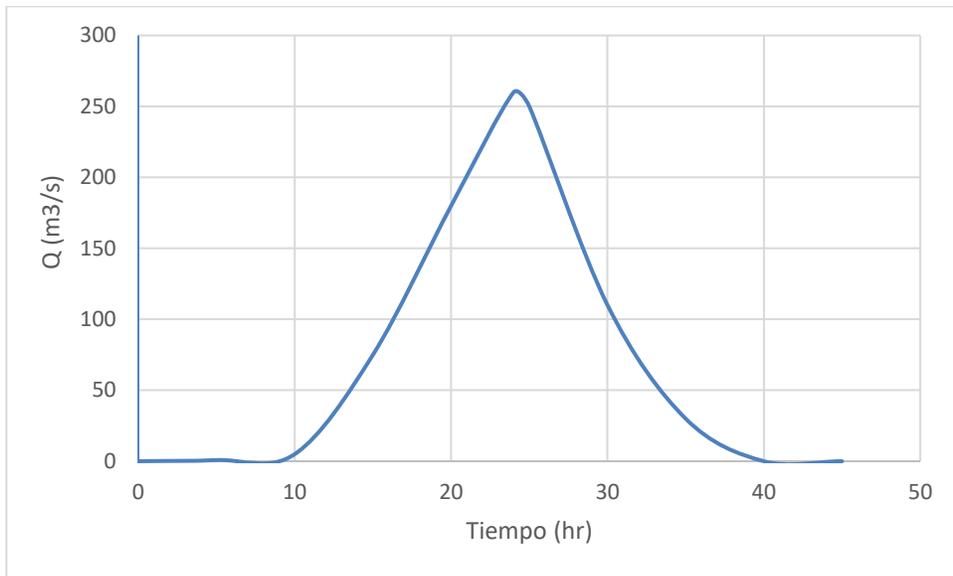


FIGURA 4-112: HIDROGRAMA RIO SAN PEDRO T50

Fuente: Elaboración Propia.

En el caso del río Vilama el Tiempo base es de 40 hrs y tiempo Peak de 24hrs. Un ejemplo se presenta a continuación.

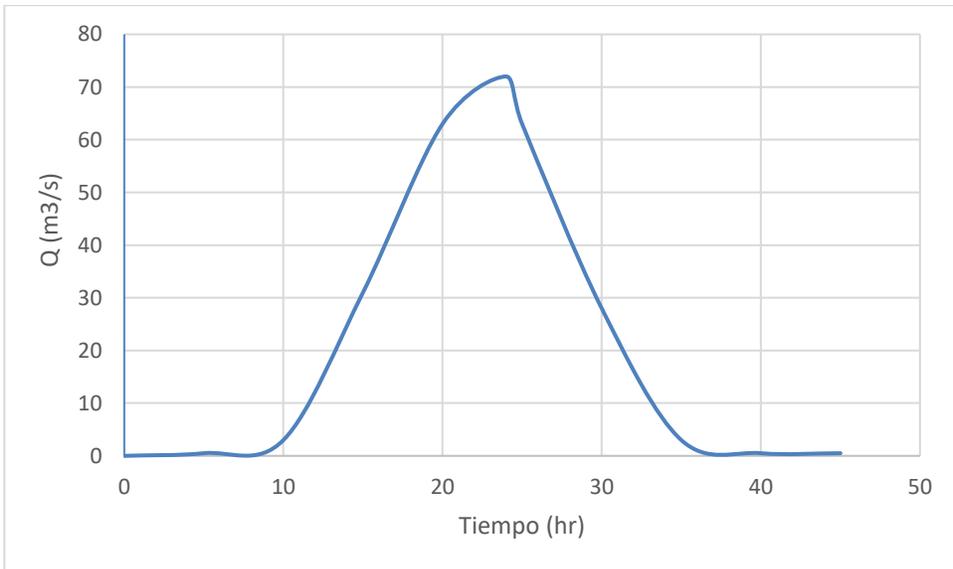


FIGURA 4-113: HIDROGRAMA RIO VILAMA T50

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.4.6. Condiciones Iniciales

Modelación Unidimensional

Para este tipo de moderación no se imponen condiciones iniciales ya que este modelo se desarrolla asumiendo flujo permanente.

Modelación Bidimensional

La condición inicial que se utilizó fue impuesta aguas arriba y corresponde a que en $t=0s$ la condición de caudal es igual a $0 \text{ m}^3/s$, es decir el modelo propaga la onda de crecida sobre un lecho inicial seco.

4.3.4.7. Condiciones de Borde

Modelación Unidimensional

En el río San Pedro la condición de borde utilizada aguas arriba es la de altura normal y aguas abajo es la de altura normal. El régimen de análisis para el flujo se considera mixto.

En el río Vilama la condición de borde utilizada aguas arriba es la de altura crítica, propia de cauces con flujo intermitente y alta pendiente, aguas abajo se impone la condición de altura normal. El régimen de análisis para el flujo se considera mixto.

Modelación Bidimensional

La condición de borde impuesta aguas arriba corresponde a los hidrogramas referidos en el acápite 2.4.4. Aguas abajo el Flo-2D no requiere considerar una condición de borde.

4.3.5. Análisis de Validez de los Modelos Numéricos

Para analizar la validez de los modelos se procede a realizar la modelación de una crecida conocida de la cual se dispongan datos de caudal y extensión de inundación, en este caso se esa crecida corresponderá a la del año 2019, que acorde al estudio hidrológico correspondería a una crecida de periodo de retorno de 25 años y cuya superficie de inundación fue delimitada a partir de las imágenes del satélite Sentinel durante el proceso de determinación del cauce histórico.

En la Figura 4-114, Figura 4-115 y Figura 4-116 se puede observar la comparación entre la superficie obtenida de la modelación 1D (Figura 4-114, Figura 4-115) y la modelación 2D (Figura 4-116) con la superficie de la crecida del año 2019 delimitada satelitalmente. De estas se puede concluir que, aunque las superficies no tienen exactamente la misma extensión, los modelos si reproduce los sectores que resultaron mayormente afectados como lo son las zonas colindantes al puente San Pedro y la ruta de circunvalación.

Es importante mencionar que la validación que se busca hacer en este caso es del tipo cualitativa más que cuantitativa, ya que se tienen una cantidad considerable de impedimentos que permiten obtener un resultado más preciso como, por ejemplo:

- *Cambios en la topografía del cauce:* actualmente se encuentran desarrollando defensas fluviales en la zona urbana de San Pedro lo que debería disminuir los efectos de las crecidas, esto sin considerar que el cauce por si solo se encuentra cambiando permanentemente. Asimismo, en el sector 3 se realiza extracción de áridos a lo largo del cauce, lo cual también produce cambios en la topografía respecto a la situación base del año 2019.
- *Precisión de la delimitación de la superficie afectada el 2019:* la imagen Sentinel corresponde a varios días posterior a la crecida por lo que mucho material en zonas urbanas ya pudo haber sido removido.
- *Falta de registro de trazas y volúmenes acumulados,* si se quiere realizar una buena calibración de los modelos estas variables deben ser capturadas de forma posterior a la crecida.
- *Falta de topografía* en sectores de desborde como son calle Domingo Atienza y extensión de la ruta circunvalación. En este último caso, debido a falta de topografía representativa del punto bajo de la ruta y hacia aguas abajo del mismo, no es posible representar el cauce que se activa por ese sector y por lo tanto, toda el agua de la crecida escurre hacia Coyo y Tolor.

En términos generales con los modelos se obtiene un área mayor de inundación, lo que podría deberse a que el área registrada o estimada en el año 2019, no corresponde al momento del peak del hidrograma, sino un momento posterior.

Para complementar el análisis anterior se procede a utilizar capturas obtenidas de un vuelo Dron realizado por la DOH Región de Antofagasta, el que, si bien fue hecho el día posterior al evento de febrero del, tiene una resolución mucho más detallada y permite identificar agua que quedo apozada posterior a la crecida. En la Figura 4-117 y Figura 4-118 se puede observar la comparación de los resultados de la modelación 2D y los registros obtenidos por el Dron, se puede observar que los sectores donde el modelo 2D indica inundaciones efectivamente existen vestigios de la crecida, lo que respalda los resultados obtenidos.

Si ahora se compara las áreas del modelo 1D con el 2D, se puede apreciar que en términos generales con el modelo 2D se obtiene un área mayor en los distintos sectores, lo cual puede deberse a que el modelo 2D incluye el efecto de peraltamiento en las curvas lo cual puede generar desbordes, además el modelo 2D al ser un modelo continuo en la superficie permite identificar desbordes por puntos más bajos que no siempre se ven representados en los perfiles transversales de un modelo 1D.



FIGURA 4-114: COMPARACIÓN SUPERFICIE DE INUNDACIÓN PARA CRECIDA 2019-MODELO 1D

Fuente: Elaboración Propia.

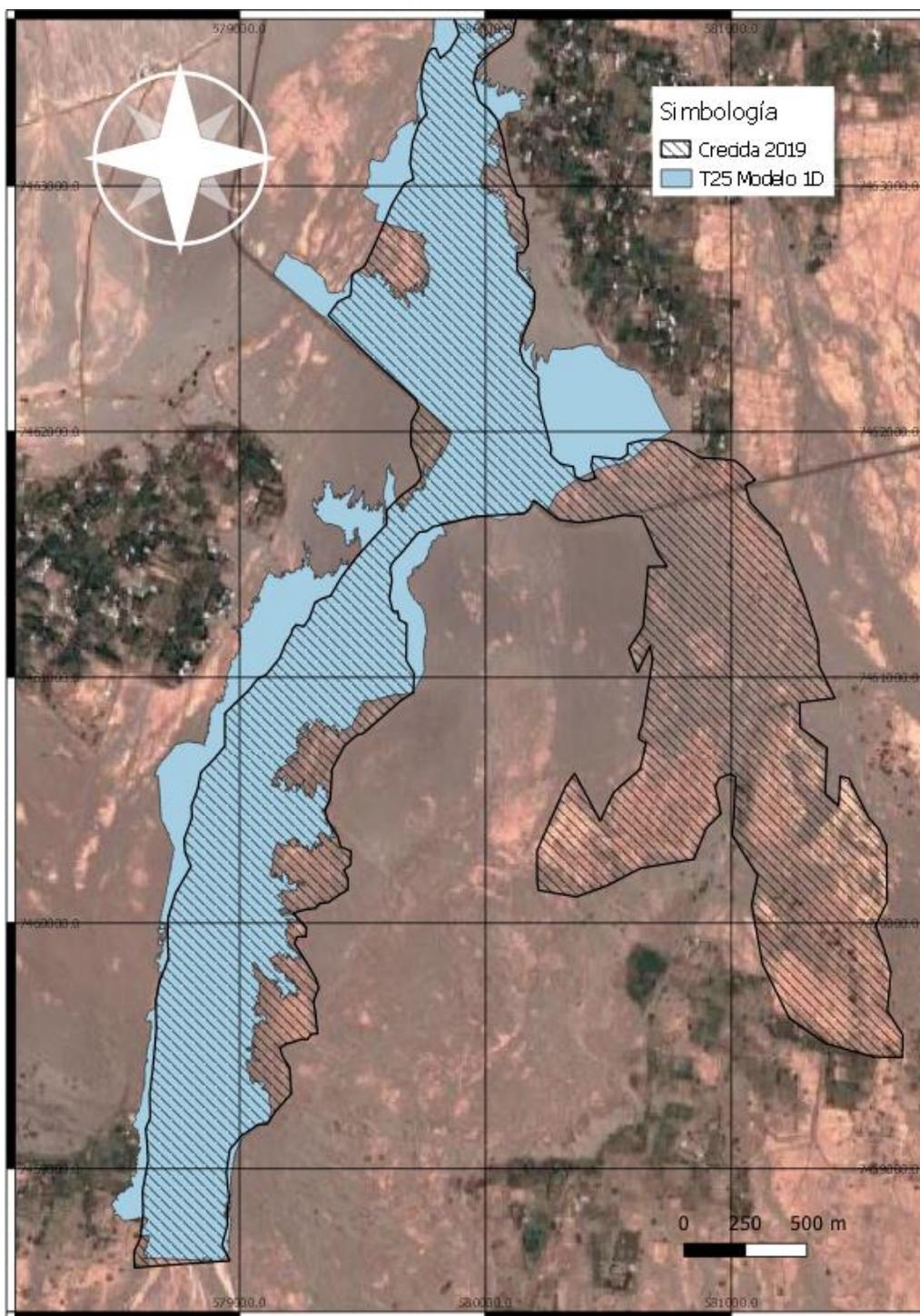


FIGURA 4-115 : COMPARACIÓN SUPERFICIE DE INUNDACIÓN PARA CRECIDA 2019. MODELO 1D

Fuente: Elaboración Propia.

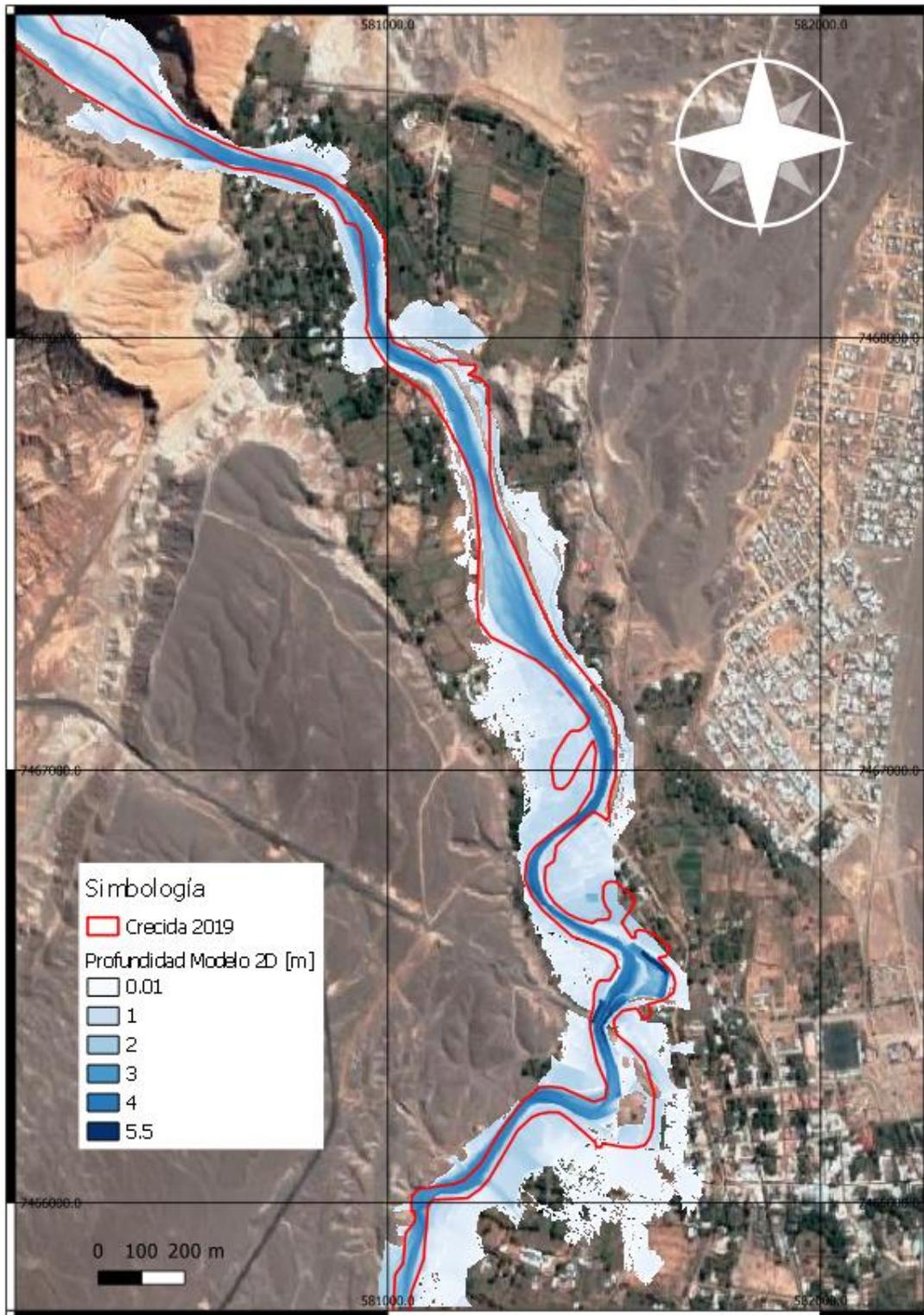


FIGURA 4-116: COMPARACIÓN SUPERFICIE DE INUNDACIÓN PARA CRECIDA 2019.MODELO 2D

Fuente: Elaboración Propia.

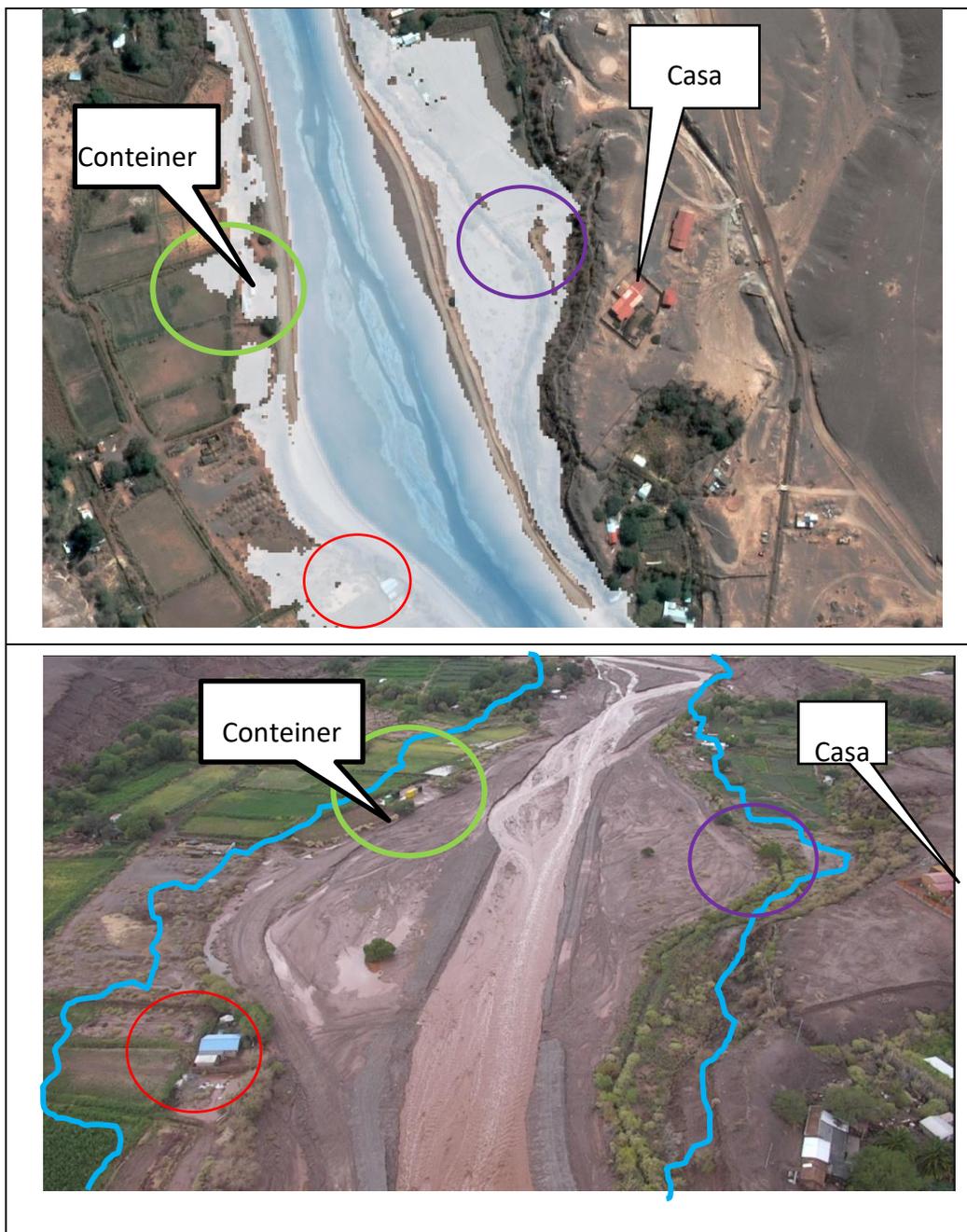


FIGURA 4-117: COMPARACIÓN SUPERFICIE DE INUNDACIÓN IMAGEN VUELO DRON-MODELO 2D

Fuente: Elaboración Propia.

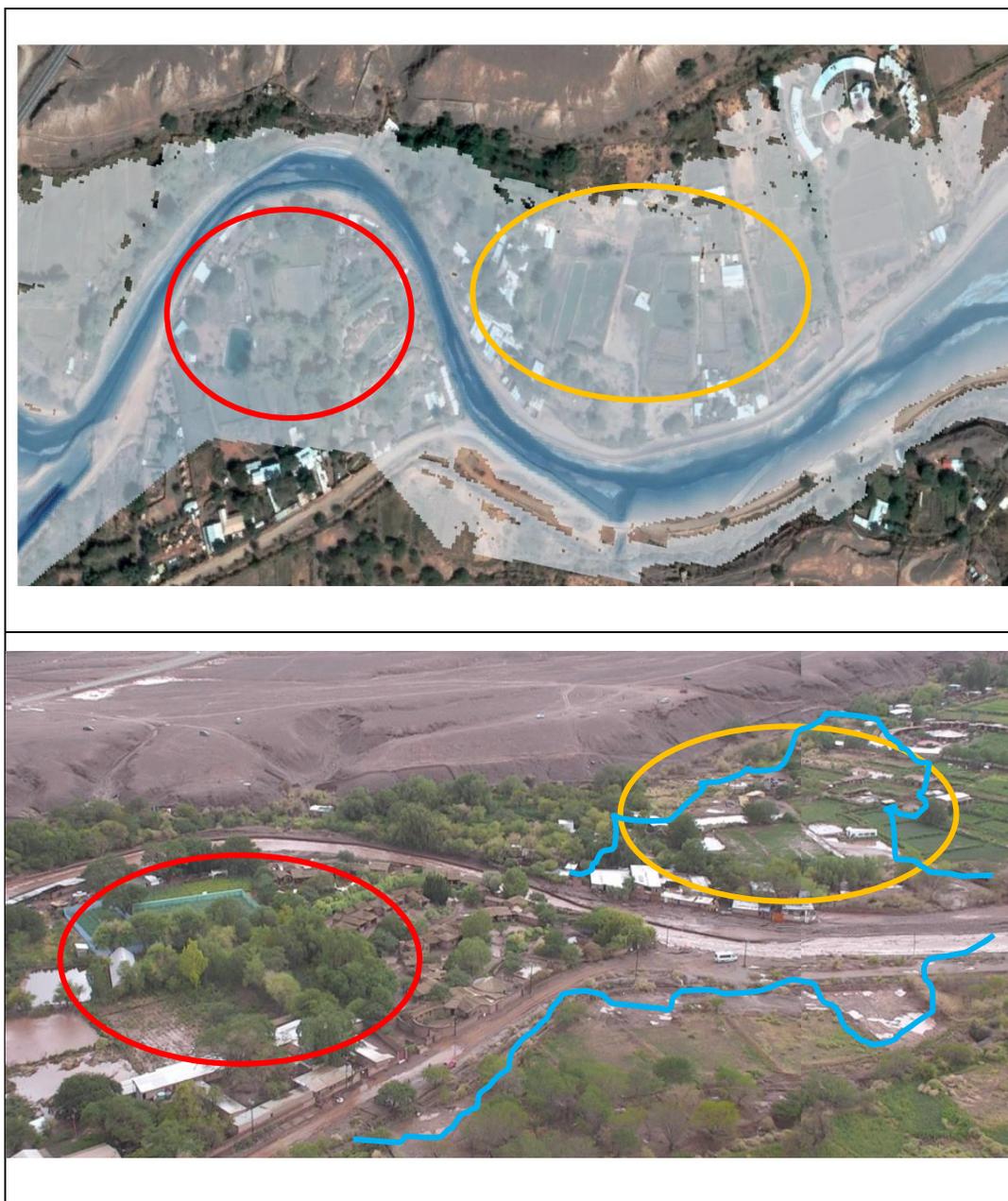


FIGURA 4-118: COMPARACIÓN SUPERFICIE DE INUNDACIÓN IMAGEN VUELO DRON -MODELO 2D

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.6. Resultados Estudio Hidráulico Unidimensional de Crecidas

4.3.6.1. Río San Pedro

Resultados rio San Pedro entre estación Cuchabrachi y Pucara de Quito

En la Figura 4-119 se presentan las superficies de inundación para los diversos periodos de retorno simulados en el sector norte del rio de San Pedro, donde se observa una sección de escurrimiento bastante extensa la cual solo se ve restringida en sectores puntuales para proteger asentamientos humanos específicos o la propia morfología del cauce.



FIGURA 4-119: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 4-120 se presentan las velocidades medias en el centro del cauce para el tramo analizado, se observa que las velocidades son proporcionales a la magnitud del periodo de retorno simulado y presentan incrementos coincidentes con las zonas donde el flujo se ve estrangulado ya sea por factores humanos o la propia morfología del cauce. Llama la atención a que pesar de ser una superficie de gran extensión las velocidades son considerable, esto podría atribuirse a que el sector alto del río tienen una gran pendiente.

Las superficies de inundación y la modelación hidráulica unidimensional se presentan en las carpetas “3. Planos” y “Anexo 4-3-1”, las que se encuentra dentro del volumen de ingeniería.

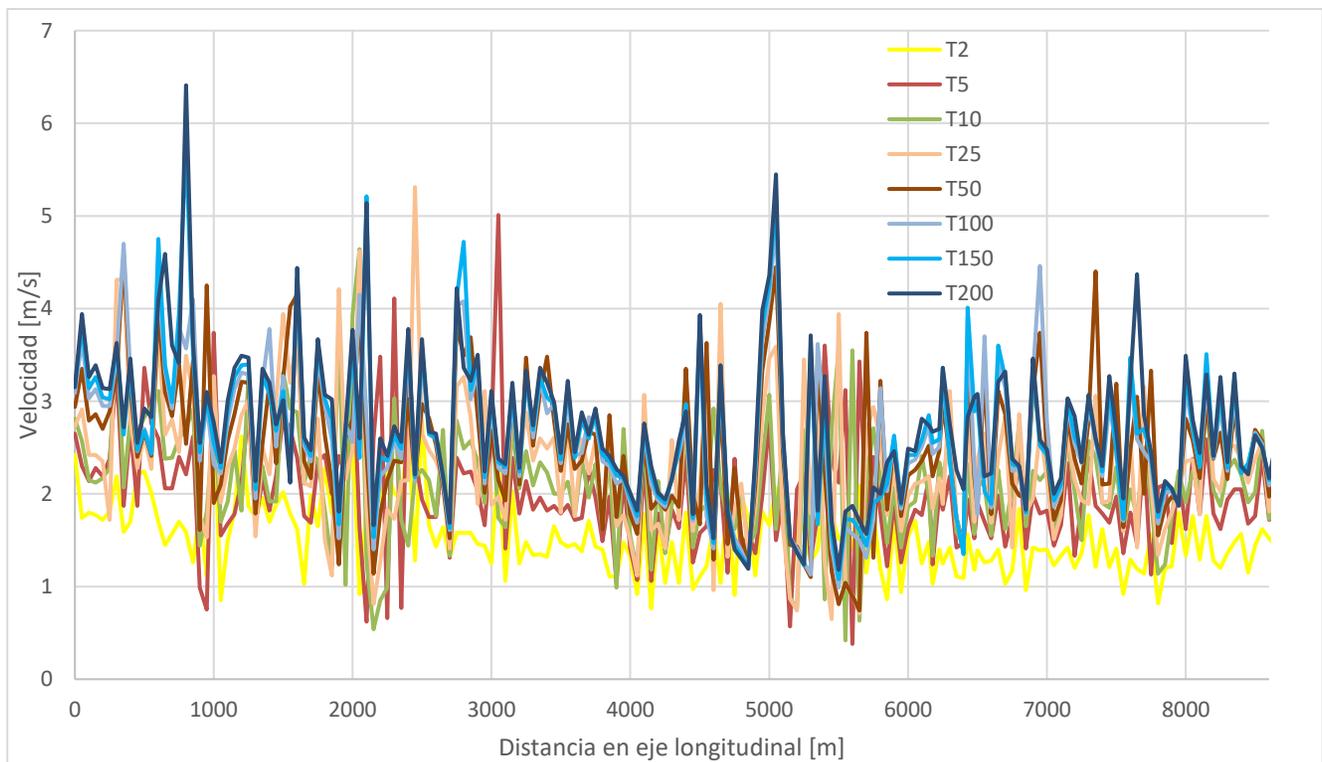


FIGURA 4-120: PERFIL LONGITUDINAL DE VELOCIDADES

Fuente: Elaboración Propia.

Resultados rio San Pedro entre Pucara de Quito hasta acceso a Sequitor

En la Figura 4-121 se presentan las superficies de inundación para los diversos periodos de retorno simulados en el sector urbano de San Pedro, donde se observa una sección de escurrimiento bastante más restringida que la del sector anterior, existe una gran presencia de desbordes los que coinciden con las zonas de mayor estrechamiento y curvas, como por ejemplo lo es el sector a la altura del puente San Pedro.

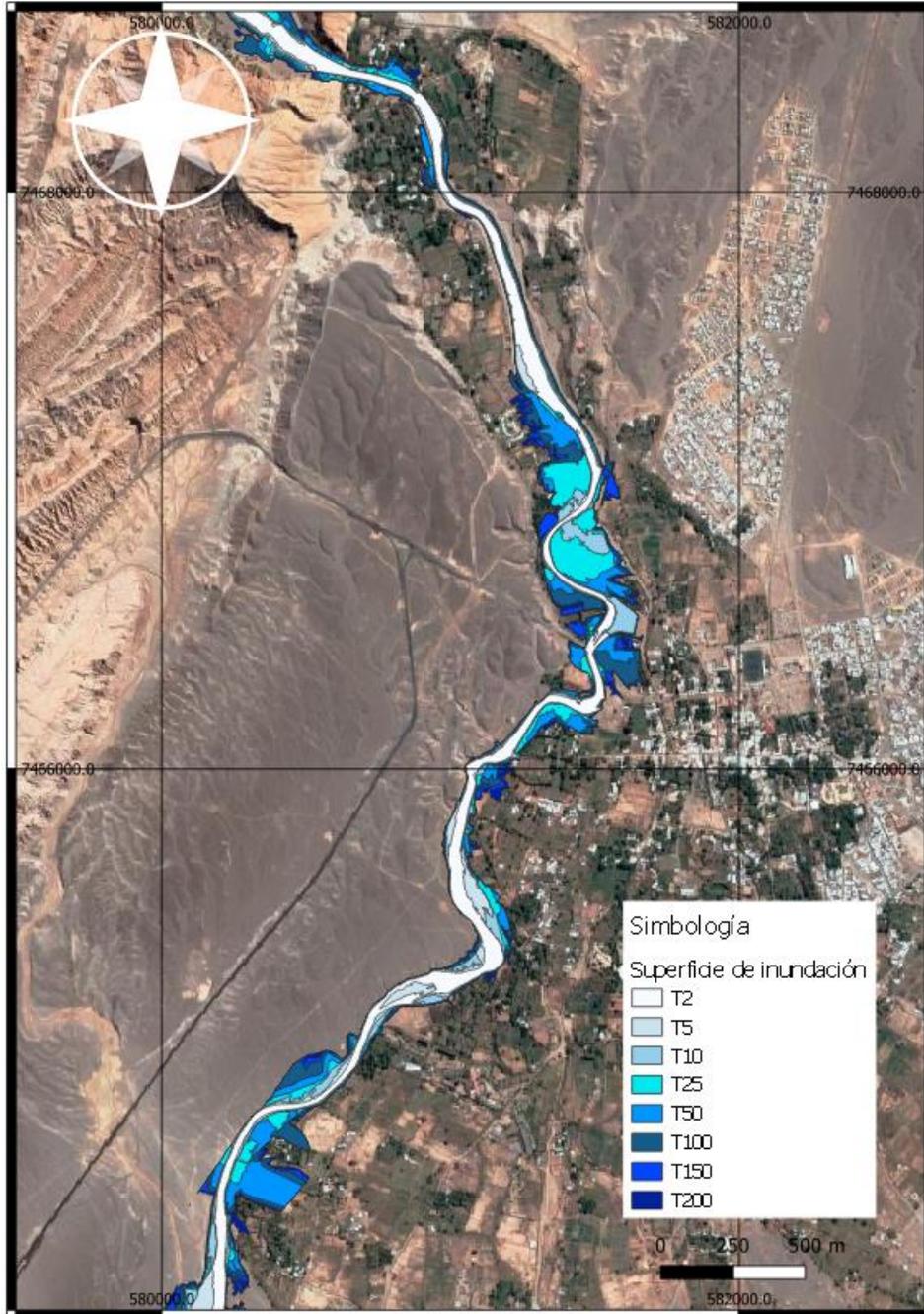


FIGURA 4-121: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 4-122 se presentan las velocidades medias en el centro del cauce para el tramo analizado, se observa que las velocidades presentan un comportamiento bastante irregular siendo más notorio a medida que los periodos de retorno modelados son mayores, lo que es de esperarse ya que a mayores caudales se generan más desbordes lo que tienen como consecuencias disminuciones abruptas de velocidad.

Respecto al puente San Pedro este presenta capacidad suficiente para transportar el flujo como se puede observar en la Figura 4-123, sin embargo, hay que considerar que la revancha es prácticamente nula y el sector fue modelado sin considerar las obras que se encuentran en desarrollo las que disminuirán la sección transversal de la obra, implicando su colapso.

Las superficies de inundación y la modelación hidráulica unidimensional se presentan en las carpetas “3. Planos” y “Anexo 4-3-1”, las que se encuentran dentro del volumen de ingeniería.

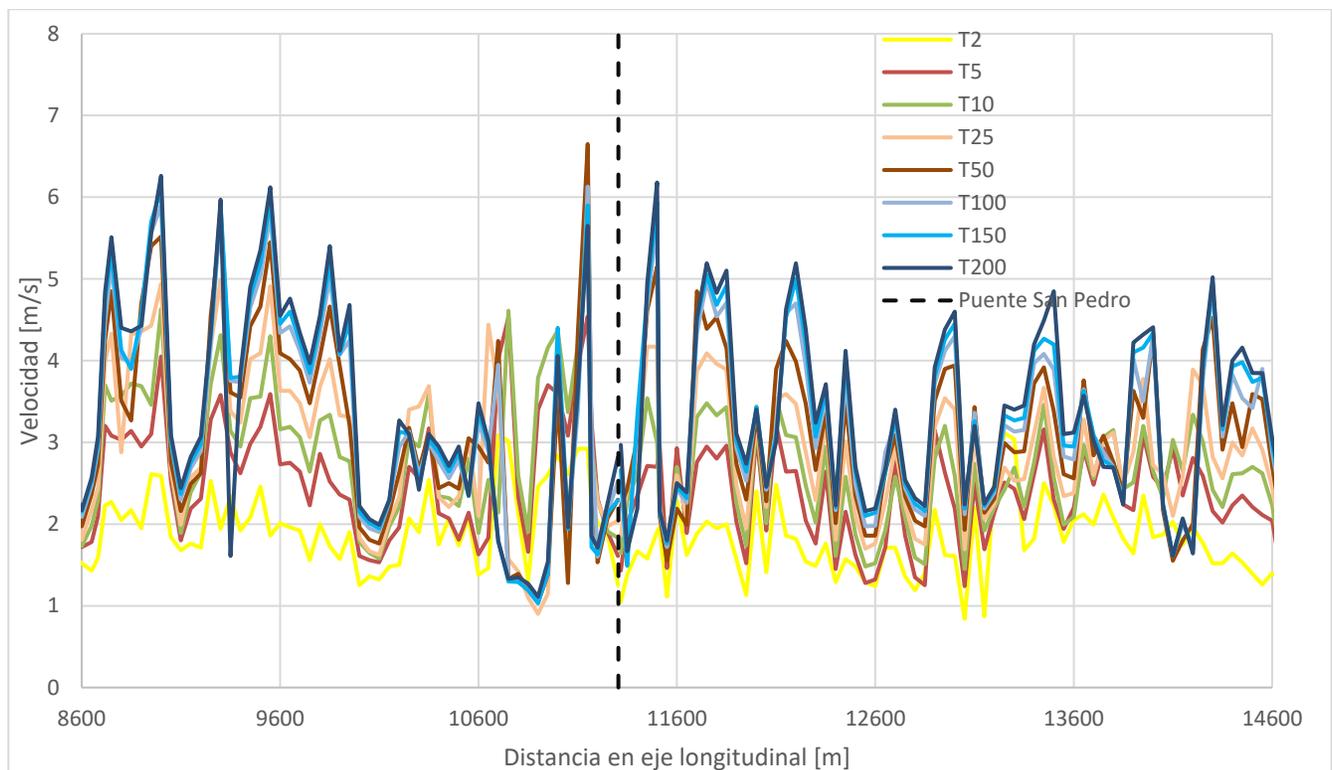


FIGURA 4-122: PERFIL LONGITUDINAL DE VELOCIDADES

Fuente: Elaboración Propia.

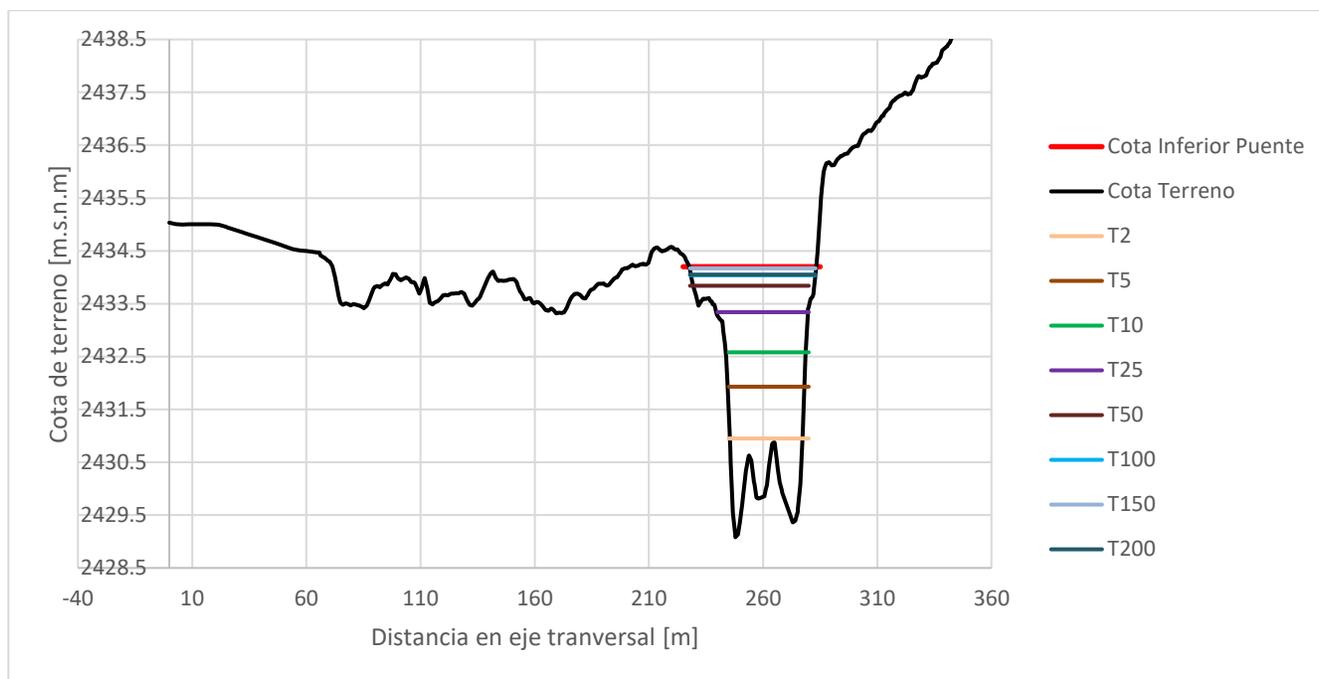


FIGURA 4-123: PERIODOS DE RETORNO SIMULADO EN EL PUENTE SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

En el Cuadro 4-108 se evalúa la revancha para el Puente San Pedro para los diversos periodos de retorno, se observa que para periodos de retorno iguales o superiores a 25 años la revancha es inferior a un metro por lo que no se cumpliría la revancha mínima de acuerdo a criterios de la Dirección de Vialidad para un diseño de Puente.

Se observa que el periodo de retorno asociado a 150 años presenta mayor cota que el asociado a 200 años, esto se debe a que aguas abajo el periodo de retorno mayor supera la sección canalizada provocando que el eje se encuentre menos peraltado.

CUADRO 4-108: EVALUACIÓN DE LA REVANCHA EN PUENTE SAN PEDRO

T	Cota escurrimiento [m.s.n.m.]	Cota inferior Viga [m.s.n.m.]	Revancha [m]	Cumple Revancha
2	2430,95	2434,2	3,25	Si
5	2431,93	2434,2	2,27	Si
10	2432,58	2434,2	1,62	Si
25	2433,34	2434,2	0,86	No
50	2433,84	2434,2	0,36	No
100	2434,04	2434,2	0,16	No
150	2434,17	2434,2	0,03	No
200	2434,05	2434,2	0,15	No

Fuente: Elaboración propia.

Resultados río San Pedro entre acceso a Sequitor hasta el Ayllu de Tulor

En la Figura 4-124 se presentan las superficies de inundación para los diversos periodos de retorno simulados para el sector aguas abajo del acceso a Sequitor, se observa que la ruta de circunvalación actúa como un dique generando la acumulación del escurrimiento, lo que probablemente es una consecuencia de la limitada capacidad de los atravesos.

Es importante mencionar que la extensión de las superficies de inundación puede ser mayor a la presentada, ya que por ejemplo en la ribera izquierda se tienen antecedentes de inundación en la comunidad de Beter que no se ven reflejados.

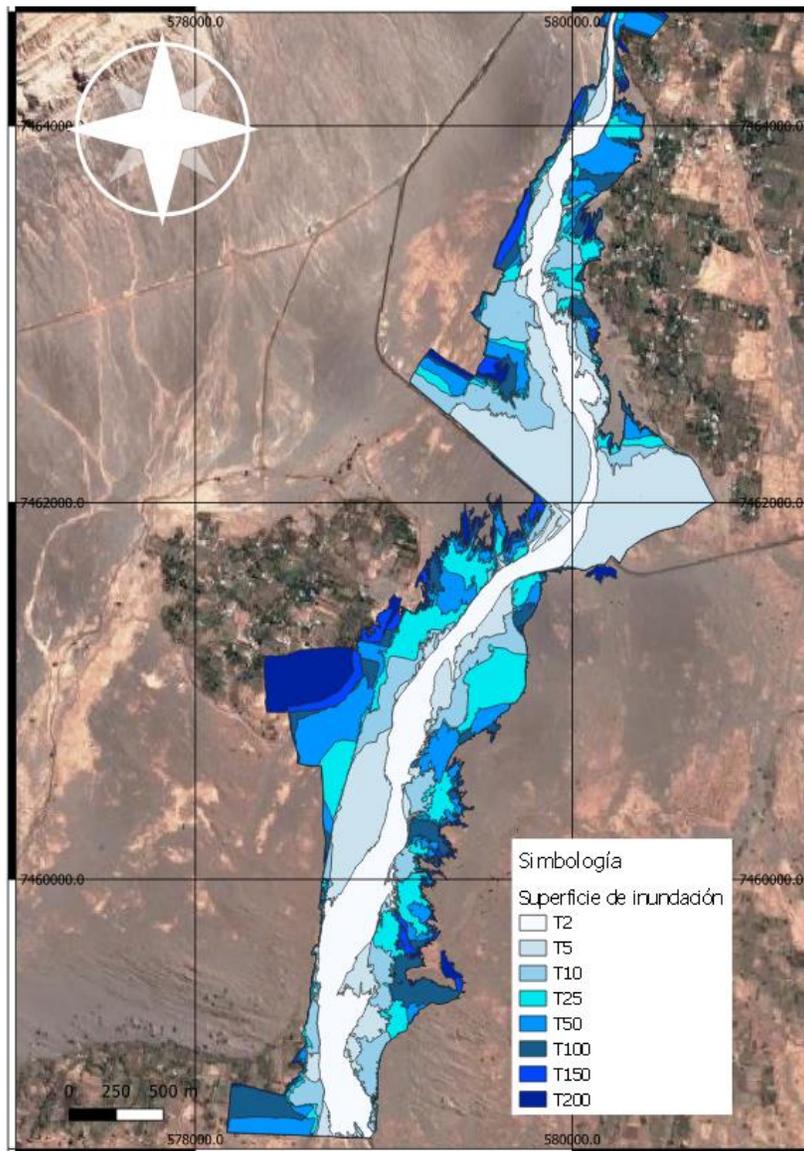


FIGURA 4-124: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 4-125 se presentan las velocidades medias en el centro del cauce para el tramo analizado, se observa que las velocidades son proporcionales a la magnitud del periodo de retorno simulado y decrecen a medida que se acercan a la ruta de circunvalación, esto es consecuente con el efecto “dique” de la ruta pero una vez que se atraviesa este sector las velocidades vuelven a incrementarse alcanzando sus máximos en el sector del Ayllu de Tulor donde se contrae la sección de escurrimiento.

Respecto al efecto “Dique” en la ruta de circunvalación, en la Figura 4-126 se puede observar que la capacidad de los atravesos es insuficiente ya que solo el periodo de retorno de 2 años presenta cota inferior a la de la ruta. En particular el efecto del vertimiento de la ruta no se aprecia en la sección aguas abajo, porque la sección donde se desarrolla el escurrimiento en su parte baja tiene la capacidad suficiente para contener crecidas de gran tamaño, esto es una de las limitaciones que presenta el modelo unidimensional en representar los múltiples brazos que se forman.

Las superficies de inundación y la modelación hidráulica unidimensional se presentan en las carpetas “3. Planos” y “Anexo 4-3-1”, las que se encuentra dentro del volumen de ingeniería.

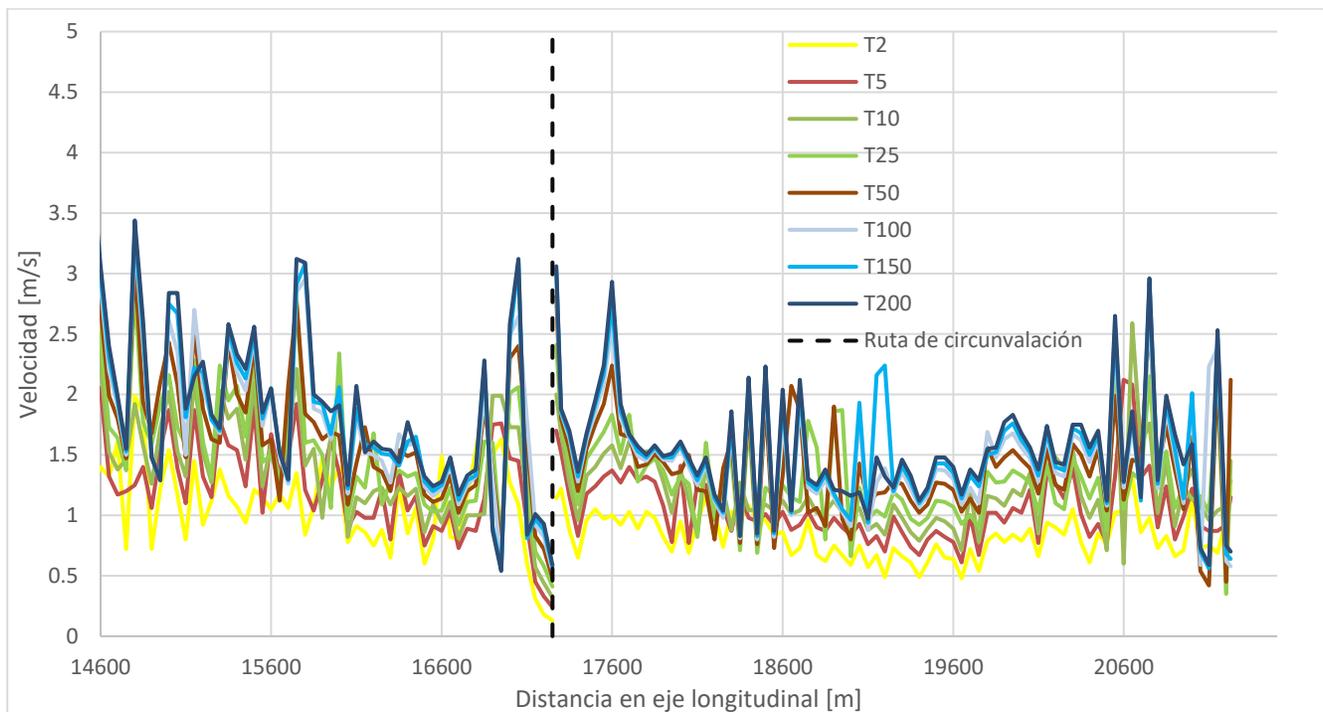


FIGURA 4-125: PERFIL LONGITUDINAL DE VELOCIDADES

Fuente: Elaboración Propia.

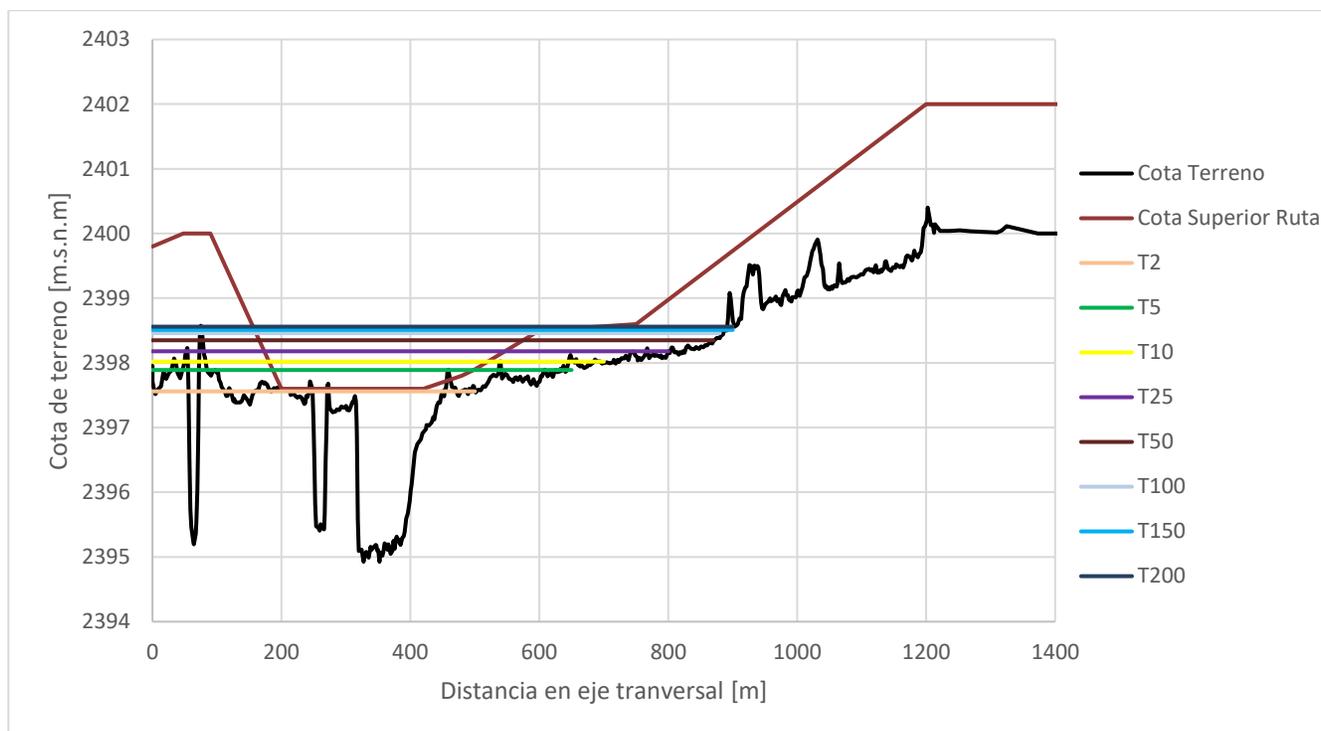


FIGURA 4-126: PERIODOS DE RETORNO SIMULADO EN LA RUTA DE CIRCUNVALACIÓN

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Las obras de arte si se incluyen en el modelo, pero no se representan en la figura para mejorar la representación.

Además de la capacidad insuficiente de las obras de arte en la Figura 4-126, se observa que el paso bajo nivel localizado en los primeros 50 metros de la figura termina operando como obra de arte, lo que ha implicado que está presente múltiples rastros de erosión.

4.3.6.2. Río Vilama

En la Figura 4-127 se presentan las superficies de inundación para los diversos periodos de retorno simulados en el río Vilama, se observa que el canal tiene una sección transversal insuficiente que puede soportar como máximo crecidas de periodo de retorno 50 años.

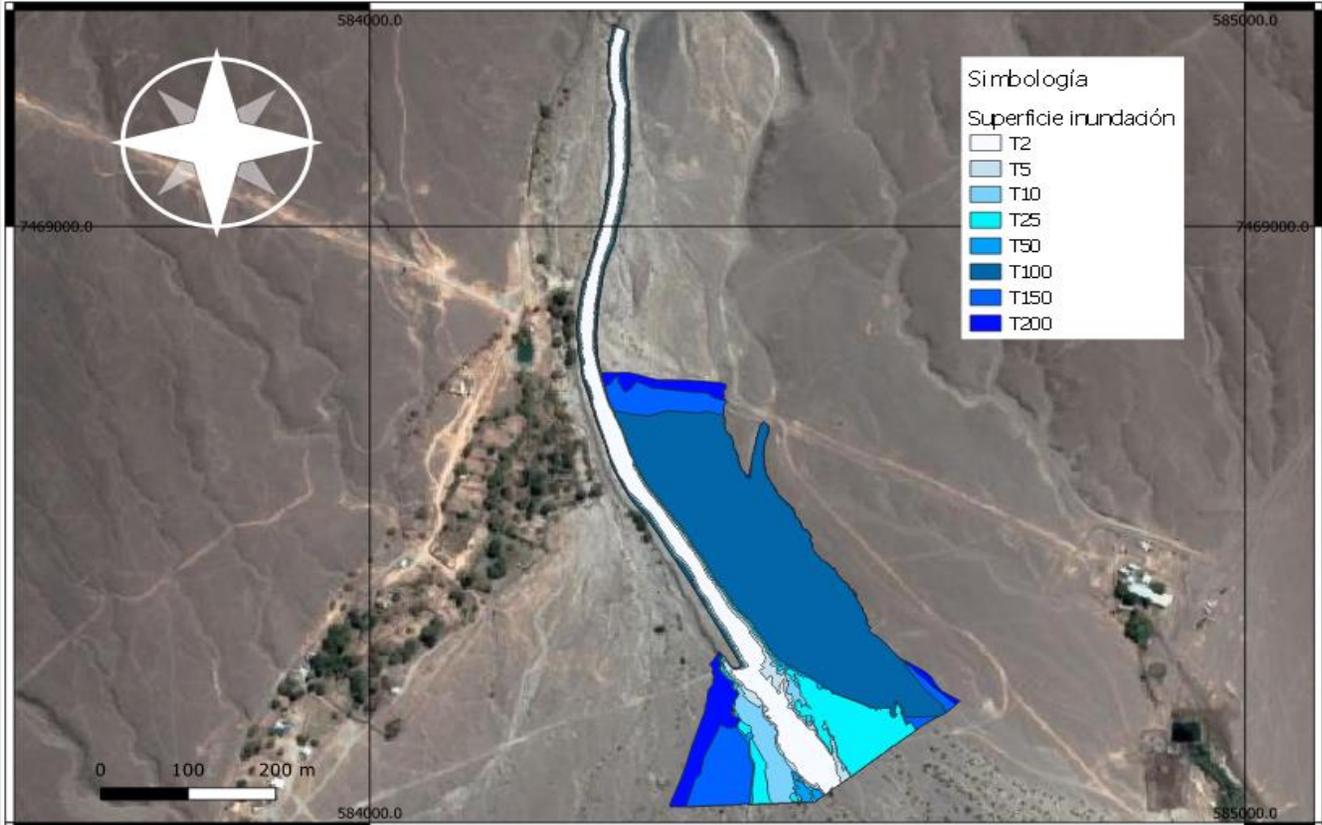


FIGURA 4-127: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 4-128 se presentan las velocidades medias en el centro del cauce para el tramo analizado, se observa que las velocidades son proporcionales a la magnitud del periodo de retorno simulado y decrecen a medida que se desarrolla el eje aguas abajo, esto puede asociarse a que la canalización se va ensanchando hasta llegar al fin (perfil 900) donde las velocidades decrecen aceleradamente.

En particular los periodos de retorno de 200 y 100 años presentan incrementos o disminuciones de velocidad abruptas, las cuales se dan en los casos donde los perfiles se ven desbordados como es el caso presentado en la Figura 4-129.

Las superficies de inundación y la modelación hidráulica unidimensional se presentan en las carpetas "3. Planos" y "Anexo 4-3-1", las que se encuentra dentro del volumen de ingeniería.

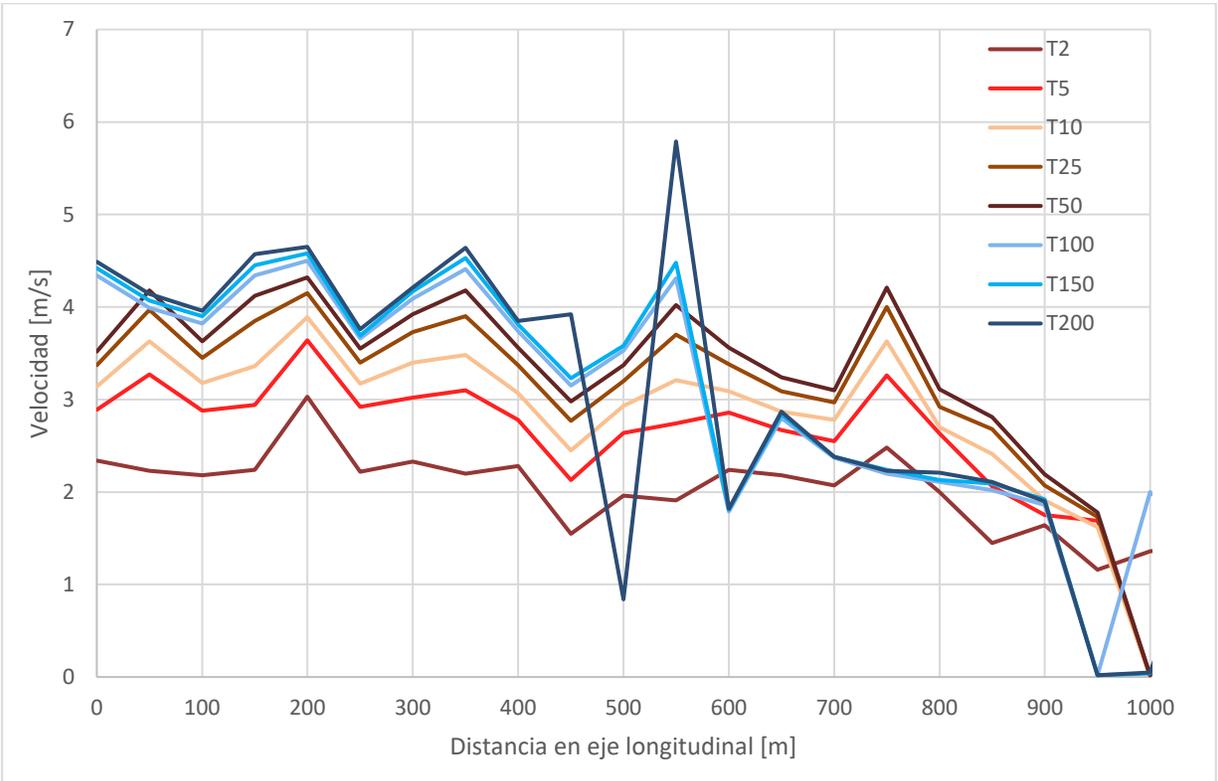


FIGURA 4-128: PERFIL LONGITUDINAL DE VELOCIDADES

Fuente: Elaboración Propia.

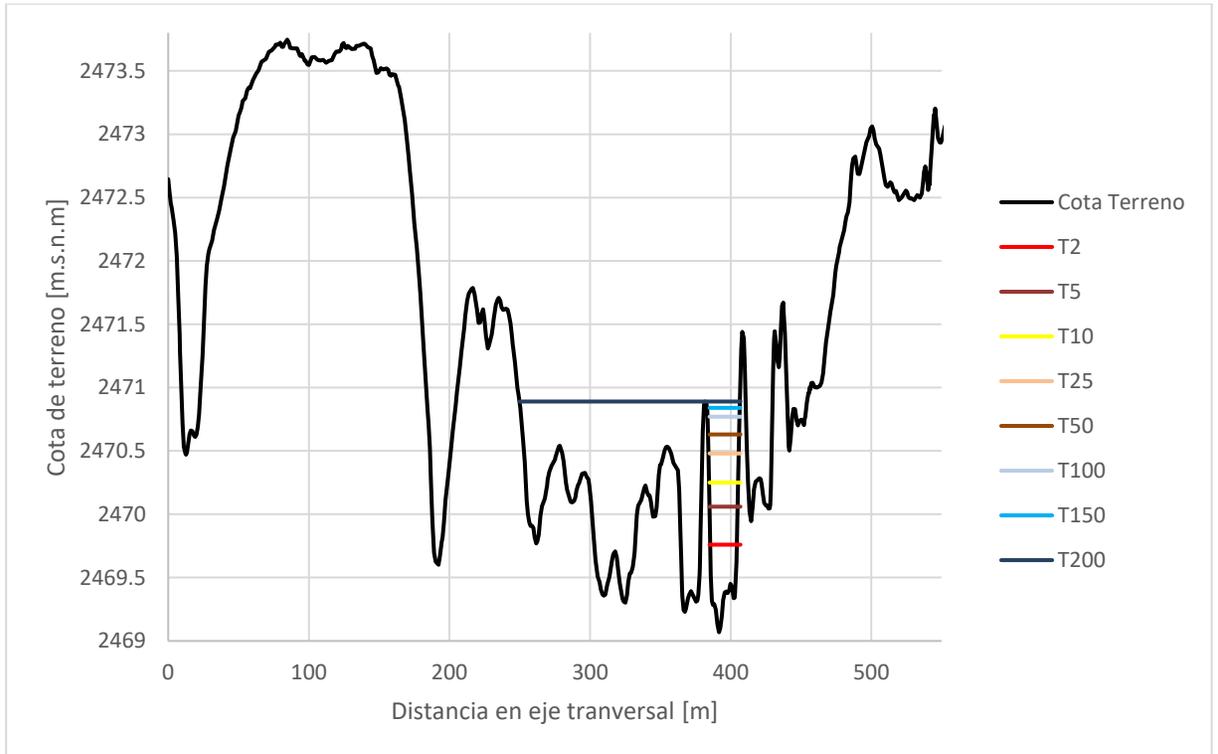


FIGURA 4-129: PERIODOS DE RETORNO SIMULADO EN EL PERFIL 500

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.7. Resultados Estudio Hidráulico Bidimensional de Crecidas

4.3.7.1. Río San Pedro

Resultados río San Pedro entre estación Cuchabrachi y Pucara de Quito

Entre la Figura 4-130 a Figura 4-141 se presentan las alturas de escurrimiento para los periodos de retorno T2, T50 y T100 simulados en el río San Pedro, se observa que el río tiene un comportamiento trezado para periodos de retorno pequeños a medida que se incrementan estos la superficie de inundación se unifica.

Respecto a las velocidades estas presentan sus mayores valores en la zona que corresponden a los brazos que aparecen inicialmente y se incrementan a medida que aumentan los periodos de retorno, las zonas inundadas correspondientes a grandes planicies presentan velocidades bastante menores. Entre la Figura 4-145 a Figura 4-156 se presentan las velocidades de escurrimiento estas presentan los mayores para los periodos de retorno T2, T50 y T100 simulados.

En la Figura 4-160 se presentan las cotas del escurrimiento en la sección del puente San Pedro. El modelo 2D tiende a presentar cotas superiores en dicho perfil en comparación al modelo 1D, ya que en este caso la capacidad hidráulica del puente es insuficiente para los 25 años de período de retorno, lo que puede explicarse en que este modelo considera el efecto de la curva previo a la obra y el brusco estrechamiento que se genera en este sector.

Si se desea consultar en detalle otros resultados, estos se presentan en el Anexo 4-3-2.

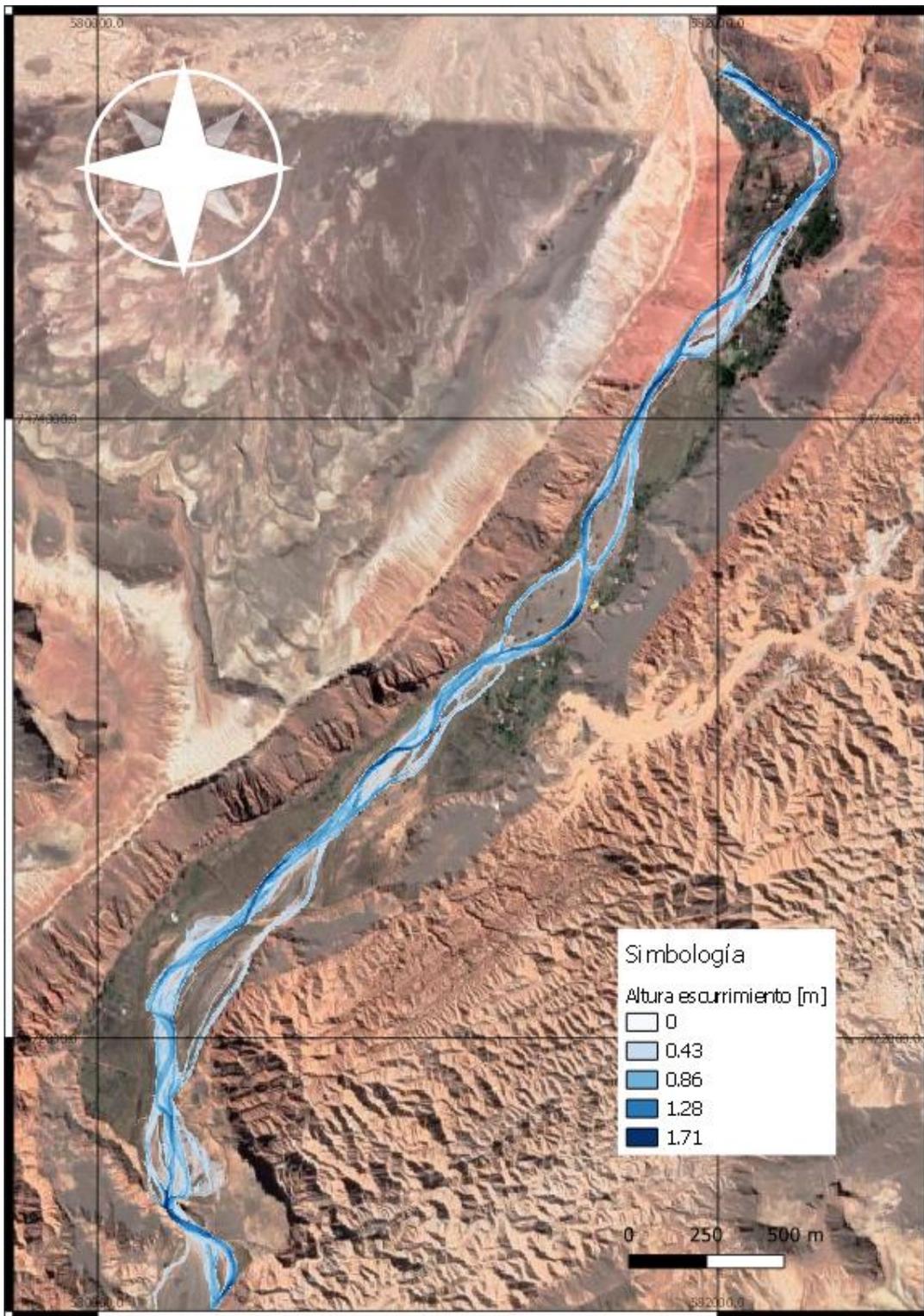


FIGURA 4-130: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 1A

Fuente: Elaboración Propia.

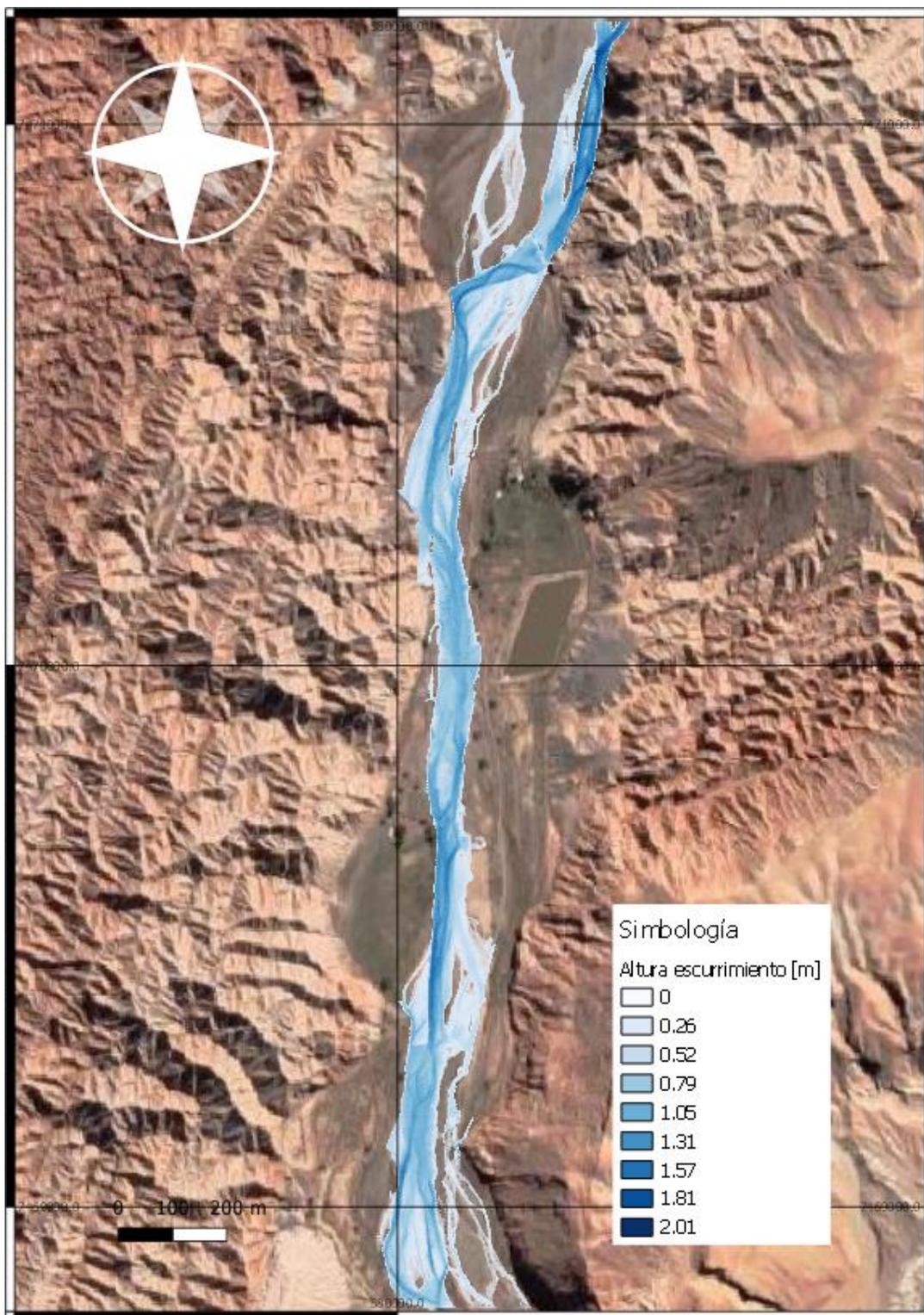


FIGURA 4-131: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 1B

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 4-132: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 2

Fuente: Elaboración Propia.

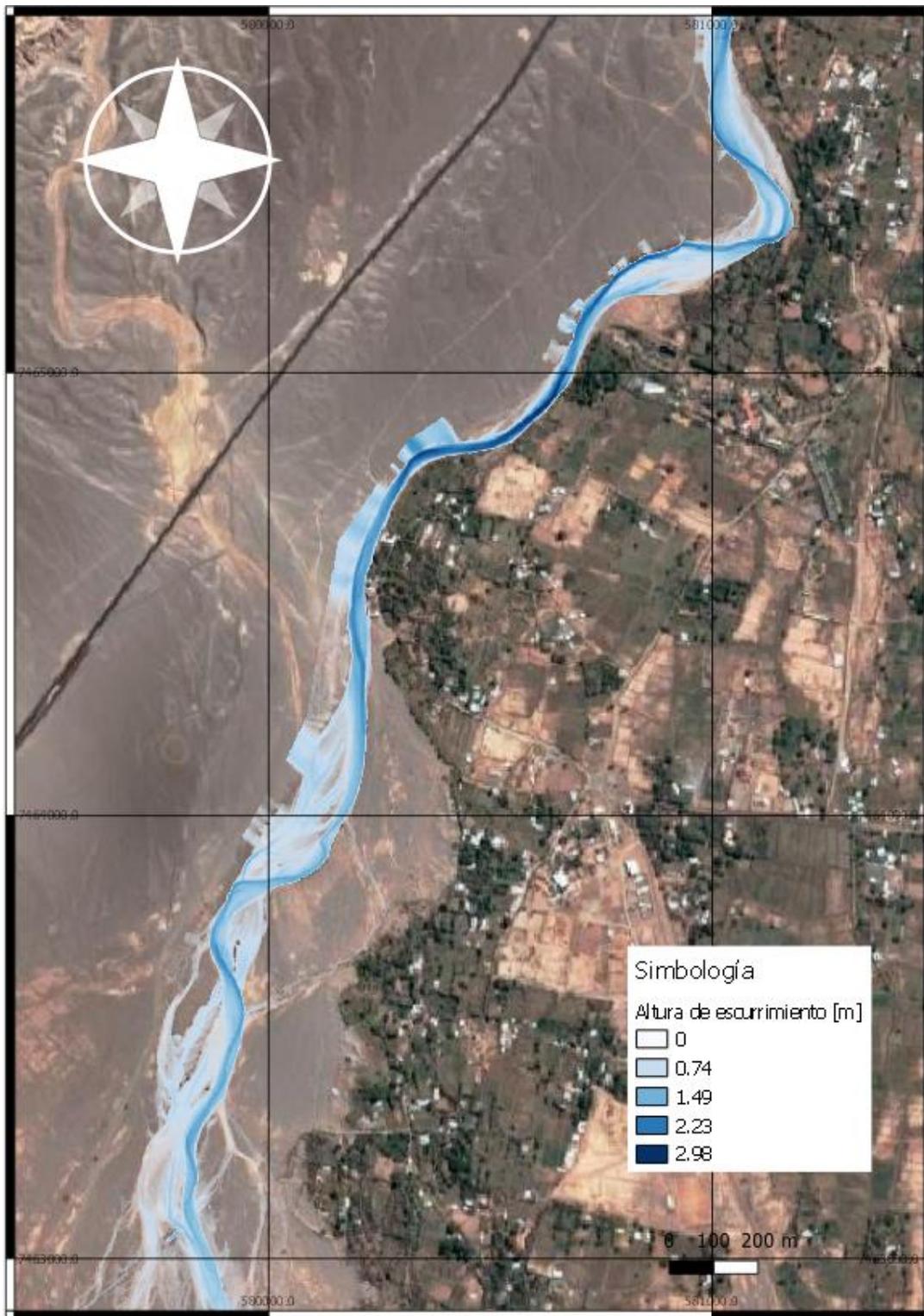


FIGURA 4-133: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 3

Fuente: Elaboración Propia.

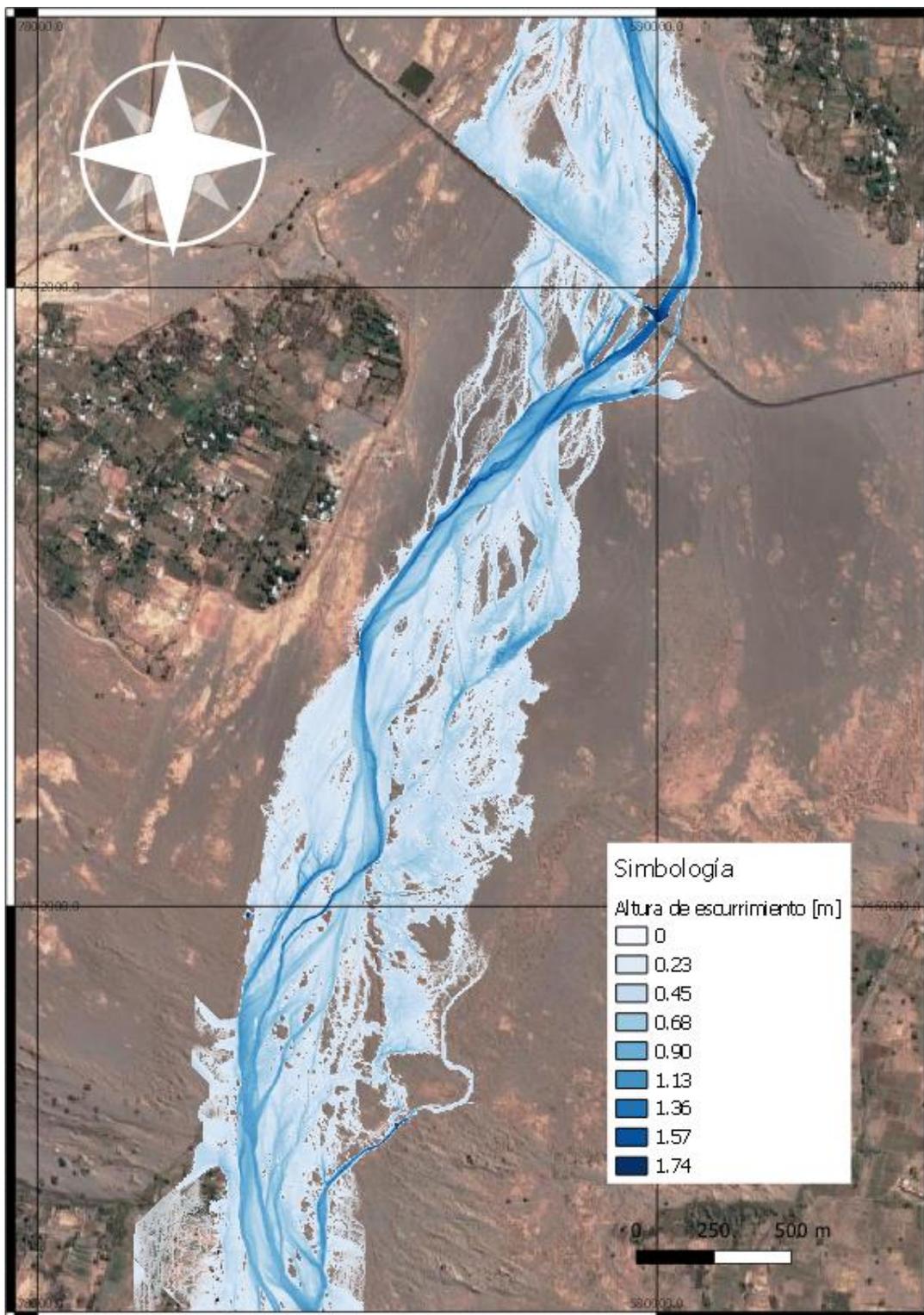


FIGURA 4-134: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 4

Fuente: Elaboración Propia.

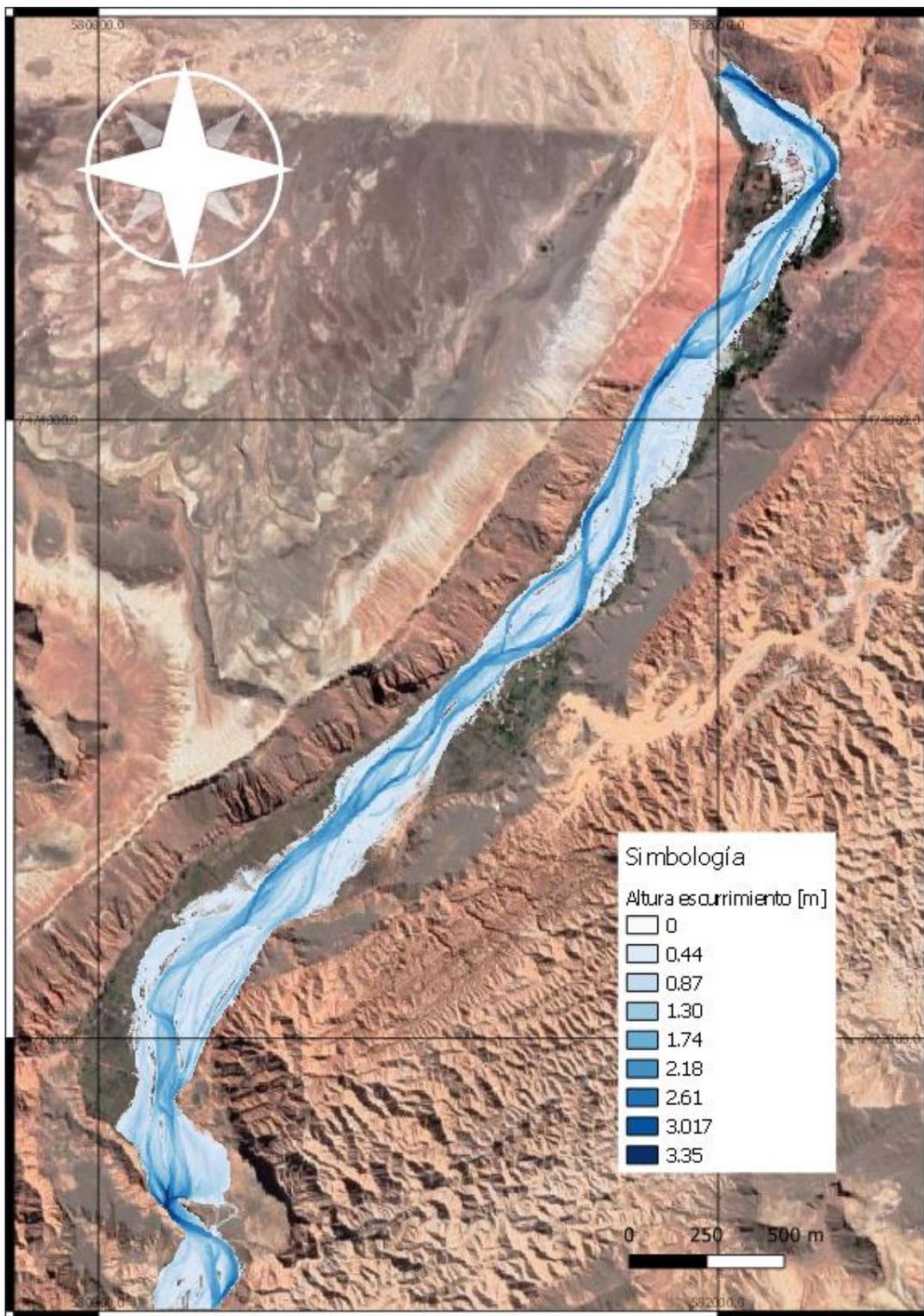


FIGURA 4-135: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 1A

Fuente: Elaboración Propia.

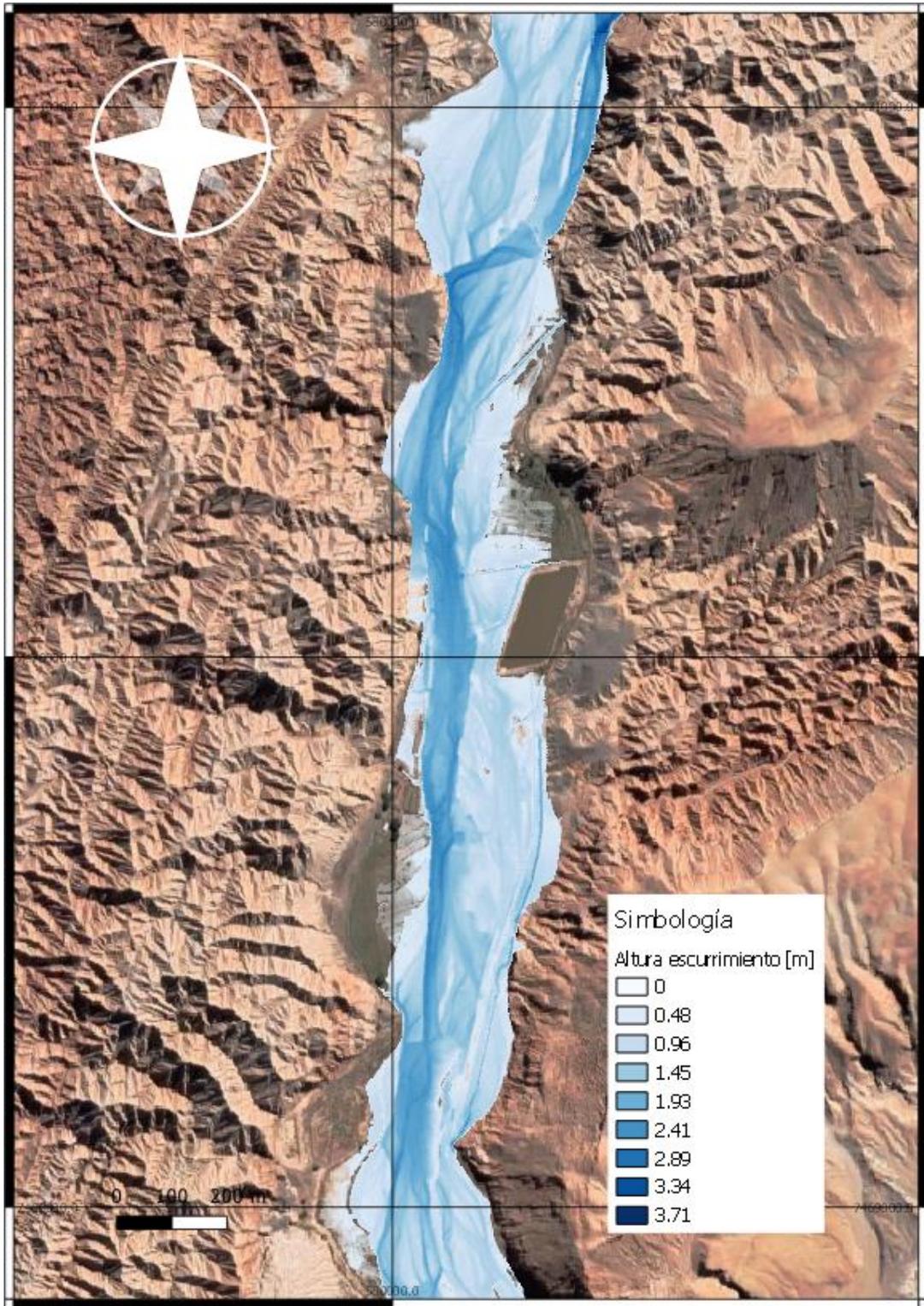


FIGURA 4-136: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 1B

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 4-137: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 2

Fuente: Elaboración Propia.

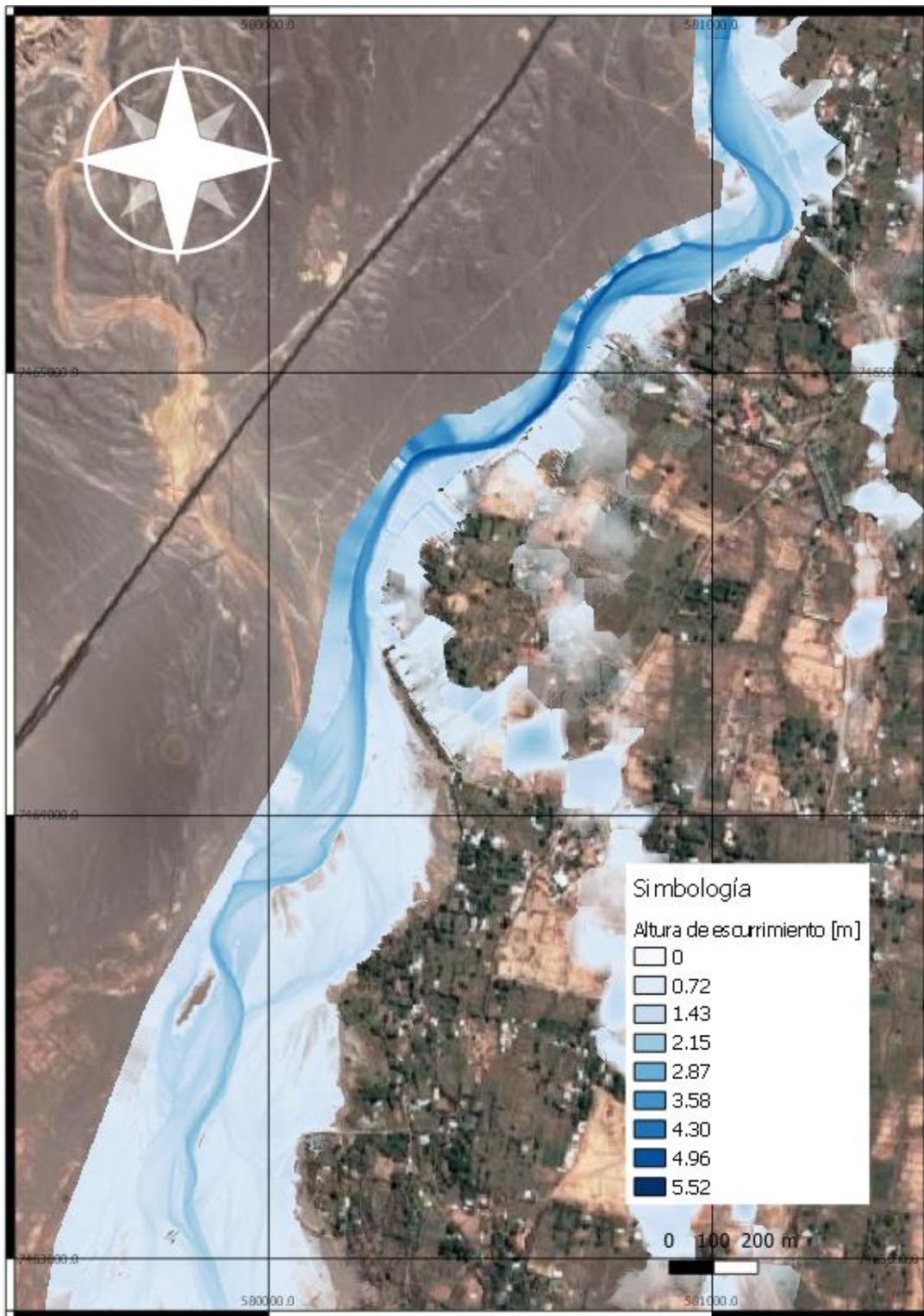


FIGURA 4-138: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 3

Fuente: Elaboración Propia.

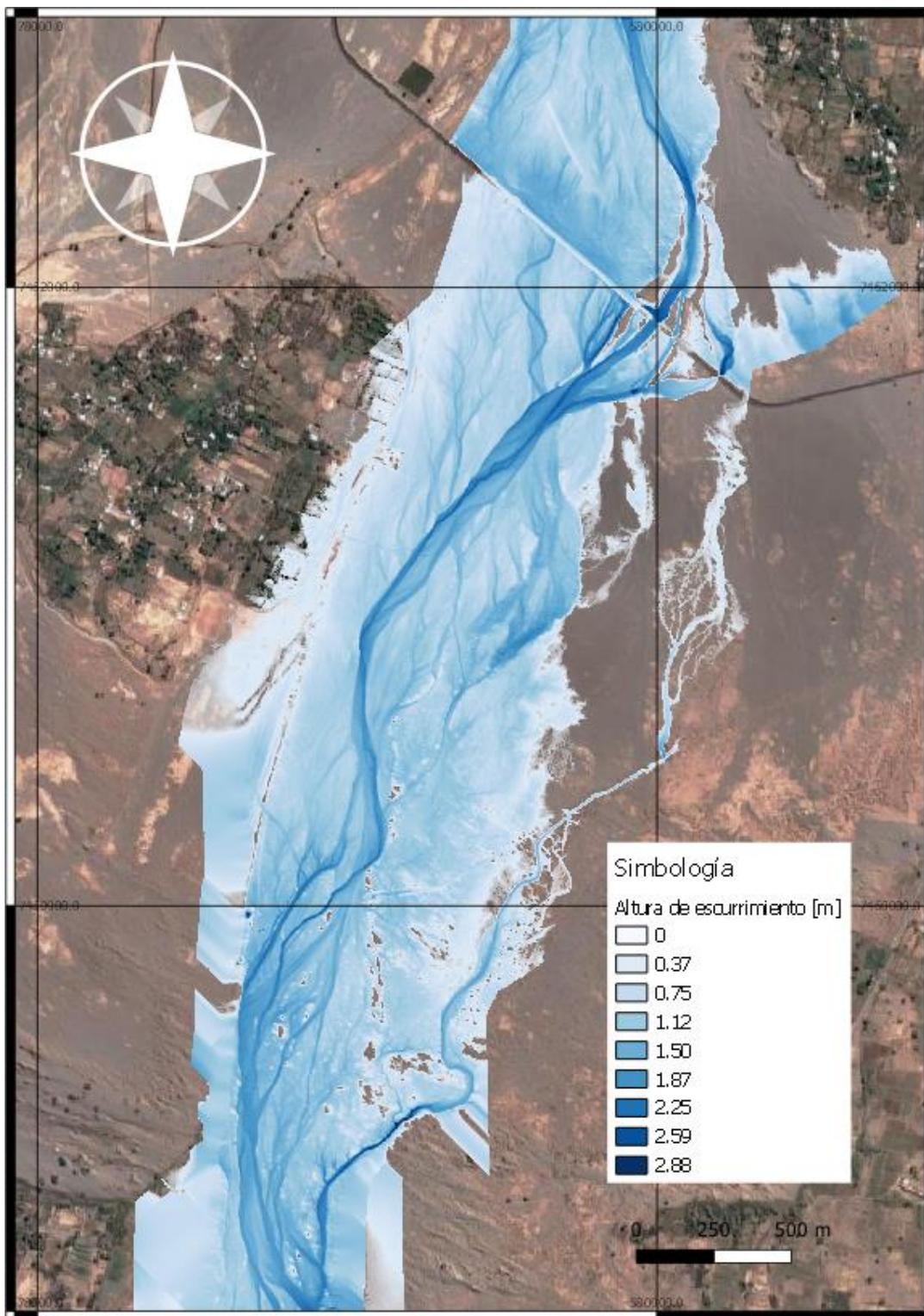


FIGURA 4-139: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 4

Fuente: Elaboración Propia.

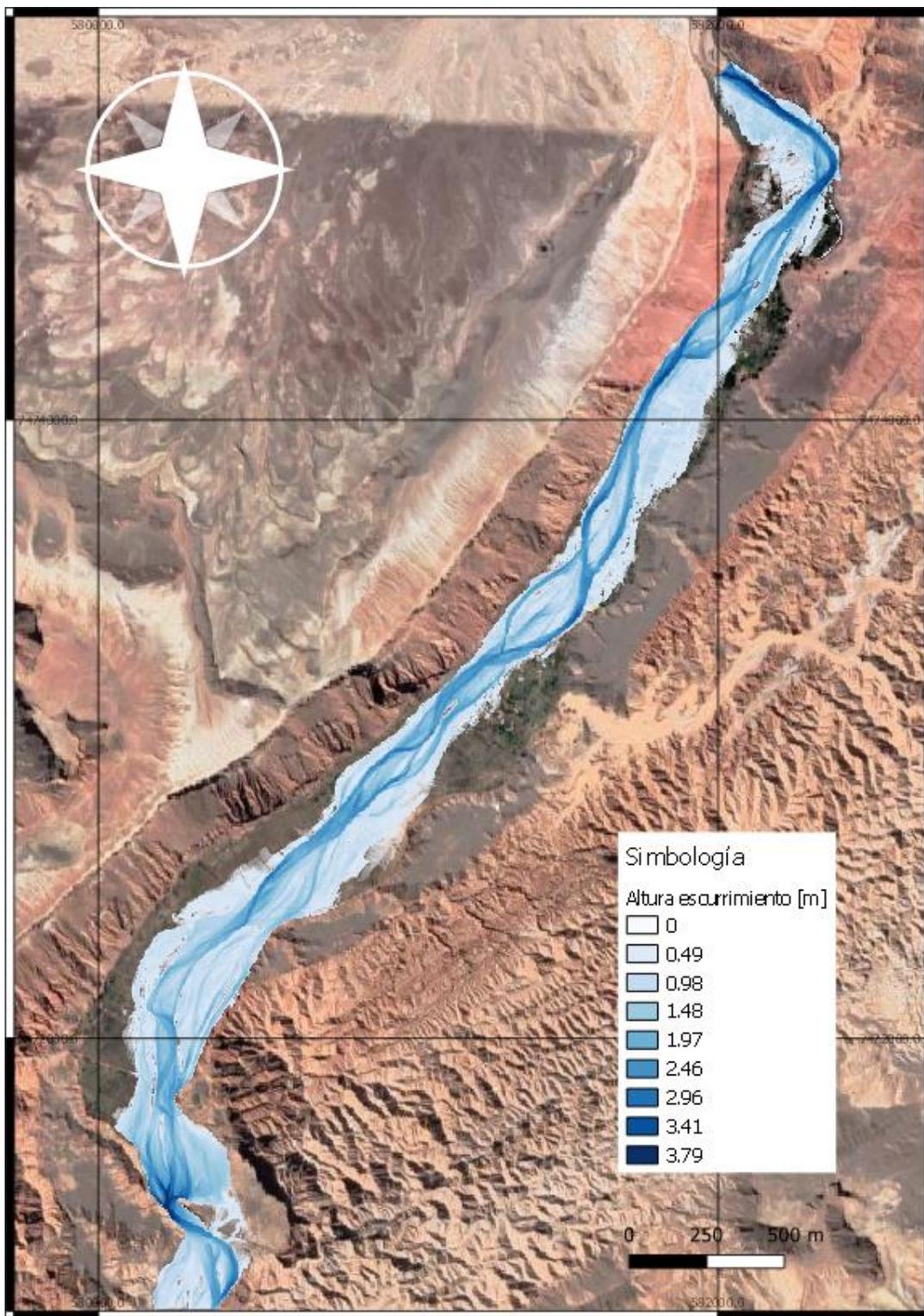


FIGURA 4-140: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 1A

Fuente: Elaboración Propia.

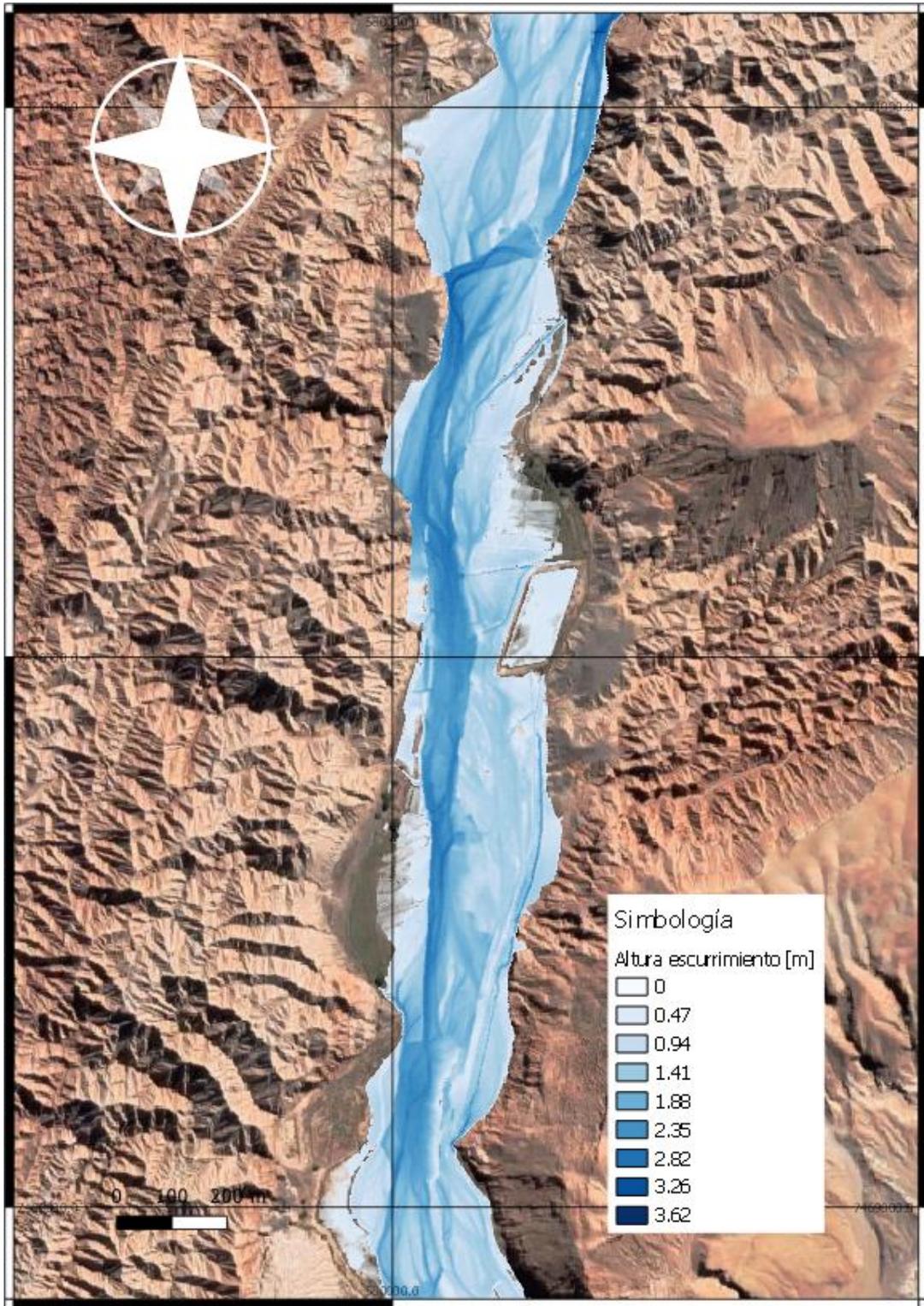


FIGURA 4-141: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 1B

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 4-142: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 2

Fuente: Elaboración Propia.

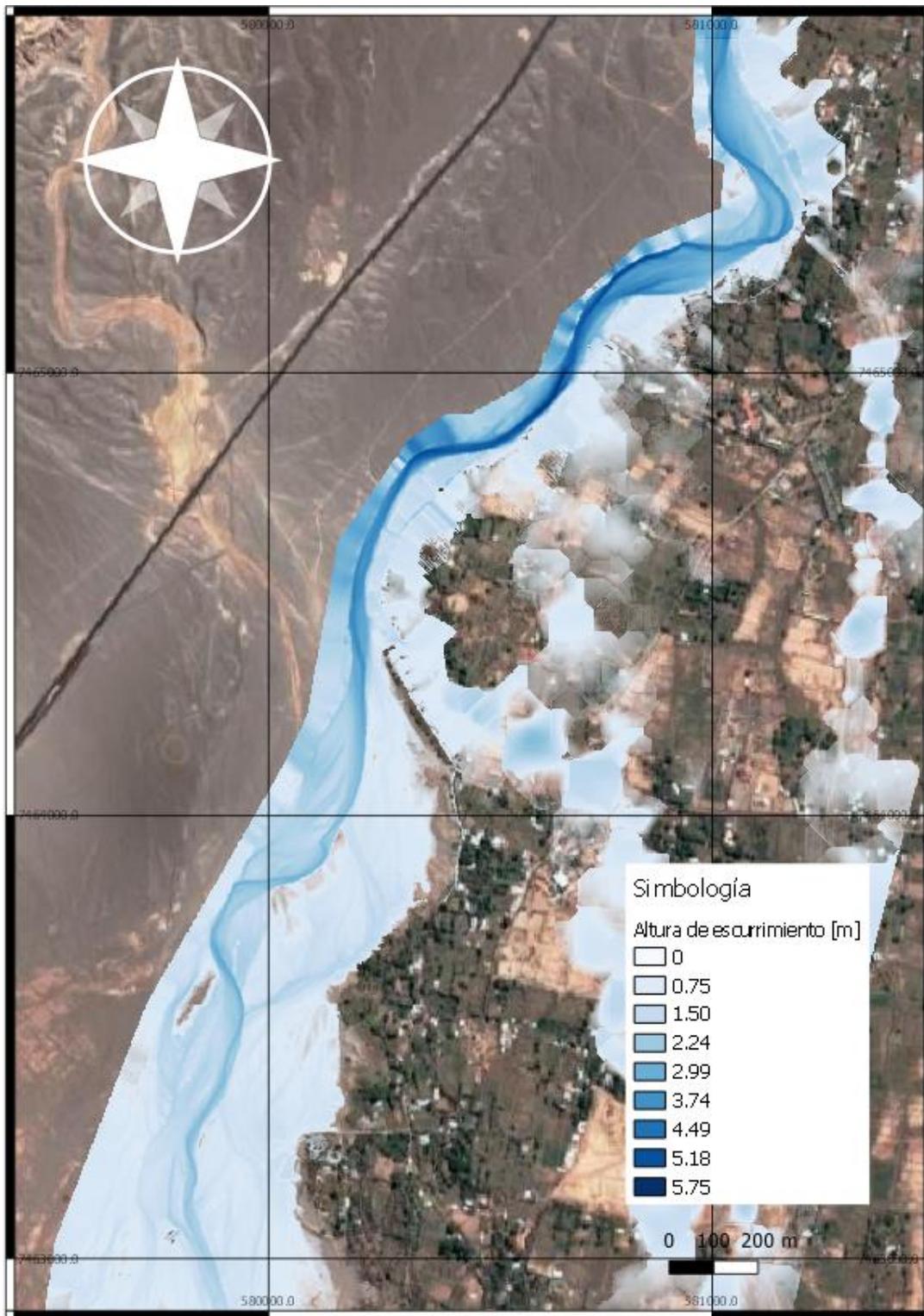


FIGURA 4-143: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 3

Fuente: Elaboración Propia.

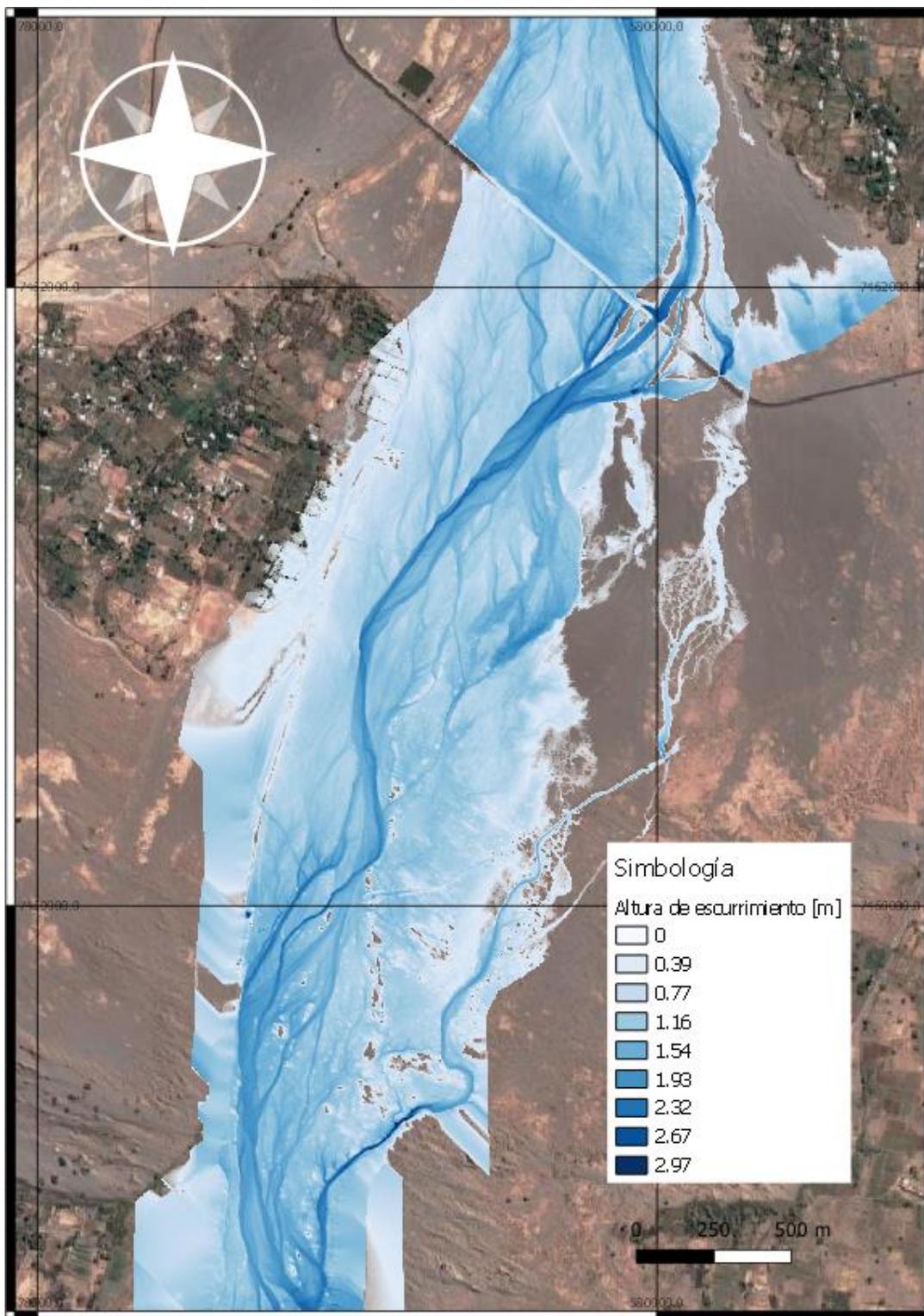


FIGURA 4-144: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 4

Fuente: Elaboración Propia.

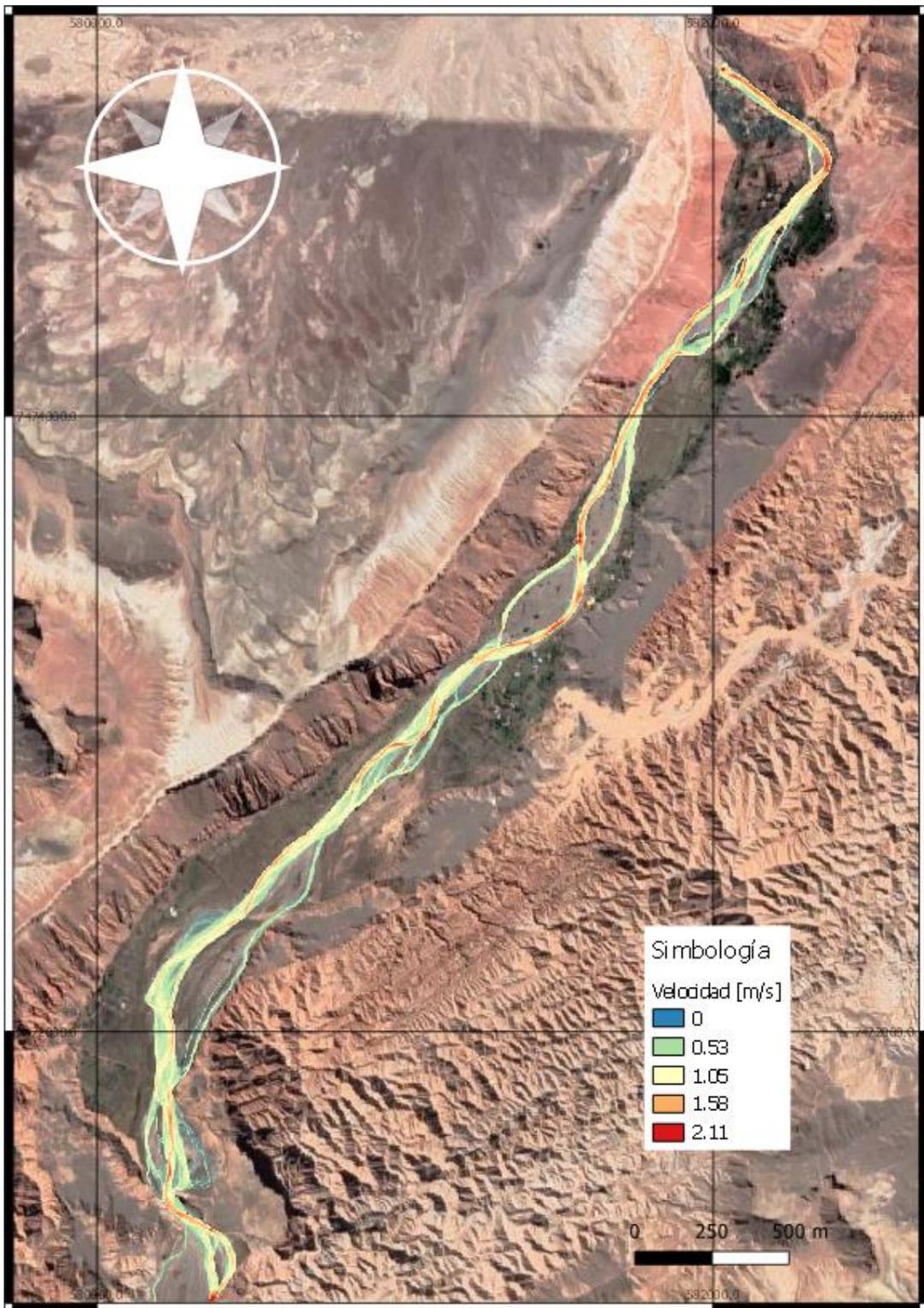


FIGURA 4-145: MAPA DE VELOCIDADES EN RIO SAN PEDRO PARA T2 GRILLA 1A

Fuente: Elaboración Propia.

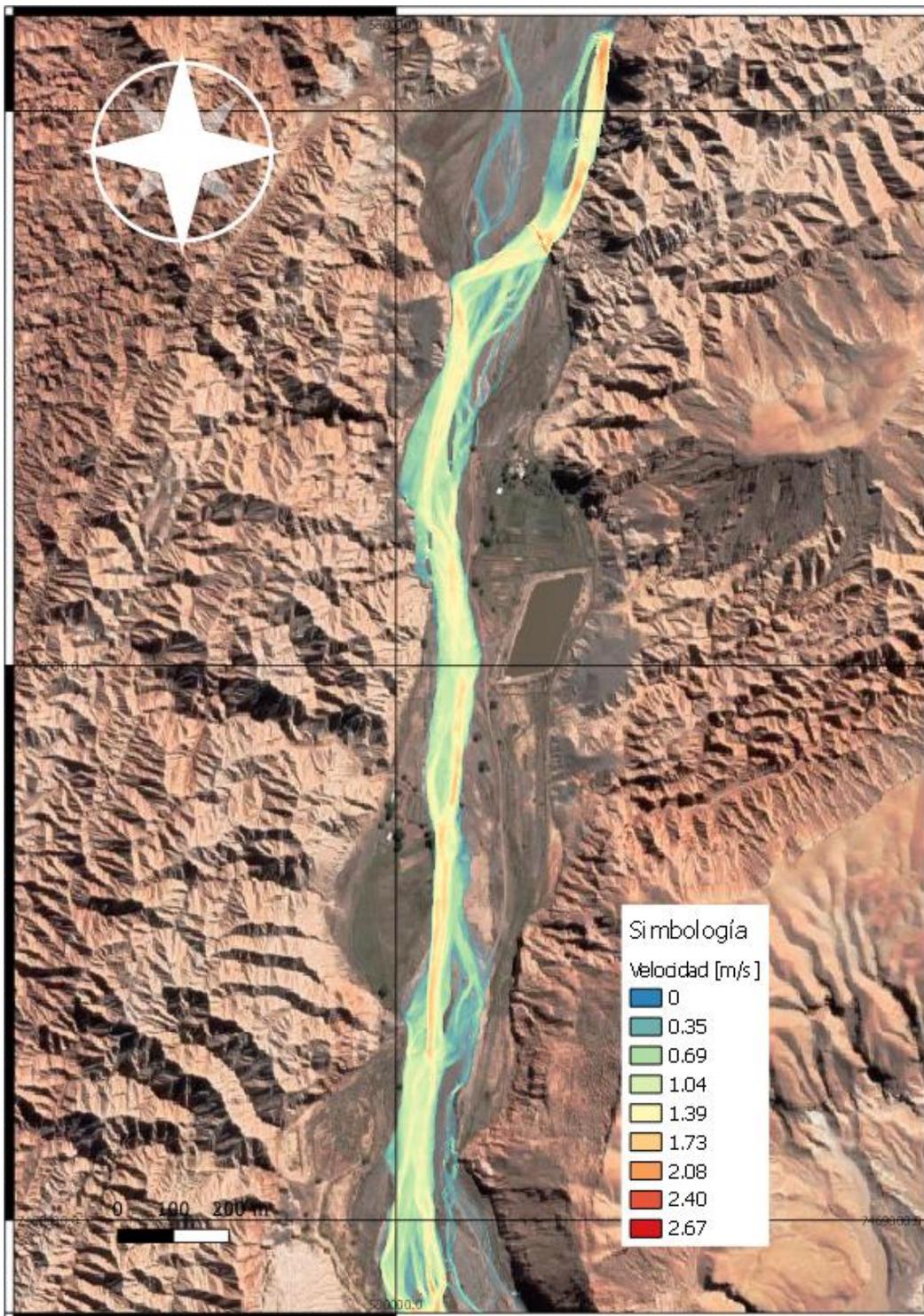


FIGURA 4-146: MAPA DE VELOCIDADES EN SAN PEDRO PARA T2 GRILLA 1B

Fuente: Elaboración Propia.



FIGURA 4-147: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 2

Fuente: Elaboración Propia.

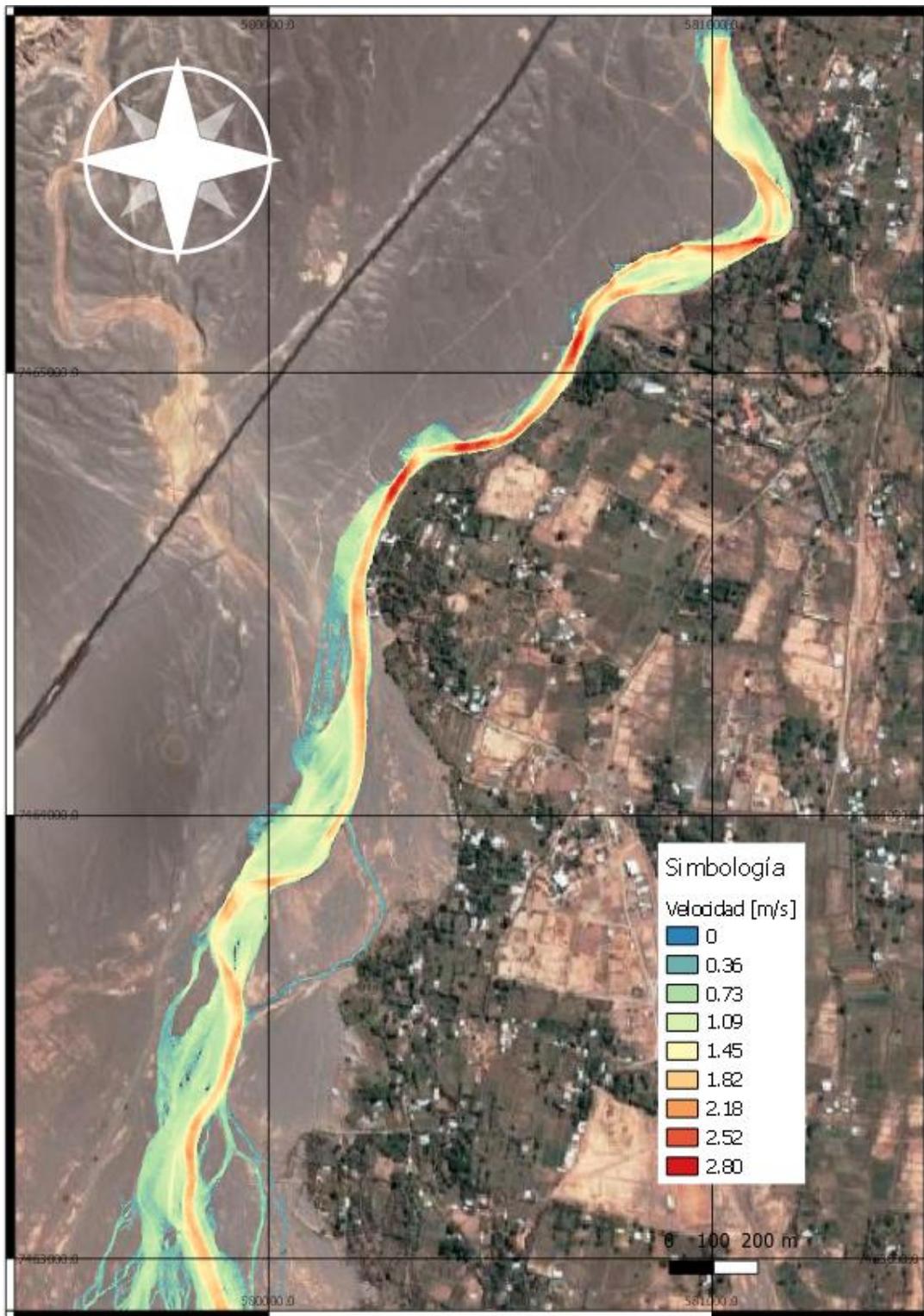


FIGURA 4-148: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 3

Fuente: Elaboración Propia.

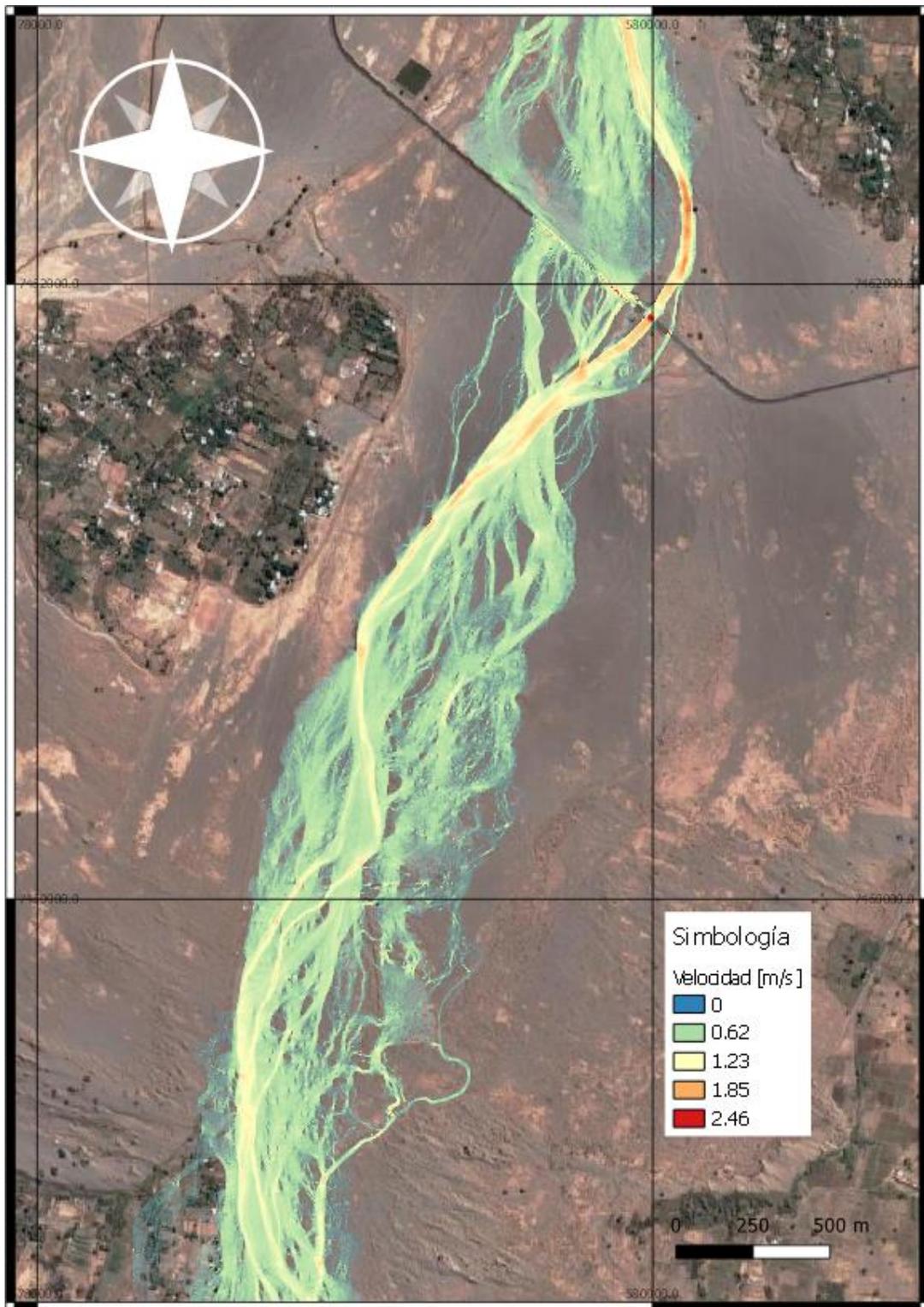


FIGURA 4-149: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T2 GRILLA 4

Fuente: Elaboración Propia.

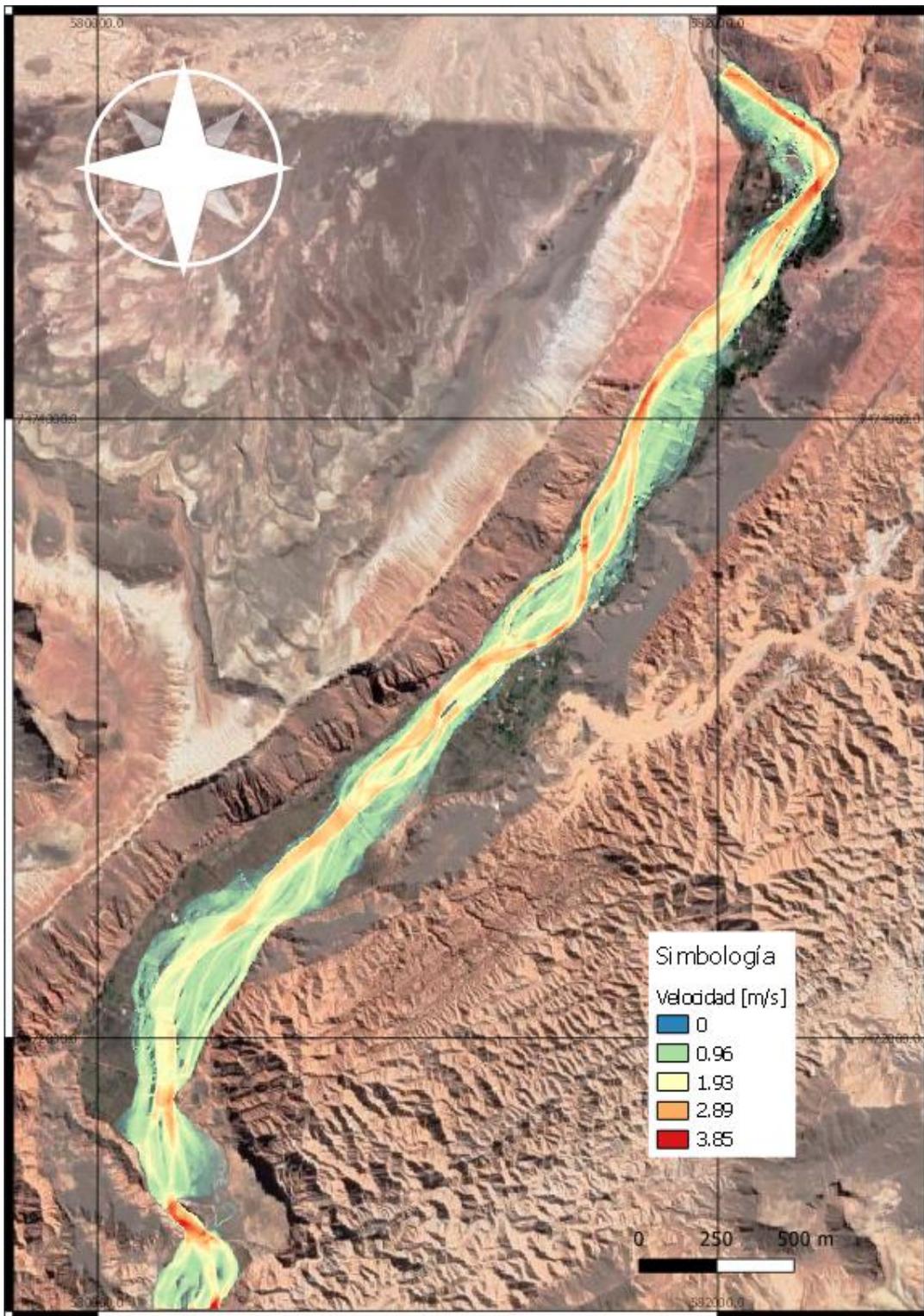


FIGURA 4-150: MAPA DE VELOCIDADES EN SAN PEDRO PARA T50 GRILLA 1A

Fuente: Elaboración Propia.

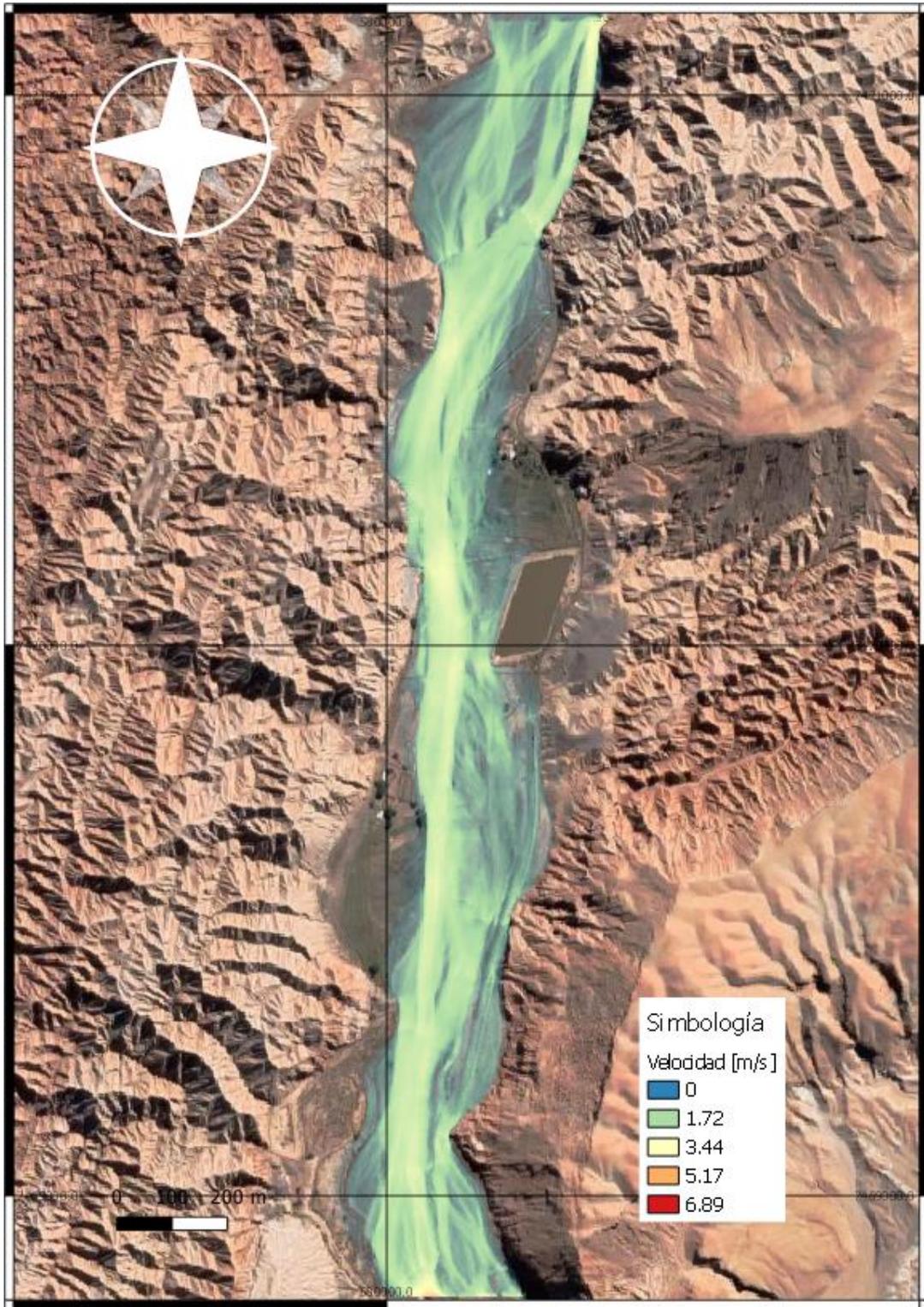


FIGURA 4-151: MAPA DE VELOCIDADES EN SAN PEDRO PARA T50 GRILLA 1B

Fuente: Elaboración Propia.

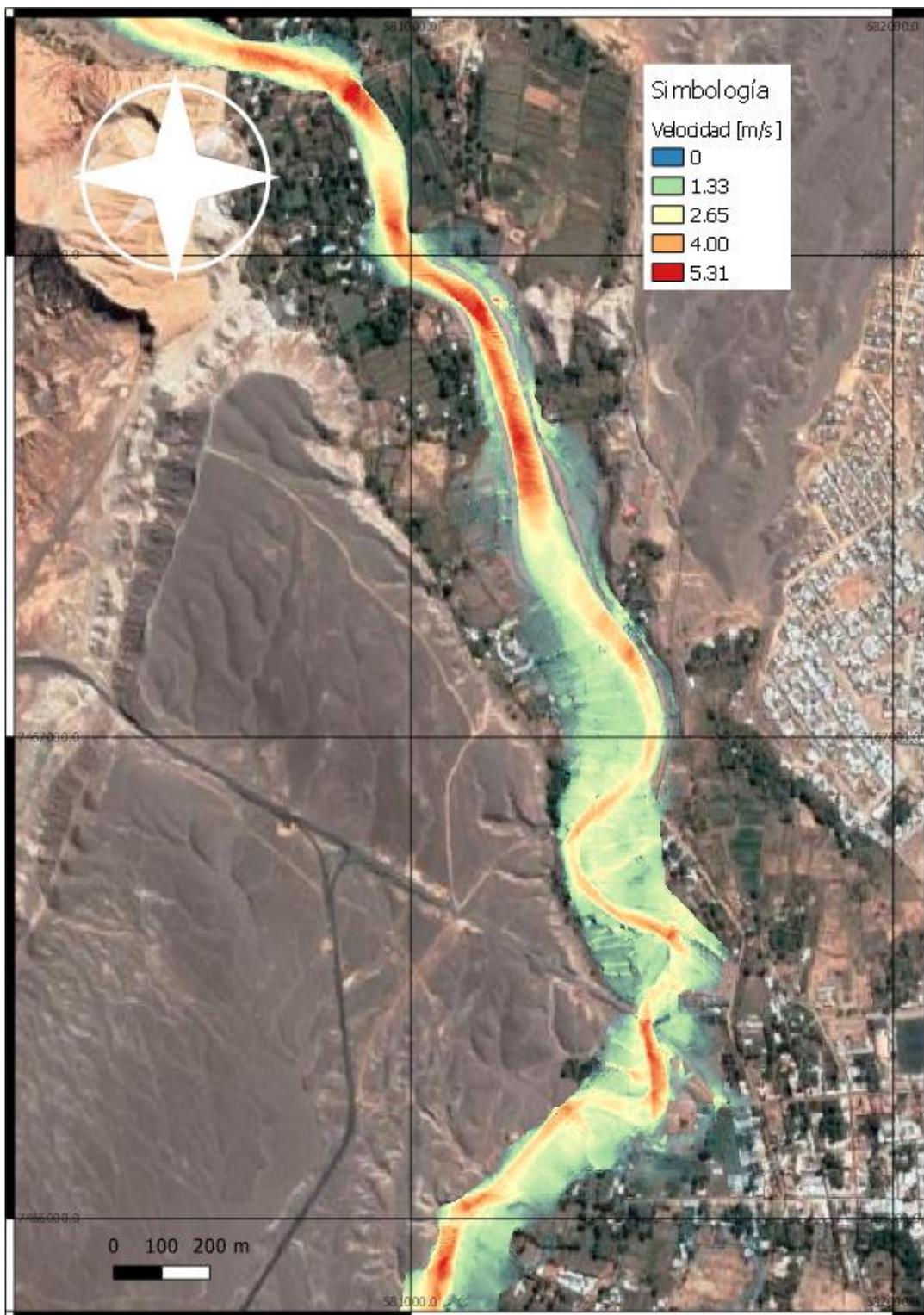


FIGURA 4-152: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 2

Fuente: Elaboración Propia.

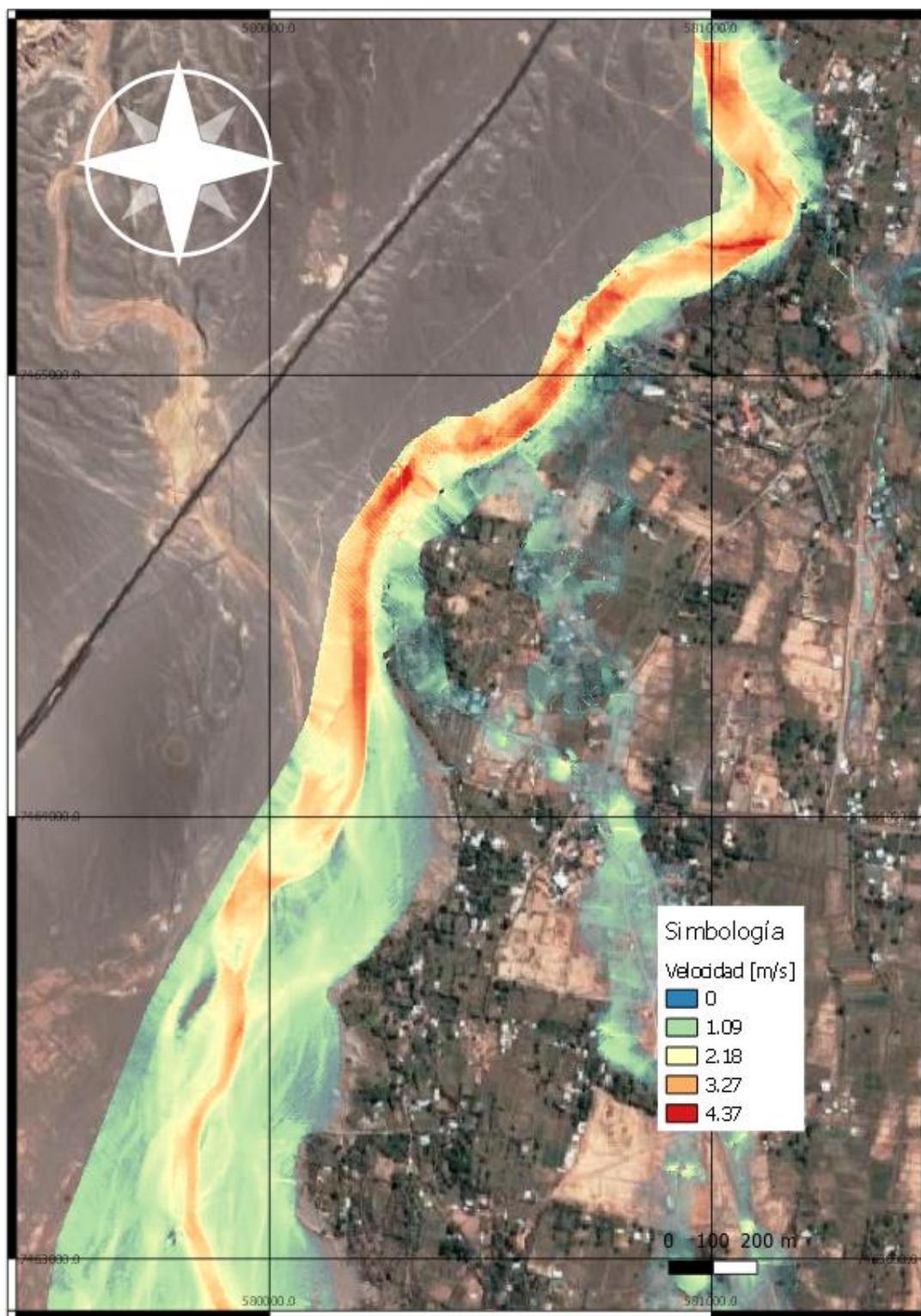


FIGURA 4-153: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 3

Fuente: Elaboración Propia.

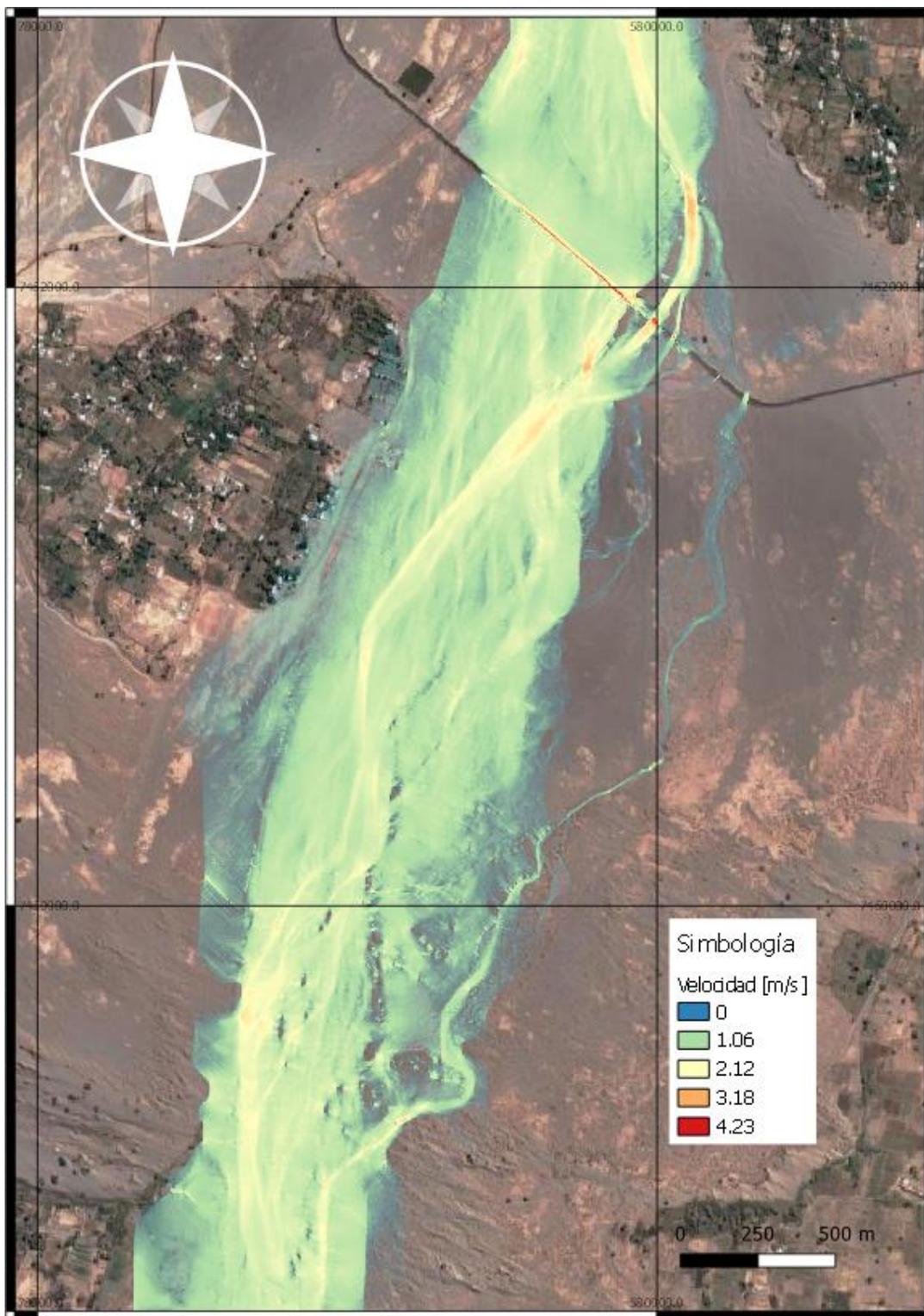


FIGURA 4-154: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T50 GRILLA 4

Fuente: Elaboración Propia.

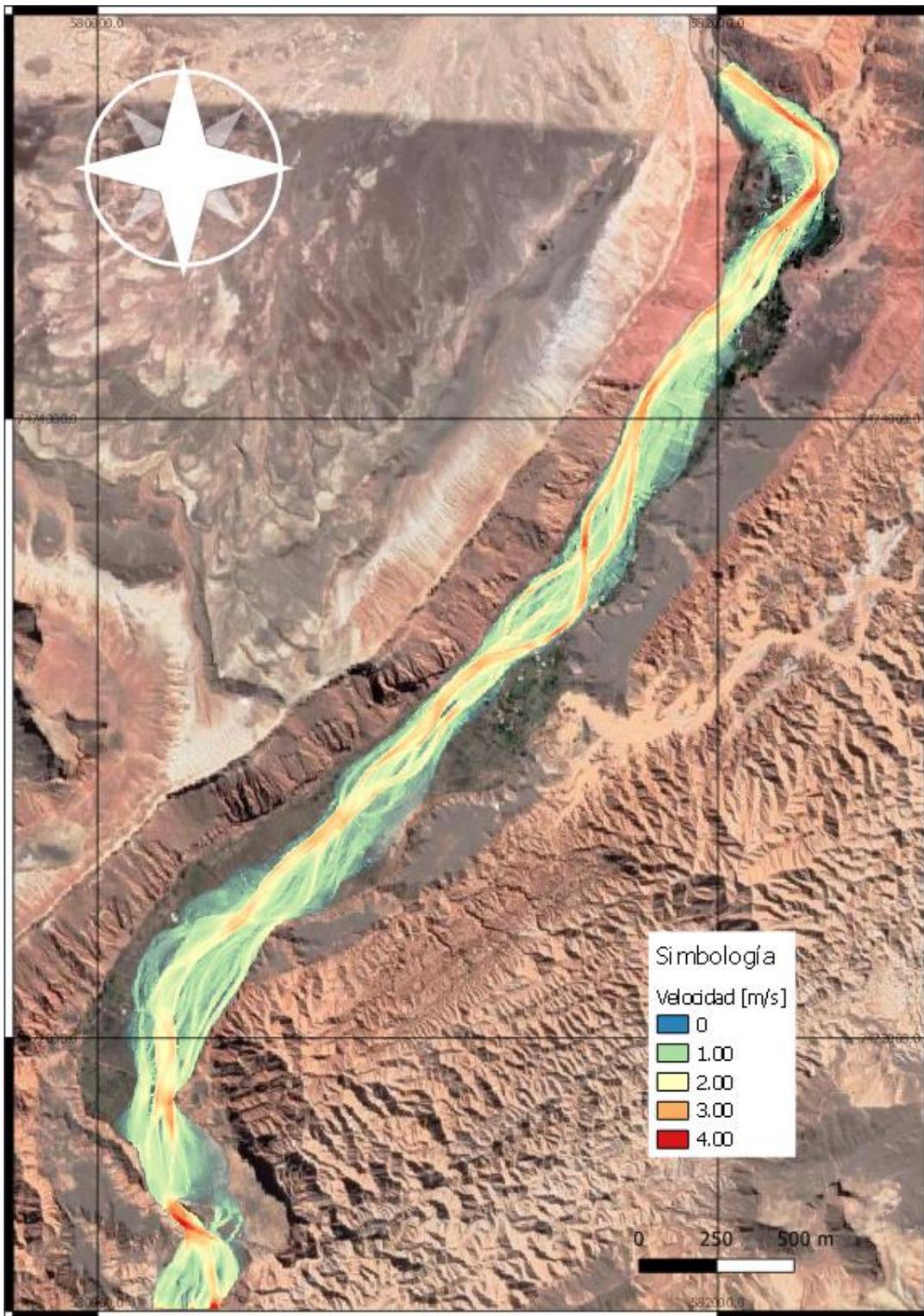


FIGURA 4-155: MAPA DE VELOCIDADES EN SAN PEDRO PARA T100 GRILLA 1A

Fuente: Elaboración Propia.

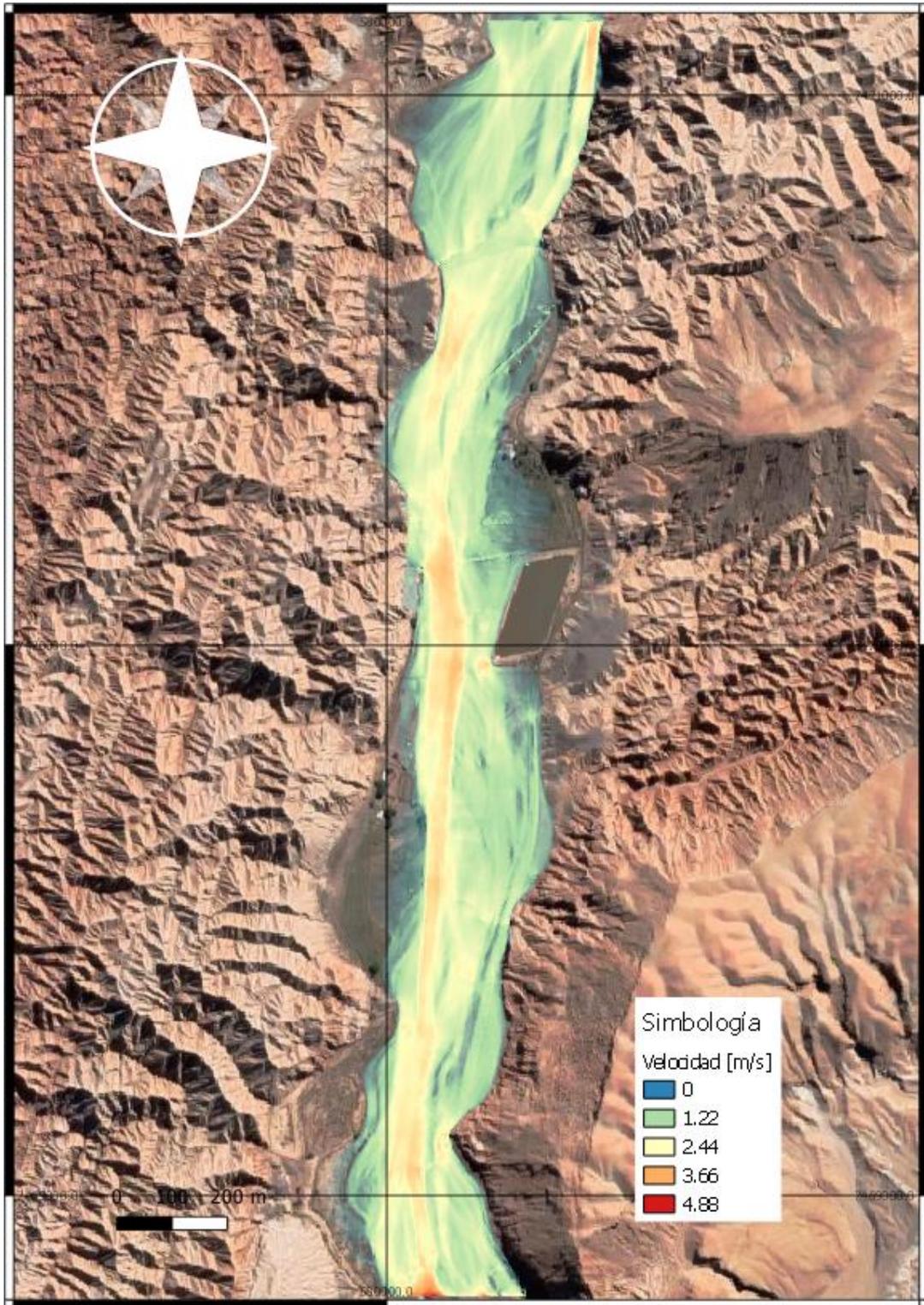


FIGURA 4-156: MAPA DE VELOCIDADES EN SAN PEDRO PARA T100 GRILLA 1B

Fuente: Elaboración Propia.

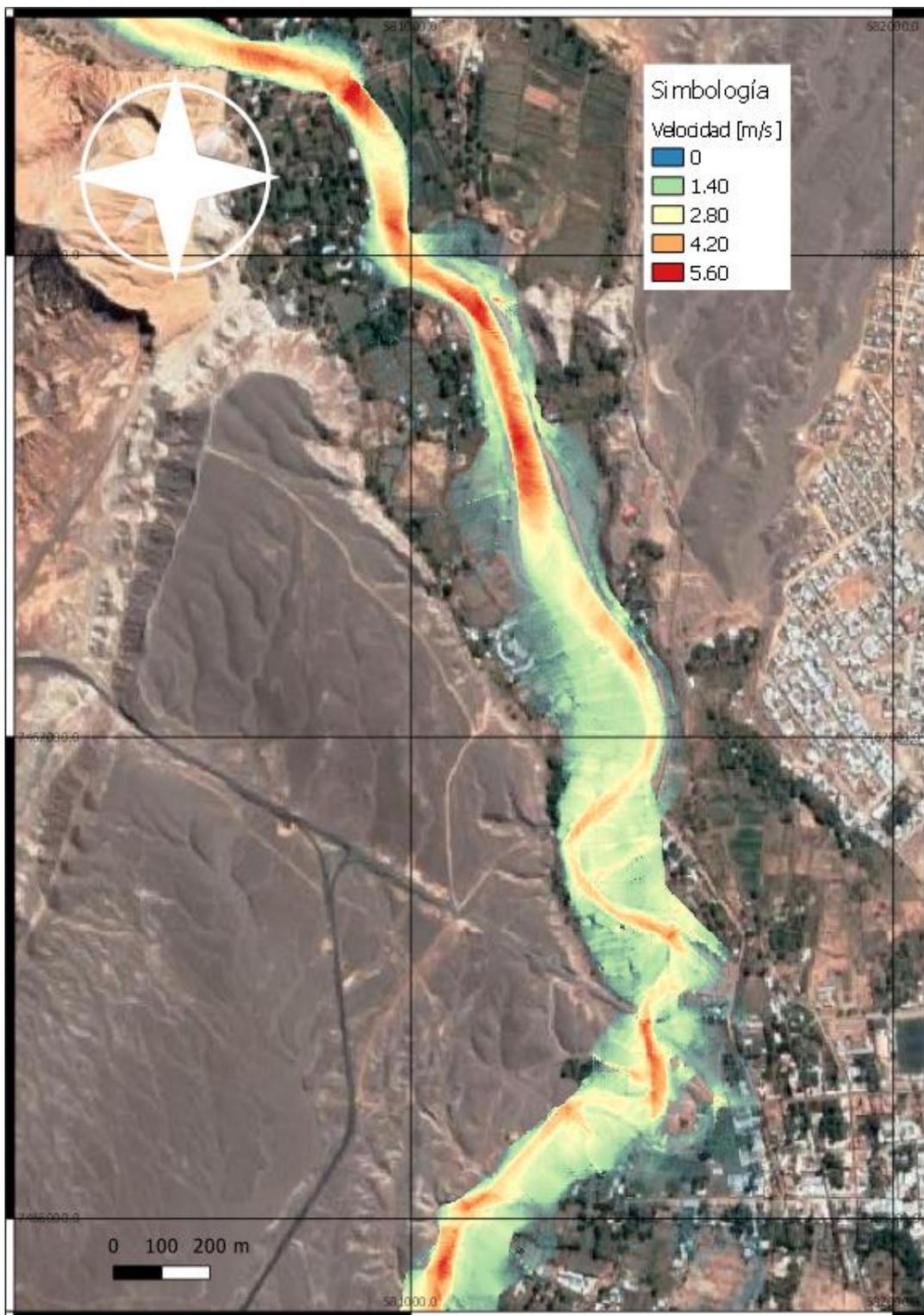


FIGURA 4-157: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 2

Fuente: Elaboración Propia.

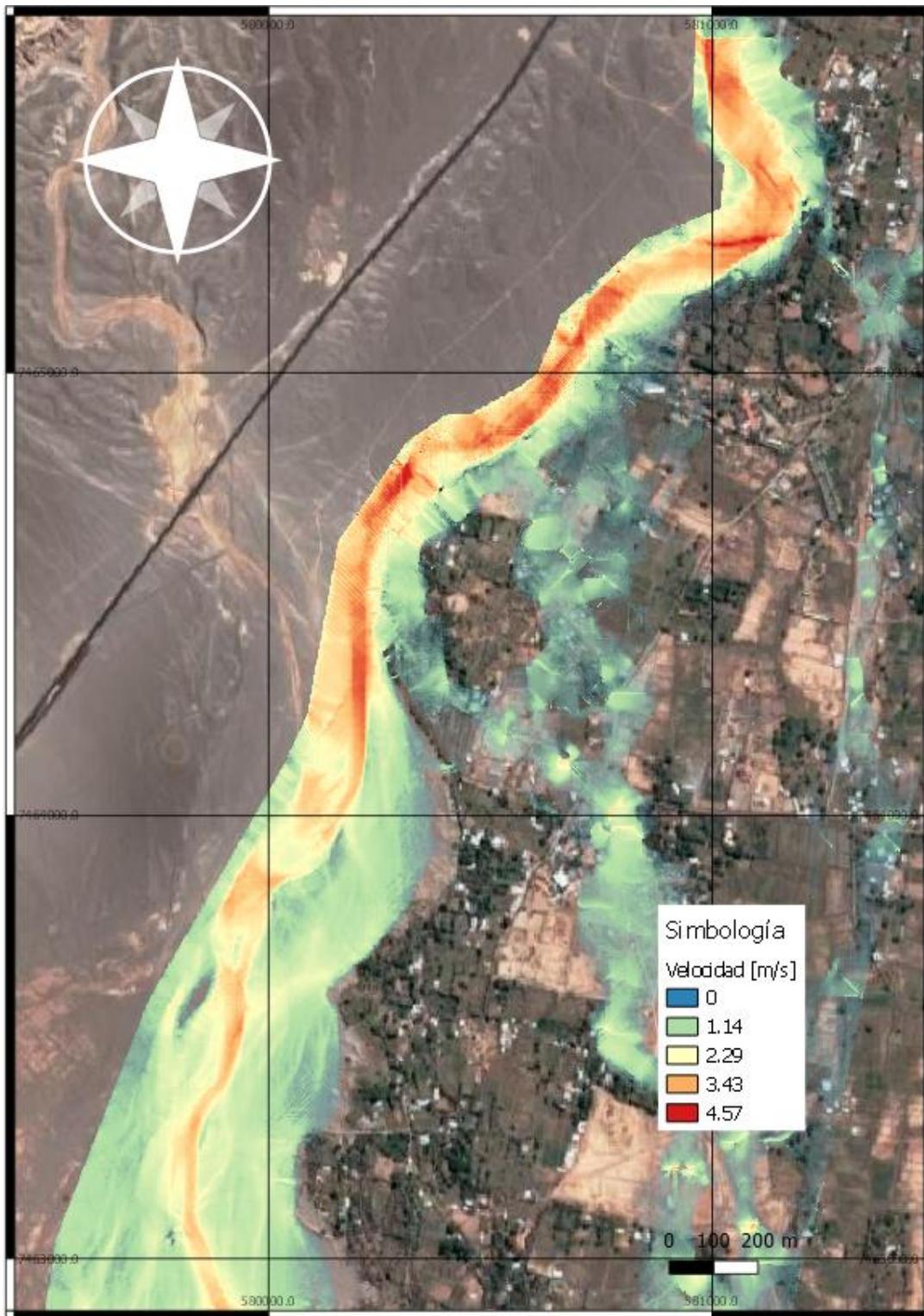


FIGURA 4-158: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 3

Fuente: Elaboración Propia.

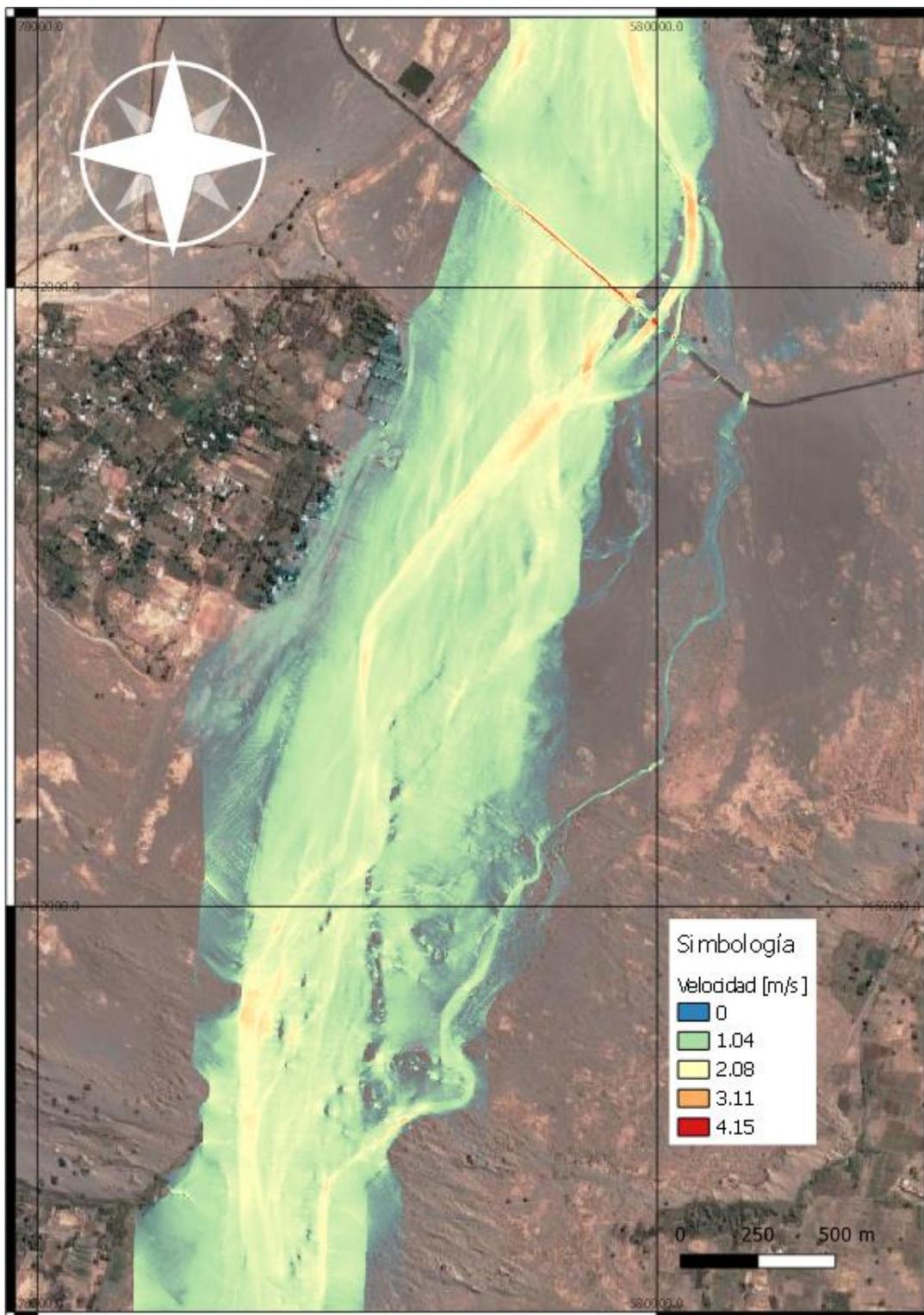


FIGURA 4-159: MAPA DE VELOCIDADES RIO SAN PEDRO T100 GRILLA 4

Fuente: Elaboración Propia.

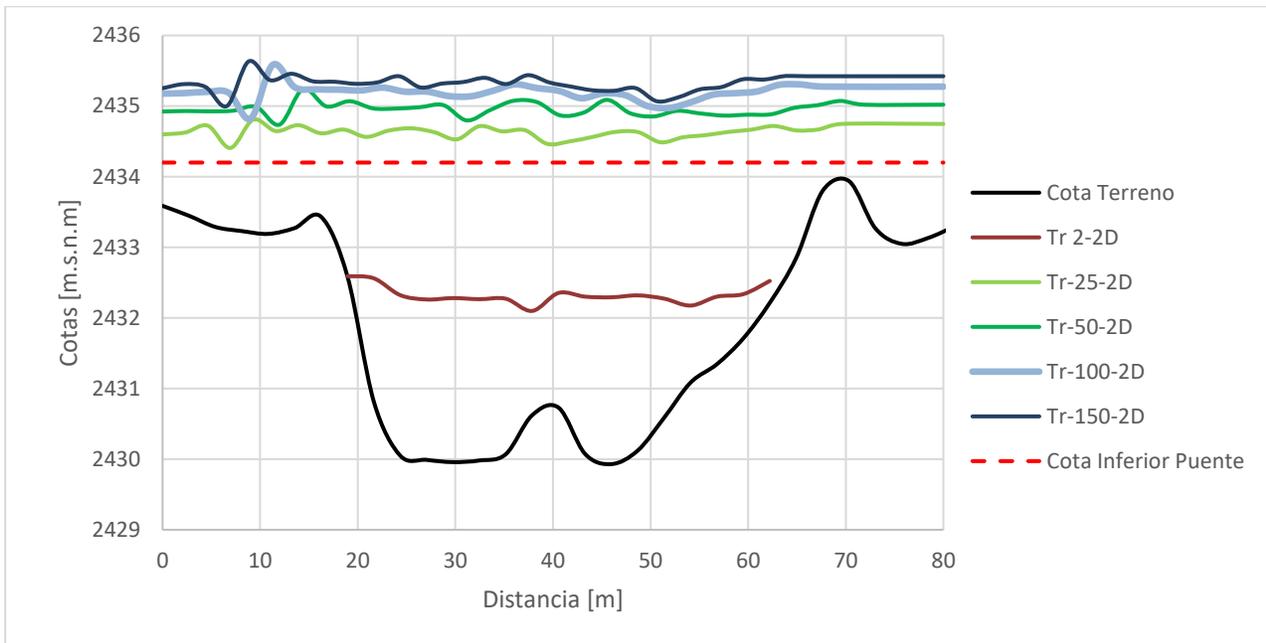


FIGURA 4-160: NIVELES DEL ESCURRIMIENTO EN SECTOR DEL PUENTE SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

En el Cuadro 4-109 se evalúa la revancha para el Puente San Pedro para los diversos periodos de retorno, se observa que para periodos de retorno de 25 años la revancha es negativa lo que implica que el escurrimiento está tocando la viga del puente, para periodos superiores la situación empeora y el escurrimiento estaría vertiendo sobre la estructura implicando su eventual colapso.

CUADRO 4-109: EVALUACIÓN DE LA REVANCHA EN PUENTE SAN PEDRO MODELO 2D

T	Cota escurrimiento	Cota inferior Viga	Revancha	Cumple Revancha de 1 metro
2	2432,59	2434,2	1,61	Si
25	2434,81	2434,2	-0,61	No
50	2435,24	2434,2	-1,04	No
100	2435,58	2434,2	-1,38	No
200	2435,63	2434,2	-1,43	No

Fuente: Elaboración propia.

4.3.7.2. Río Vilama

Entre la Figura 4-161 a Figura 4-163 se presentan las alturas de escurrimiento para los periodos de retorno T2, T50, T100 Y T200 simulados en el rio Vilama, se observa que el canal tiene una sección transversal insuficiente que puede soportar como máximo crecidas de periodo de retorno 50 años, donde los desbordes se generan en los sectores donde el escurrimiento alcanza la altura de 3 metros, que es la altura asociada a las defensas fluviales.

Respecto a las velocidades estas presentan sus mayores valores en la zona canalizada y se incrementan a medida que aumentan los periodos de retorno, las zonas de desborde presentan velocidades bastante menores. Entre la Figura 4-164 a Figura 4-166 se presentan las velocidades de escurrimiento estas presentan los mayores para los periodos de retorno T2, T50, T100 Y T200 simulados.

Si se desea consultar en detalle otros resultados, estos se presentan en el Anexo 4-3-2.

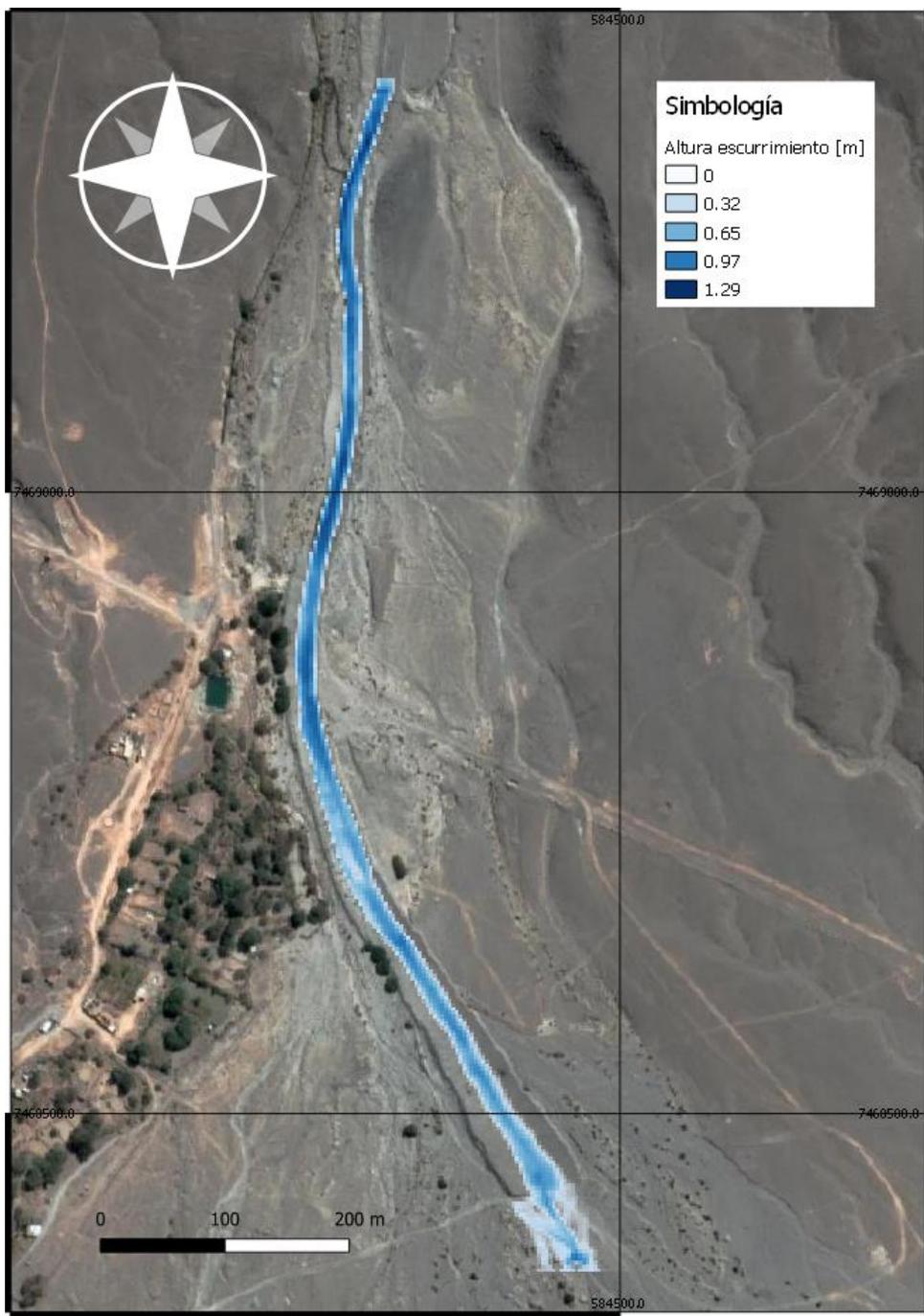


FIGURA 4-161: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO VILAMA PARA T2

Fuente: Elaboración Propia.

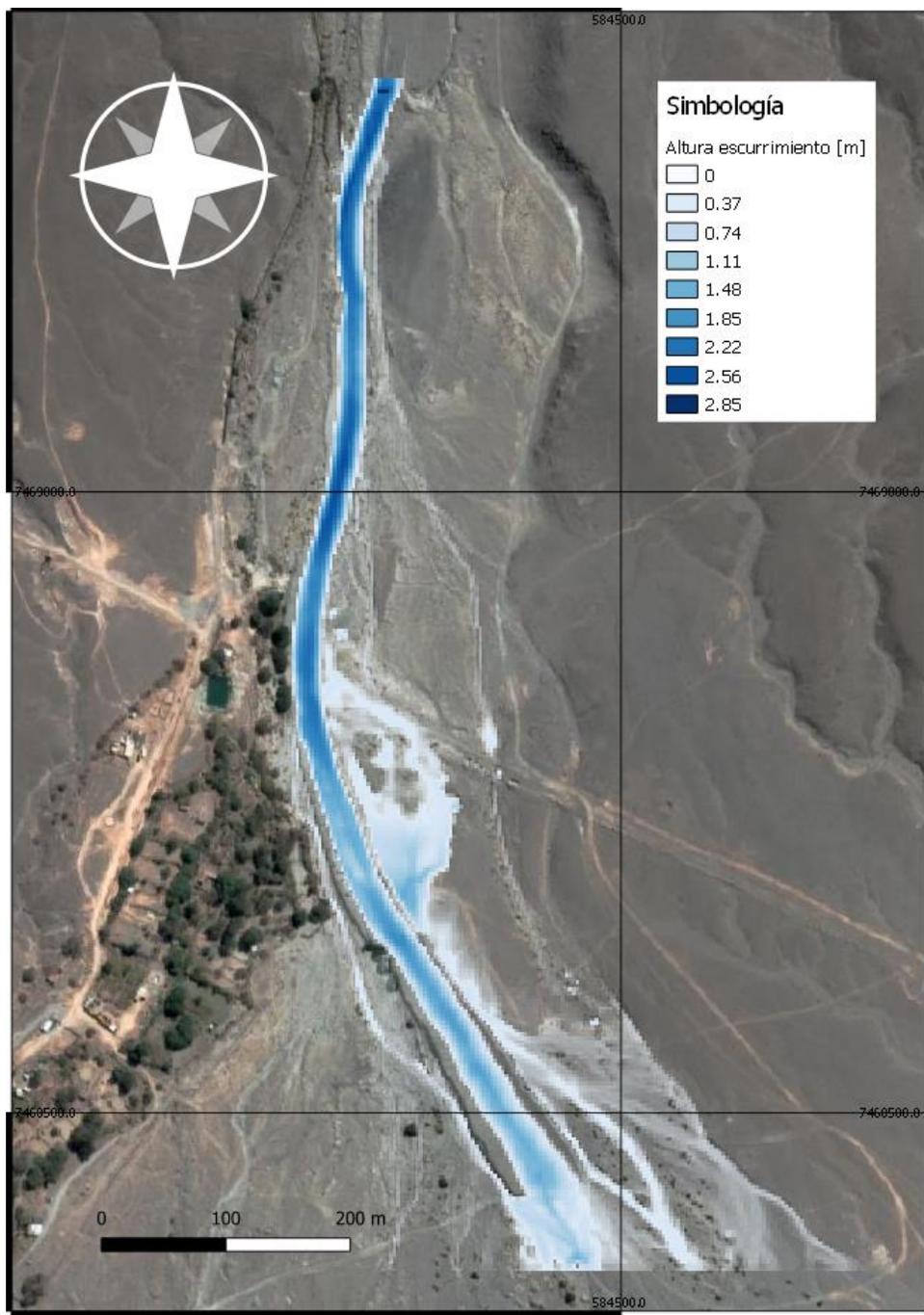


FIGURA 4-162: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO VILAMA PARA T50

Fuente: Elaboración Propia.

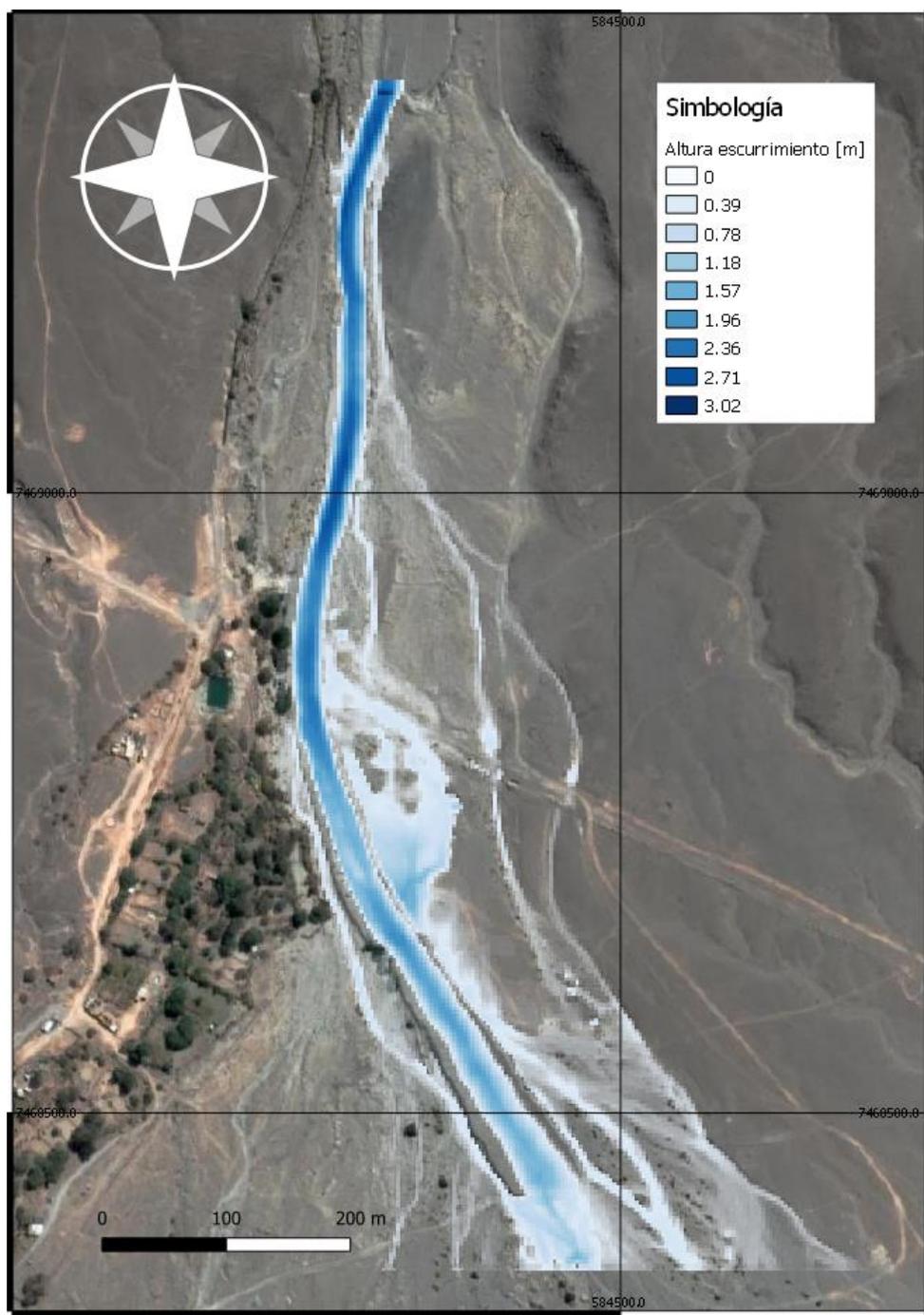


FIGURA 4-163: MAPA DE ALTURA DE ESCURRIMIENTO RIO VILAMA PARA T100

Fuente: Elaboración Propia.

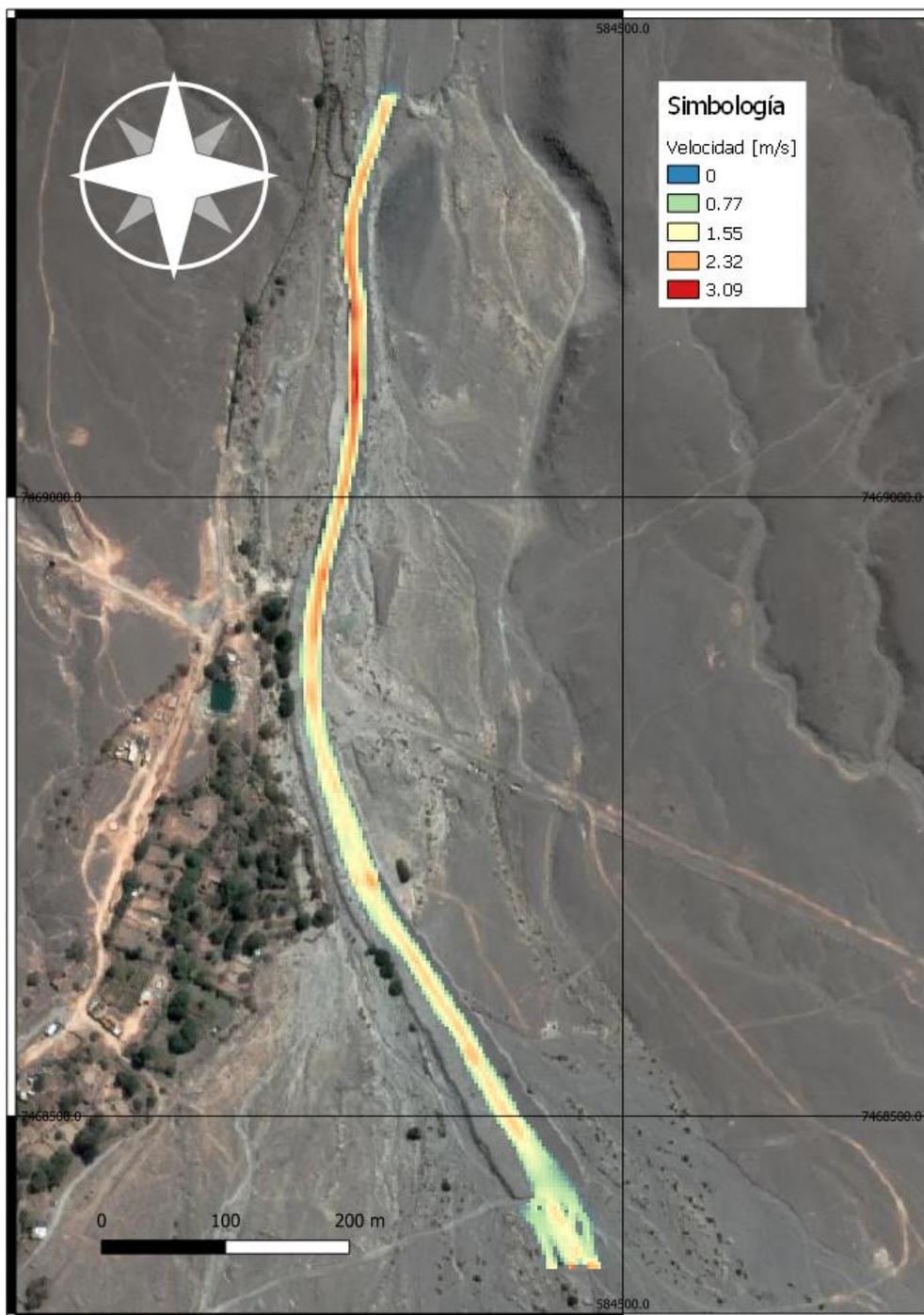


FIGURA 4-164: MAPA DE VELOCIDADES EN RIO VILAMA PARA T2

Fuente: Elaboración Propia.

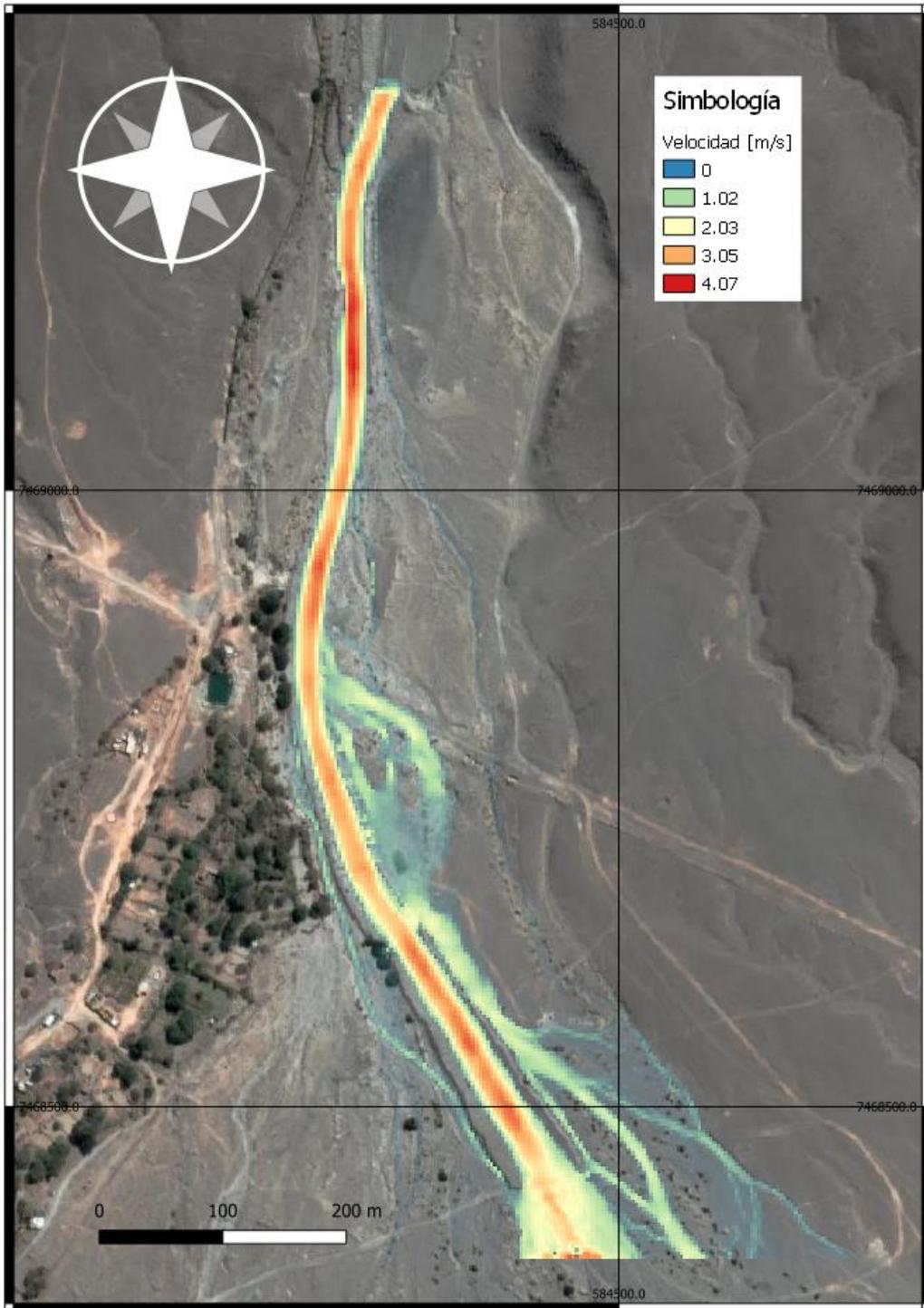


FIGURA 4-165: MAPA VELOCIDADES EN RIO VILAMA PARA T50

Fuente: Elaboración Propia.

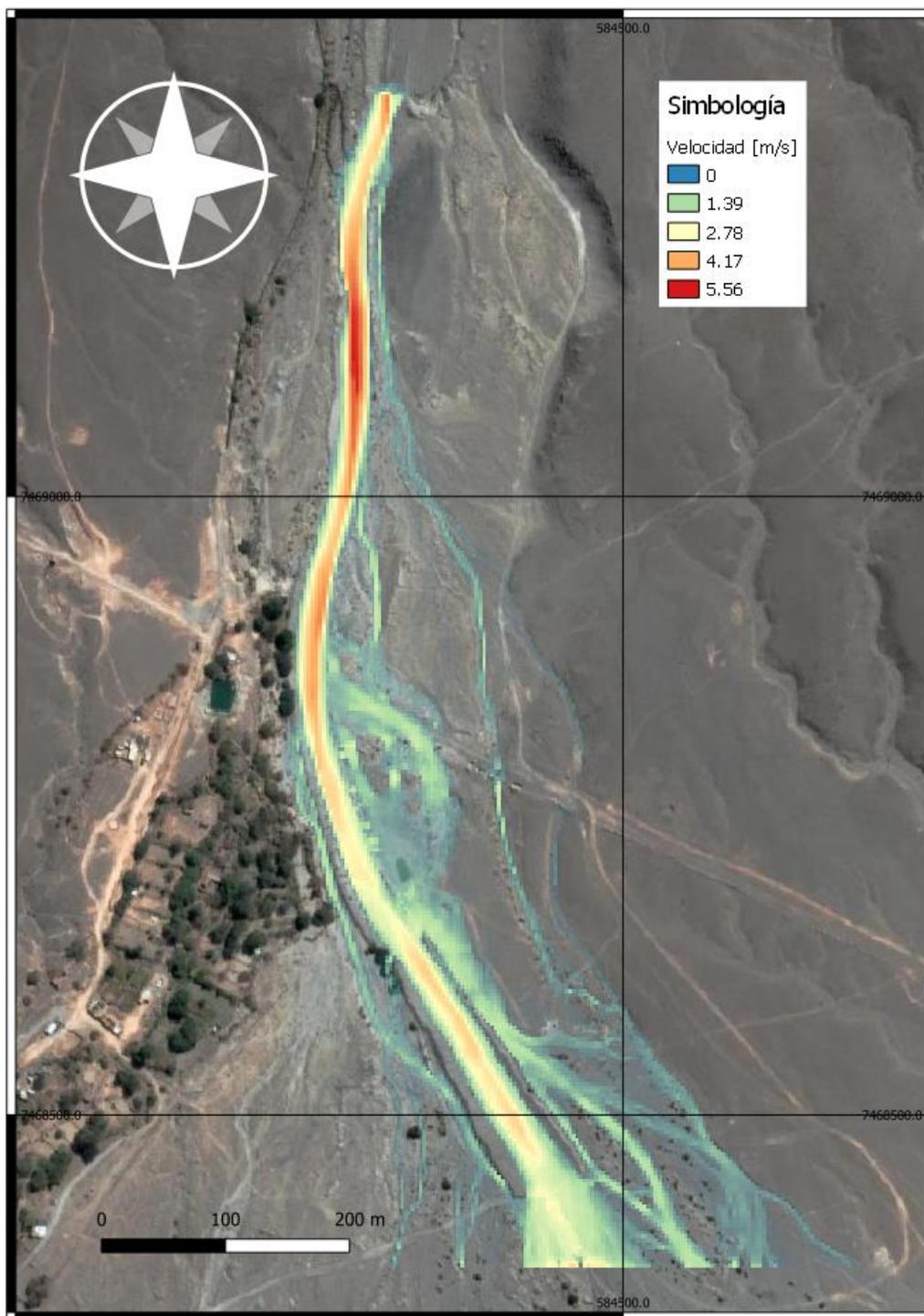


FIGURA 4-166: MAPA VELOCIDADES EN RIO VILAMA PARA T100

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.8. Análisis Comparativo Resultados Modelación Unidimensional y Bidimensional

4.3.8.1. Rio San Pedro

Al comparar los resultados entre el modelo unidimensional y bidimensional para el rio San Pedro, podemos observar que no existe gran diferencia respecto a la superficie de inundación para periodos de retornos pequeños en el tramo urbano ya que acá el comportamiento del flujo es principalmente es unidimensional, distinta es la situación en el sector de la ruta de circunvalación donde el rio tiene un comportamiento trenzado, lo que se ve representado de mejor manera por el modelo bidimensional.

A medida que se incrementa el caudal modelado se producen desbordes en el sector urbano de San Pedro para ambos modelos, aunque el modelo bidimensional logra una mejor representación de la situación ya que se ve la existencia de canales secundarios los cuales no pueden ser recreadas por el modelo unidimensional como se observa en la Figura 4-169 y Figura 4-170.

La causa de estos desbordes es la falta de capacidad que presenta el cauce para transportar el flujo, pero estos se ven incrementados en el modelo bidimensional, donde se ve el efecto de las curvas que tienen como consecuencia el peraltamiento del eje.

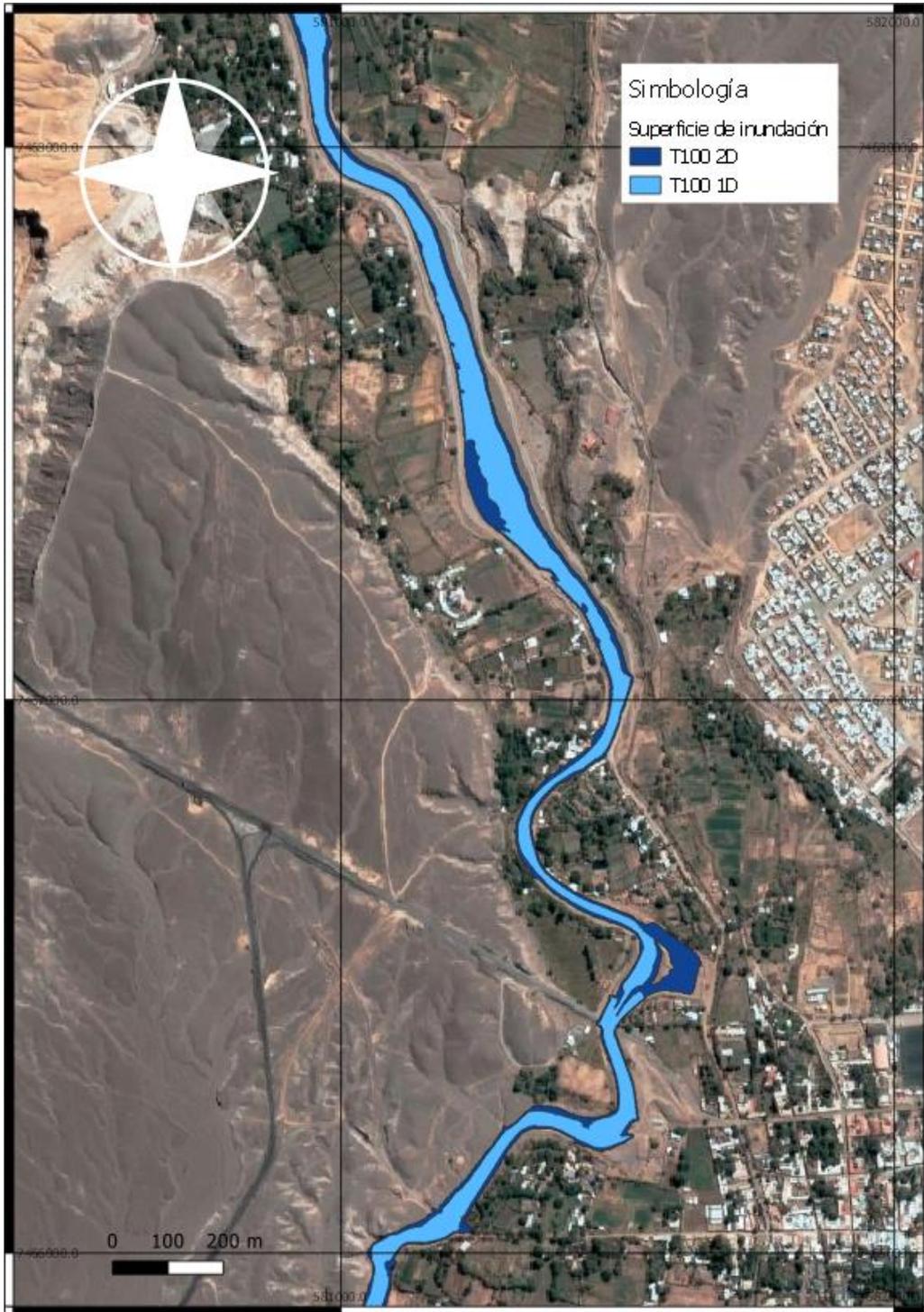


FIGURA 4-167: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO PARA T2

Fuente: Elaboración Propia.

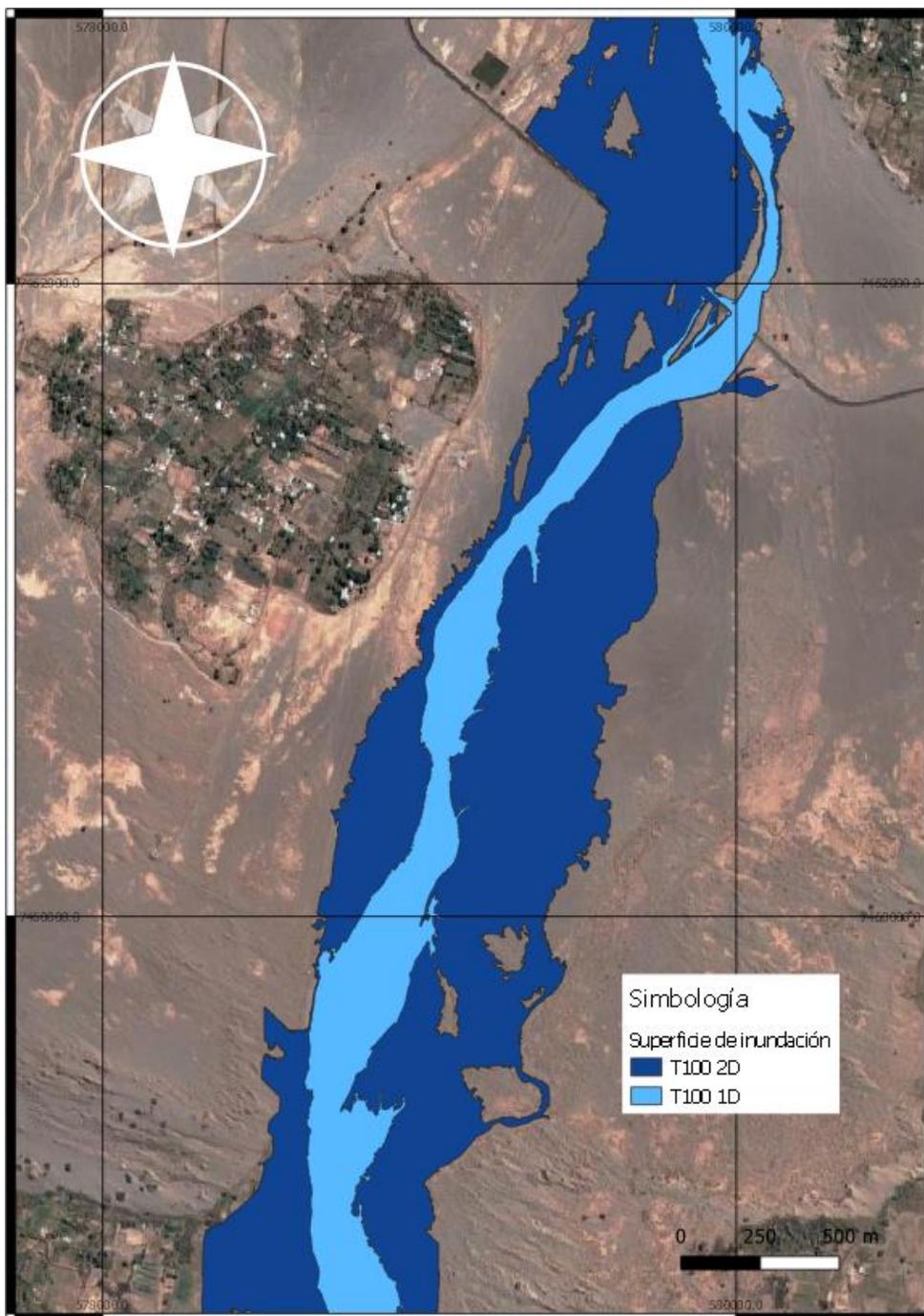


FIGURA 4-168: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO PARA T2

Fuente: Elaboración Propia.

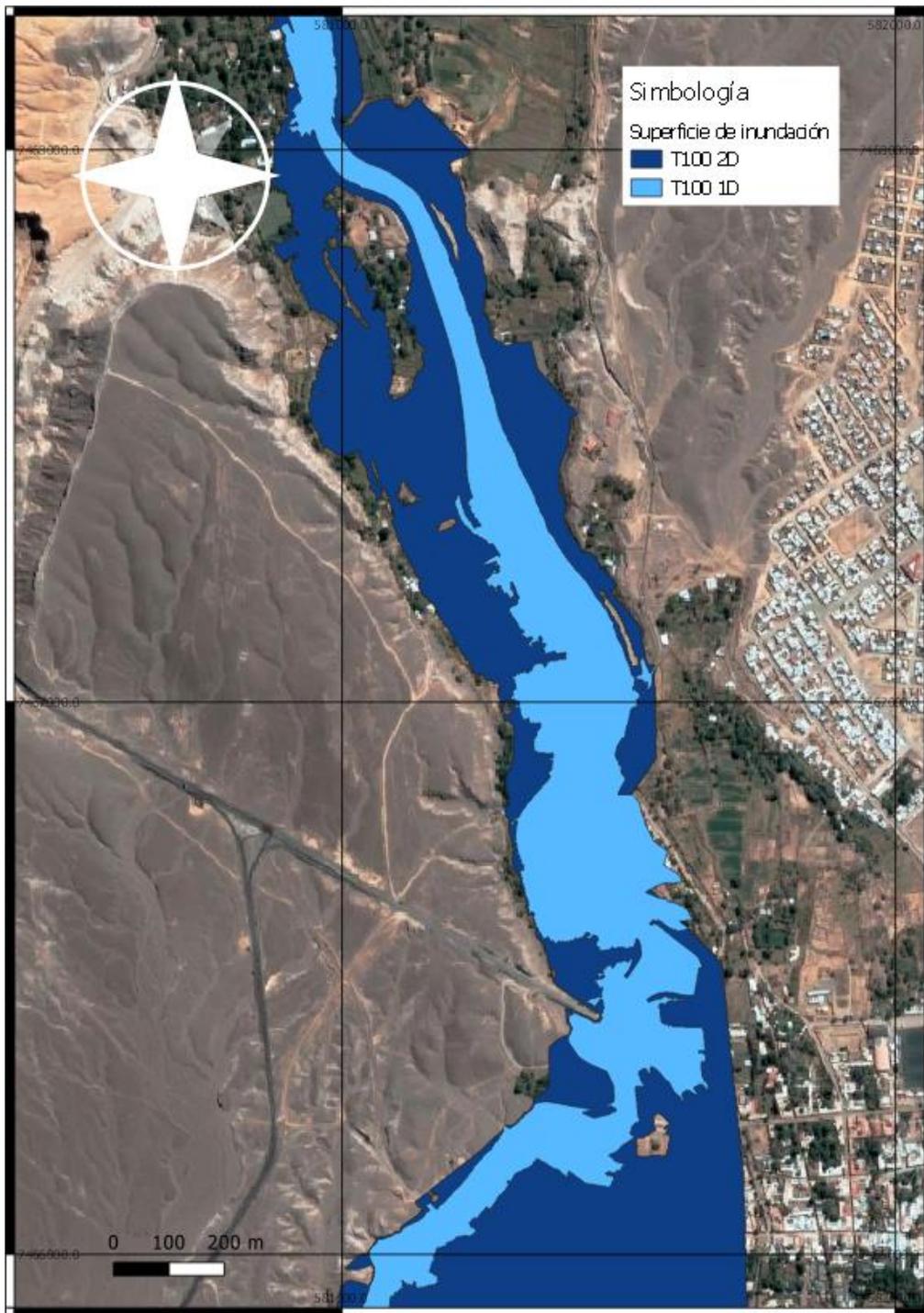


FIGURA 4-169: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO PARA T100

Fuente: Elaboración Propia.

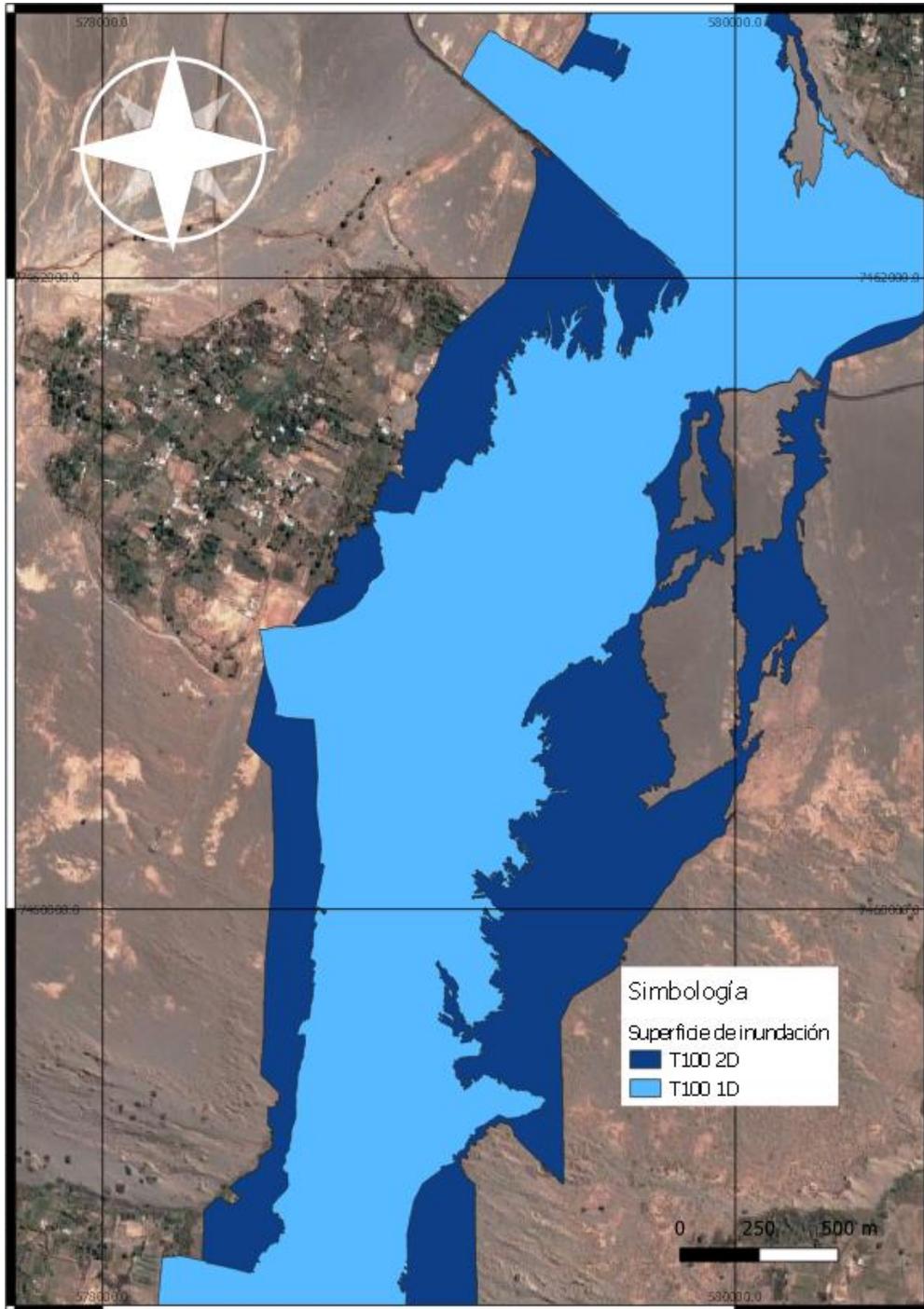


FIGURA 4-170: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO PARA T100

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.8.2. Río Vilama

Al comparar los resultados entre el modelo unidimensional y bidimensional para el río Vilama, podemos observar que no existe grande diferencia respecto a la superficie de inundación para periodos de retornos pequeños, ya que el comportamiento que domina en el tramo canalizado es unidimensional.



FIGURA 4-171: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO VILAMA PARA T2

Fuente: Elaboración Propia.

Esta situación cambia a medida que se incrementa el caudal ya que en el modelo bidimensional se producen desbordes en el cauce generando múltiples vías de escurrimiento las cuales no pueden ser recreadas por el modelo unidimensional como se observa en la Figura 4-172.

La causa de los desbordes en el modelo bidimensional puede ser efectos de las curvas que tienen como consecuencia el peraltamiento del eje, esto es consistente con lo observado en las superficies de inundación obtenidas, lamentablemente este efecto no se puede reproducir en los modelos unidimensionales.

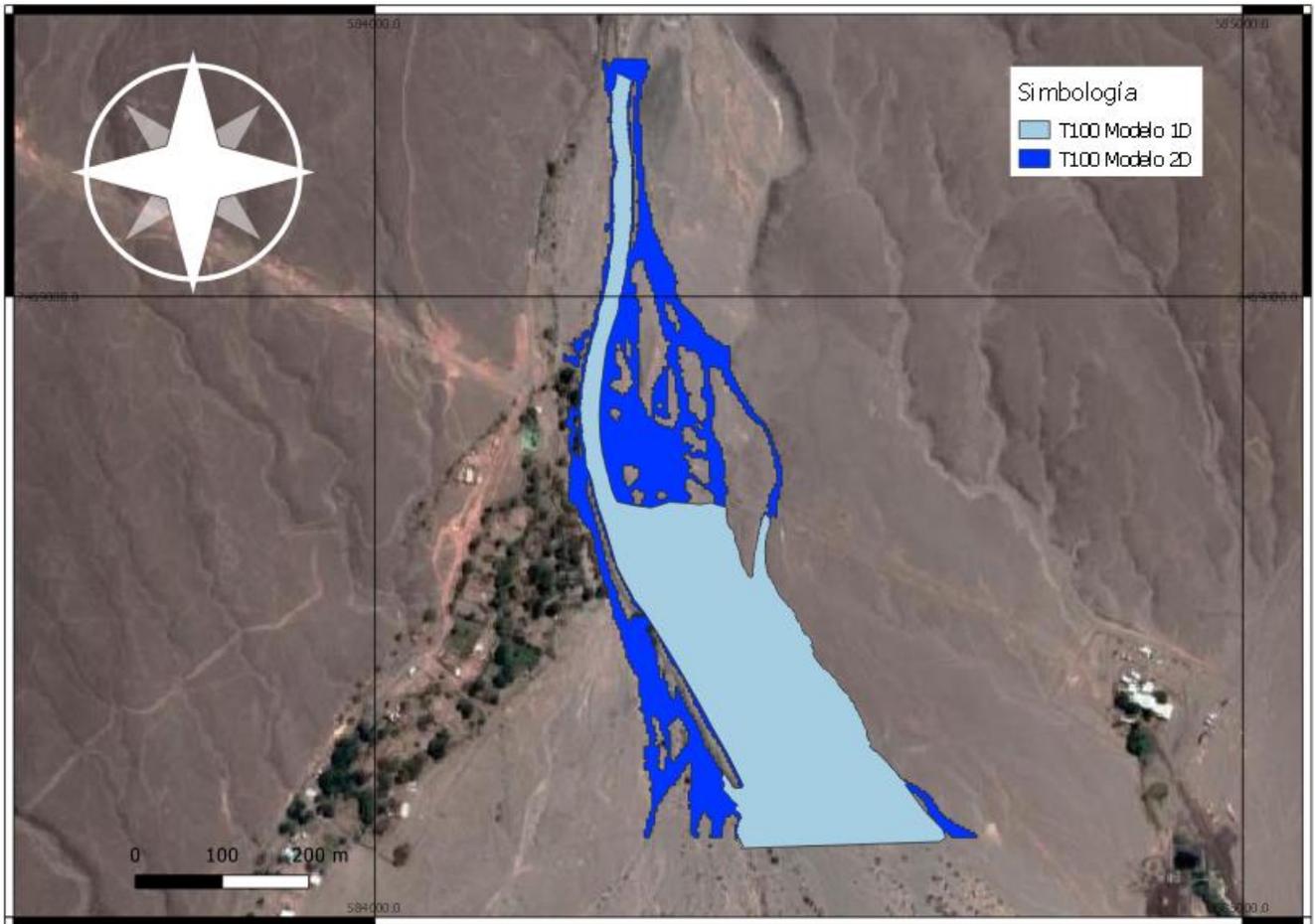


FIGURA 4-172: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO VILAMA PARA T100

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.9. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos podemos concluir que tanto el modelo unidimensional como el bidimensional desarrollados logran replicar de manera bastante aceptable el comportamiento de los cauces en estudio.

Referente a las diferencias entre los modelos desarrollados, el modelo unidimensional tiene la ventaja de ofrecernos resultados bastante aceptables a partir de información discreta y tiempos de cálculo bastante pequeños, lo que sirve para tener una primera aproximación a los principales problemas que podrían generarse y de esta manera adelantar soluciones del tipo conceptual. Por otro lado, el modelo bidimensional al calcularse sobre una superficie “continua” (no perfiles transversales), nos ofrece la virtud de delatar los puntos por donde se podría “filtrar” el escurrimiento, además al tener una distribución espacial de las velocidades detallada, nos permite evaluar el comportamiento de las defensas existentes o proyectadas, para así poder realizar un diagnóstico o diseño más detallado. Esto se ve reforzado al analizar por ejemplo los resultados obtenidos en el sector del Puente San Pedro donde los resultados de la modelación 2D entrega valores más desfavorables que los del modelo 1D.

Es importante recalcar que, si bien los modelos generados representan los principales problemas identificados en terreno, existen limitaciones dada la extensión de la superficie sobre la que se desarrollan. En particular el sector de la ribera izquierda en la ruta de circunvalación no se puede representar de forma totalmente correcta por falta de información topográfica, al tener antecedentes de inundación en el sector aguas abajo en el Ayllu de Beter este análisis debería complementarse en estudios posteriores.

4.4. Análisis Mecánico Fluvial del Cauce

4.4.1. Introducción

La variación temporal de la forma, geometría del cauce y de la morfología de la cuenca aportante dan como resultado los procesos de socavación, transporte de sedimentos y depositación de sedimentos en el cauce.

Debido a estos procesos, se tiene como objetivo evaluar el comportamiento de forma cualitativa del cauce a lo largo de toda el área de estudio para determinadas escorrentías producidas por las lluvias de diseño, que precipitan en el área de estudio y su cuenca aportante. Luego de obtener el comportamiento total del cauce, es posible identificar zonas con tendencia a embanque o erosión del lecho.

Para obtener la tendencia del cauce, se estiman los gastos sólidos de material en suspensión y de arrastre de fondo. Luego se analizan los resultados realizando un equilibrio de sedimento a lo largo del cauce.

Se considerará como base el modelo de simulación hidráulica a partir del software HEC-RAS 5.0.1 en el área de estudio, teniendo en cuenta los parámetros hidráulicos e hidrológicos.

4.4.2. Características Principales del Cauce

La sección de estudio corresponde al río San Pedro y al río Vilama, cuya descripción general se indica a continuación:

- En el tramo alto del río San Pedro, que se le ha denominado Sector 1, se produce interrupción del camino existente tanto por inundación del mismo como por falla de las obras de arte existentes, las cuales revisten el carácter de provisorias y solo permiten el paso de caudales bajos del cauce a través de ellas. En este tramo, para crecidas de mayor importancia, existen sectores en que el cauce divaga de una ribera a la otra generando erosión y desborde.
- En el tramo intermedio del río San Pedro, correspondiente al paso por el sector urbano en donde se encuentra encauzado por tramos importantes de defensa fluvial mediante gaviones, se observan tramos de estrechamientos en la sección del cauce producto del confinamiento que producen las propiedades ribereñas (casas y hotel), así como el angostamiento en la sección que produce el puente vial y que actualmente se verá aún más afectado debido a los gaviones en construcción, en particular en este tramo se observan gaviones con curvas abruptas.

Al realizar el recorrido en terreno, las obras de defensa fluvial dan la impresión de no contar con un diseño hidráulico adecuado otorgando una falsa sensación de seguridad, ya que la reducción de la sección transversal del río podría tener como consecuencia el incremento de las inundaciones para las crecidas de gran magnitud.

Se tiene el antecedente de la crecida del año 2019, donde se presentaron importantes inundaciones y daños precisamente en los sectores de angostamientos y curvas abruptas, además de una importante sedimentación en el cauce en este tramo, que en el caso del puente redujo a la mitad su altura disponible.

- En el tramo final del río San Pedro, que se le ha denominado Sector 3, y que corresponde al tramo desde el acceso por badén a Séquitur hasta el Ayllú de Tulor, se observa un cauce sin mayores intervenciones, con amplias planicies de inundación y presencia de cauces secundarios. La mayor intervención está dada por la ruta de circunvalación que para flujos mayores en el cauce, se comporta como un dique y permite el paso de las aguas a través de varias obras de arte. En las crecidas anteriores, el cauce ha arrasado con las obras de arte existentes. Actualmente Vialidad dispuso de una nueva obra de arte, que preliminarmente se aprecia insuficiente debido a que no respeta el ancho natural que muestra el cauce hacia aguas arriba y que no presenta obras de aproximación y de salida bien conformadas. Por otra parte, se observa que el cauce en forma natural se dirige hacia los sectores de Coyo y Tulor en puntos bajos del terraplén del camino y que, de acuerdo a lo indicado por los lugareños, se han producido desbordes en dichos puntos.
- En el río Vilama, todo el tramo de estudio se encuentra canalizado mediante pretilos de material del lecho fluvial, se trata de pretilos de aproximadamente 3 a 4 m de altura, con un tramo revestido en enrocados con pobre conformación. De los antecedentes disponibles y de lo que se pudo observar en terreno, en la crecida del año 2019 se produjo un desborde por la ribera derecha del cauce hacia el Ayllu de Vilama.

Para la estimación de la socavación generalizada se ha utilizado la velocidad del tramo central del cauce dado que corresponde a la máxima velocidad de la sección de acuerdo a la distribución de velocidades en el mismo.

4.4.3. Perfiles Transversales

Para el análisis, se utilizarán los resultados del eje hidráulico donde se han utilizado los perfiles transversales obtenidos del levantamiento LIDAR realizado como parte del presente estudio. Los perfiles de HEC-RAS considerados y las características principales de los perfiles se incluyen en el Anexo 4-3-1.

4.4.4. Granulometría del Lecho

Para conocer las características granulométricas del cauce se realizaron un conjunto de calicatas a lo largo del cauce y las quebradas aportantes al cauce, donde las características de cada una fueron presentadas la etapa 2B del presente estudio. En el Cuadro 4-110 se presenta un resumen del total de calicatas en el cauce.

CUADRO 4-110: COORDENADAS CALICATAS

Calicata	Coordenadas UTM WGS84.		Cauce
	Norte	Este	
CA SP 01	581973	7475159	San Pedro
CA SP 02	582302	7474958	San Pedro
CA SP 03	582036	7474289	San Pedro
CA SP 04	581741	7473964	San Pedro
CA SP 05	580734	7472565	San Pedro
CA SP 06	580114	7470446	San Pedro
CA SP 07	580549	7468425	San Pedro
CA SP 08	581505	7466980	San Pedro
CA SP 09	581549	7466552	San Pedro
CA SP 10	580106	7462255	San Pedro
CA SP 11	581167	7466034	San Pedro
CA SP 12	581186	7465378	San Pedro
CA SP 13	580772	7465174	San Pedro
CA SP 14	580203	7464398	San Pedro
CA SP 15	579927	7463437	San Pedro
CA SP 16	580014	7461914	San Pedro
CA SP 17	579028	7460085	San Pedro
CA SP 18	578706	7458830	San Pedro
CA VL 01	584270	7469130	Vilama
CA VL 02	584479	7468376	Vilama

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de socavación es necesario tramificar el cauce, asignándole a cada uno de ellos una distribución granulométrica representativa del subtramo, de acuerdo a los resultados de las granulometrías de las calicatas. En el Cuadro 4-111 se observan los diámetros característicos de las calicatas seleccionadas.

CUADRO 4-111: GRANULOMETRÍAS POR SECTOR

Prospección	Horizonte	Dm	D90	D84	D50	D16	σ_g
	m	mm	mm	mm	mm	mm	
CA SP 01	0,00-0,40	1.19	5.67	0.41	0.17	0.08	2.26
CA SP 01	0,40-2,50	17.40	52.37	44.01	7.35	0.34	11.43
CA SP 02	0,00-1,40	0.29	0.42	0.35	0.13	0.08	2.10
CA SP 02	1,40-3,40	20.35	64.38	56.12	2.96	0.18	17.85
CA SP 02	3,40-4,00	23.58	64.38	56.72	5.95	0.28	14.30
CA SP 03	0,00-1,60	0.79	1.04	0.48	0.18	0.08	2.45
CA SP 03	1,60-2,50	15.04	45.73	40.00	5.74	0.57	8.35
CA SP 04	0,00-2,20	23.45	60.48	55.74	12.08	0.59	9.69
CA SP 04	2,20-2,60	18.81	56.12	46.42	8.71	0.31	12.17
CA SP 05	0,00-1,30	0.30	0.48	0.37	0.16	0.08	2.15
CA SP 05	1,30-2,00	18.23	55.21	47.05	3.47	0.11	20.76

CUADRO 4-111: GRANULOMETRÍAS POR SECTOR

Prospección	Horizonte	Dm	D90	D84	D50	D16	σ_g
	m	mm	mm	mm	mm	mm	
CA SP 05	2,00-3,00	21.44	66.57	56.12	8.20	0.48	10.77
CA SP 06	0,00-0,30	5.13	14.98	10.59	1.39	0.23	6.79
CA SP 06	0,30-2,20	24.20	61.89	55.63	15.87	0.55	10.03
CA SP 07	0,00-1,20	11.95	41.30	29.82	1.62	0.12	15.69
CA SP 07	1,20-2,70	19.19	54.38	47.29	10.51	0.28	13.05
CA SP 08	0,00-4,00	20.53	64.38	56.12	4.46	0.22	15.96
CA SP 09	0,00-1,40	15.93	58.33	36.72	3.16	0.14	16.03
CA SP 09	1,40-2,00	0.45	0.42	0.34	0.10	0.08	2.06
CA SP 09	2,00-4,00	22.94	63.00	55.54	14.14	0.37	12.26
CA SP 10	0,00-0,70	0.82	1.64	1.29	0.35	0.12	3.24
CA SP 10	0,70-2,00	6.78	25.00	7.58	0.57	0.11	8.25
CA SP 10	2,00-4,00	0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	1.00
CA SP 11	0,00-0,90	1.75	4.63	2.93	0.79	0.17	4.20
CA SP 11	0,90-1,90	13.22	54.00	36.41	1.17	0.13	16.75
CA SP 11	1,90-3,50	30.80	67.45	60.80	25.00	1.60	6.16
CA SP 11	3,50-4,00	0.20	0.27	0.14	0.08	0.08	1.32
CA SP 12	0,00-0,30	1.69	4.21	2.99	0.78	0.15	4.44
CA SP 12	0,30-1,20	13.38	45.99	42.29	1.62	0.14	17.23
CA SP 12	1,20-4,00	27.81	65.56	56.12	21.75	1.00	7.49
CA SP 13	0,00-1,20	0.43	0.92	0.54	0.20	0.09	2.43
CA SP 13	1,20-2,70	28.08	69.51	63.89	15.16	0.26	15.63
CA SP 13	2,70-3,50	4.06	13.70	9.26	0.42	0.10	9.86
CA SP 13	3,50-4,00	26.40	67.45	61.21	13.46	0.29	14.51
CA SP 14	0,00-0,10	0.99	1.70	1.34	0.35	0.11	3.55
CA SP 14	0,10-1,30	9.80	33.14	22.36	1.31	0.17	11.38
CA SP 14	1,30-4,00	21.54	63.00	57.06	6.10	0.26	14.95
CA SP 15	0,00-0,90	14.27	59.46	36.99	1.63	0.17	14.93
CA SP 15	0,90-1,90	6.94	23.21	15.16	1.23	0.16	9.65
CA SP 15	1,90-3,60	15.64	59.46	50.00	1.87	0.18	16.52
CA SP 15	3,60-4,00	1.83	5.00	2.00	0.23	0.08	5.00
CA SP 16	0,00-1,30	0.01	0.08	0.08	0.08	0.08	1.00
CA SP 16	1,30-3,00	0.23	0.35	0.31	0.17	0.09	1.85
CA SP 16	3,00-4,00	0.82	1.11	0.62	0.17	0.08	2.78
CA SP 17	0,00-0,40	18.54	64.38	45.99	4.08	0.08	23.98
CA SP 17	0,40-3,00	4.90	14.14	9.48	1.41	0.24	6.26
CA SP 17	3,00-4,00	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	1.00
CA SP 18	0,00-4,00	5.07	14.86	9.12	1.64	0.24	6.23

CUADRO 4-111: GRANULOMETRÍAS POR SECTOR

Prospección	Horizonte	Dm	D90	D84	D50	D16	σ_g
	m	mm	mm	mm	mm	mm	
CA VL 01	0,00-4,00	28.61	67.45	60.15	22.01	1.24	6.97
CA VL 02	0,00-0,60	1.03	1.81	1.47	0.46	0.13	3.32
CA VL 03	0,60-1,30	8.98	30.17	17.41	1.14	0.21	9.14
CA VL 04	1,30-4,00	27.51	71.77	67.24	15.42	0.50	11.60

Fuente: Elaboración propia.

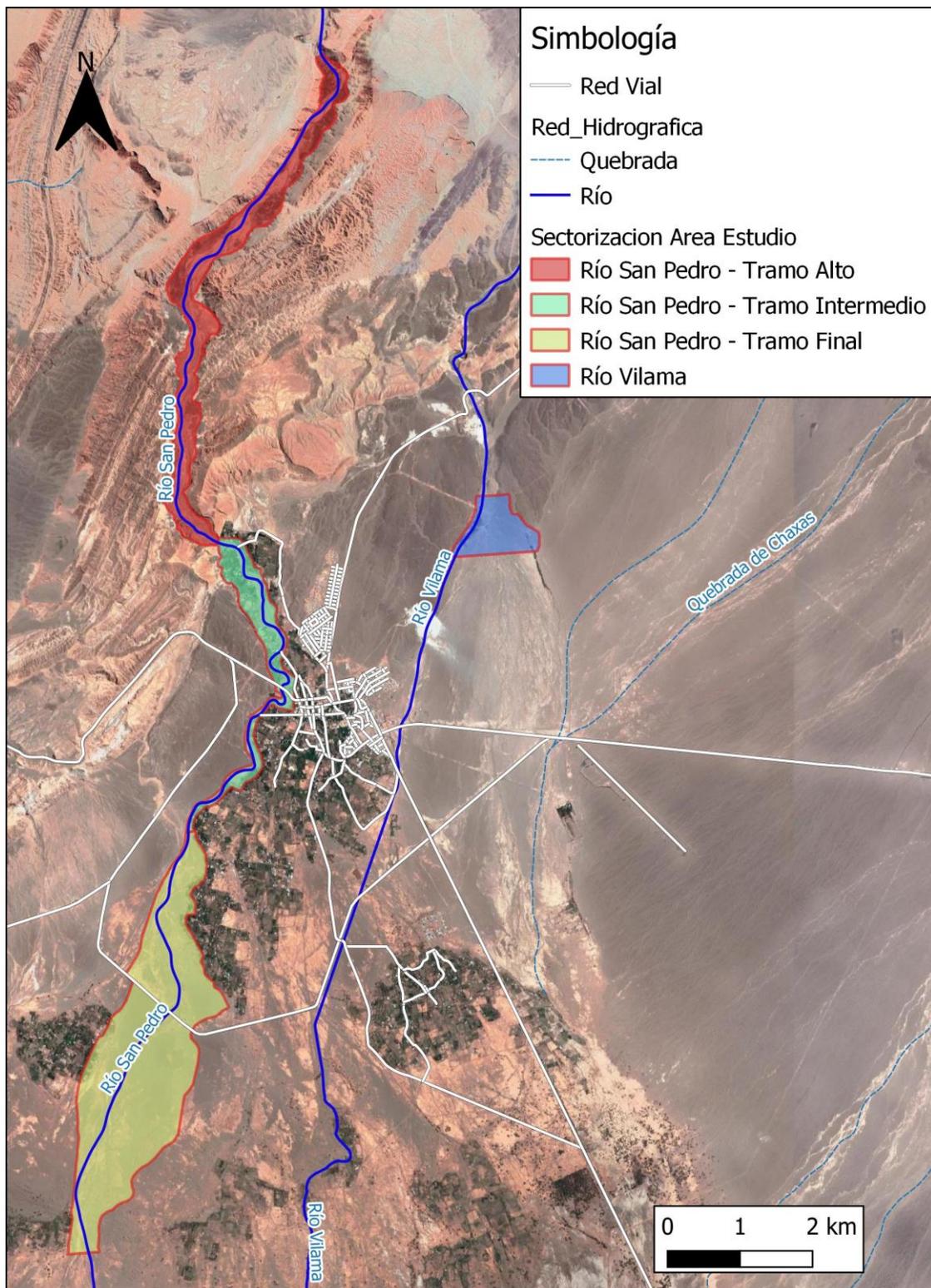


FIGURA 4-173: SECTORIZACIÓN DEL CAUCE Y QUEBRADAS

Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth

4.4.5. Socavación en el Cauce

4.4.5.1. Análisis de Socavación General del Cauce

Introducción

La socavación corresponde a un fenómeno en el cual el equilibrio del cauce se ve alterado ya sea por índole natural, como por ejemplo debido a las crecidas, obstrucciones por caída de árboles y/o desmoronamiento de laderas, como por índole artificial al alterar el cauce con una estructura en él que cambia la pendiente de fondo o reduce la sección transversal del cauce, entre otros. Se distinguen al menos dos tipos de socavación: socavación general y socavación local.

La socavación general ocurre generalmente en secciones contraídas debido a la aceleración del flujo. El aumento de la velocidad y el esfuerzo de corte en el lecho, resultan en una mayor capacidad de transporte, lo que puede provocar remoción de material desde el lecho y las riberas hasta restablecerse un equilibrio entre el sedimento que llega a la sección y el que es transportado fuera de ésta.

La estimación de la magnitud de la socavación general es relevante cuando se pretende construir y/o colocar obras dentro del cauce para que ésta no se vea afectada y/o no sea afectada seriamente. Por lo anterior, se estima la máxima erosión asociada a un caudal de diseño

Por otro lado, la socavación local se presenta al pie de estructuras que obstruyen la corriente del flujo, ya sea que éstas se vean envueltas por el flujo o bien si se encuentran en los márgenes del cauce.

En lo que sigue se procede a calcular la socavación generalizada que se produce como consecuencia del aumento de la capacidad del flujo para transportar material en el río durante las crecidas.

Para la determinación de la socavación general se han utilizado los métodos propuestos por: Neill, Lischtvan-Lebediev y Lischtvan-Lebediev-Maza.

Para la caracterización granulométrica de los suelos de cada una de las secciones, se utilizó la calicata más cercana que se encuentre en el Cuadro 4-111, donde el estrato utilizado será el más superficial que presente tamaños característicos mayores al milímetro de manera de no sobrestimar los valores de socavación estimados.

Método de Cálculo de Socavación General

Introducción

En lo que sigue se describe la metodología para determinar la socavación generalizada en las secciones donde se emplazan las obras, determinada para sedimento grueso según Neill, la relación de Lischtvan Levediev y Lischtvan-Lebediev-Maza.

Los datos para el análisis se obtienen del modelo HEC-RAS realizado para periodo de retorno T=100 años considerando el caudal sin aporte de sedimentos.

Neill

Este método utiliza fórmulas de velocidad crítica de arrastre derivadas para lechos granulares planos. La velocidad crítica de arrastre (V_c) de Neill para suelos no cohesivos y sedimentos gruesos, está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{c_j}}{\sqrt{g \cdot h_{c_j}}} = 1,81 \cdot \left(\frac{h_{c_j}}{d}\right)^{-0,33}$$

Para el caso de sedimentos finos se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{V_{c_j}}{\sqrt{g \cdot h_{c_j}}} = 0,787 \cdot \left(\frac{h_{c_j}}{d}\right)^{-0,5} \ln\left(\frac{12h_c}{k_s}\right)$$

Donde:

- V_{c_j} : Velocidad crítica de arrastre en la subsección j
- h_{c_j} : Altura de escurrimiento crítica en la subsección j
- d : Diámetro representativo del sedimento del lecho
- g : Aceleración de gravedad (9,81 m/s²)

Para el cálculo, se aplicó la relación en las secciones y/o perfiles que se han mencionado con anterioridad. En la condición de arrastre crítico, el caudal que escurre por las diferentes subsecciones está dado por:

$$q_j = A_{c_j} \cdot V_{c_j} = b_j \cdot h_{c_j} \cdot V_{c_j}$$

Donde:

q_j : Caudal que escurre por la subsección j

A_{c_j} : Área crítica asociada a la subsección j ($A_{c_j}=b_j \cdot h_{c_j}$)

V_j : Velocidad crítica de arrastre en la subsección j

Por otra parte, considerando constante en toda la sección la pendiente del plano de carga y el coeficiente de rugosidad, e igualando las dos relaciones anteriores se obtiene:

Para sedimento grueso:

$$h_{c_j} = \left(\frac{q_j}{1,81 \cdot \sqrt{g} \cdot d^{0,33}} \right)^{0,855}$$

Para sedimento fino:

$$h_{c_j} \ln \left(\frac{12 h_{c_j}}{k_s} \right) = \left(\frac{q_j}{0,787 \sqrt{g D}} \right)$$

Con lo cual la socavación generalizada en la sección queda dada por la siguiente relación:

$$S_j = h_{c_j} - h_j$$

En que:

h_j : Altura del escurrimiento sin socavación en la subsección j (se obtiene del eje hidráulico y del perfil transversal)

b_j : Ancho de la subsección j ($A_j=h_j \cdot b_j$)

S_j : Socavación generalizada en la subsección j

Lischtvan – Lebediev

De acuerdo a la literatura consultada, para el cálculo de la socavación general se recomienda utilizar el método de Lischtvan-Lebediev, el cual se basa en determinar la condición de

equilibrio entre la velocidad media de la corriente y la velocidad media del flujo necesaria para erosionar el material que forma el cauce; es aplicable tanto para materiales del subsuelo con distribución homogénea o heterogénea.

Para el cálculo de la socavación se utilizó la metodología en el Manual de Carreteras.

Se determinó la socavación generalizada en lecho no cohesivo, que se origina en las distintas verticales o franjas que constituyen cada sección del cauce, lo que se traduce en descensos puntuales distintos en el nivel del fondo a lo ancho del perfil. Conservadoramente, en los cálculos se considera nulo el aporte de sedimentos a la sección proveniente de aguas arriba, lo que significa considerar el límite máximo para la socavación.

El método es aplicable íntegramente a una sección, pero puede utilizarse para realizar el cálculo en franjas.

Para cada franja se determina la profundidad máxima de escurrimiento, incluyendo la de la situación socavada para sedimentos no cohesivos.

$$h_j = \left(\frac{q_j}{0.68 * \beta * D^{0.28} * \psi} \right)^{\frac{1}{X+1}}$$

Donde:

h_j : Altura del escurrimiento en la franja socavada j expresado en m.

q_j : Caudal por unidad de ancho de la franja socavada j en m³/m/s.

D : Diámetro medio (D_m) del sedimento obtenido de la curva granulométrica, expresado en mm. Puede ser D_{84}

β : Coeficiente función de la probabilidad de excedencia del caudal de diseño según la Tabla 3.707.405 A del Manual de Carreteras.

ψ : Coeficiente que considera la influencia del sedimento en suspensión según la Tabla 3.707.405 B del Manual de Carreteras.

X : Parámetro de la fórmula de arrastre crítico según la Tabla 3.707.405 C del Manual de Carreteras.

Lischtvan – Lebediev – Maza

Dadas las características del lecho del río, para el cálculo de la socavación general se utilizará además las fórmulas de Lischtvan Lebediev Maza que se ajustan muy bien con experiencias de laboratorio y de terreno.

El cálculo se basa en la determinación de la profundidad de socavación (d_s). Asumiendo que la rugosidad es constante en toda la sección, la profundidad de socavación medida desde el fondo del lecho a la superficie libre del escurrimiento líquido se expresa en las ecuaciones siguientes:

Para suelos granulares:

- Si $0,05 \text{ mm} < D_{84} < 2,6 \text{ mm}$

$$D_s = \left[\frac{\alpha * d_0^{5/3}}{4,7 * \beta * D_{84}^{0,28}} \right]^{\left(\frac{d_m^{0,03}}{0,322 + d_m^{0,03}} \right)}$$

- Si $2,6 \text{ mm} \leq D_{84} \leq 182 \text{ mm}$

$$D_s = \left[\frac{\alpha * d_0^{5/3}}{4,7 * \beta * D_{84}^{0,28}} \right]^{\left(\frac{d_m^{0,092}}{0,223 + d_m^{0,092}} \right)}$$

- Si $182 \text{ mm} \leq D_{84} \leq 1000 \text{ mm}$

$$D_s = \left[\frac{\alpha * d_0^{5/3}}{4,7 * \beta * D_{84}^{0,28}} \right]^{\left(\frac{d_m^{0,187}}{0,191 + d_m^{0,187}} \right)}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{Q_d}{d_m^{5/3} * B_e}$$

D_{84} : Diámetro por el que pasa el 84% del material sólido.

d_0 : Profundidad inicial, medida desde el fondo del lecho hasta la superficie libre del escurrimiento líquido.

D_s : Profundidad después del proceso de socavación, medida desde el fondo del lecho hasta la superficie libre del escurrimiento líquido.

Q_d : Caudal de diseño.

B_e : Ancho superficial efectivo, asociado al caudal de diseño y a la sección inicial del cauce.

- dm: Profundidad media que resulta de dividir el área de escurrimiento y el ancho superficial efectivo B_e , ambos asociados al caudal de diseño y a la sección original del cauce
- β : Es un coeficiente que toma en cuenta el período de retorno T asociado al caudal de diseño. Para determinar su valor se propone la siguiente expresión, la cual es válida para períodos de retorno entre 15 y 1500 años.
- $$\beta = 0,8416 + 0,03342 * \ln(T) \quad \text{Para } T \geq 100 \text{ años; } \beta = 1,0$$
- α : Coeficiente de conducción hidráulica obtenido de aplicar la fórmula de Manning a la sección.

Finalmente, la socavación "S" desde el fondo inicial con máxima erosión se determina como:

$$S = D_s - d_0$$

4.4.5.2. Análisis de Socavación Local

Introducción

Dado que se proyecta realizar obras en el cauce, corresponde definir algunas obras de protección para evitar la erosión de éstas y para evitar que las obras se inunden o sufran peligro de inestabilidad.

Cabe señalar que las socavaciones están calculadas considerando la velocidad en cada uno de los perfiles. La velocidad considerada es el valor máximo de cada perfil, dado que, si bien en las riberas es menor que en el centro del cauce, se considera la más desfavorable en caso que en algún evento natural el río se cargue más en una ribera.

La granulometría del sector estudiado vendrá representada por la calicata más próxima dentro de las mencionadas en el Cuadro 4-111, donde los parámetros a considerar será la relación entre D_{84} y D_{50} pertenecientes al estrato superior. En el caso en que la socavación es superior al tamaño del estrato se procederá a utilizar los diámetros característicos del estrato inferior.

Para este punto, se considera la socavación local de las pilas de los puentes a lo largo del cauce.

Método de Cálculo Socavación Local de Pilas

Existen numerosas fórmulas que han sido propuestas para determinar la profundidad máxima de la fosa o cavidad de socavación alrededor de una pila. A continuación, se presenta un grupo de fórmulas que reflejan la información más completa o actualizada sobre el fenómeno.

Para estimar la socavación máxima al pie de una pila de sección circular inserta en un lecho se utilizará la metodología del Manual de Carreteras Volumen 3, donde considera las fórmulas de

Breusers, Nicollet y Shen (BNSh), Envoltente de datos experimentales (EDE) y la relación de Richardson (R) que son dadas a continuación:

- Breusers, Nicollet y Shen (BNSh)

$$\frac{Sc}{b} = 2 * \tan \left(\frac{h}{b} \right)$$

- Envoltente de datos experimentales (EDE)

$$\frac{Sc}{b} = \begin{cases} 2 \left(\frac{h}{b} \right)^{0.35} & \text{para } \frac{h}{b} \leq 2 \\ 2,5 & \text{para } > 2 \end{cases}$$

- Relación de Richardson (R)

$$\frac{Sc}{b} = 2 * \left(\frac{h}{b} \right)^{0.35} * F^{0.43}$$

En las expresiones anteriores, Sc es la socavación máxima debido a la presencia de la pila de sección circular de diámetro b inserta en un lecho y sujeta a condiciones aguas claras y transporte incipiente del flujo en la zona no alterada por la pila; h es la altura de escurrimiento y F es el número de Froude del flujo no perturbado

4.4.5.3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de las metodologías descritas anteriormente en base a los sectores característicos. El detalle de los cálculos y resultados se encuentra en el Anexo 4-4-1.

El promedio de la socavación general para cada sector descrito anteriormente se presenta en el Cuadro 4-112.

CUADRO 4-112: SOCAVACIÓN GENERAL CAUCES Y QUEBRADAS

ID Sector	Cauce	Perfil HECRAS	Socavación Promedio (m)
S1	Río San Pedro	0 a 8600	0.32
S2	Río San Pedro	8650 a 14350	0.76
S3	Río San Pedro	14400 a 21227	0.63
S4	Río Vilama	0 a 1050	0.33

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la socavación general en el eje longitudinal del Rio San Pedro presentada en la Figura 4-174, se puede observar que el sector 2 es aquel que presenta mayores socavaciones lo que es coincidente con ser la sección más intervenida y angosta del cauce, seguido por el sector 3 que presenta un grado de intervención considerable hasta el sector del ayllu de Coyo aguas abajo de este el cauce se ensancha y decae el valor de las socavaciones, estas diferencias de comportamiento refuerzan la sectorización adoptada en el Rio San Pedro.

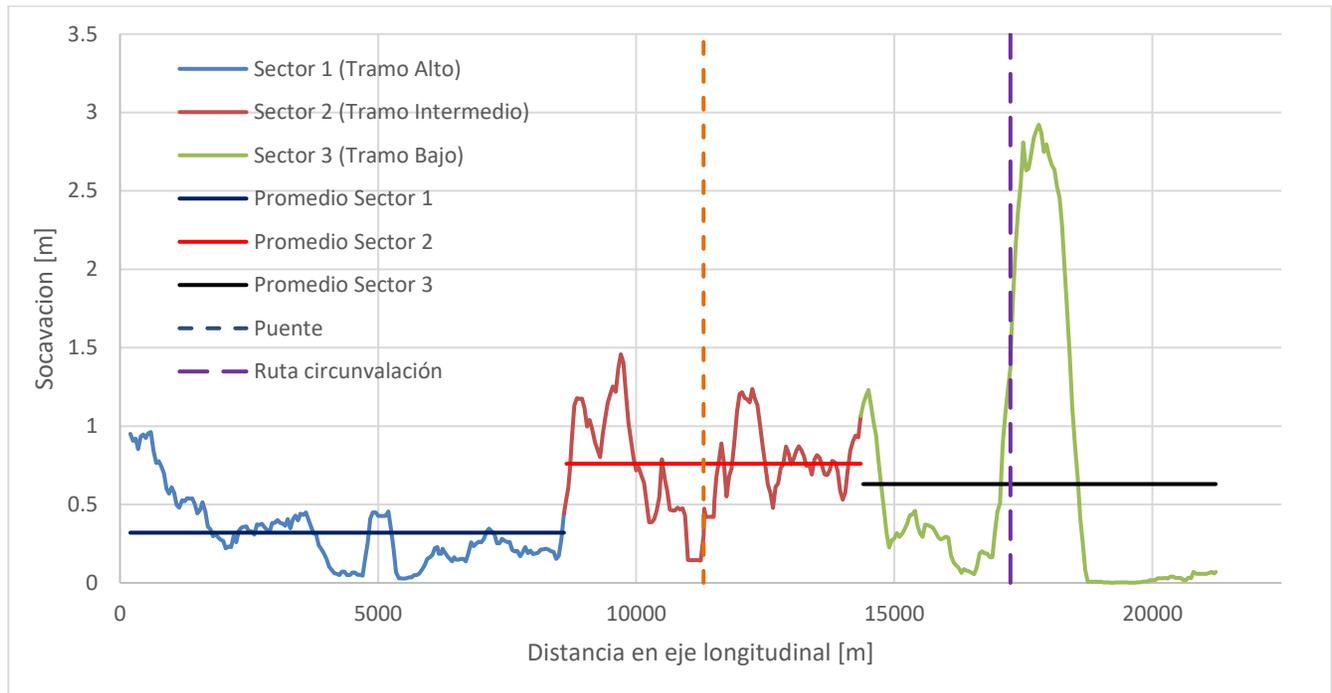


FIGURA 4-174: SOCAVACIÓN GENERAL EN RIO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-175 se presenta la socavación general en el eje longitudinal del Rio Vilama, se observa que las socavaciones decrecen a medida que se desarrolla el eje longitudinal, lo que se explica en base a que la zona inicial del tramo analizado es donde existe un mayor encauzamiento el cual se va ensanchando hasta desaparecer alrededor de los 700 metros.

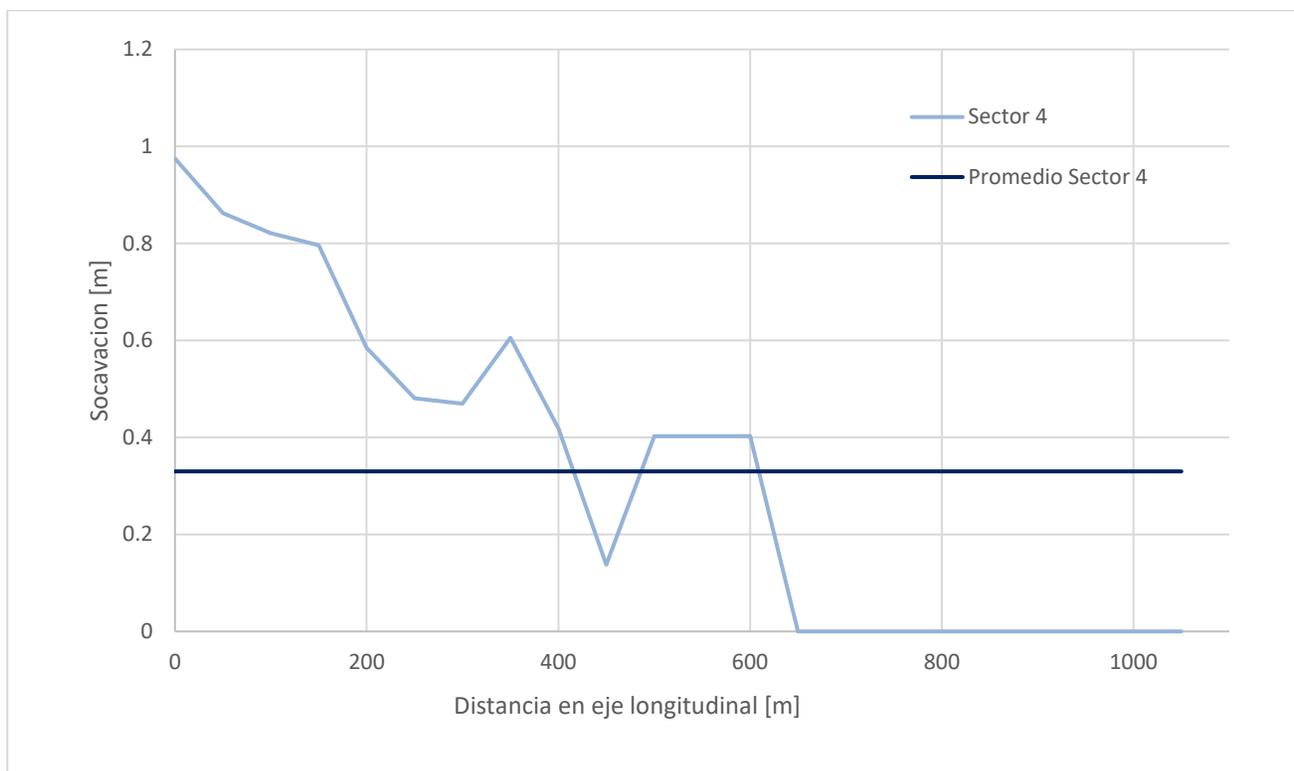


FIGURA 4-175: SOCAVACIÓN GENERAL EN RIO VILAMA

Fuente: Elaboración propia.

Dentro del área de estudio la socavación local solo será aplicable al Puente de acceso a San Pedro, en el Cuadro 4-113 se presenta la socavación local de la obra.

CUADRO 4-113: SOCAVACIÓN LOCAL PUENTE SAN PEDRO

Sector	Puente	Elemento	Km Inicio	Socavación Local (m)						
				T2	T5	T10	T25	T50	T100	T200
1	San Pedro	Pila	-11303.5	2.47	2.93	3.07	3.16	3.19	3.20	3.21

Fuente: Elaboración propia.

Al observar los resultados de la socavación local para el puente San Pedro podemos ver que se tienen valores superiores a los 3 metros para periodo de retorno superiores a 10 años. Si a esto le sumamos el valor de socavación general promedio del sector (76 centímetros), obtenemos valores del orden de la profundidad a la cual se funda la pila (4 metros) y por lo tanto, estaríamos por debajo de la cota de fundación comprometiendo la estabilidad del puente.

4.4.6. Transporte de Sedimentos y Depositación

4.4.6.1. Método de Cálculo para el Gasto de Sedimento

Gasto Sólido de Fondo

Dados los datos de terreno con que se cuenta, las características de la granulometría, la hidrología de la cuenca, entre otras variables, se ha estimado que las relaciones más apropiadas para determinar esta fracción del transporte de sedimentos corresponden a: Engelund y Fredsoe (1976), Meyer, Peter y Müller (1948) y Ackers y White (1973).

A continuación, se presentan las relaciones básicas de la hidráulica fluvial en cauces aluviales. El esfuerzo de corte (τ) depende del radio hidráulico (R_h) y la pendiente de energía del flujo, ambos valores ya calculados (el radio hidráulico es muy complejo de calcular para cauces naturales, razón que lleva al uso de métodos numéricos, como es el caso de HEC-RAS).

$$\tau = \rho g R_h S_f$$

Las relaciones más conocidas utilizan el esfuerzo de corte adimensional (τ^* ó τ_*) el cual depende de R , que corresponde a la densidad relativa entre los sólidos (ρ_s) y la del agua (ρ), que en este caso es 1,65 y además del diámetro característico (d o d_s).

$$\tau^* = \frac{\tau}{\rho g R d}$$

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$$

El caudal sólido volumétrico adimensional por unidad de ancho (q_s^*) y la velocidad friccional (u_*), ambos adimensionales se requieren también para la determinación del arrastre de fondo. Dentro de las variables consideradas en estas relaciones están también el caudal sólido volumétrico por unidad de ancho, la pendiente de fondo del lecho y el esfuerzo de corte de fondo.

$$q_s^* = \frac{i_b}{\sqrt{\rho^2 (R g d_s)^3}} = \frac{q_s}{\sqrt{g R d_s^3}}$$

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$$

Las siguientes dos relaciones, provienen del enfoque de Bagnold (1956), que ha sido bastante seguido pese a presentar algunas deficiencias: sobre estima la caída del esfuerzo de corte en la capa de fondo bajo ciertas condiciones, provee fallas al analizar el transporte en lechos con altas pendientes en la dirección transversal y no se puede generalizar a granulometría extendida. De todas

formas, en general estos enfoques sobre estiman el volumen de sedimentos arrastrados y han sido muy utilizados en la práctica, particularmente el modelo de Meyer, Peter y Müller (1948).

Este enfoque posee varias ventajas; la primera consiste en que estas relaciones, en general, sobre estiman el valor del gasto de fondo, lo cual da seguridad; en segundo lugar, dado que los esfuerzos de corte requeridos serán altos, dada la granulometría gruesa de las calicatas, enfoques como el de Einstein (1950) no generarán una mejora significativa y por último la evaluación de metodologías como Parker (2003) o Seminara (2002) que también mantienen la estructura de Bagnold, pero levantan hipótesis, requieren de una caracterización en terreno mucho más detallada, que en este caso sólo sería agregar incertidumbre.

En las metodologías que se presentan a continuación se han utilizado los esfuerzos de corte críticos adimensionales (τC^* ó condición de arrastre incipiente) corresponden a 0,05 y 0,048 respectivamente.

Engelund y Fredsoe (1976)

$$q_s^* = 18.74 (\tau_* - \tau_{*c}) (\tau_*^{1/2} - 0.7 \tau_{*c}^{1/2})$$

Meyer, Peter y Müller (1948)

$$q_s^* = 8 (\tau_* - \tau_{*c})^{3/2}$$

En la Figura 4-176 se ilustran los métodos derivados del enfoque de Bagnold, se ha escogido Engelund y Fredsoe (1976), pues corresponde a una envolvente (a partir de esfuerzos de corte pequeños). La relación de Meyer, Peter y Müller (1948) fue desarrollada para granulometrías gruesas, lo cual la hace bastante apropiada para este caso.

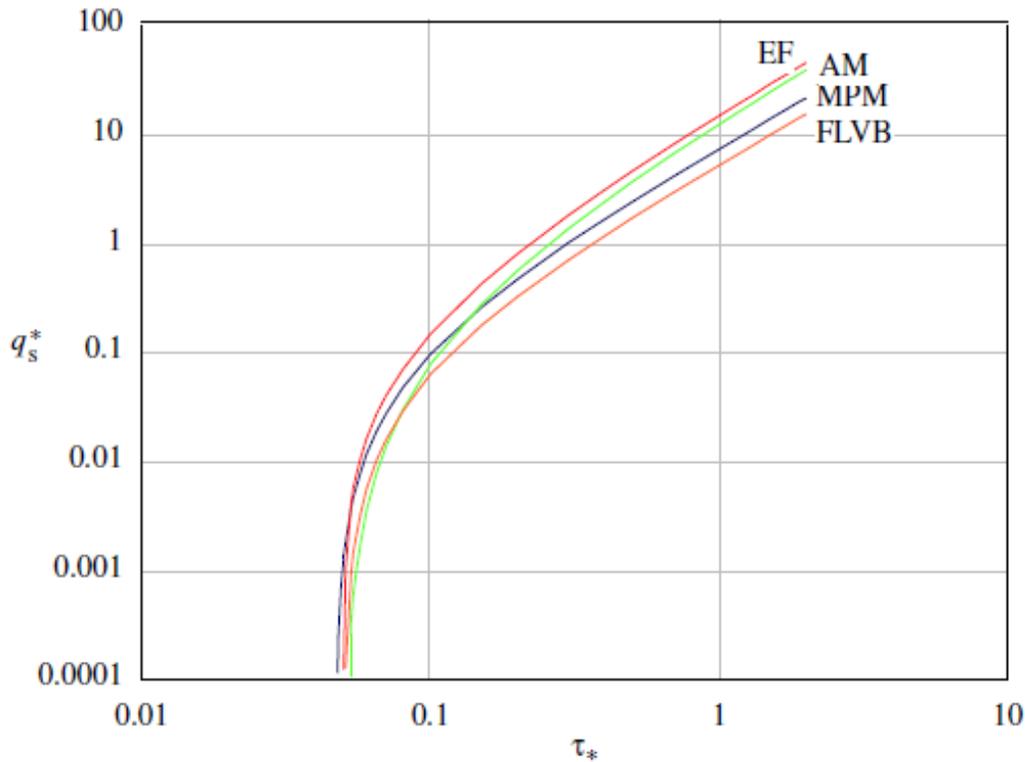


FIGURA 4-176: COMPARACIÓN MÉTODOS DERIVADOS DEL ENFOQUE DE BAGNOLD (1956)

Fuente: Niño Y., 2005. "Hidráulica fluvial y arrastre de sedimentos".

Como tercera opción se ha decidido aplicar además un enfoque que no depende de las dos escuelas mencionadas anteriormente: Ackers y White (1973). De todas maneras, cuando el tamaño del sedimento adimensionalizado D_{gr} tiende a ser muy grande, esta metodología en general podría subestimar los valores, aun así, se aplicó como punto de comparación con los otros dos enfoques, pues no es evidente su invalidez inmediata en este caso. Las relaciones son las siguientes:

$$G_{gr} = \frac{q_s u_*^n}{d_s U^{1+n}}$$

$$F_{gr} = \frac{u_*^n}{\sqrt{g R d_s}} \left(\frac{U}{\sqrt{32} \log_{10}(10 \frac{h}{d_s})} \right)^{1-n}$$

$$D_{gr} = d_s \left(\frac{g R}{\nu^2} \right)^{1/3}$$

$$G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m$$

Donde G_{gr} es la eficiencia del proceso de transporte, F_{gr} el factor de movilidad (que representa la razón entre el esfuerzo de corte efectivo sobre las partículas de sedimento y el peso

sumergido de ellas), U y h la velocidad media y altura del escurrimiento respectivamente, ν la viscosidad cinemática del fluido, g la aceleración de gravedad, D_{gr} el tamaño adimensionalizado del sedimento y C , A , m y n parámetros que dependen de D_{gr} . Cuando D_{gr} es mayor a 60 (que es el caso en este estudio), los valores de los parámetros son:

$$A = 0.17$$

$$C = 0.025$$

$$m = 1.5$$

$$n = 0$$

Se consideró el caudal máximo de cada crecida para calcular los volúmenes de sedimentos y el gasto sólido asociado. Como los resultados se presentan en $m^3/día$ y $Ton/día$, se asumió una distribución triangular del gasto sólido de fondo con respecto al tiempo como se muestra en la Figura 4-177.

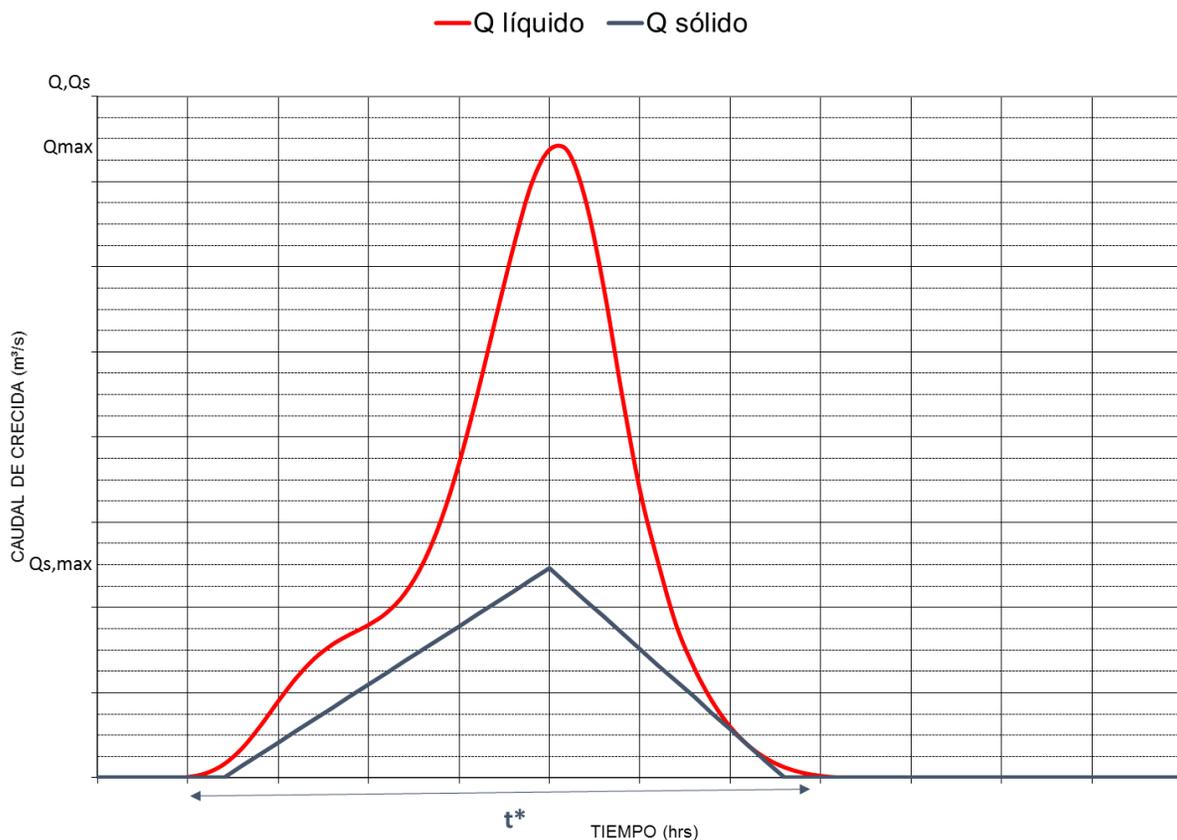


FIGURA 4-177: SIMPLIFICACIÓN GASTO SÓLIDO DE FONDO POR CRECIDA

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior, los caudales líquidos y sólidos se denotan como Q y Q_s respectivamente. Se asumió que el máximo del gasto sólido de fondo (Q_{s,max}) ocurre simultáneamente con el máximo caudal de la crecida (Q_{max}). Además, el tiempo de duración del escurrimiento (t*) puede ser menor al tiempo de duración de la tormenta de diseño (típicamente 24 horas), por lo que el volumen de sedimento transportado de esta manera durante la crecida se calculó como el área bajo el triángulo azul (Q_{s,max} x t*)/2. Los resultados en detalle se pueden revisar en el Anexo 4-4-2.

El procedimiento de cálculo de la planilla Excel del Anexo 4-4-2 se detalla a continuación. Para las metodologías de Meyer Peter y Muller y Engelund, en base a la granulometría de las calicatas (d_{s84}) que se presentan en el Cuadro 4-111 y los resultados de parámetros hidráulicos extraídos desde las simulaciones de HEC-RAS (R_h e i_b), se calculó primero el esfuerzo de corte adimensional (τ*), luego el gasto sólido adimensionalizado (q_s*) mediante la fórmula correspondiente a cada metodología, luego el gasto sólido por unidad de ancho (q_s) y finalmente, con el ancho del cauce por sección obtenido desde HEC-RAS, el gasto sólido de fondo total por sección transversal (Q_s).

Para la metodología de Ackers y White en cambio, se calculó primero el esfuerzo de corte (τ) mediante el radio hidráulico y la pendiente (R_h e i_b obtenidos desde HEC-RAS), D_{gr} se calculó en base a la granulometría por sección, F_{gr} se obtuvo con los datos de la granulometría y la altura y velocidad media extraída de los resultados de HEC-RAS, G_{gr} se obtuvo con los parámetros de la fórmula presentada anteriormente y F_{gr}, luego el gasto sólido por unidad de ancho (q_s) y finalmente, con el ancho del cauce por sección obtenido desde HEC-RAS, el gasto sólido de fondo total por sección transversal (Q_s).

Gasto sólido en suspensión

Dada la ausencia de mediciones de relaciones de gasto sólido en suspensión (Q_{ss}) v/s gasto líquido (Q) en el área de estudio, no se puede estimar esta fracción del transporte de sedimentos.

Para esto se considerarán formulas empíricas y tasas regionales para obtener un valor estimado del volumen de sedimento anual producido por una determinada cuenca. El detalle de los cálculos se presenta en el Anexo 4-4-2.

Expresión Propuesta por Bureau of Reclamation (USBR)

Esta fórmula se desarrolló en base a mediciones en varios embalses del suroeste de los Estados Unidos, en los estados de Arizona, Nuevo México y California. El tamaño de la cuenca es considerado como la variable más importante en la aportación de sedimentos. Se define como:

$$A_s = 1421,8 * A^{-0,229}$$

Donde

As: aporte de sedimentos en m³/km²/año

A: área de cuenca en km²

Esta metodología estima un volumen esperado anual, por lo que se debe estimar para la vida útil proyectada de la obra un volumen de sedimento total mediante la siguiente expresión:

$$V_s = (A_s) * A_c * N * 10^{-6}$$

Donde:

V_s= Volumen en (Mm³)

A_s= Aporte de sedimentos en (m³/km²/año)

A_c= Área Cuenca (km²)

N= Vida útil de la obra (años)

Método de Dendy y Bolton (1976)

Dendy y Bolton desarrollaron una ecuación obtenida de evaluar alrededor de 800 embalses en los Estados Unidos para estimar la producción de sedimentos en cuencas. Esta expresión tiene validez en cuencas que van desde 2,5 a 75.000 km² de superficie. La ecuación depende de la superficie de la cuenca aportante y del caudal medio anual. Dicha ecuación se aplicó en la estimación del volumen en el Estudio de la Quebrada de Camiña (DOH, 2007).

$$S = S_r * C_1 * \left(\frac{Q}{Q_r}\right)^{0,46} * \left(1,43 - 0,26 * \log\left(\frac{A}{A_r}\right)\right)$$

Donde:

S = producción específica de sedimento en t/km²/año

S_r= producción específica referencial de sedimento, considerada como 576 (t/km²/año)

A = superficie de la cuenca en km²

A_r = superficie de cuenca referencial, considerada como 2,59 km²

C₁ = coeficiente adimensional 0,375

Q = escorrentía anual en (mm/año)

Qr = escorrentía de referencia, considerado como 508 (mm/año)

Tasa Regional US

En diversas cuencas de Estados Unidos se determinó una tasa de producción anual de sedimento de 0,24 mm/km²/año (Tasa US) permiten obtener una estimación del aporte en una vida útil de 50 y 25 años.

4.4.6.2. Balance Sedimentológico

La determinación de los tramos con tendencias a la erosión o depositación, se realizó mediante el cálculo de las diferencias entre las tasas medias del gasto sólido de entrada y salida de cada sector, obtenidas en el Anexo 4-4-2 del presente informe. Si dicho valor resulta ser positivo indica que el tramo posee condiciones con tendencias a la depositación, es decir, lo que sale es menor a lo que entra. Por el contrario, si la diferencia es negativa indica que el tramo tiene tendencia a la erosión.

A continuación, entre la Figura 4-178 y Figura 4-180 se presenta la tendencia a la depositación o erosión por cada perfil HEC RAS para los sectores 1,2 y 3 del Río San Pedro, mientras que en la Figura 4-181 se presentan las tendencias para el Río Vilama.

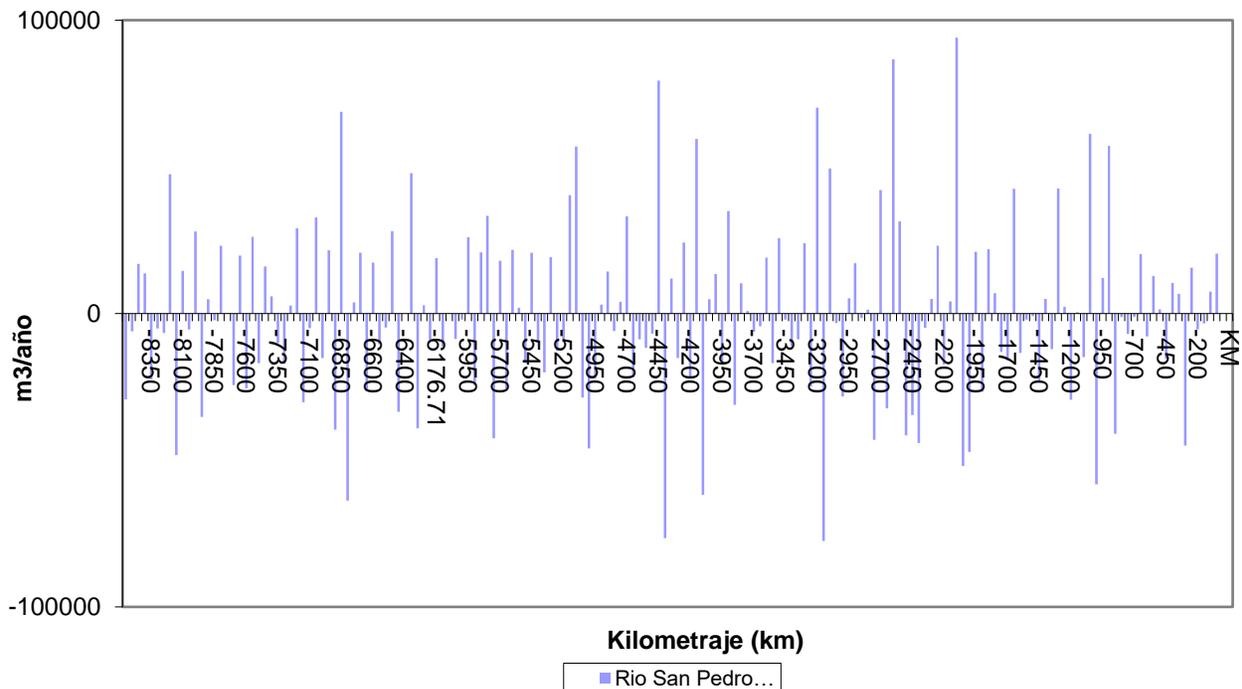


FIGURA 4-178: BALANCE SEDIMENTOLÓGICO POR PERFIL HEC RAS RIO SAN PEDRO SECTOR 1

Fuente: Elaboración propia.

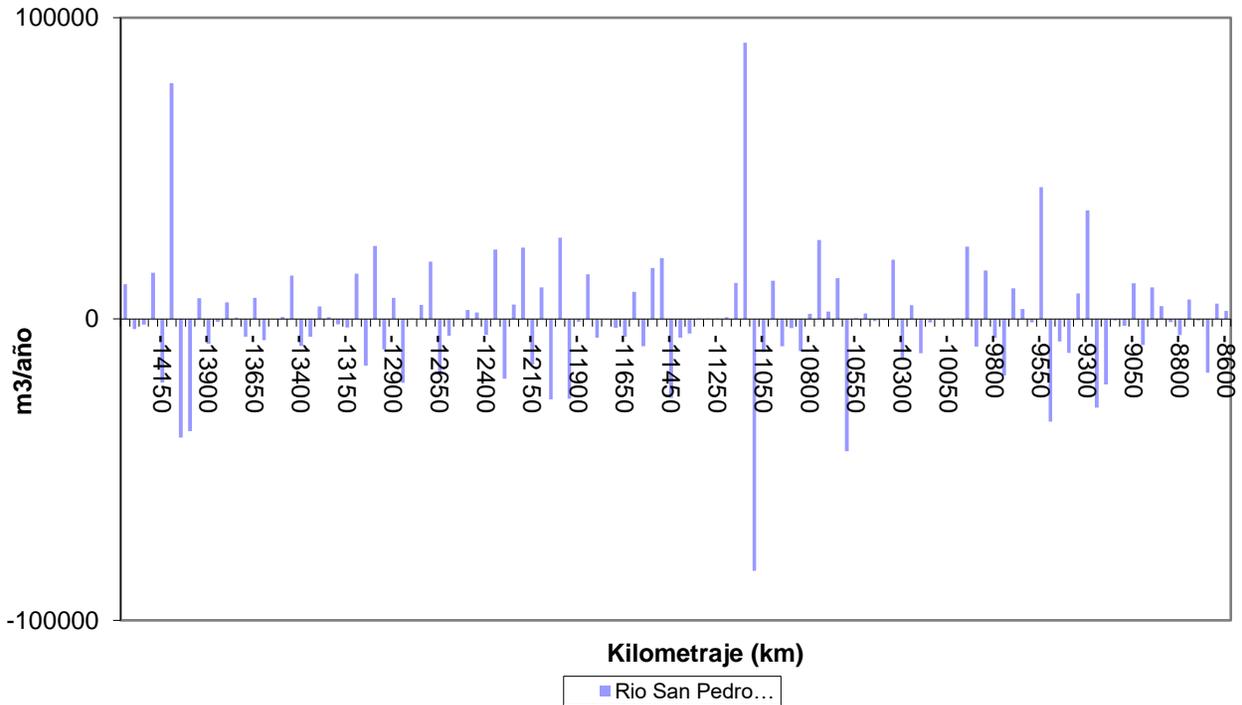


FIGURA 4-179: BALANCE SEDIMENTOLÓGICO POR PERFIL HEC RAS RIO SAN PEDRO SECTOR 2

Fuente: Elaboración propia.

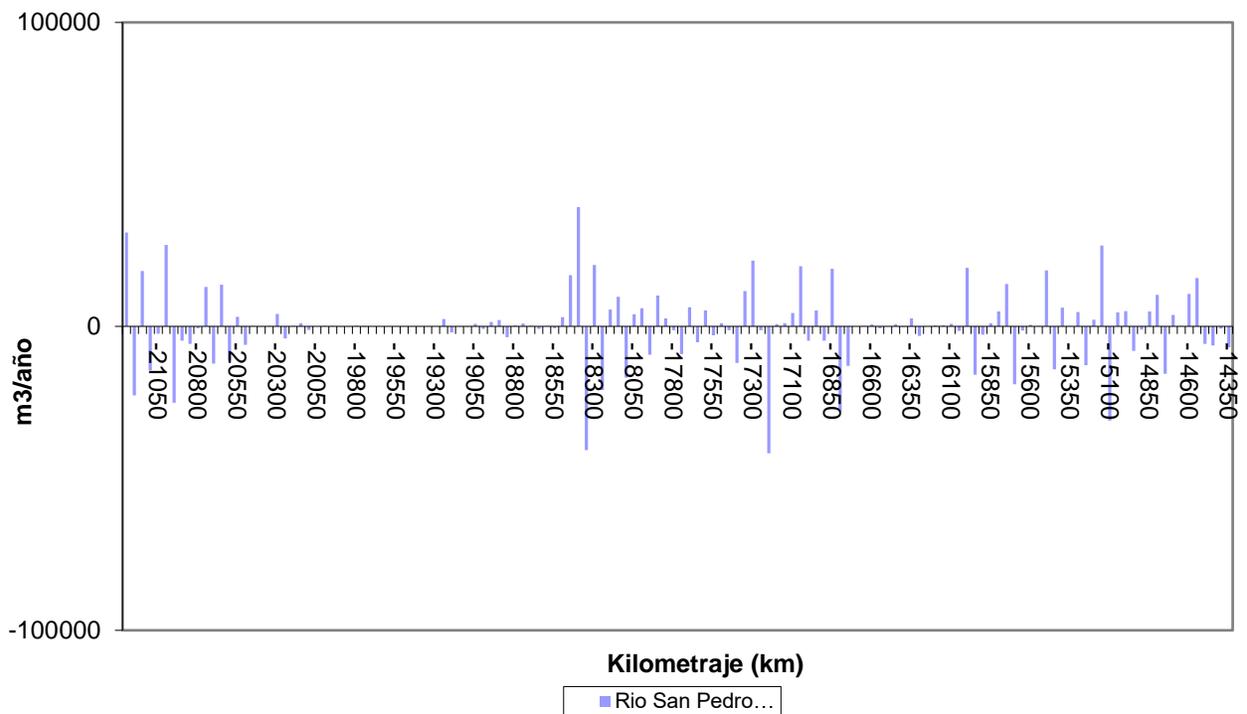


FIGURA 4-180: BALANCE SEDIMENTOLÓGICO POR PERFIL HEC RAS RIO SAN PEDRO SECTOR 3

Fuente: Elaboración propia.

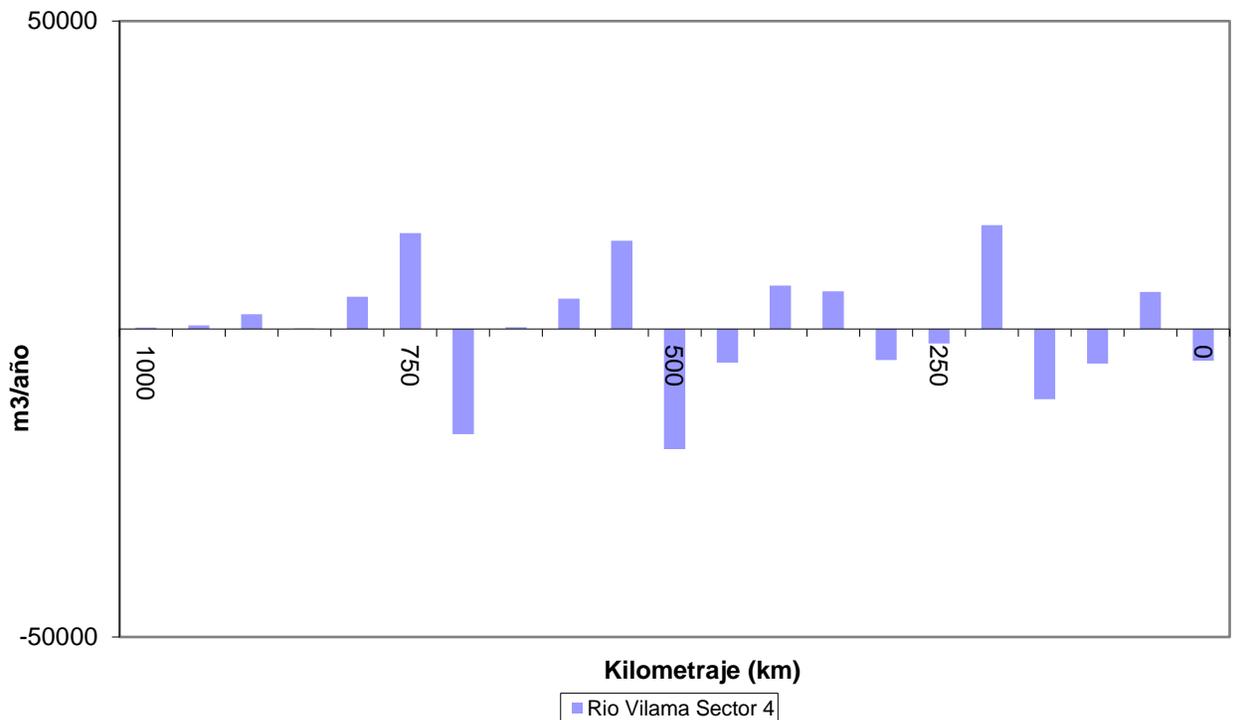


FIGURA 4-181: BALANCE SEDIMENTOLÓGICO POR PERFIL HEC RAS RIO VILAMA SECTOR 4

Fuente: Elaboración propia.

Cabe decir que se hicieron pequeñas correcciones a los resultados obtenidos en HECRAS. Intuitivamente, cuando el período de retorno aumenta el flujo en el río también aumenta, por lo que el cauce tiende a ocupar las riberas y por consiguiente aumenta el ancho del eje hidráulico. En los resultados de la modelación HECRAS para grandes períodos de retorno, se detectó una pequeña cantidad de posibles errores en el eje hidráulico, en donde los “*leeves*” (definidos para períodos de retorno de magnitud media) de ciertos perfiles transversales no le permitía al flujo poder escurrir por la ribera. Esto genera un aumento considerable en la pendiente de la línea de energía, lo que se traduce en un aumento abrupto del gasto sólido en ese perfil en particular.

Para corregir aquellos perfiles transversales, el valor de la pendiente de la línea de energía se reemplazó por el promedio de los valores de pendiente de línea de energía entre el perfil más próximo aguas arriba y el perfil más próximo aguas abajo. En el Cuadro 4-114 se muestran los perfiles que fueron corregidos. Los perfiles destacados en amarillo son perfiles que se ubican en la cercanía de un puente y que no fueron tomados en cuenta en el balance sedimentológico, porque su análisis ya se realizó en el estudio de socavaciones locales.

CUADRO 4-114: CORRECCIÓN PENDIENTE DE LÍNEA DE ENERGÍA EN PERFILES HECRAS

Perfiles corregidos	
SECTOR	Perfil HECRAS
S1	2300
	2550
	3050
S2	8950
	9000
	10500
	10550
	11350
	14050

Fuente: Elaboración propia.

4.4.6.3. Aporte de Sedimento Estimado de la Cuenca

Luego de aplicar la metodología de las fórmulas empíricas para el cálculo estimado de aporte de sedimento con respecto a una determinada cuenca, para cada uno de los sectores, se obtienen los resultados que se indican en el Cuadro 4-115. El cálculo detallado se encuentra en el Anexo 4-4-2. Desde la Figura 4-182 hasta la Figura 4-183 se muestra el volumen anual total de sedimento grueso para cada sector, el cual corresponde al 15% del volumen total estimado anual.

CUADRO 4-115: APORTE SEDIMENTOLÓGICO TOTAL ESTIMADO ANUAL

	SECTOR	MÉTODO			Promedio
		USBR	Dendy Bolton	Tasa Regional US	
APORTE CUENCA (m³/Anuales)	S1	388,154	157,318	346,704	297,392
	S2	390,182	156,413	349,056	298,551
	S3	391,464	155,617	350,544	299,208
	S4	140,873	61,272	93,120	98,422

Fuente: Elaboración propia.

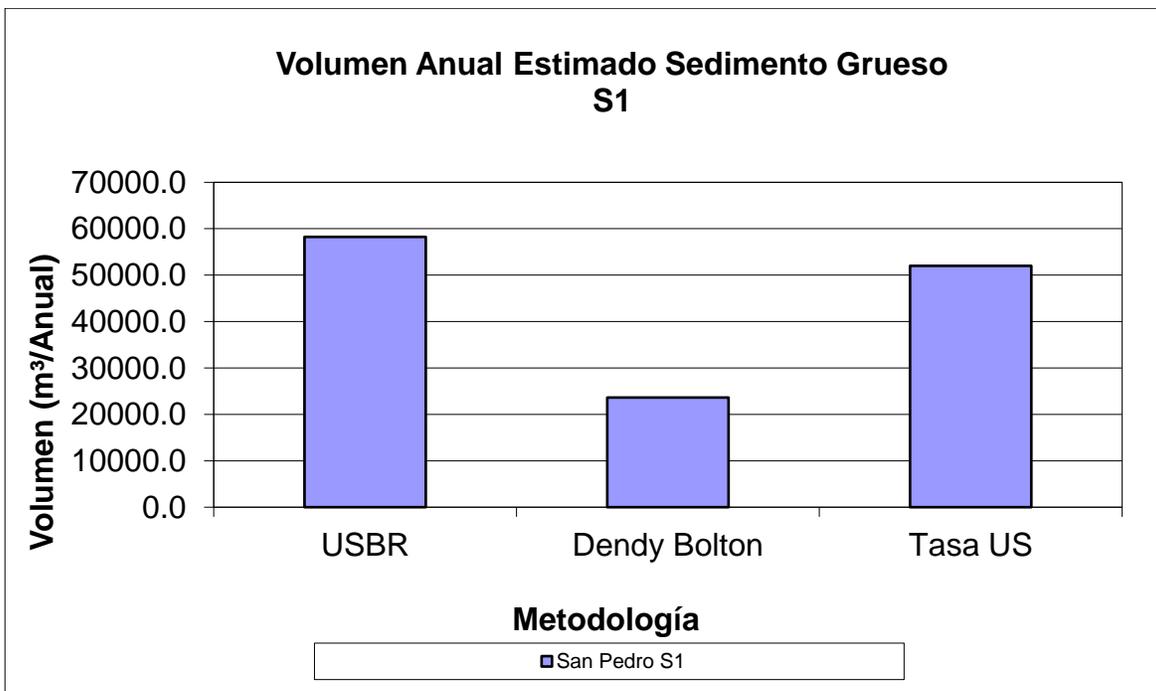


FIGURA 4-182: APOORTE SEDIMENTOLÓGICO DE FONDO SECTOR 1

Fuente: Elaboración propia.

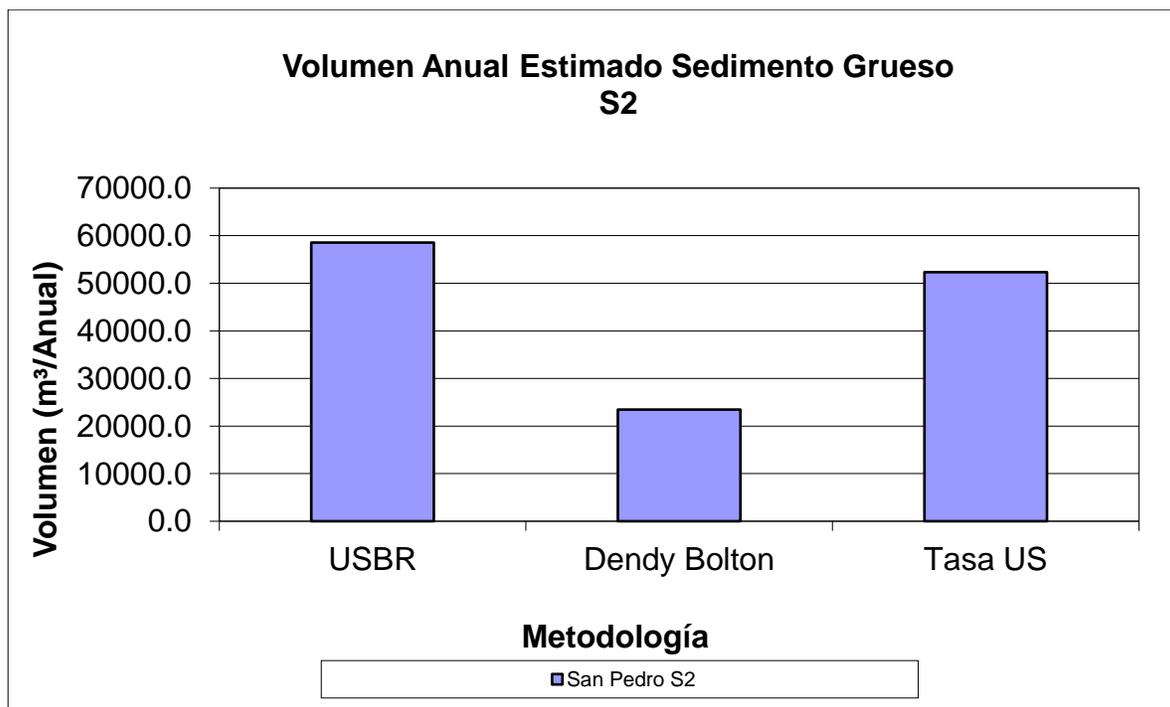


FIGURA 4-183: APOORTE SEDIMENTOLÓGICO DE FONDO SECTOR 2

Fuente: Elaboración propia.

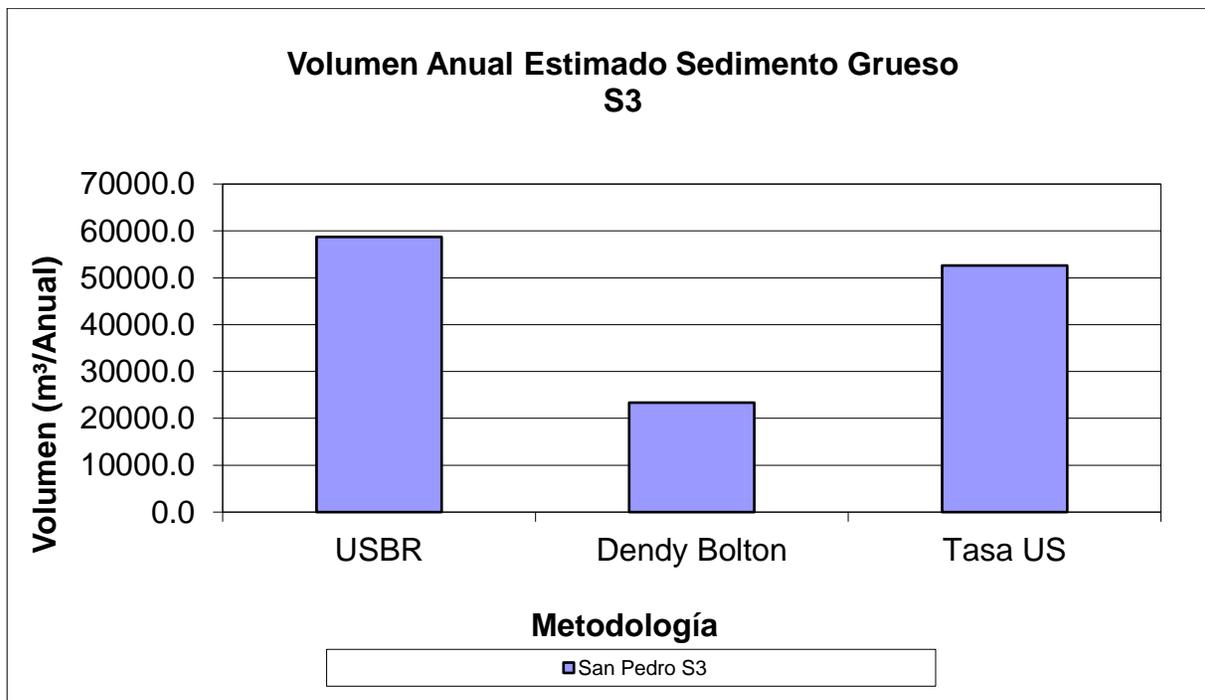


FIGURA 4-184: APOORTE SEDIMENTOLÓGICO DE FONDO SECTOR 3

Fuente: Elaboración propia.

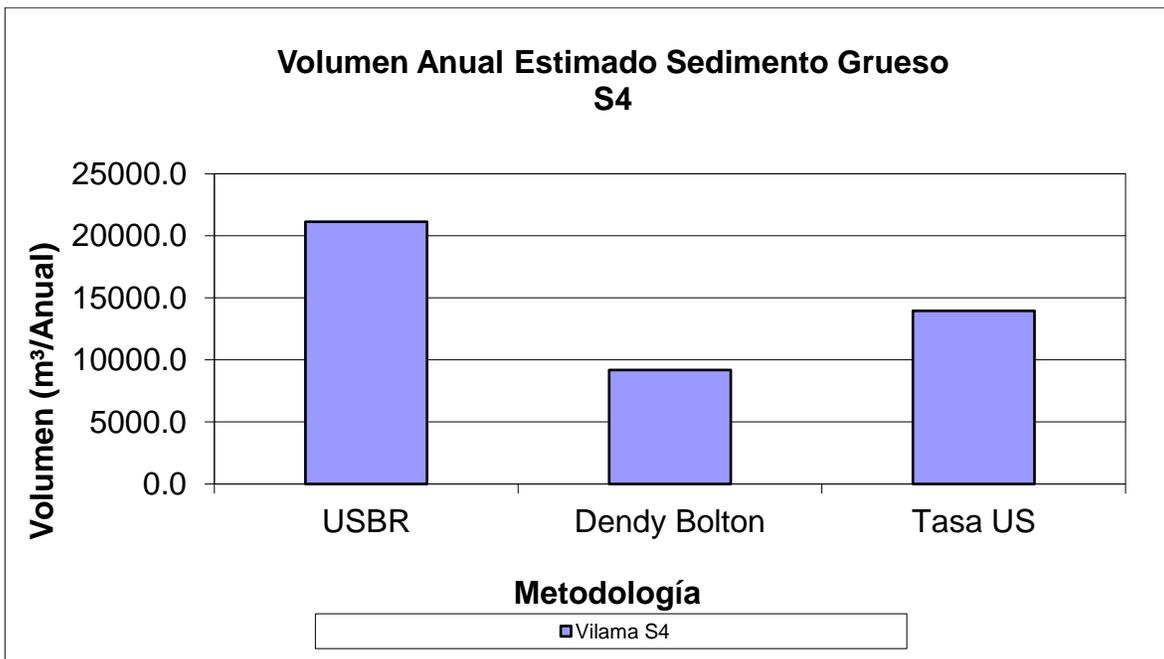


FIGURA 4-185: APOORTE SEDIMENTOLÓGICO DE FONDO SECTOR 4

Fuente: Elaboración propia.

4.4.7. Conclusiones

De los resultados de socavación general obtenidos se puede concluir que los sectores que presentaran mayor erosión corresponderán a aquellos donde el cauce se encuentre más intervenido como por ejemplo el sector intermedio del Rio San Pedro y la sección encauzada del rio Vilama, esto es de esperarse ya que al transportar la crecida en una sección transversal menor se generaran mayores esfuerzos de corte lo que implicara una mayor erosión, para disminuir estos efectos una sugerencia seria incrementar la sección transversal con el fin de disminuir la velocidad del flujo

El resultado anterior es importante en el diseño de las defensas fluviales, ya que por ejemplo si los gaviones que se han construido en el sector intermedio del Rio San Pedro no se encuentran propiamente fundados, una socavación del orden de un metro podría implicar su destrucción y la eventual obstaculización del rio.

Si los resultados de socavación general los complementamos con los valores locales obtenidos para obras de interés como el Puente de acceso a San Pedro, podemos concluir que esta estructura se encuentra amenazada para crecidas de periodos de retorno igual o superior a 10 años, esto sin considerar el efecto de las obras del tipo gavión que se están desarrollando en el sector las cuales al reducir la sección transversal implicarían valores de socavación aún mayores. Ante estos escenarios se sugiere considerar un mejoramiento del Puente.

La cuenca del rio San Pedro tiene una producción de sedimento considerable, la que se genera principalmente en su zona alta donde se concentra la mayor área aportante y quebradas con alta disponibilidad de arenas, esto se condice con la gran cantidad de material que se ha acumulado en la zona urbana durante las últimas crecidas.

A partir del balance sedimentológico se puede observar que en el sector alto del Rio San Pedro existe una zona candidata para la extracción de áridos entre los kilómetros 4,0 y 6,0 (referido al eje longitudinal del cauce), la que debe ser descartada por la presencia de bocatomas las cuales se pueden verse afectadas producto de las modificaciones de las cotas a causa de las extracciones en el rio.

En el sector intermedio del rio San Pedro existe una zona a la altura de Pucara de Quitor que desde el punto de vista numérico podría ser candidato a sectores de extracción de áridos, sin embargo, esta zona se descarta al verse localizada en un lugar urbano y que podría comprometer la integridad de las defensas fluviales.

En el sector bajo del rio San Pedro (Sector 3), existe una zona candidata a la altura del Ayllu de Coyo entre los kilómetros 17, y 18,5, la cual no presentaría ninguno de los inconvenientes previamente nombrados, en terreno se identificó que esta zona si presenta una zona de extracción, la cual no tiene permisos de extracción de áridos otorgados (según lo informado por la municipalidad). En la Figura 4-186 se presenta el sitio mencionado donde se observa que esta zona de extracción no presenta una antigüedad considerable al menos en la magnitud que posee actualmente.

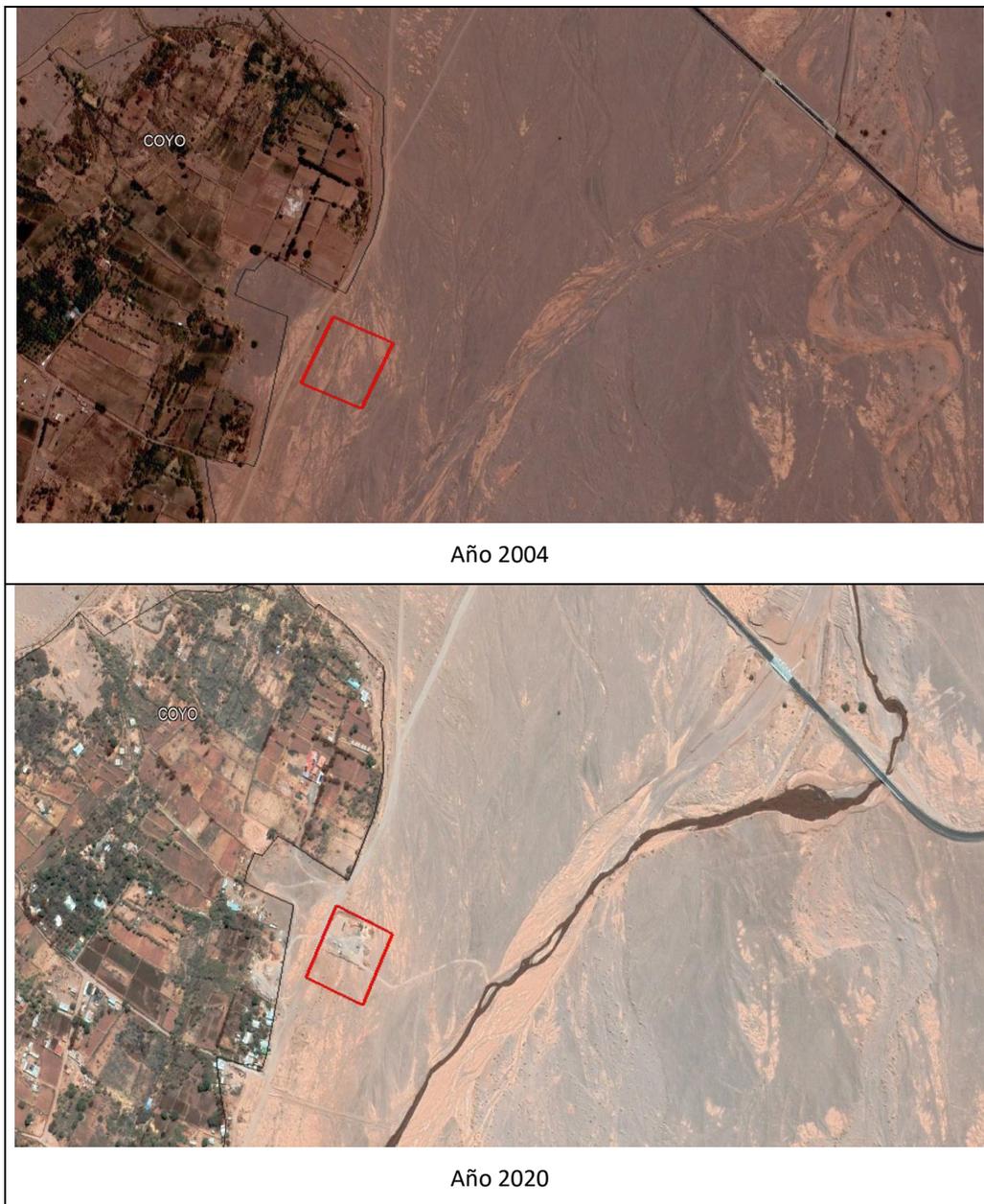


FIGURA 4-186: EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS EN COYO

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en el Rio Vilama no se observa dentro del balance sedimentológico un lugar con una tendencia a la depositación de sedimentos, tampoco se sugiere instalar zonas de extracciones de áridos dentro del área de estudio ya que existen defensas fluviales las cuales podrían verse comprometidas por los efectos erosivos de la extracción, además de encontrarse cercano a zonas de interés arqueológico.

CAPÍTULO 5 DIAGNÓSTICO

0	15-11-2021	Aprobado	WLN/DMM/WUP	DMP	SPA
A	11-11-2021	Emitido para Revisión Interna	WLN/DMM/WUP	DMP	SPA
REV	FECHA	REVISIÓN PARA	POR	CHECK	JDP
		CÓDIGO DOCUMENTO			
		ARR104-IF-C05 0			

5. DIAGNÓSTICO

5.1. Evaluación de la Vulnerabilidad

5.1.1. Generalidades

Se presenta la descripción de la problemática de los cauces que se analizan, respecto de la infraestructura instalada, actividades que se desarrollan y cualquier aspecto que resulte riesgoso.

5.1.2. Metodología

Sobre la base de los antecedentes y estudios básicos realizados, se formuló un diagnóstico integral de la vulnerabilidad de la infraestructura existente, afectada por las crecidas.

Para lo anterior, se utilizaron los criterios de discretización del riesgo de inundación o aluvión, que se señalan en el Cuadro 5-1 siguiente:

CUADRO 5-1: CRITERIOS PARA LA DISCRETIZACIÓN DEL RIESGO.

Criterio	Parámetro Hidráulico Por Inundación o Aluvión	
	H (m)	v*h (m ² /s)
Alto	>1	>1.5
Medio	0.5<h<l	0.5<v*h <1.5
Bajo	0.1<h<0.5	0.1<v*h <0.5

Fuente: Dirección de Obras Hidráulicas.

Respecto de la infraestructura relevante, se presenta una Tabla Resumen y un mapa de riesgo por sector, con una escala básica de colores de 3 niveles (alto-medio-bajo), que presente el riesgo asociado a la obra de infraestructura que se evalúa.

5.1.3. Resultados

5.1.3.1. Río San Pedro, Sector 1

Se presenta en el Cuadro 5-2 los resultados de los niveles de riesgo en la infraestructura catastrada y sitios arqueológicos identificados, mientras que en el Cuadro 5-3 la superficie de terrenos de cultivo por cada nivel de riesgo presente en el sector 1 para el periodo de retorno 100 años y en la Figura 5-1 se presenta en forma gráfica el mapa de riesgos para dicho sector, considerando tanto el criterio de riesgo por altura de inundación como el criterio de velocidad por altura de escurrimiento. En Anexo 5-1 se incluyen los archivos ráster con la discretización de riesgos utilizada.

Es importante destacar que a lo largo del sector 1, además de realizarse labores agrícolas, también se realizan actividades de carácter turístico, ya que en este sector se encuentran restos arqueológicos del antiguo asentamiento de Catarpe, vestigios del camino de inca, así como atractivos de la geomorfología del lugar, como es la quebrada del Diablo. En la Figura 5-1, se aprecia una amplia área de riesgo alto en el cauce para la crecida de 100 años, por lo que la actividad turística debe ser

restringida cuando existen pronósticos de eventos de crecida en el cauce, ya que el camino en este sector transcurre por el lecho del cauce.

CUADRO 5-2: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 1 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS.

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
SPd3	Canal Patilla	Descarga	0.1	Bajo	Bajo
CMC-01	Sitio CMC-01	Sitio Arqueológico	0.2	Alto	Medio
SPd4	Canal Patilla	Descarga	0.35	Alto	Alto
SPo2	Canal Patilla	Canal	0.5	Medio	Bajo
SPdf1-inicio	Defensa de Gaviones ribera derecha, sector Cuchabrachi	Defensa Fluvial	0.6	Alto	Alto
	Edificaciones en ribera derecha sector Cuchabrachi	vivienda	0.65	Bajo	Bajo
	Edificaciones en ribera izquierda sector Cuchabrachi	corrales	0.7	Medio	Medio
SPdf1-fin	Defensa de Gaviones ribera derecha, sector Cuchabrachi	Defensa Fluvial	0.7	Alto	Alto
SPa1	Atravesio de acceso a predio ribera derecha, sector Cuchabrachi	Atravesio	0.7	Alto	Alto
SPdf2-inicio	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Cuchabrachi	Defensa Fluvial	0.85	Alto	Alto
SPdf2-fin	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Cuchabrachi	Defensa Fluvial	0.95	Alto	Medio
SPdf3-inicio	Pretel de tierra en ribera izquierda, sector Cuchabrachi	Defensa Fluvial	1	Bajo	Bajo
SPdf3-fin	Pretel de tierra en ribera izquierda, sector Cuchabrachi	Defensa Fluvial	1.1	Alto	Alto
SPb3	Canal Naranjo	Bocatoma	1.4	Alto	Alto
SPdf4-inicio	Defensa de enrocado ribera derecha, canal Naranjo	Defensa Fluvial	1.5	Alto	Alto
SPdf4-fin	Defensa de enrocado ribera derecha, canal Naranjo	Defensa Fluvial	1.55	Alto	Alto
SPd6	Canal Cuchabrachi	Descarga	1.55	Alto	Alto
SPo3	Canal Naranjo en ribera derecha. Tramo con erosión en radier	Canal	1.65	Alto	Alto
SPdf5-inicio	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Catarpe	Defensa Fluvial	1.7	Alto	Alto

CUADRO 5-2: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 1 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS.

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
SPdf5-fin	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Catarpe	Defensa Fluvial	1.8	Alto	Alto
SPdf6-inicio	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Catarpe	Defensa Fluvial	2.05	Alto	Alto
	Edificaciones en ribera izquierda sector Catarpe	Viviendas e infraestructura comunitaria	2.1	Medio	Bajo
SPdf6-fin	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Catarpe	Defensa Fluvial	2.2	Bajo	Bajo
SPdf7-inicio	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Catarpe	Defensa Fluvial	2.2	Bajo	Bajo
SPd7	Canal Tambillo	Descarga	2.25	Medio	Medio
SPdf7-fin	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector Catarpe	Defensa Fluvial	2.4	Bajo	Bajo
SPb4	Canal Tambillo	Bocatoma	2.4	Alto	Alto
SPdf8-inicio	Pretil de tierra en ribera derecha, canal Tambillo	Defensa Fluvial	2.6	Bajo	Bajo
SPdf8-fin	Pretil de tierra en ribera derecha, canal Tambillo	Defensa Fluvial	2.75	Alto	Medio
	Edificación en ribera derecha ubicada aguas abajo sector Tambillo	vivienda	3.9	Bajo	Bajo
SPa2	Atraveso camino acceso a predios ribera derecha	Atraveso	4.55	Alto	Alto
SPa3	Atraveso camino principal Catarpe con tuberías HDPE	Atraveso	5.05	Alto	Alto
SPb5	Canal Huachar	Bocatoma	5.8	Alto	Alto
SPa4	Atraveso camino principal Catarpe	Atraveso	5.9	Alto	Alto
SPd8	Canal Huachar	Descarga	6.15	Bajo	Bajo
	Edificaciones en ribera izquierda, sector cercano a tranque Huachar	Viviendas	6.3	Bajo	Bajo
SPb5	Canal Bellavista	Bocatoma	6.5	Medio	Medio
SPd9	Canal Bellavista	Descarga	6.5	Alto	Alto
SPd10	Canal Bellavista	Descarga	6.55	Alto	Alto
SPd11	Canal Bellavista	Descarga	6.6	Alto	Alto
SPd13	Canal San Pedro	Descarga	7.6	Alto	Alto

CUADRO 5-2: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 1 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS.

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
SPdf9-inicio	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector barrera acceso Catarpe	Defensa Fluvial	7.7	Alto	Alto
SPdf9-fin	Defensa de Gaviones ribera izquierda, sector barrera acceso Catarpe	Defensa Fluvial	7.8	Alto	Alto
SPdf10-inicio	Pretil de tierra en ribera izquierda, sector Pucará de Quitar	Defensa Fluvial	7.95	Alto	Alto
SPd14	Canal San Pedro	Descarga	8.05	Alto	Alto

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5-3: NIVELES DE RIESGO EN TERRENOS DE CULTIVO SECTOR 1 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS

Criterio	Superficie (ha)		
	Bajo	Medio	Alto
Criterio Altura escurrimiento	13.2	15.0	7.9
Criterio v*h	19.5	11.4	4.9

Fuente: Elaboración propia.

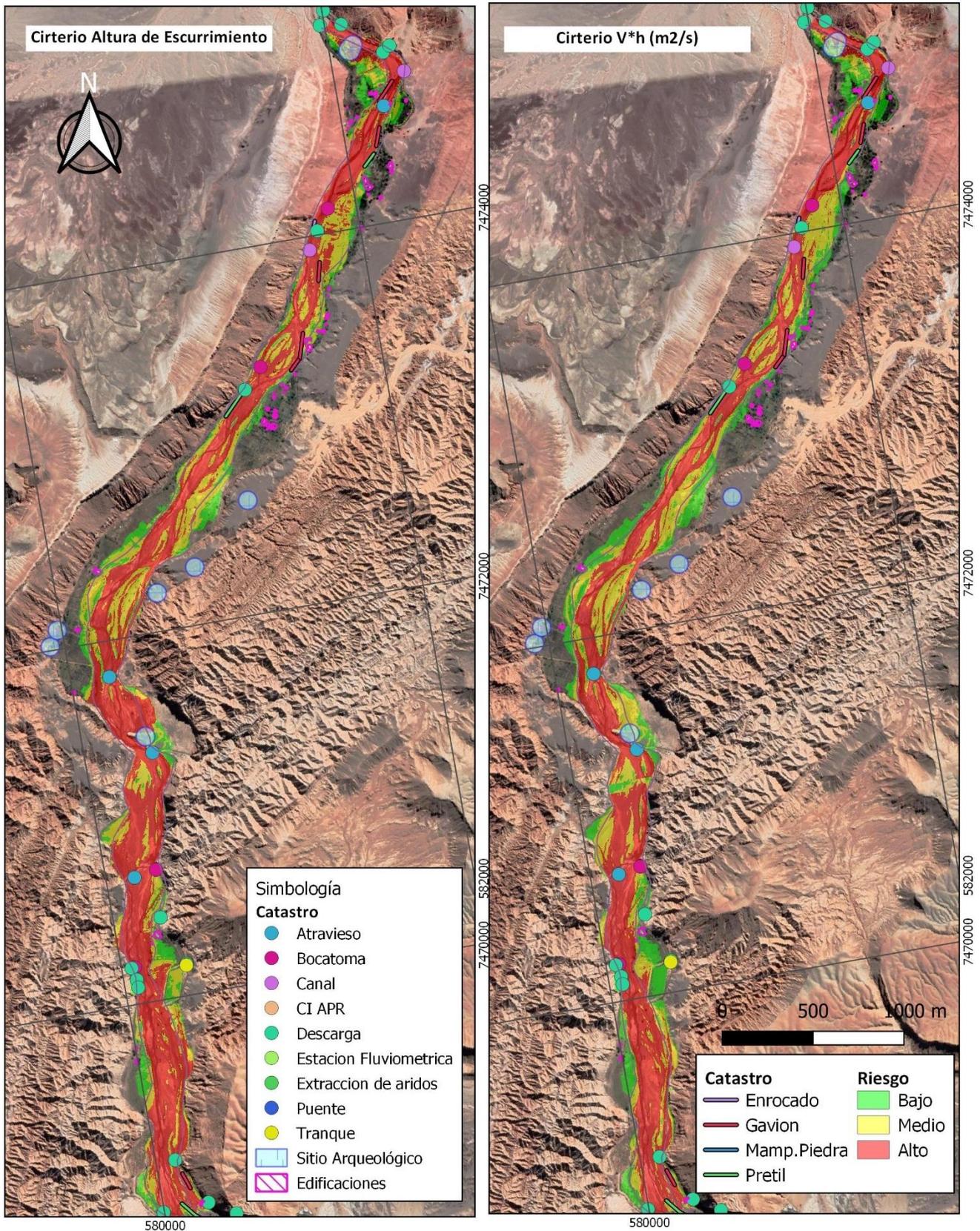


FIGURA 5-1: MAPA DE RIESGO SECTOR 1 RÍO SAN PEDRO PARA T=100 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

5.1.3.2. Río San Pedro, Sector 2

Se presenta en el Cuadro 5-4 los resultados de los niveles de riesgo en la infraestructura catastrada y en sitios arqueológicos identificados, mientras que en el Cuadro 5-5 y Cuadro 5-6 la superficie de terrenos de cultivo y de edificaciones (viviendas, hoteles y otros) por cada nivel de riesgo presente en el sector 2 para el periodo de retorno 100 años y en la Figura 5-2 se presenta en forma gráfica el mapa de riesgos para dicho sector, considerando tanto el criterio de riesgo por altura de inundación como el criterio de velocidad por altura de escurrimiento. En Anexo 5-1 se incluyen los archivos ráster con la discretización de riesgos utilizada.

Cabe mencionar que, para el periodo de retorno 100 años se produce el desborde del cauce en el sector 2 formándose brazos secundarios que escurren por alguna de las calles principales de San Pedro. El primer brazo que se activa es en la calle Domingo Atienza hacia el sur pasando por los Ayllus de Conde Duque y Larache, el nivel de riesgo que se observa es principalmente bajo con zonas puntuales de riesgo alto. Hacia el sur del sector del hotel Explora, se produce otro desborde y activación de otro brazo del cauce que escurre por la calle Callejón Reales y se une al brazo que escurre por Domingo Atienza, desde este punto el escurrimiento de ambos desbordes continúa hacia el sur por calle sin nombre hasta intersección con Avda. Selti para continuar hacia aguas abajo por Camino a Beter. Un tercer brazo se incorpora producto del desborde del cauce en el sector de badén de acceso a Sequitor. En todo el tramo de escurrimiento por las calles antes mencionadas, el nivel de riesgo es mayoritariamente bajo, observándose riesgo alto en sector de rotonda Sequitor.

Es importante señalar que debido a que la topografía que representa al sector de ayllus de Conde Duque, Larache y Sequitor es de un nivel de precisión menor (escala 1:5000) a la ejecutada en el presente estudio (escala 1:1000), las áreas inundadas y niveles de riesgo en dichos sectores podrían estar sobreestimadas.

CUADRO 5-4: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
SPdf12-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	8.5	Medio	Bajo
SPdf12-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	8.6	Alto	Alto
SPdf14-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	8.6	Alto	Alto
SPdf13-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	8.6	Alto	Alto
SPo5	Estación fluviométrica sector Pucará	Estación Fluviométrica	8.65	Sin riesgo	Sin riesgo
SPdf15-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	8.8	Alto	Alto
SPdf13-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	8.8	Alto	Alto
SPdf16-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	8.8	Alto	Alto
SPd18	Obra de descarga	Descarga	8.85	Alto	Alto
SPdf16-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	8.95	Alto	Alto
SPdf14-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	8.95	Alto	Alto

CUADRO 5-4: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
SPdf17-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	8.95	Alto	Alto
SPdf20-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	8.95	Alto	Alto
SPa6	Obra de atraveso de cauce	Atraveso	8.95	Alto	Alto
SPdf17-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	9	Alto	Alto
SPdf20-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	9	Alto	Alto
SPdf21-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	9	Alto	Alto
SPdf18-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	9	Alto	Alto
SPdf18-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	9.15	Alto	Alto
SPdf19-inicio	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	9.15	Alto	Alto
SPdf21-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	9.25	Alto	Alto
SPdf22-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	9.25	Alto	Alto
SPd19	Obra de descarga	Descarga	9.25	Alto	Alto
SPdf22-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	9.7	Alto	Alto
SPdf23-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	9.7	Alto	Alto
SPdf24-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	10.2	Alto	Alto
SPdf23-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	10.2	Alto	Alto
SPa7	Obra de atraveso de cauce	Atraveso	10.3	Alto	Alto
SPdf19-fin	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	10.45	Alto	Alto
SPdf25-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	10.45	Alto	Alto
SPd20	Obra de descarga	Descarga	10.45	Alto	Alto
SPdf27-inicio	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	10.65	Alto	Alto
SPdf25-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	10.65	Alto	Alto
SPdf26-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	10.7	Alto	Alto
SPdf28-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	10.7	Alto	Alto
SPdf24-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	10.7	Alto	Alto
SPdf27-fin	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	10.8	Alto	Alto
SPdf29-inicio	Pretil Tierra en ribera Derecha	Defensa Fluvial	10.9	Alto	Alto
SPd21	Obra de descarga	Descarga	10.9	Alto	Alto
SPdf26-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	10.9	Alto	Alto
SPdf28-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	10.95	Alto	Alto
SPdf30-inicio	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11	Alto	Alto

CUADRO 5-4: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
SPdf31-inicio	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.15	Alto	Alto
	Sitio área E3	Sitio Arqueológico	11.15	Alto	Alto
SPdf32-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.2	Sin riesgo	Sin riesgo
SPdf31-fin	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.2	Medio	Bajo
SPdf30-fin	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.25	Alto	Alto
SPdf29-fin	Pretil Tierra en ribera Derecha	Defensa Fluvial	11.25	Alto	Alto
SPdf33-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.25	Alto	Alto
SPdf32-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.25	Alto	Alto
SPdf33-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.25	Alto	Alto
SPdf34-inicio	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	11.3	Alto	Alto
SPdf35-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.3	Alto	Alto
SPp1	Puente ruta 23 Calama - San Pedro	Puente	11.3	Alto	Alto
SPdf34-fin	Gavión en ribera Derecha	Defensa Fluvial	11.45	Alto	Alto
SPdf35-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.5	Alto	Alto
SPdf36-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.55	Alto	Medio
SPdf37-inicio	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.65	Alto	Alto
SPdf36-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.65	Alto	Alto
SPdf37-fin	Pretil Tierra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.9	Alto	Alto
SPdf38-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	11.95	Alto	Alto
SPa8	Obra de atraveso de cauce	Atraveso	11.95	Alto	Alto
SPdf38-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	12.05	Alto	Alto
	Sitio Yaye 3	Sitio Arqueológico	12.75	Medio	Medio
	Sitios Yaye 2 y 4	Sitio Arqueológico	13.1	Alto	Alto
SPdf39-inicio	Mampostería Piedra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	13.25	Alto	Alto
SPdf39-fin	Mampostería Piedra en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	13.3	Alto	Alto
SPa9	Obra de descarga	Atraveso	14.3	Alto	Alto

Fuente: elaboración propia

CUADRO 5-5: NIVELES DE RIESGO EN TERRENOS DE CULTIVO SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS.

Criterio	Superficie (ha)		
	Bajo	Medio	Alto
Criterio Altura escurrimiento	34.6	35.6	44.8
Criterio v*h	33.0	24.3	26.4

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5-6: NIVELES DE RIESGO EN EDIFICACIONES DE VIVIENDAS Y EQUIPAMIENTO EN SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS.

Criterio	Superficie (m ²)		
	Bajo	Medio	Alto
Criterio Altura escurrimiento	13352	15924	36124
Criterio v*h	13184	8996	36048

Fuente: Elaboración propia.

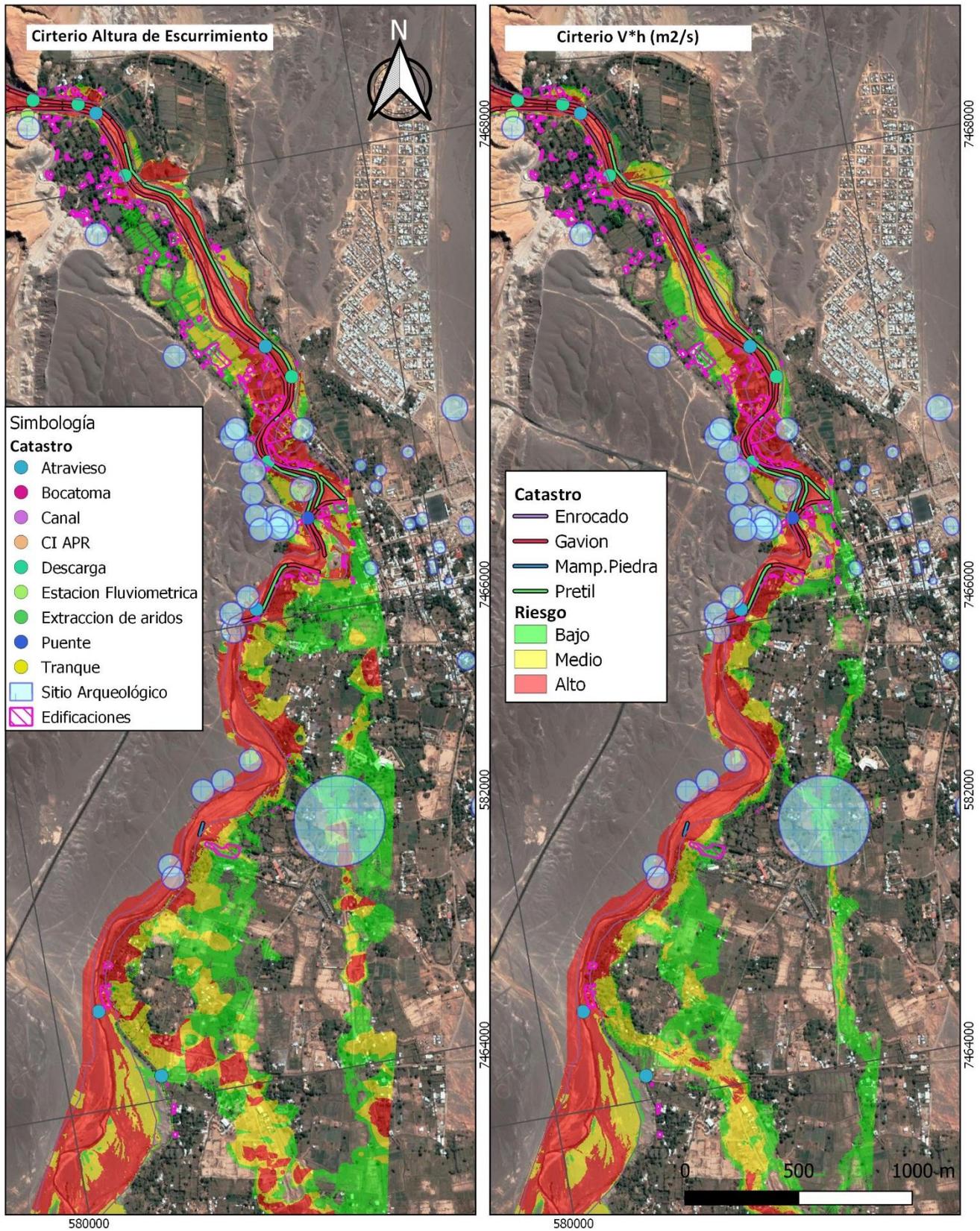


FIGURA 5-2: MAPA DE RIESGO SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO PARA T=100 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

5.1.3.3. Río San Pedro, Sector 3

Se presenta en el Cuadro 5-7 los resultados de los niveles de riesgo en la infraestructura catastrada y en sitios arqueológicos identificados, mientras que en el Cuadro 5-8 y Cuadro 5-9 la superficie de terrenos de cultivo y de edificaciones (viviendas, hoteles y otros) por cada nivel de riesgo presente en el sector 2 para el periodo de retorno 100 años y en la Figura 5-3 se presenta en forma gráfica el mapa de riesgos para dicho sector, considerando tanto el criterio de riesgo por altura de inundación como el criterio de velocidad por altura de escurrimiento. En Anexo 5-1 se incluyen los archivos ráster con la discretización de riesgos utilizada.

CUADRO 5-7: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 3 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
SPa12	Postación eléctrica	Atravieso	16.2	Alto	Medio
SPa11	Cámara canal de riego	Atravieso	16.2	Alto	Bajo
SPa11	Cámara canal de riego	Atravieso	16.3	Medio	Medio
SPdf41-inicio	Pretil en ribera Derecha	Defensa Fluvial	16.95	Alto	Alto
SPdf42-inicio	Pretil en ribera Derecha	Defensa Fluvial	17	Alto	Alto
SPdf43-inicio	Pretil en ribera Derecha	Defensa Fluvial	17.1	Alto	Alto
SPdf40-inicio	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	17.15	Alto	Alto
SPdf40-fin	Gavión en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	17.15	Bajo	Bajo
SPa14	Obra de arte ribera izquierda cruce circunvalación	Atravieso	17.25	Alto	Alto
SPa15	Obra de arte central, cruce circunvalación	Atravieso	17.25	Alto	Alto
SPa17	Obra de arte ribera derecha cruce circunvalación	Atravieso	17.25	Alto	Alto
SPdf45-inicio	Enrocado en ribera Derecha	Defensa Fluvial	17.25	Alto	Alto
SPdf43-fin	Pretil en ribera Derecha	Defensa Fluvial	17.25	Alto	Alto
SPdf45-fin	Enrocado en ribera Derecha	Defensa Fluvial	17.25	Alto	Alto
SPdf44-fin	Enrocado en ribera Izquierda	Defensa Fluvial	17.25	Medio	Medio
SPa13	Paso bajo nivel sector Séquitor Bajo	Atravieso	17.25	Alto	Alto
SPdf42-fin	Pretil en ribera Derecha	Defensa Fluvial	17.25	Bajo	Bajo
	Varias viviendas Ayllu de Coyo	Edificaciones	17.65 al 18.65	Bajo	Bajo
1 Coyo Oriente	Sitio arqueológico sector Coyo	Sitio arqueológico	18	Bajo	Sin riesgo

CUADRO 5-7: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 3 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
Extracción de áridos	Sector de acopio de material extracción de áridos	Extracción de áridos	18.1	Medio	Bajo
SPa16	Cámara sifón canal Vilama	Atravieso	19	Bajo	Bajo
SPa16	Cámara sifón canal Vilama	Atravieso	19.2	Bajo	Bajo
SPa16	Cámara sifón canal Vilama	Atravieso	19.3	Medio	Bajo
SPa16	Cámara sifón canal Vilama	Atravieso	19.4	Medio	Medio
SPa16	Cámara sifón canal Vilama	Atravieso	19.45	Medio	Medio
SPa16	Cámara sifón canal Vilama	Atravieso	19.5	Medio	Medio
SPa16	Cámara canal de riego	Atravieso	19.55	Alto	Medio
SPa16	Cámara sifón canal Vilama	Atravieso	19.65	Alto	Alto
SPdf46-inicio	Pretil en ribera Derecha	Defensa Fluvial	20.45	Alto	Alto
SPdf46-fin	Pretil en ribera Derecha	Defensa Fluvial	20.7	Alto	Alto
	Vivienda Ayllu de Tolor	Edificaciones	20.8	Alto	Alto

Fuente: Elaboración propia

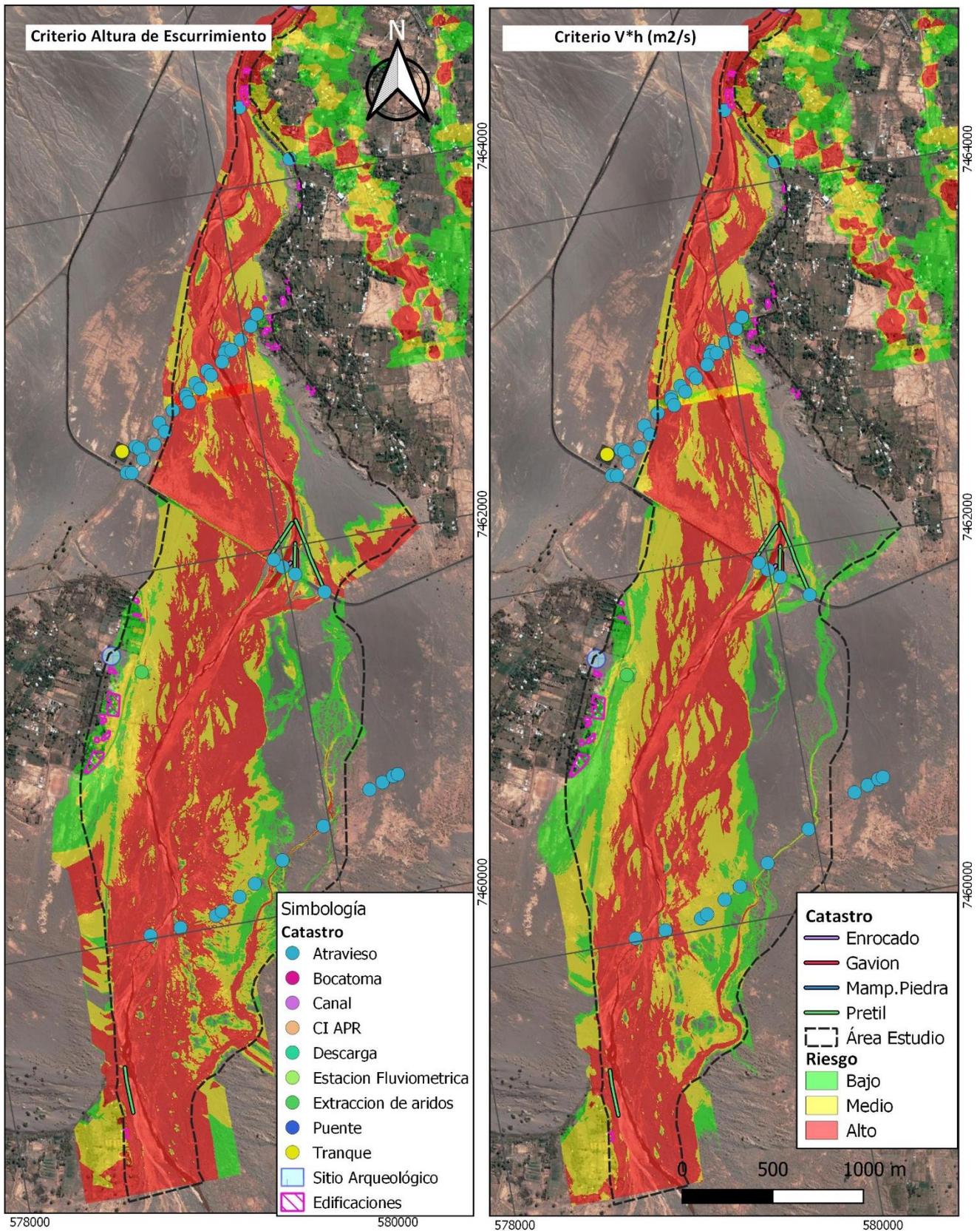


FIGURA 5-3: MAPA DE RIESGO SECTOR 3 RÍO SAN PEDRO PARA T=100 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

CUADRO 5-8: NIVELES DE RIESGO EN TERRENOS DE CULTIVO SECTOR 3 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS.

Criterio	Superficie (ha)		
	Bajo	Medio	Alto
Criterio Altura escurrimiento	6.0	10.4	6.1
Criterio v*h	4.5	12.1	2.5

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 5-9: NIVELES DE RIESGO EN EDIFICACIONES DE VIVIENDAS Y EQUIPAMIENTO EN SECTOR 3 RÍO SAN PEDRO. T=100 AÑOS.

Criterio	Superficie (m ²)		
	Bajo	Medio	Alto
Criterio Altura escurrimiento	12480	4236	856
Criterio v*h	12380	648	504

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.4. Río Vilama, Sector 4

Se presenta en el Cuadro 5-10 los resultados de los niveles de riesgo en la infraestructura, viviendas y sitios arqueológicos presente en el sector 4 para el periodo de retorno 100 años y en la Figura 5-4 se presenta en forma gráfica el mapa de riesgos para dicho sector, considerando tanto el criterio de riesgo por altura de inundación como el criterio de velocidad por altura de escurrimiento.

Cabe mencionar que si bien es cierto no se dispone de información oficial de la delimitación de las propiedades en este sector, no se aprecia que los terrenos de cultivo actuales se encuentren bajo riesgo en ninguno de los 2 criterios analizados.

CUADRO 5-10: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 4 RÍO VILAMA. T=100 AÑOS.

Código	Nombre	Tipo	Ubicación KM	Criterio Riesgo por Altura Inundación	Criterio Riesgo por relación v*h
Vldf2-inicio	Pretel de tierra en ribera derecha	Defensa Fluvial	0.1	Medio	Medio
	Sitio 5b	Sitio Arqueológico	0.18	Bajo	Bajo
Vldf1-inicio	Pretel de tierra en ribera izquierda	Defensa Fluvial	0.2	Alto	Alto
Vld1	Canal Vilama	Descarga	0.25	Sin Riesgo	
	Sitio 5a	Sitio Arqueológico	0.35	Bajo	Medio
Vlo1	Tubería de Agua Potable	CI APR	0.4	Sin Riesgo	
Vldf2-final	Pretel de tierra en ribera derecha	Defensa Fluvial	0.45	Alto	Alto
Vlo1	Tubería de Agua Potable	CI APR	0.45	Bajo	Bajo

CUADRO 5-10: NIVELES DE RIESGO INFRAESTRUCTURA SECTOR 4 RÍO VILAMA. T=100 AÑOS.

Vldf3-inicio	Enrocado en ribera derecha	Defensa Fluvial	0.45	Alto	Alto
Vlo1	Tubería de Agua Potable	CI APR	0.65	Sin Riesgo	
Vldf4-inicio	Pretel de tierra en ribera derecha	Defensa Fluvial	0.65	Sin Riesgo	
Vldf3-final	Enrocado en ribera derecha	Defensa Fluvial	0.65	Bajo	Bajo
Vla2	Camino de cruce hacia APR	Atraveso	0.85	Alto	Alto
Vldf4-final	Pretel de tierra en ribera derecha	Defensa Fluvial	0.9	Medio	Medio
Vldf1-final	Pretel de tierra en ribera izquierda	Defensa Fluvial	0.9	Bajo	Bajo
Vlo1	Tubería de Agua Potable	CI APR	0.95	Sin Riesgo	
	Edificaciones	Planta Agua Potable Rural	1	Sin Riesgo	
Vla1	Postación eléctrica	Atraveso	1.05	Sin información*	
Vla1	Postación eléctrica	Atraveso	1.05	Sin información*	
	Edificaciones	Viviendas	0.4 al 1.0	Sin Riesgo	

Fuente: Elaboración propia.

(*) No se dispone de topografía para ese sector

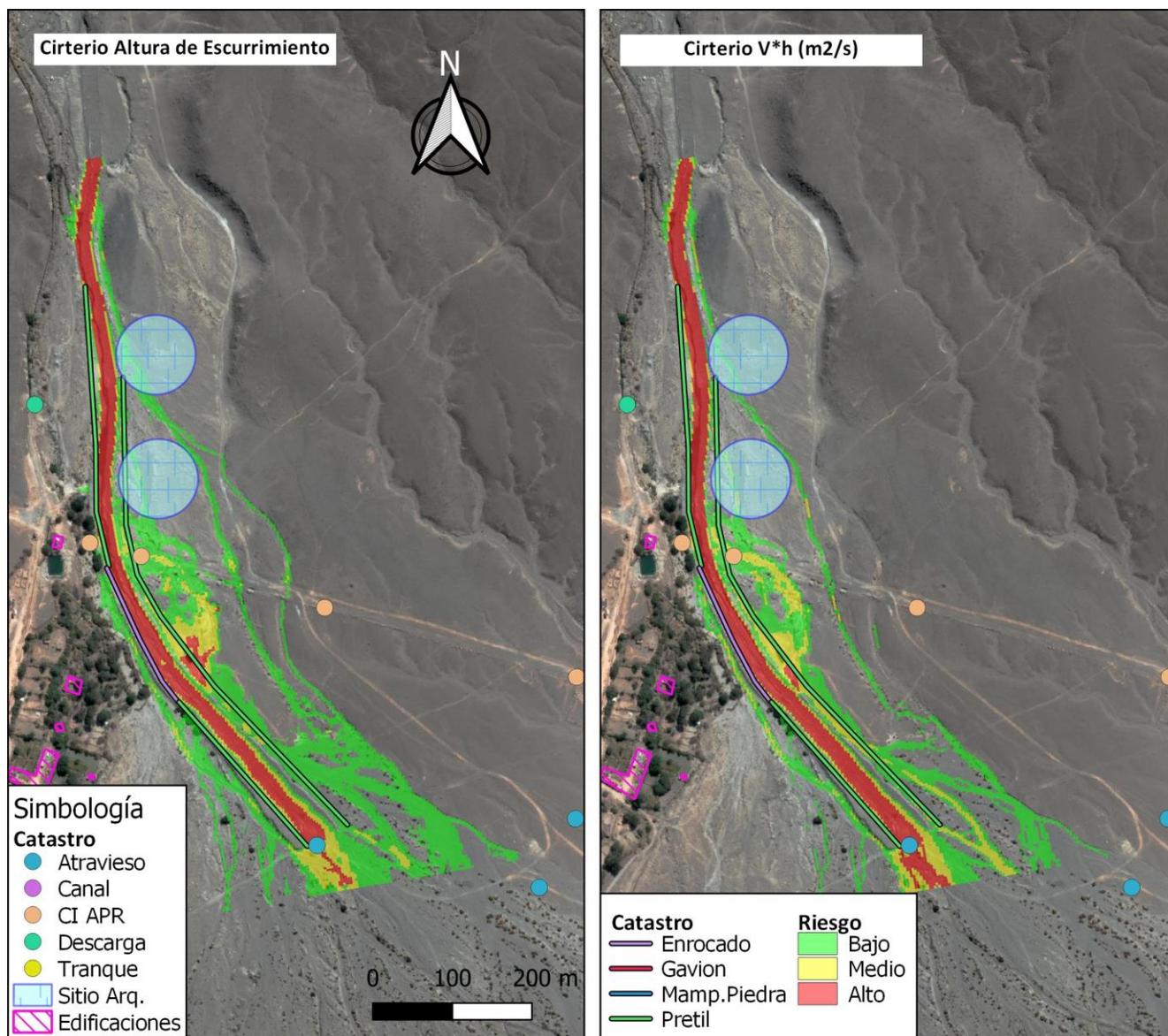


FIGURA 5-4: MAPA DE RIESGO SECTOR 4 RÍO SAN VILAMA PARA T=100 AÑOS

Fuente: Elaboración propia

5.1.4. Conclusiones

El análisis realizado permitió realizar un diagnóstico de la vulnerabilidad de la infraestructura existente que se ve afectada por las crecidas de los ríos San Pedro y Vilama en los tramos estudiados.

Respecto al río San Pedro, se observa que el sector que presenta mayor infraestructura vulnerable a riesgos es el sector 2, encontrándose la mayor parte de la infraestructura catastrada dentro de la zona de riesgo alto para la crecida de periodo de retorno 100 años. Asimismo, el sector 2 es el que presenta mayor superficie de terrenos agrícolas y de edificaciones que se encuentran dentro de la zona de riesgo alto.

Respecto a los caminos que se ven afectados, es importante señalar que en el sector 1, el camino de acceso a Catarpe en la mayor parte de su trazado se encuentra en zona de riesgo alto, ya que transcurre por la caja del cauce, lo cual es consistente con los antecedentes de riesgo catastrados que indican el corte o interrupción de dicho camino en variados sectores.

Por otro lado, en el sector 2 el puente de la ruta 23 que une Calama y San Pedro presenta riesgo alto y de acuerdo al diagnóstico realizado este puente para periodos de retorno menores a 100 años no presenta la revancha mínima acorde a los criterios del Manual de Carreteras, siendo sobrepasado el nivel mínimo de la viga para la crecida detrítica de 100 años de periodo de retorno. También, en este sector se produce desborde del cauce y activación de escurrimiento secundarios mediante la inundación de varios caminos, como son Domingo Atienza, Callejón Reales, Ada. Selti y Camino a Beter, los cuales presentan nivel de riesgo bajo en la mayor parte de la extensión inundada a excepción de sectores puntuales como lo son la rotonda Sequitor.

Finalmente, en el sector 4 correspondiente al tramo de análisis del río Vilama, se produce riesgo alto en las obras de defensa fluvial existente y se observa que el riesgo hacia los sitios arqueológicos identificados es bajo para una crecida de 100 años de periodo de retorno, mientras que los terrenos agrícolas del Ayllu de Vilama no presentarían riesgo siempre y cuando no se produzca falla de la obra de defensa existente.

Es importante destacar que en el caso del río Vilama se sugiere incorporar toda el área aguas abajo del tramo de estudio hasta el Ayllu de Solor, ya que en visita a terreno y de acuerdo a lo indicado por las comunidades, en ese tramo y en las quebradas afluentes existe población e infraestructura vulnerable a la inundación del río Vilama.

5.2. Diagnóstico Hidráulico del Cauce y de la Infraestructura Existente

5.2.1. Generalidades

En este capítulo se presenta el diagnóstico de la situación de los cauces naturales del área de estudio, realizado principalmente sobre la base de los estudios básicos, visitas a terreno, catastros de infraestructura existente y el análisis hidráulico y de mecánica fluvial de cada cauce con crecidas de diferentes períodos de retorno.

Para este diagnóstico, se aborda la situación de cada uno de los 4 sectores en el área de estudio, cuya definición se basó en características comunes, considerando en ellos los problemas y riesgos a los cuales se ven expuestos.

De esta forma, se consideró que el tramo del río Vilama en estudio corresponderá a un sector independiente definiendo, a su vez 3 sectores más del Río San Pedro. La representación espacial de esta sectorización se muestra en la Figura 5-5, mientras que el Cuadro 5-11 detalla cada una de las zonas, el inicio y término de cada sector, las localidades o asentamientos afectados por problemas relacionados con los cauces y una descripción de cada sector con los principales riesgos/problemas identificados.

CUADRO 5-11: SECTORIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

ID Sector	Cauce	Punto Inicio	Punto Término	Longitud (km)
S1	Río San Pedro	Aguas abajo estación San Pedro en Cuchabrachi	Pucará de Quítor	8,6
S2	Río San Pedro	Pucará de Quítor	Badén de acceso a Séquitor	5,7
S3	Río San Pedro	Badén de acceso a Séquitor	Tramo final frente a Tulor	6,9
S4	Río Vilama		Fin encauzamiento existente	1,0

Fuente: Elaboración propia

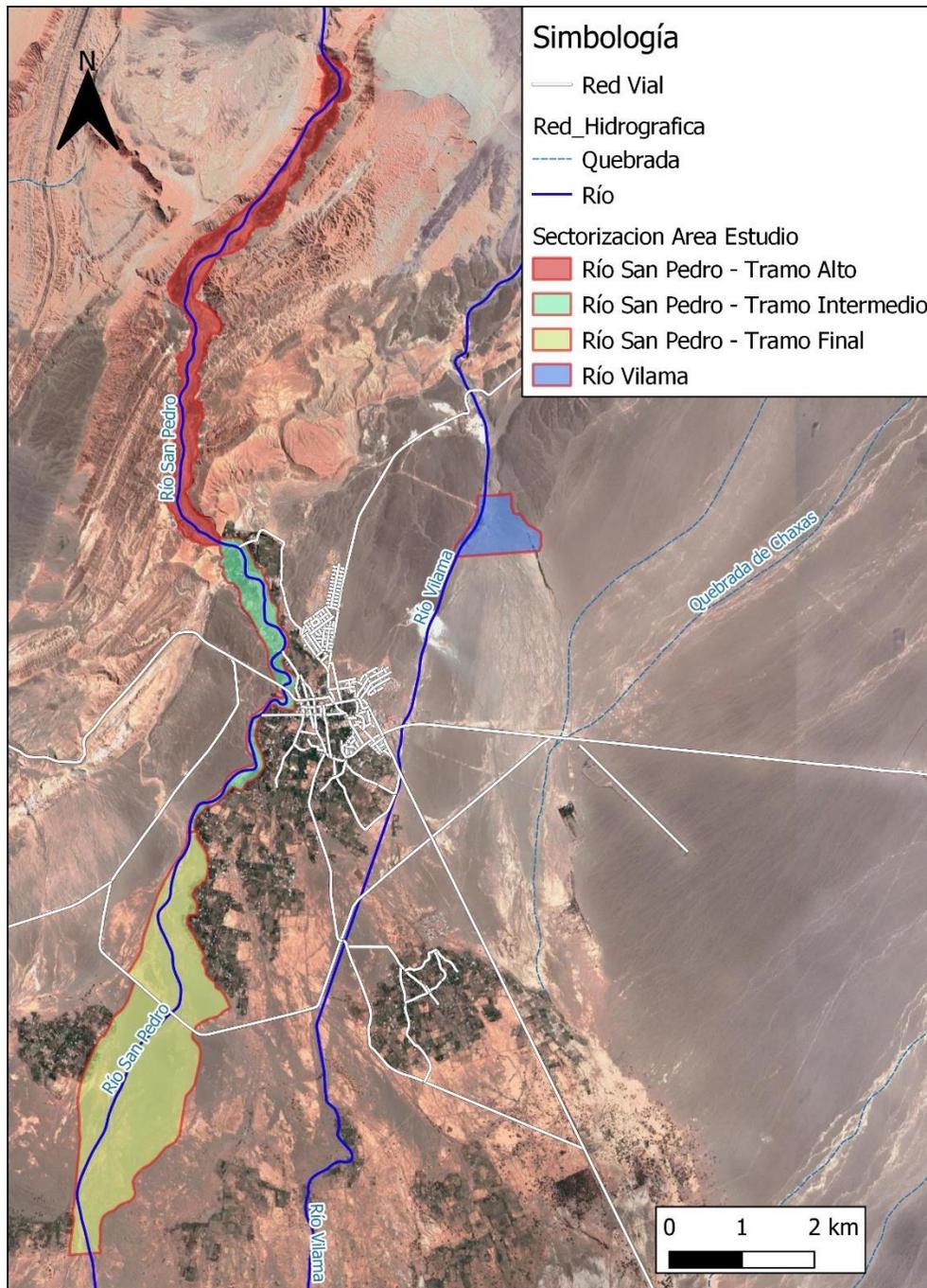


FIGURA 5-5: SECTORIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Sector 1: Río San Pedro sector alto

En términos generales, el río San Pedro en el primer tramo se presenta confinado naturalmente por las laderas de cerro, sin presentar riberas bien definidas para la condición de crecidas, teniendo una sección amplia con intervenciones puntuales mediante defensas fluviales o en que la sección del cauce se observa con un mayor confinamiento dado por los predios agrícolas.

La infraestructura presente en este sector, que puede ser crítica corresponde a lo siguiente:

- 5 atravesos, corresponden a cruces desde camino principal a casas y un hotel, además de cruces sobre el río en sector Catarpe.
- 13 tramos de defensas fluviales, las que corresponden principalmente a revestimiento de ribera con gaviones y en algunos casos pretiles de material fluvial.
- Canal de riego deteriorado, posee revestimiento y compuertas de descargas, destruidas por crecidas

En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, los siguientes sectores que representan puntos críticos:

- El sector de Catarpe posee riesgo de interrupción de caminos, inundación por desborde de cauce y anegamiento de caminos y pasos a desnivel.
- Cuchabrache, tiene riesgo muy alto de inundación por desborde de cauce.

En la Figura 5-6, se observa las áreas de inundación en el sector S1 de río San Pedro, que se producirían para crecidas asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, cuyas zonas de inundación se ilustran en forma separada. Además, se destacan en dicha figura los puntos relevantes ubicados en el cauce, según el catastro realizado, tales como, defensas fluviales, atravesos y otros.

En dicha Figura 5-6 se puede observar principalmente lo siguiente:

- Para T=2 años se observa en general que el río está bien encauzado en este tramo sin producirse desborde hacia los predios agrícolas. Se aprecia que en el kilómetro 5,9, sector ubicado unos 700 m aguas arriba del tranque Huachar, en el atraveso del camino de acceso a Catarpe, la longitud de camino que se inunda es de aproximadamente 180 m con una profundidad máxima de escurrimiento de aproximadamente 1 m, lo cual es consistente con el riesgo de interrupción de camino identificado por ONEMI.
- Para T=5 años, el flujo en el cauce aumenta un poco su ancho, observándose que la mayoría de las defensas fluviales existentes logran contener el río dentro de su margen, a excepción de la defensa fluvial que protege la sede social de Catarpe, la cual se ve sobrepasada y se produce una altura de inundación de aproximadamente 0,4 m por sobre el umbral del gavión.
- Para T=10 años, se observan similares resultados que para T=5 años, con la diferencia que comienzan a aparecer algunos sectores puntuales de inundación parcial de predios agrícolas en el sector de Cuchabrachi y en predio ubicado en ribera izquierda del cauce a unos 500 m aguas arriba de la sede de Catarpe. Las velocidades de

escurrimiento en un 60% del tramo superan los 2 m/s, valor que se considera potencialmente erosivo, alcanzando valores cercanos a los 4 m/s en el tramo que se ubica 200 m aguas arriba de la sede de Catarpe. Respecto a las obras de defensa fluvial de gaviones existentes, 4 de las 6 se ven sobrepasadas, asimismo, el camino se ve sobrepasado casi en la totalidad de su trazado.

- Para T=25 años, se produce un aumento en la superficie inundada en los mismos predios señalados para T=10 años y además se comienzan a inundar predios ubicados en la ribera derecha del cauce (respecto al sentido de escurrimiento), en un tramo de 1 km aproximadamente, específicamente a partir del km 3,6 del tramo en estudio. También se aprecia la inundación en los bordes del tranque Huachar, sin sobrepasar los muros del mismo y en un tramo del canal de riego que sale desde el tranque. Respecto a las obras de defensa fluvial de gaviones existentes, 5 de las 6 obras se ven sobrepasadas, asimismo, el camino se ve sobrepasado en la totalidad de su trazado.
- Para T=50 años, se produce un mayor aumento de predios inundados, junto con la afectación de 7 construcciones; en la ribera izquierda a unos 800 m aguas abajo del inicio del tramo de estudio se produce la afectación de 2 construcciones, otras 3 construcciones se ven afectadas en el sector de la sede de Catarpe, otra construcción en el sector del tranque Huachar y la última corresponde a la caseta de acceso a Catarpe. En un 70% del sector 1 el cauce presenta velocidades potencialmente erosivas.
- Para T=100 años en un 80% del sector 1 el cauce presenta velocidades potencialmente erosivas. En términos generales la superficie inundada aumenta marginalmente respecto a la que se produce para T=50 años.
- Para T=200 años se produce un leve aumento del área inundada respecto de la superficie que se tiene para la crecida de 100 años de periodo de retorno. Dicho aumento no alcanza a ser mayor a un 10%. Para esta crecida, se tiene que un 85% del sector 1 el cauce presenta velocidades potencialmente erosivas.

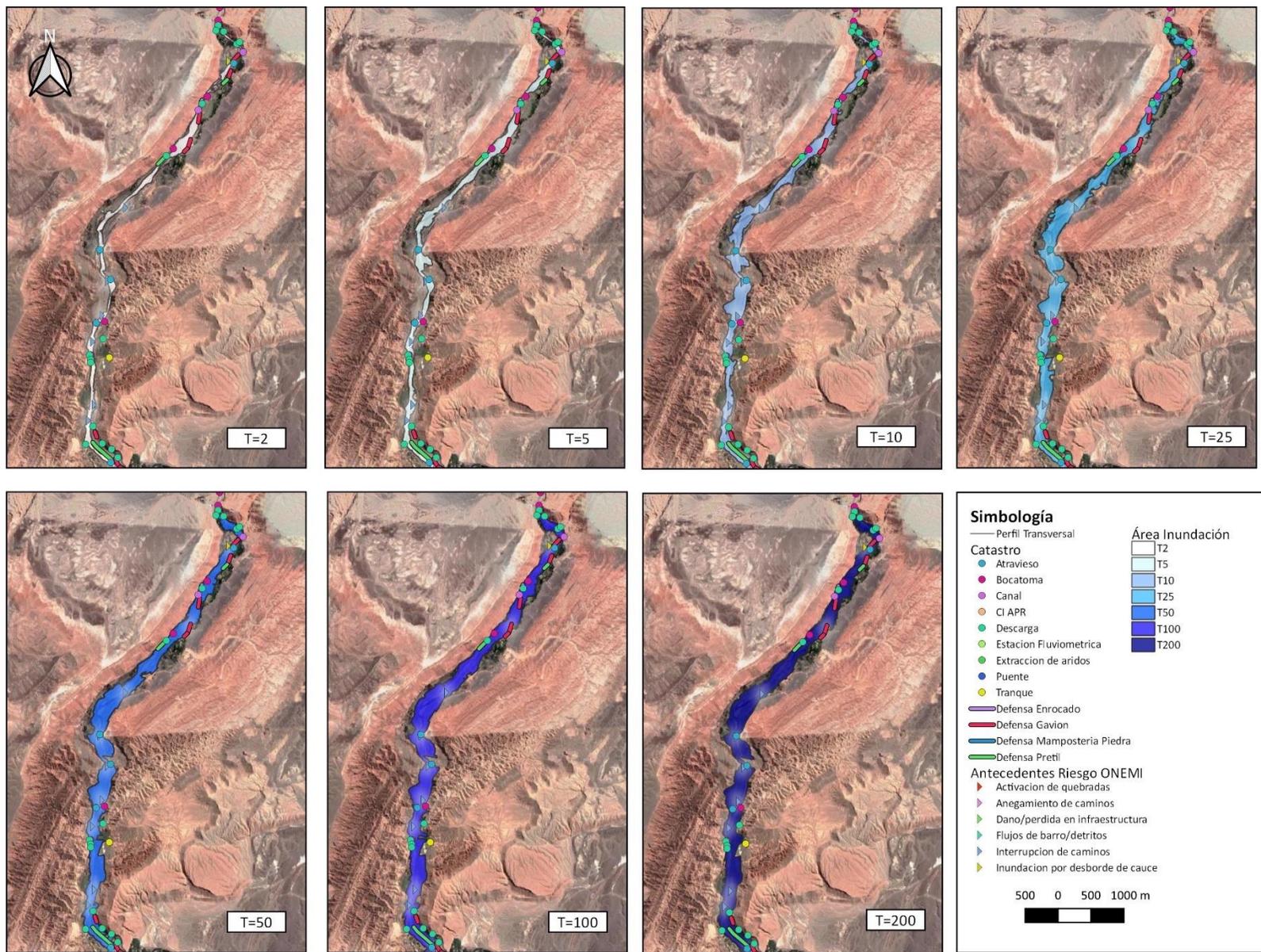


FIGURA 5-6: INUNDACIONES EN SECTOR 1 RÍO SAN PEDRO, SEGÚN T

Fuente: Elaboración propia.

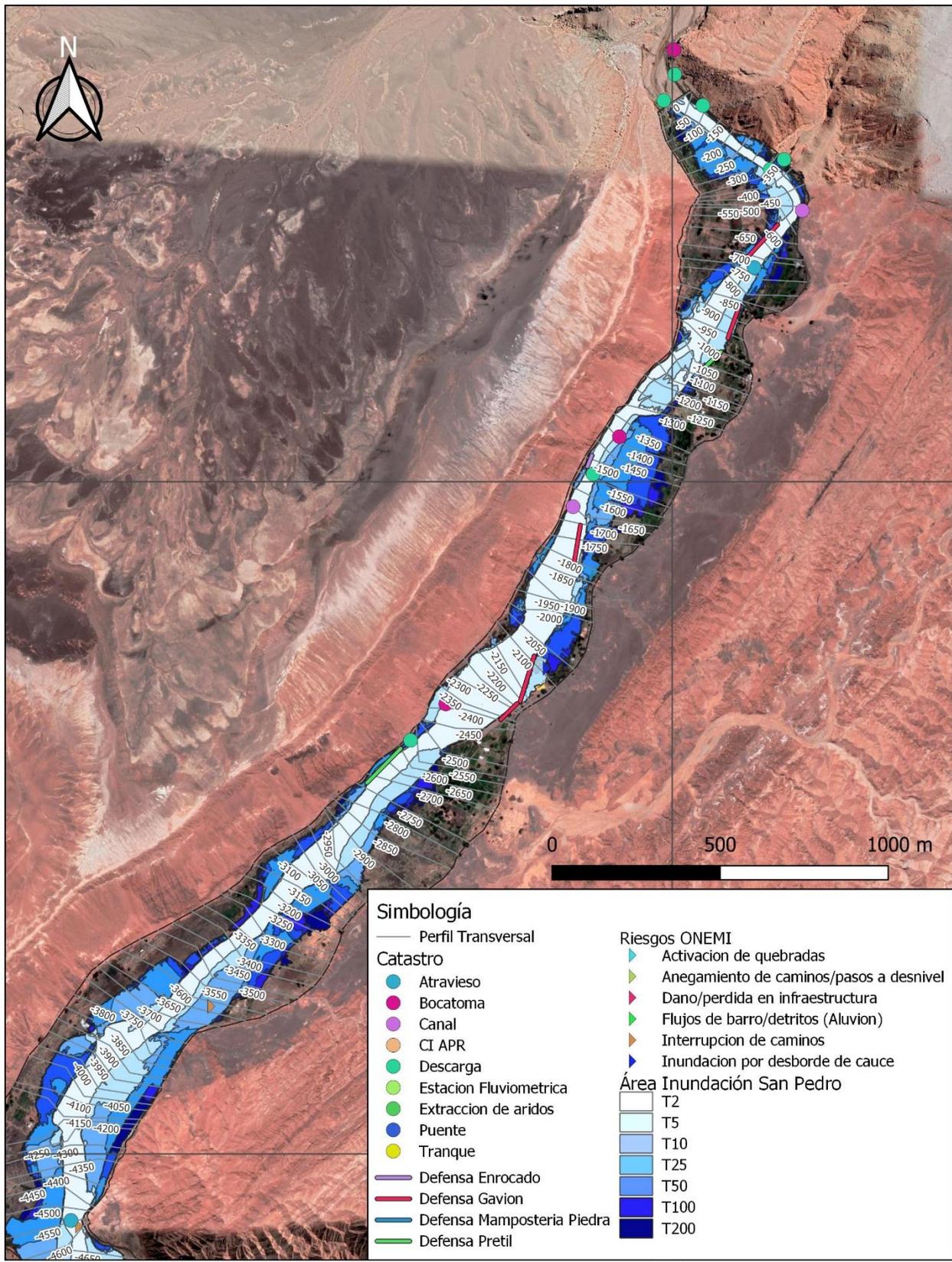


FIGURA 5-7: ÁREAS DE INUNDACIÓN SECTOR 1 RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 5-12 se detalla los principales resultados del análisis hidráulico de cada uno de los puntos relevantes que se ven afectados por las crecidas. Se detalla en cada punto la ubicación según km del cálculo de eje hidráulico (HEC-RAS), y para cada Período de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, se detalla el caudal, la velocidad y la altura de agua correspondiente.

Cabe mencionar que, sobre la base de las velocidades máximas admisibles en canales no revestidos que se indican en la Tabla 3.703.301.B del Manual de Carreteras y para fines de realizar un diagnóstico del cauce en sus diferentes tramos respecto a la erosión de las riberas, se proponen los siguientes rangos de velocidad:

- Velocidad potencialmente erosiva: $2,0 < v \text{ (m/s)} < 3,0$
- Velocidad erosiva: $v \text{ (m/s)} > 3,0$

CUADRO 5-12: PUNTOS RELEVANTES DEL SECTOR 1 QUE SE AFECTAN CON LAS CRECIDAS

Punto Interés	KM	T (años)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Altura de agua (m)	Observaciones
Defensa Fluvial ribera derecha	-650	2	42	1.5	1.1	
	-650	5	111	2.1	1.6	Velocidad potencialmente erosiva
	-650	10	169	2.4	1.9	Velocidad potencialmente erosiva
	-650	25	251	2.6	2.3	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-650	50	353	3.1	2.6	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-650	100	432	3.3	2.8	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-650	200	515	4.6	2.6	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Defensa Fluvial ribera izquierda	-900	2	42	1.8	1.3	
	-900	5	111	1.0	2.0	Se produce desborde sobre la obra
	-900	10	169	1.4	2.0	Se produce desborde sobre la obra
	-900	25	251	1.7	2.2	Se produce desborde sobre la obra
	-900	50	353	1.6	2.7	Se produce desborde sobre la obra
	-900	100	432	2.4	2.5	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-900	200	515	2.6	2.6	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Viviendas en ribera izquierda	-1200	2	42	2.6	1.1	Velocidad potencialmente erosiva
	-1200	5	111	2.1	1.8	Velocidad potencialmente erosiva
	-1200	10	169	1.8	2.0	
	-1200	25	251	2.9	1.9	Velocidad potencialmente erosiva
	-1200	50	353	3.2	2.1	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre vivienda
	-1200	100	432	3.3	2.3	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre vivienda
	-1200	200	515	3.5	2.5	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre vivienda
Bocatoma Canal Naranjo en ribera derecha y Predio Com.	-1400	2	42	1.7	1.4	Se produce desborde sobre la obra
	-1400	5	111	1.8	2.2	Se produce desborde sobre la obra
	-1400	10	169	1.9	2.6	Se produce desborde sobre la obra
	-1400	25	251	2.2	2.9	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra

CUADRO 5-12: PUNTOS RELEVANTES DEL SECTOR 1 QUE SE AFECTAN CON LAS CRECIDAS

Punto Interés	KM	T (años)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Altura de agua (m)	Observaciones
Catarpe en ribera izquierda	-1400	50	353	3.2	2.9	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-1400	100	432	3.8	3.0	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-1400	200	515	3.2	3.2	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Defensa fluvial en ribera izquierda	-1750	2	42	1.7	1.2	
	-1750	5	111	2.4	1.7	Velocidad potencialmente erosiva
	-1750	10	169	2.4	1.7	Velocidad potencialmente erosiva
	-1750	25	251	2.8	1.9	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-1750	50	353	3.4	2.1	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-1750	100	432	3.5	2.3	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-1750	200	515	3.7	2.4	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Sede Catarpe en ribera izquierda	-2150	2	42	2.1	1.5	Velocidad potencialmente erosiva
	-2150	5	111	2.6	2.5	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-2150	10	169	0.5	2.6	Se produce desborde sobre la obra
	-2150	25	251	0.8	2.6	Se produce desborde sobre la obra
	-2150	50	353	1.1	2.6	Se produce desborde sobre la obra
	-2150	100	432	1.4	2.6	Se produce desborde sobre la obra
	-2150	200	515	1.7	2.6	Se produce desborde sobre la obra
Enrocado defensa canal Tambillo ribera derecha	-2650	2	42	1.6	0.9	
	-2650	5	111	2.5	1.2	Velocidad potencialmente erosiva
	-2650	10	169	2.7	1.5	Velocidad potencialmente erosiva
	-2650	25	251	2.1	1.9	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-2650	50	353	2.1	2.3	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-2650	100	432	2.1	2.6	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-2650	200	515	2.2	2.9	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Atraveso camino	-5100	2	42	1.8	0.9	
	-5100	5	110	2.0	1.3	Se produce desborde sobre la obra
	-5100	10	167	2.6	1.4	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-5100	25	249	1.6	1.8	Se produce desborde sobre la obra
	-5100	50	351	2.4	1.7	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-5100	100	429	2.6	1.9	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-5100	200	512	2.7	2.1	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Bocatoma canal San Pedro en ribera izquierda	-5800	2	41	1.2	0.8	
	-5800	5	106	1.8	1.1	
	-5800	10	162	2.2	1.3	Velocidad potencialmente erosiva
	-5800	25	242	2.6	1.5	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-5800	50	343	3.2	1.6	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra

CUADRO 5-12: PUNTOS RELEVANTES DEL SECTOR 1 QUE SE AFECTAN CON LAS CRECIDAS

Punto Interés	KM	T (años)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Altura de agua (m)	Observaciones
	-5800	100	421	3.1	1.8	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-5800	200	506	2.0	2.0	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Tranque Huachar	-6600	2	41	1.3	0.8	
	-6600	5	106	1.5	1.2	
	-6600	10	162	1.6	1.5	
	-6600	25	242	1.7	1.7	
	-6600	50	343	1.8	2.0	
	-6600	100	421	1.9	2.2	
	-6600	200	506	2.2	2.2	Velocidad potencialmente erosiva
Pretil ribera izquierda en sector de barrera de acceso a Catarpe	-8050	2	40	1.8	0.9	
	-8050	5	106	2.4	1.5	Velocidad potencialmente erosiva
	-8050	10	163	2.3	1.9	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-8050	25	241	2.4	2.1	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-8050	50	341	2.6	2.3	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-8050	100	419	2.7	2.5	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-8050	200	504	2.8	2.6	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Sector 2: Río San Pedro en zona poblada

El sector 2 corresponde al paso por la zona urbana del río San Pedro. En términos generales el río en el segundo tramo se encuentra canalizado en varios tramos por obras de defensa fluvial y en otros tramos confinado por los asentamientos a ambas riberas del cauce.

La infraestructura presente en este sector, que puede ser crítica corresponde a lo siguiente:

- 4 atravesos, uno de ellos corresponde a un cruce de camino sobre el río, en sector de Pucará de Quito. Otro de estos atravesos es un cruce de camino a San Pedro Urbano.
- 26 tramos de defensas fluviales, gran parte de ellas corresponde a revestimiento de ribera con gaviones.
- Puente en ruta Paso Sico, posee obras de protección en construcción.
- Casas particulares a un costado de la caja del río.

- Canales de riego sin compuertas y las modificaciones del cauce incorporadas para protegerlos

En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, los siguientes sectores que representan puntos críticos:

- Quito, presenta riesgo muy alto de interrupción de caminos e inundaciones por desborde de cauces.
- Domingo Atienza, tiene riesgo muy alto de inundación por desborde.
- San Pedro de Atacama, presenta riesgo de inundación por desborde del cauce.

En la Figura 5-8, se observa las áreas de inundación en el sector S2 de río San Pedro, que se producirían para crecidas asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, cuyas zonas de inundación se ilustran en forma separada. Además, se destacan en dicha figura los puntos relevantes ubicados en el cauce, según el catastro realizado, tales como, defensas fluviales, atraviesos y otros.

En dicha Figura 5-8 se puede observar principalmente lo siguiente:

- Para T=2 años se observa en general que el río está bien encauzado en este tramo sin producirse desborde. La altura de escurrimiento en los sectores de atraveso del cauce en Pucará de Quito, Domingo Atienza y acceso a Séquito son de 1; 1,3 y 1,2 m, respectivamente, por lo que para esta condición no es posible el atraveso sin contar con una obra de arte en el cauce.
- Para T=5 años, El flujo en el cauce aumenta un poco su ancho, observándose que todas las defensas fluviales existentes logran contener el río dentro de su margen. Prácticamente en el 80% del tramo se presentan velocidades superiores a los 2 m/s, valor considerado como potencialmente erosivo y que afecta al tramo de la ribera izquierda del río que presenta pretil de material de lecho fluvial entre el kilómetro 9,1 y 10,5 sobre el cual transcurre el camino que permite acceder por el norte con la ruta 27CH. De igual manera se presentan velocidades potencialmente erosivas en la ribera izquierda en el sector de badén de acceso a Séquito, en cuya ribera se pudo constatar la presencia de infraestructura hotelera en el margen de la ribera y sin contar con medida de mitigación frente al riesgo de erosión.
- Para T=10 años, el cauce desborda en ambas riberas en un tramo de aproximadamente 200 m de longitud, específicamente en el sector de intersección del cauce con la calle Domingo Atienza. Cabe mencionar que dicho sector cuenta con obras de defensa fluvial, correspondientes a las obras de emergencia ejecutadas por DOH, sin embargo, en este tramo las obras se ven sobrepasadas por sobre su coronamiento por una altura de aproximadamente 0,2 m.

- Para T=25 años, se produce un aumento en la superficie inundada. Los gaviones existentes frente al Pucará de Quito se ven sobrepasados en un tramo de aproximadamente 300 m, con una altura por sobre el coronamiento de estas obras que fluctúa entre 0,2 y 0,7 m. En el puente de la ruta que une Calama y San Pedro, se observa una revancha o borde libre de aproximadamente 0,85 m, lo cual es inferior a la revancha mínima de diseño para este tipo de obra. Se observa también que las defensas de gaviones inmediatamente aguas abajo del puente también se ven sobrepasadas inundando construcciones en el sector de Conde Duque. La defensa de gaviones que se ubica al final de la calle Caracoles, se ve sobrepasada por su borde inicial, lo cual implica la posible falla de la obra por escurrimiento en su borde posterior el cual no cuenta con material de relleno que soporte al último nivel de gavión. Se produce la inundación de una de las dos construcciones situadas en la ribera izquierda del cauce a la altura del badén de Séquito.
- Para T=50 años, se produce un mayor aumento de predios y construcciones inundados. Las obras de defensa ubicadas inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del puente se ven sobrepasadas, ya que la altura de escurrimiento supera los 4 m. De los 4 km de obras de defensa fluvial y canalización del río San Pedro en el sector 2, solo 0,8 km de dicho tramo logran contener la crecida sin producir desbordes.
- Para T=100 años e inclusive para T=200 años el puente permite el paso de ambas crecidas, sin que se alcance el nivel mínimo de la viga, sin embargo, la revancha o borde libre es inferior a 0,2 m. Se observan velocidades potencialmente erosivas en la sección del puente, sin embargo, se debe tener en cuenta las obras que se encuentra realizando vialidad para la protección del puente, las cuales se componen por obras de defensa fluvial de gaviones de 4 niveles con revestimiento de hormigón armado, lo cual permite velocidades mayores. También se debe verificar el comportamiento de esta obra en la situación con proyecto, ya que si bien es cierto permitirá la protección de las riberas, restringe aún más la sección de escurrimiento por lo que se podría tener como resultado que el puente se vea sobrepasado para las condiciones de crecida detrítica que se analizan en el presente estudio.

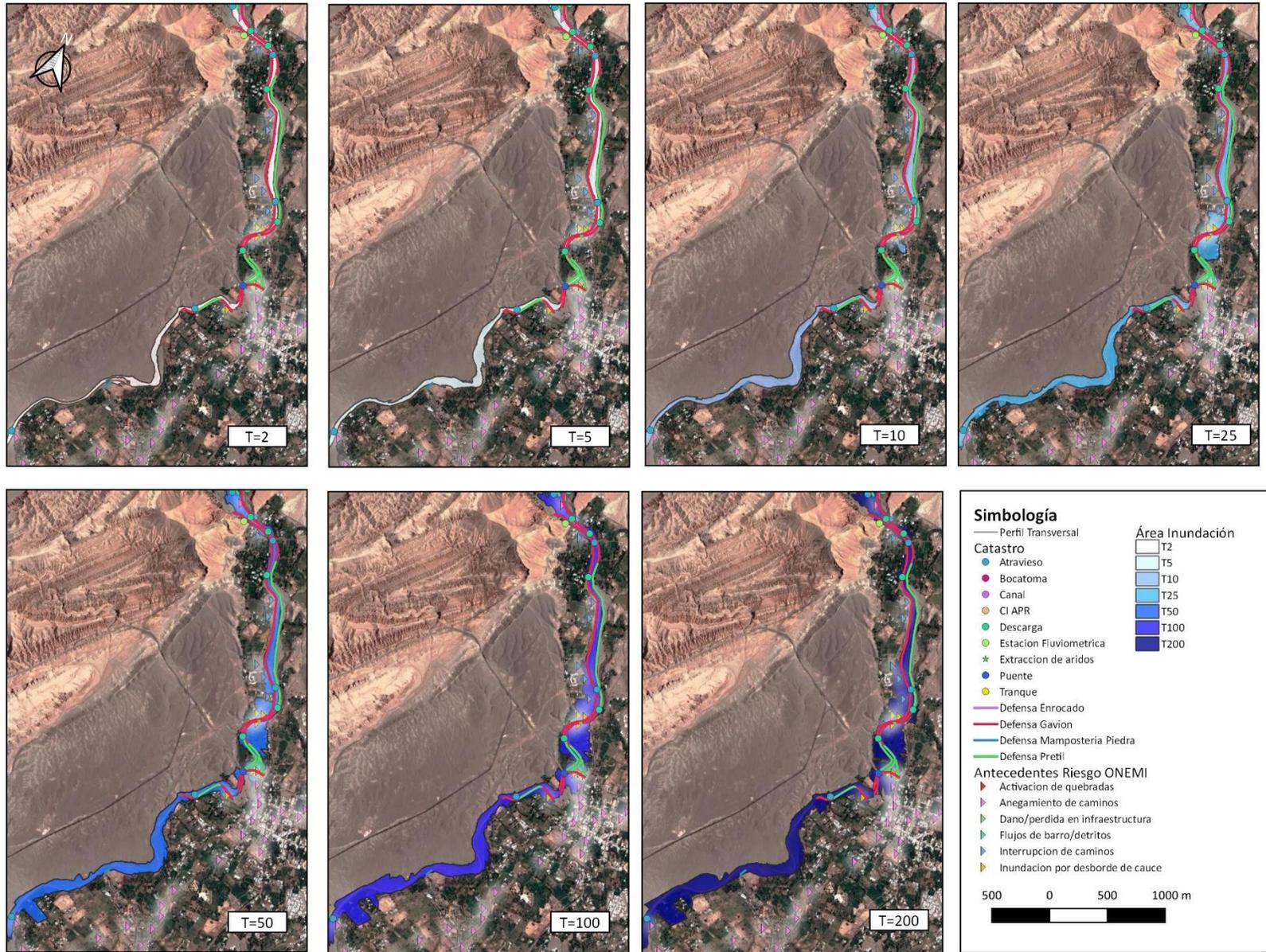


FIGURA 5-8: INUNDACIONES EN SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO, SEGÚN T

Fuente: Elaboración propia.

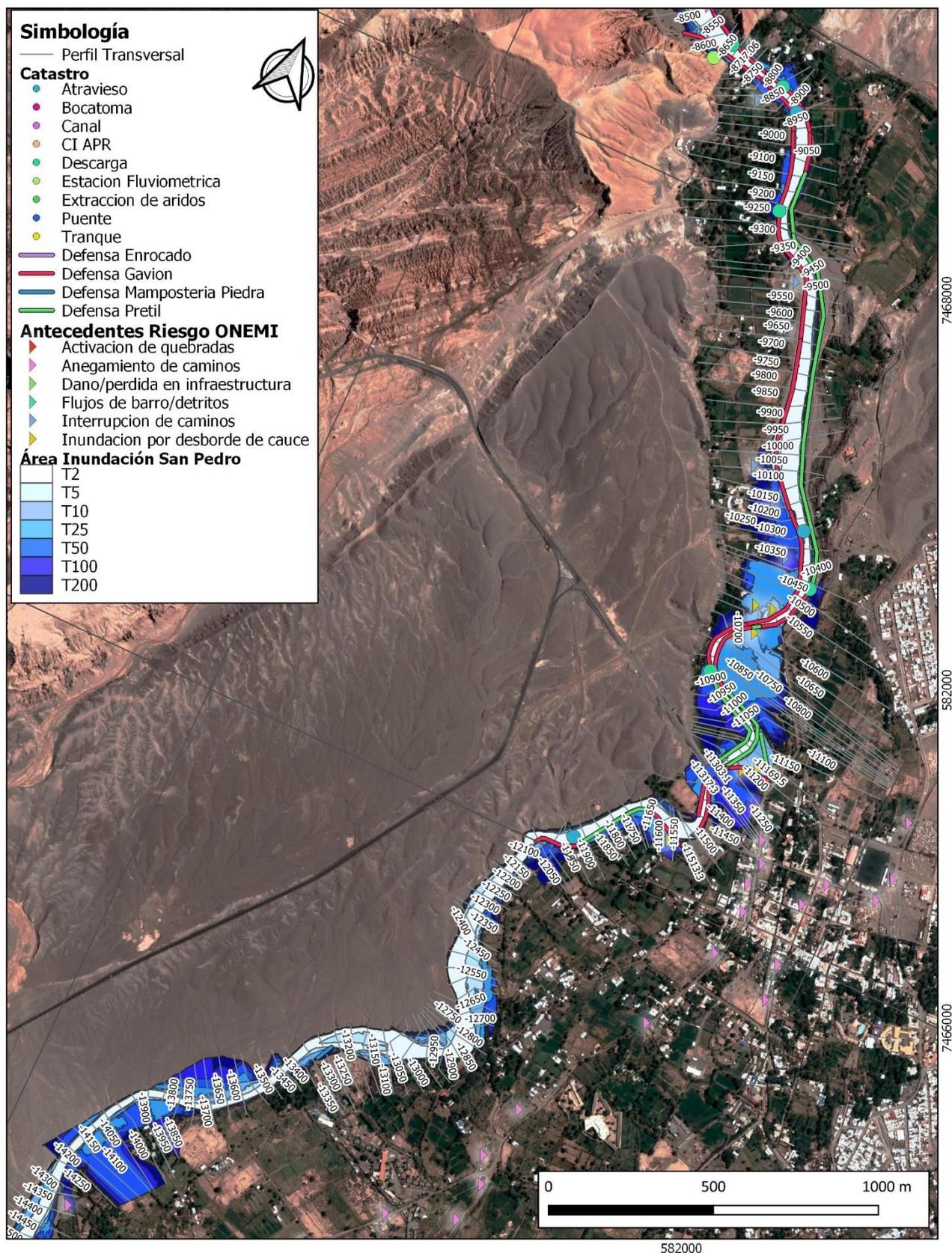


FIGURA 5-9: ÁREAS DE INUNDACIÓN SECTOR 2 RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 5-13 se detalla los principales resultados del análisis hidráulico de cada uno de los puntos relevantes que se ven afectados por las crecidas. Se detalla en cada punto la ubicación según km del cálculo de eje hidráulico (HEC-RAS), y para cada Período de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, se detalla el caudal, la velocidad y la altura de agua correspondiente.

CUADRO 5-13: PUNTOS RELEVANTES DEL SECTOR 2 QUE SE AFECTAN CON LAS CRECIDAS

Punto Interés	KM	T (años)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Altura de agua (m)	Observaciones
Defensa Fluvial ambas riberas. Sector Quitor	-8850	2	40	2.2	1.1	Velocidad potencialmente erosiva
	-8850	5	106	3.1	1.6	Velocidad erosiva.
	-8850	10	163	3.7	2.0	Velocidad erosiva.
	-8850	25	241	4.3	2.4	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-8850	50	341	3.3	3.4	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-8850	100	419	4.0	3.5	Velocidad erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Atraveso camino acceso a sector Pucará de Quitor	-8900	2	40	2.0	1.0	
	-8900	5	106	3.0	1.5	Velocidad potencialmente erosiva
	-8900	10	163	3.7	1.8	Velocidad erosiva.
	-8900	25	241	4.4	2.2	Velocidad erosiva.
	-8900	50	341	4.7	2.7	Velocidad erosiva.
	-8900	100	419	4.4	3.2	Velocidad erosiva.
Defensa fluvial ribera derecha y atraveso Domingo Atienza	-10300	2	40	1.9	1.3	
	-10300	5	105	2.6	1.9	Velocidad potencialmente erosiva
	-10300	10	161	3.0	2.3	Velocidad potencialmente erosiva
	-10300	25	239	3.5	2.7	Velocidad erosiva.
	-10300	50	339	2.7	3.4	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-10300	100	416	2.6	3.6	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Defensas fluviales en Sector angostamiento o cauce en Domingo Atienza	-10650	2	40	1.5	1.9	
	-10650	5	104	1.8	3.3	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-10650	10	160	2.5	3.5	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-10650	25	239	2.8	3.9	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-10650	50	338	2.8	4.0	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-10650	100	415	2.9	4.2	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Puente ruta Calama-San Pedro	-11303	2	40	1.3	1.9	
	-11303	5	104	1.6	2.9	
	-11303	10	160	1.8	3.6	
	-11303	25	238	2.0	4.3	Velocidad potencialmente erosiva
	-11303	50	338	2.3	5.0	Velocidad potencialmente erosiva
	-11303	100	415	2.5	5.3	Velocidad potencialmente erosiva
Defensa fluvial sector Conde Duque	-11650	2	40	1.6	1.3	
	-11650	5	104	1.9	2.2	
	-11650	10	160	2.0	2.8	Velocidad potencialmente erosiva
	-11650	25	238	2.1	3.5	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra

CUADRO 5-13: PUNTOS RELEVANTES DEL SECTOR 2 QUE SE AFECTAN CON LAS CRECIDAS

Punto Interés	KM	T (años)	Q (m³/s)	V (m/s)	Altura de agua (m)	Observaciones
	-11650	50	338	2.0	4.3	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-11650	100	415	2.3	4.4	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-11650	200	500	2.4	4.8	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Defensa fluvial sector Cruce calle Caracoles	-11650	2	40	1.6	1.3	
	-11650	5	104	1.9	2.2	
	-11650	10	160	2.0	2.8	Velocidad potencialmente erosiva
	-11650	25	238	2.1	3.5	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-11650	50	338	2.0	4.3	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-11650	100	415	2.3	4.4	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-11650	200	500	2.4	4.8	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
	-11650	200	500	2.4	4.8	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce desborde sobre la obra
Atraveso badén acceso a Séquitior	-11400	2	40	1.7	1.6	
	-11400	5	104	2.4	2.5	Velocidad potencialmente erosiva
	-11400	10	160	2.6	3.1	Velocidad potencialmente erosiva
	-11400	25	238	2.8	3.8	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce inundación
	-11400	50	338	3.1	4.4	Velocidad erosiva. Se produce inundación
	-11400	100	415	3.2	4.8	Velocidad erosiva. Se produce inundación
	-11400	200	500	2.2	5.3	Velocidad potencialmente erosiva. Se produce inundación

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4. Sector 3: Río San Pedro sector bajo

Tramo final en el que el cauce no se encuentra confinado, presenta cauces secundarios y planicies de inundación.

La infraestructura existente en este tramo y que puede ser crítica es:

- 8 atravesos, los que corresponden a cajones de hormigón y tuberías, un cruce de río bajo el camino que conecta a Calama a la altura de Coyo y viaductos.
- 7 defensas fluviales que corresponden a pretiles de material fluvial y revestimientos de ribera con enrocado.

En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, los siguientes sectores que representan puntos críticos:

- El sector de Coyo presenta riesgo de anegamiento de caminos y pasos a desnivel, además de interrupción de caminos.
- Ayllu de Tulor, tiene riesgo de inundación por desborde.

En la Figura 5-10, se observa las áreas de inundación en el sector S3 de río San Pedro, que se producirían para crecidas asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años,

cuyas zonas de inundación se ilustran en forma separada. Además, se destacan en dicha figura los puntos relevantes ubicados en el cauce, según el catastro realizado, tales como, defensas fluviales, atraviesos y otros.

En dicha Figura 5-10 se puede observar principalmente lo siguiente:

- Para T=2 años se observa en general que el río en forma natural se presenta bien encauzado en este tramo sin producirse desbordes. Las obras de arte que permiten el paso del caudal del río San Pedro en el cruce con la ruta Circunvalación
- Para T=5 años, El flujo en el cauce aumenta su ancho, se observa que se produce el embalsamiento de las aguas producto de la interferencia que produce la ruta circunvalación. Las obras de arte existentes no son capaces de evacuar el caudal del río y se produce desborde hacia ambas riberas, activándose el escurrimiento a través del paso bajo nivel (ruta tropera) que se encuentra en la ribera izquierda dirigiéndose hacia pie de Séquitor. Además, se produce desborde hacia el camino y viviendas del Ayllu de Tulor, provocando que el Ayllu quede parcialmente desconectado.
- Para T=10 años, se produce la inundación de las cámaras de la tubería que alimenta el tranque de riego de Coyo, produciéndose también la inundación del tranque de riego. También se produce la inundación de una de las obras del sifón del canal Vilama.
- Para T=25 años, se produce un aumento en la superficie inundada incluyendo la inundación de infraestructura aparentemente correspondiente a corrales en sector de Séquitor, la cual se emplaza dentro de la planicie de inundación del río San Pedro. También se produce la inundación del camino que une Coyo y Tulor, provocando que este último quede completamente desconectado a partir del evento de 25 años de periodo de retorno.
- Para T=50 años, se produce un mayor aumento de predios inundados, afectando tanto a los Ayllu de Coyo y Tulor. Cabe mencionar que, existen tramos en que la topografía disponible no permite representar el alcance completo del área inundada, debido a que se trata de amplias extensiones de terreno con muy baja pendiente, por lo que se presume que se produciría afectación del sector de pie de Séquitor y que la ruta de circunvalación podría verse sobrepasada en el punto bajo que existe frente a pie de Séquitor y dicho escurrimiento a su vez podría provocar la inundación del Ayllu de Beter.
- Para T=100 años se produce un aumento mayor de la inundación del Ayllu de Tulor. Se produce también la afectación del predio que la comunidad de Coyo indicó está proyectada la construcción de 20 viviendas, el cual se encuentra contiguo al terreno de acopio de áridos.

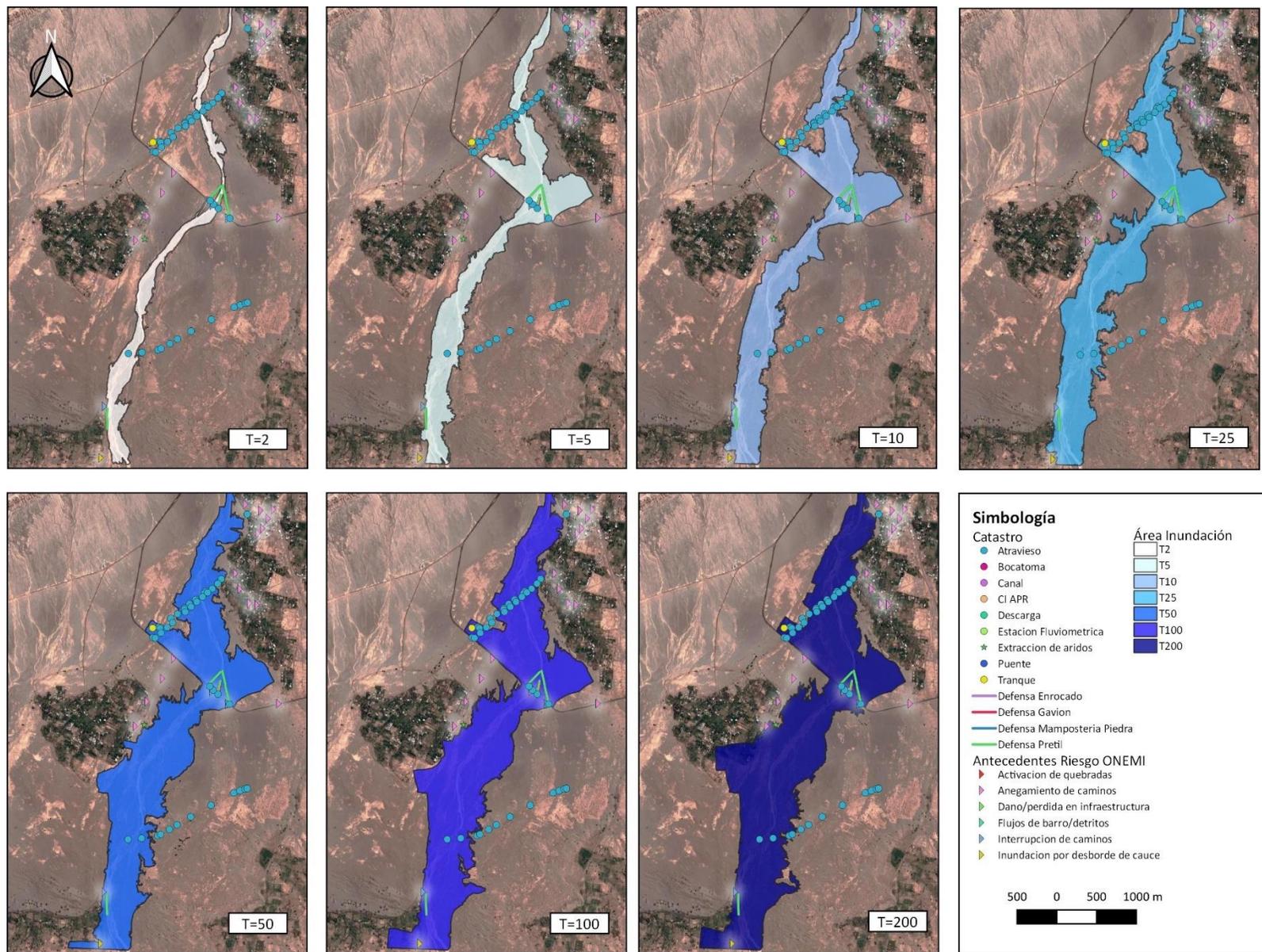


FIGURA 5-10: INUNDACIONES EN SECTOR 3 RÍO SAN PEDRO, SEGÚN T

Fuente: Elaboración propia.

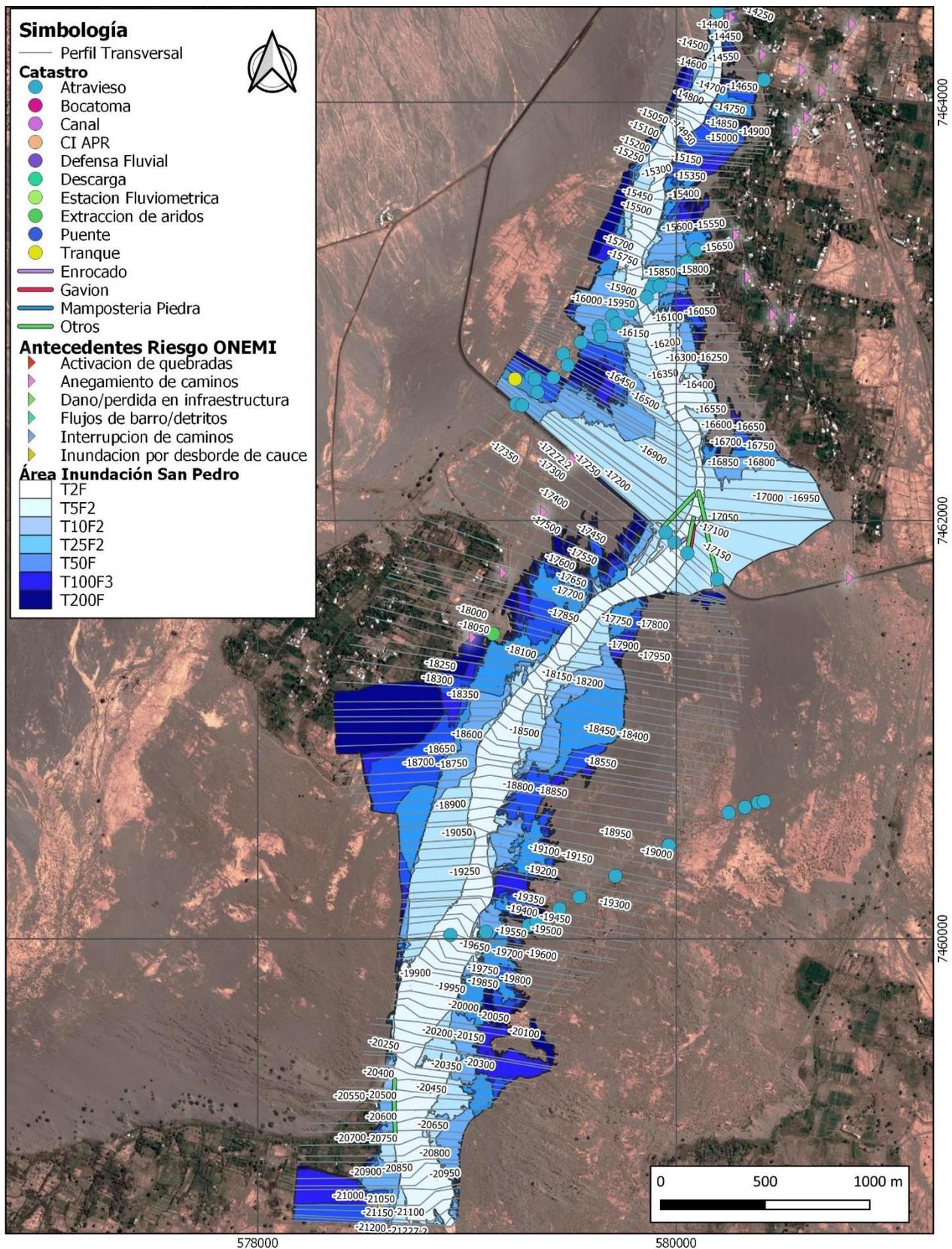


FIGURA 5-11: ÁREAS DE INUNDACIÓN SECTOR 3 RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 5-14 se detalla los principales resultados del análisis hidráulico de cada uno de los puntos relevantes que se ven afectados por las crecidas. Se detalla en cada punto la ubicación según km del cálculo de eje hidráulico (HEC-RAS), y para cada Período de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, se detalla el caudal, la velocidad y la altura de agua correspondiente. En particular, en el sector de atraveso de la ruta de circunvalación se presenta una disminución abrupta de la velocidad de escurrimiento sin que haya disminución de la altura de escurrimiento. Lo anterior se produce debido al efecto “dique” que produce el terraplén de la ruta frente al escurrimiento, el cual se ve controlado por la descarga a través de las obras de arte en la ruta, las que a partir de 5 años de periodo de retorno se ven sobrepasadas.

CUADRO 5-14: PUNTOS RELEVANTES DEL SECTOR 3 QUE SE AFECTAN CON LAS CRECIDAS

Punto Interés	KM	T (años)	Q (m³/s)	V (m/s)	Altura de agua (m)	Observaciones
Canal de riego y Postación eléctrica hacia Coyo	-15950	2	40	1.2	1.0	
	-15950	5	103	1.6	1.4	Se produce inundación de la obra
	-15950	10	158	1.7	1.7	Se produce inundación de la obra
	-15950	25	237	1.8	1.8	Se produce inundación de la obra
	-15950	50	336	1.7	1.7	Se produce inundación de la obra
	-15950	100	414	1.6	1.8	Se produce inundación de la obra
	-15950	200	498	1.9	1.8	Se produce inundación de la obra
Atraveso ruta Circunvalación	-17250	2	40	0.1	2.7	
	-17250	5	103	0.1	4.9	EL cauce sobrepasa la ruta
	-17250	10	158	0.1	5.7	EL cauce sobrepasa la ruta
	-17250	25	237	0.1	5.7	EL cauce sobrepasa la ruta
	-17250	50	336	0.1	5.8	EL cauce sobrepasa la ruta
	-17250	100	414	0.1	5.8	EL cauce sobrepasa la ruta
	-17250	200	498	0.2	5.9	EL cauce sobrepasa la ruta
Sifón Canal Vilama	-19550	2	39	0.7	0.9	
	-19550	5	103	0.8	1.1	
	-19550	10	157	1.0	1.2	Se produce inundación de la obra
	-19550	25	236	1.1	1.4	Se produce inundación de la obra
	-19550	50	335	1.3	1.5	Se produce inundación de la obra
	-19550	100	412	1.4	1.6	Se produce inundación de la obra
	-19550	200	497	1.5	1.7	Se produce inundación de la obra
Pretil camino acceso a Tulor	-19550	2	39	0.7	0.9	
	-19550	5	103	0.8	1.1	
	-19550	10	157	1.0	1.2	Se produce desborde sobre la obra
	-19550	25	236	1.1	1.4	Se produce desborde sobre la obra
	-19550	50	335	1.3	1.5	Se produce desborde sobre la obra
	-19550	100	412	1.4	1.6	Se produce desborde sobre la obra
	-19550	200	497	1.5	1.7	Se produce desborde sobre la obra

Fuente: Elaboración propia.

5.2.5. Sector 4: Río Vilama

El río se encuentra canalizado por pretilos de material del lecho fluvial. No presenta escurrimiento ni vegetación.

La infraestructura existente en este tramo y que puede ser crítica es:

- Cruce de camino sobre el río Vilama, es un camino de tierra.
- 4 tramos de defensas fluviales correspondientes a pretilos de material fluvial, encauzamiento de río y enrocado de menor tamaño.
- Cámaras de inspección de APR de Vilama que cruzan el río.
- Tranque de tratamiento de aguas servidas, aguas abajo de pozo APR de Vilama.

En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, riesgo de inundación por desborde de cauce.

En la Figura 5-8, se observa las áreas de inundación en el sector S4 en río Vilama, que se producirían para crecidas asociadas a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, cuyas zonas de inundación se ilustran en forma separada. Además, se destacan en dicha figura los puntos relevantes ubicados en el cauce, según el catastro realizado, tales como, defensas fluviales, atravesos y otros.

En dicha Figura 5-12 se puede observar principalmente lo siguiente:

- Para T=2 años hasta T=50 años se observa en general que el río está bien encauzado en este tramo sin producirse desborde hacia el Ayllu de Vilama.
- A partir de T=10 años se producen velocidades superiores a 2 m/s lo que se considera erosivo para los tramos de pretil que presenta el río Vilama en el área de estudio.
- Para T=100 años se produce desborde sobre el pretil de la ribera izquierda a partir de los 250 m aguas abajo del punto de inicio del tramo de estudio.
- Para T=200 años se produce aumento de la superficie de inundación tanto en la ribera izquierda como en el tramo final del encauzamiento del río, sin embargo, no se produce afectación de la infraestructura existente asociada a la planta de APR. En los últimos 50 m del tramo de estudio se produce una baja abrupta de la velocidad de escurrimiento producto del aumento del área de escurrimiento, sin embargo, como se trata de la activación de mas brazos de escurrimiento, el resultado más representativo para este tramo es el del modelo 2D.

Cabe destacar que los resultados que se presentan deberán ser actualizados acorde a los resultados que se obtengan para todos los periodos de retorno que se estudian con el modelo 2D. Por ejemplo, en el caso del periodo de retorno 100 años, el modelo 1D no muestra que se produzca desborde por la ribera derecha, mientras que el modelo 2D indica que se produce desborde a partir del kilómetro 0,4 en donde se encuentra una cámara de inspección del APR Vilama, a partir de este punto el modelo 2D muestra que el flujo que se desborda escurre por un brazo del cauce que se encuentra a menor cota, lo cual es consistente con lo visto en terreno y con el punto de riesgo de desborde que indica ONEMI.

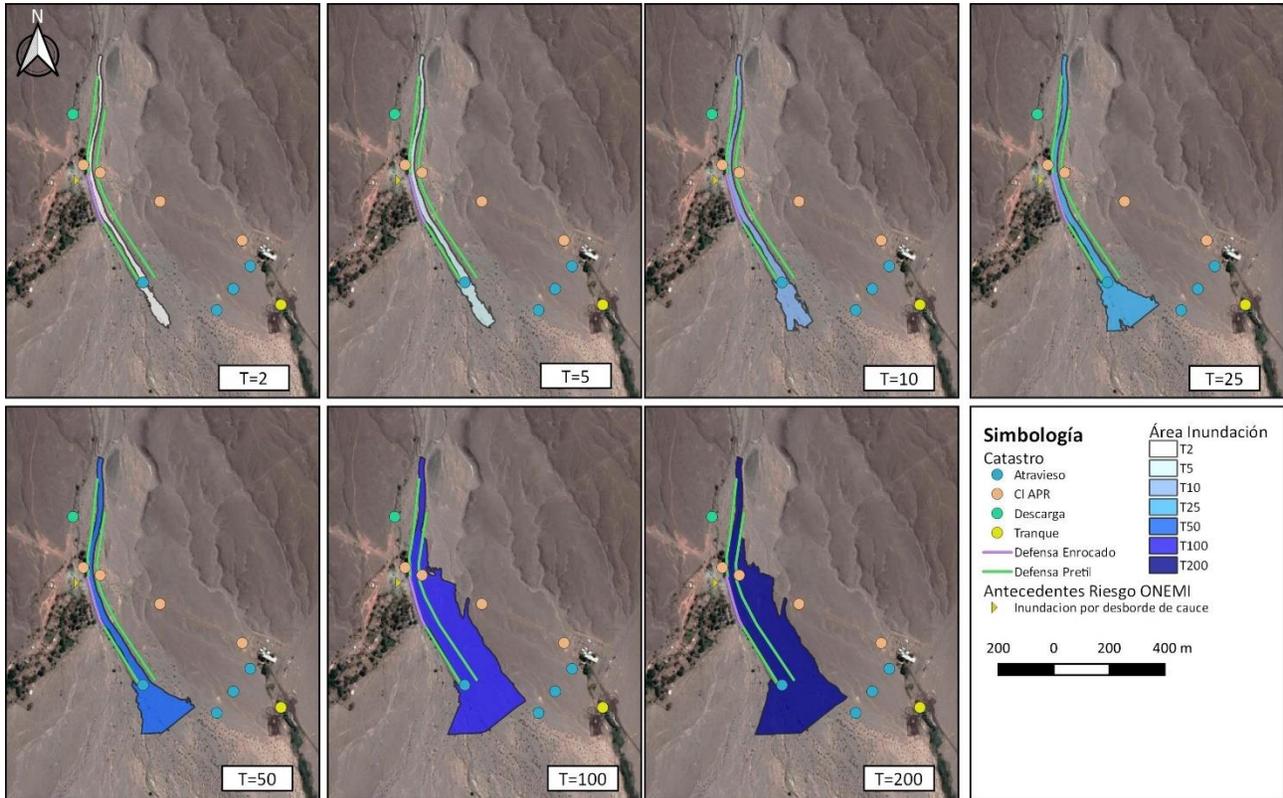


FIGURA 5-12: INUNDACIONES EN SECTOR 4 RÍO SAN VILAMA, SEGÚN T

Fuente: Elaboración propia.

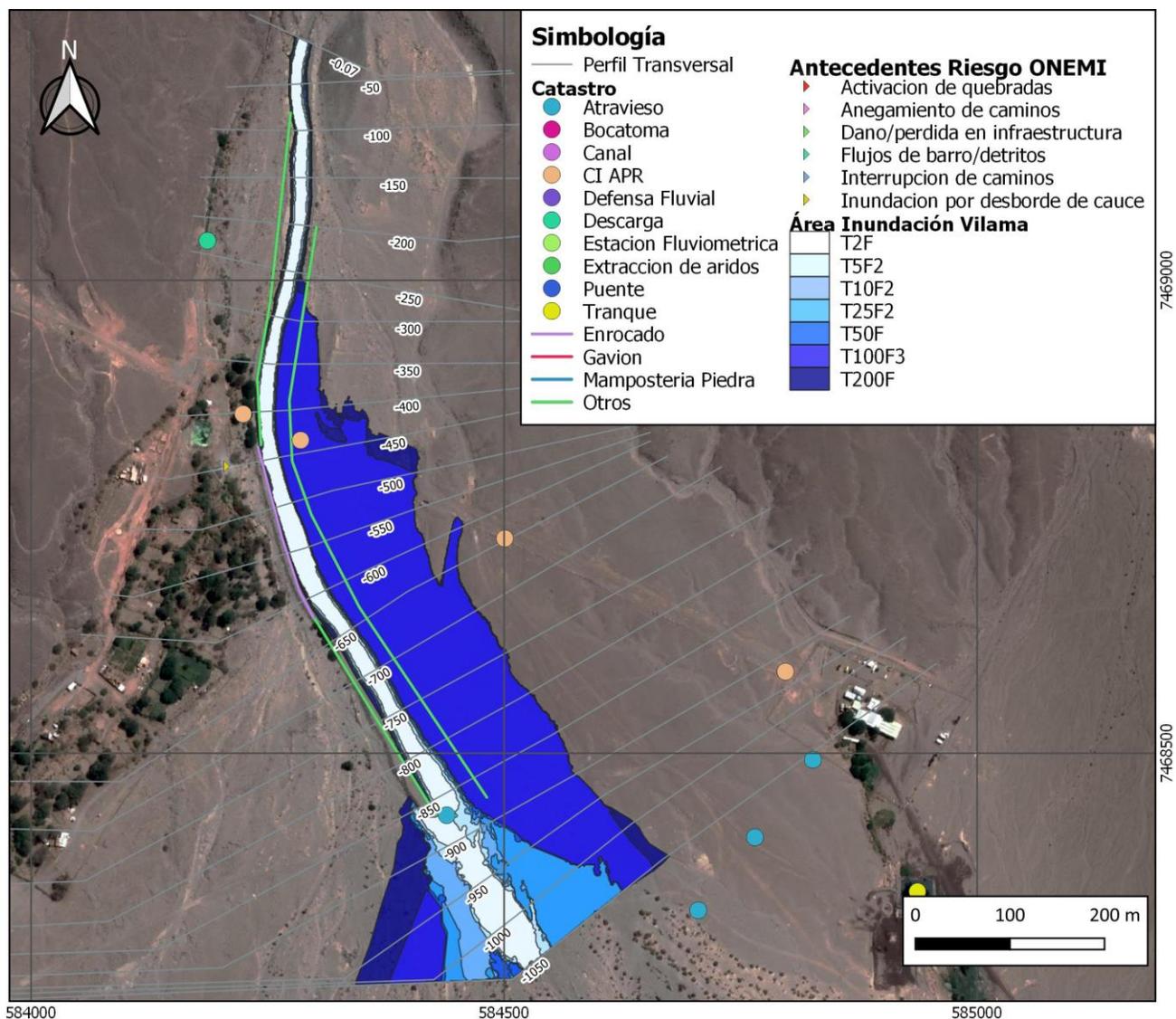


FIGURA 5-13: ÁREAS DE INUNDACIÓN SECTOR 4 RÍO SAN VILAMA

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 5-15 se detalla los principales resultados del análisis hidráulico de cada uno de los puntos relevantes que se ven afectados por las crecidas. Se detalla en cada punto la ubicación según km del cálculo de eje hidráulico (HEC-RAS), y para cada Período de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, se detalla el caudal, la velocidad y la altura de agua correspondiente.

CUADRO 5-15: PUNTOS RELEVANTES DEL SECTOR 4 QUE SE AFECTAN CON LAS CRECIDAS

Punto Interés	KM	T (años)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Altura de agua (m)	Observaciones
Pretil de tierra en ambas riberas	-250	2	16	2.2	0.9	Velocidad potencialmente erosiva
	-250	5	38	2.9	1.3	Velocidad potencialmente erosiva
	-250	10	53	3.2	1.6	Velocidad erosiva
	-250	25	73	3.4	1.8	Velocidad erosiva
	-250	50	88	3.6	2.0	Velocidad erosiva
	-250	100	103	3.7	2.2	Velocidad erosiva. Se produce desborde en ribera izquierda
	-250	200	118	3.8	2.3	Velocidad erosiva. Se produce desborde en ribera izquierda
Cámara inspección APR	-400	2	16	2.3	0.7	Velocidad potencialmente erosiva
	-400	5	38	2.8	1.1	Velocidad potencialmente erosiva
	-400	10	53	3.1	1.3	Velocidad erosiva
	-400	25	73	3.4	1.5	Velocidad erosiva
	-400	50	88	3.6	1.6	Velocidad erosiva
	-400	100	103	3.7	1.8	Velocidad erosiva
	-400	200	118	3.9	1.9	Velocidad erosiva
Defensa de enrocados	-550	2	16	1.9	0.7	
	-550	5	38	2.7	0.9	Velocidad potencialmente erosiva
	-550	10	53	3.2	1.0	Velocidad erosiva
	-550	25	73	3.7	1.1	Velocidad erosiva
	-550	50	88	4.0	1.2	Velocidad erosiva
	-550	100	103	4.3	0.7	Velocidad erosiva
	-550	200	118	5.8	0.6	Velocidad erosiva
Instalaciones APR	-950	2	16	1.2	0.7	
	-950	5	38	1.69	0.9	
	-950	10	53	1.62	1.0	
	-950	25	73	1.73	1.0	
	-950	50	88	1.78	1.1	
	-950	100	103	0.02	1.1	
	-950	200	118	0.02	1.1	

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Identificación, Caracterización Socioeconómica y Valoración Económica de los Daños del Evento de febrero de 2019

5.3.1. Caracterización Socioeconómica de los Sectores Afectados por el Evento de Febrero del 2019

5.3.1.1. Introducción

El territorio estudiado se caracteriza por la ocupación del área urbana en torno al pueblo de San Pedro de Atacama y a los ayllus cercanos.

Los ayllus de San Pedro de Atacama, denominados así por ser tradicionalmente unidades socioterritoriales de familias, se caracterizan por ser agrupaciones de tierras aisladas con bosques, que en su interior contienen estructuras prediales en las que se practican la agricultura bajo riego. Estas “islas” de bosques y tierras fértiles, son pequeños oasis rodeados de tierras de desierto. Cada unidad territorial puede contener uno o más ayllus que estuvieron ocupados, y en la mayoría de los casos lo siguen estando, por linajes y relaciones de parentesco entre familias atacameñas que han heredado las tierras de sus ancestros o las han adquirido personas de otros pueblos del salar y de la puna (Rivera et al., 2015). El término indígena ayllu corresponde a la representación de un lugar y es empleado por las sociedades andinas para referirse a una síntesis paisajística integrada por componentes e interacciones de origen natural y social, físico y metafísico, material y simbólico, seres vivientes humanos y seres vivientes no-humanos, que sustentan las relaciones sociales en el tiempo-espacio y otorgan identidad cultural a sus habitantes a través de enjambres de relaciones entre los planos celestiales (cosmológico), terrenales y subterráneos, visibles e invisibles, presentes y pasados (Romero y Opazo, 2019). Es necesario decir que la historia del riego en los ayllus de Atacama ha estado asociada al desarrollo cultural atacameño desde períodos prehispánicos (Rivera et al., 2015). La ubicación de los ayllus se presenta en la Figura 5-14.

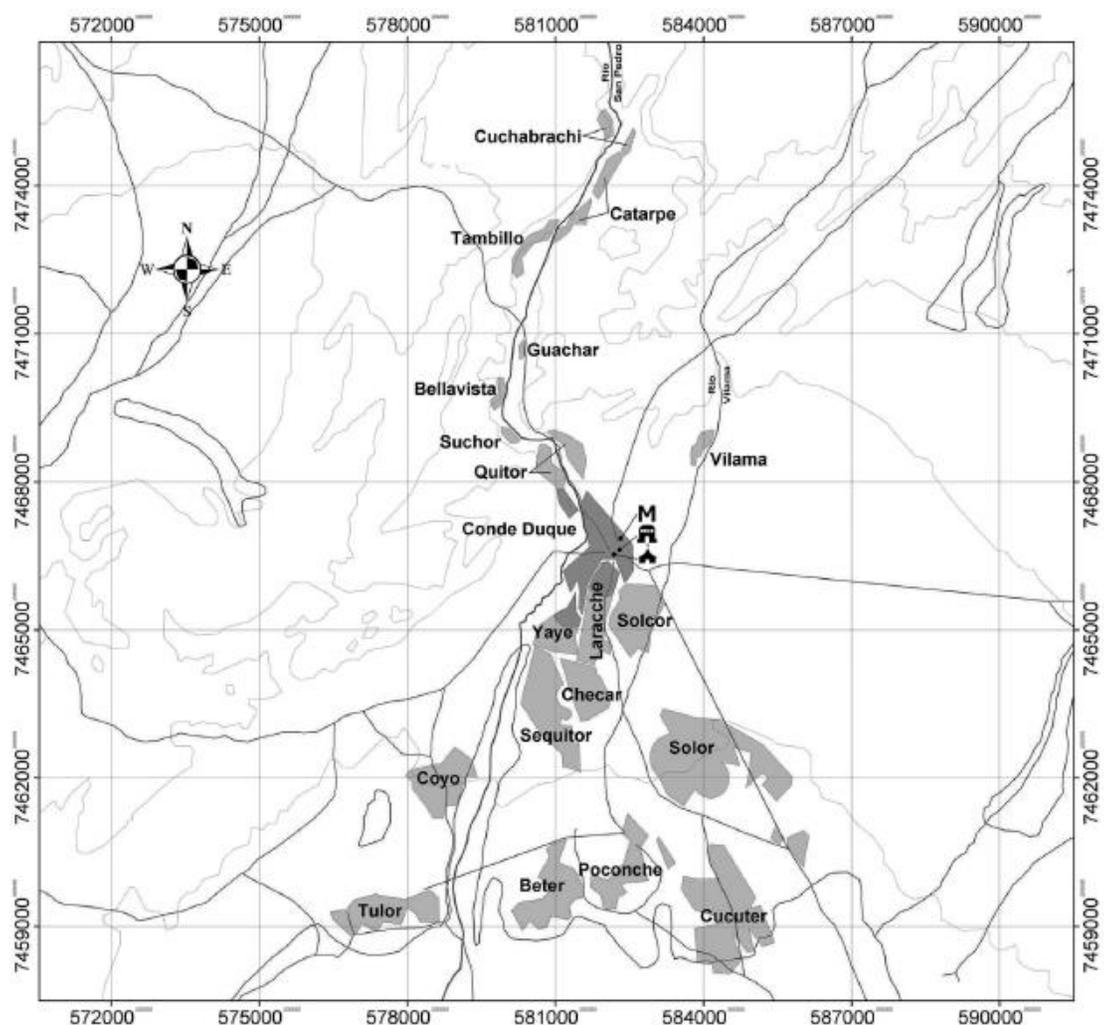


FIGURA 5-14: CROQUIS SAN PEDRO DE ATACAMA Y SUS AYLLUS

Fuente: Rivera et al., 2015.

Según el PLADECO 2017-2021, es posible diferenciar grupos de ayllus por la cercanía que tienen respecto del área urbana de San Pedro de Atacama, por la relación funcional con dicha localidad y por su accesibilidad, separándolos en tres grandes grupos:

- El sector norte, de ayllus más aislados, que conservan actividades agropecuarias y una mínima cantidad de población con residencia permanente (Vilama, Suchor, Bellavista, Guachar, Tambillo, Catarpe y Cuchabrache).
- El sector central, periférico a San Pedro de Atacama y que se caracteriza por la ocupación que combina los usos urbanos con una actividad agrícola bastante desarrollada (Quitor, Yayo, Larache, Solcor, Checar, Séquitor); y
- El sector sur, formado por ayllus independientes entre sí, conectados con San Pedro mediante caminos rurales, como Solor y Coyo.

5.3.1.2. Población

Según el Censo de 2017, San Pedro de Atacama tiene una población de 10.996 personas, con un elevado índice de masculinidad (127), y un crecimiento poblacional anual de un 8% para el período intercensal 2002-2017 (121 % en total). Ello significa que, en solo 15 años, la población ha crecido a más del doble, lo que contrasta con el lento crecimiento demográfico que ha experimentado el país en el mismo período. El mismo Censo distingue también a aquellos “residentes habituales”, los que sitúa en 8.376 personas, cifra bastante menor al total de la población censada. El Cuadro 5-16: presenta las poblaciones totales a nivel comunal y regional, así como el crecimiento poblacional para el período en cuestión. Como en él puede observarse, San Pedro de Atacama presenta cifras de crecimiento muy superiores a las del resto de la región, situación que puede incidir en el crecimiento urbano y la eventual ocupación de terrenos no aptos para la vivienda.

CUADRO 5-16: POBLACIÓN TOTAL Y CRECIMIENTO POBLACIONAL 2002-2017

Censo	Comuna de San Pedro de Atacama	Región de Antofagasta
Población Censo 2002	4.969	493.984
Población Censo 2017	10.996	607.534
Crecimiento Inter Censal	121%	20%
Crecimiento anual	8%	1.3%

Fuente: Elaboración propia a partir de censos 2002 y 2017.

Para la caracterización socioeconómica, se utiliza la información censal de cada uno de los sectores (INE, 2017) desde aguas arriba hacia aguas abajo, presentando finalmente el sector de Vilama. Esta información es presentada en el Cuadro 5-17: .

CUADRO 5-17: INFORMACIÓN CENSAL

Sector	Población Total (n°)	Hombres (n°)	Mujeres
Cuchabrachi	7	Indeterminado	Indeterminado
Catarpe	42	23	19
Quitor	292	151	141
Condeduque	159	89	70
Yaye	222	112	110
Séquiton	220	123	97
Coyo	152	82	70
Tulor	17	Indeterminado	Indeterminado
Vilama	7	Indeterminado	Indeterminado
Manzana 79*	25	14	11

*Dentro del área de estudios solamente se encuentra una manzana urbana.

Fuente: INE, 2017.

En todos los sectores que poseen datos se aprecia una mayor proporción de población de hombres, respecto de la de mujeres.

La población de San Pedro de Atacama presenta una tendencia al envejecimiento de su población. Esto, porque la pirámide de edad ha ido engrosando la parte media de edades entre 30 y 44 años, que mayor que el país y la región, tal como se aprecia en el Cuadro 5-18: .

CUADRO 5-18: DISTRIBUCIÓN POBLACIÓN POR GRUPOS DE EDAD

Grupos de Edad	San Pedro de Atacama	Región	País
0 a 14	19,66%	21,13%	19,21%
15 a 29	24,05%	24,98%	27,37%
30 a 44	29,74%	24,48%	22,50%
45 a 64	19,25%	21,50%	23,80%
65 o más	7,30%	7,91%	12,12%
Total	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia, en base a estadísticas del Censo 2017.

La distribución etaria también se caracteriza para los sectores en el Cuadro 5-19.

CUADRO 5-19: DISTRIBUCIÓN POBLACIÓN SECTORES ESTUDIADOS POR GRUPOS DE EDAD

Sector	0-5 años	6-14 años	15-64 años	65 o más años
Cuchabrachi	0	0	Indeterminado	Indeterminado
Catarpe	Indeterminado	Indeterminado	28	5
Quitor	18	17	228	29
Condeduque	15	15	121	8
Yaye	9	13	188	12
Séquitor	17	20	158	25
Coyo	17	15	106	14
Tulor	0	0	Indeterminado	Indeterminado
Vilama	0	Indeterminado	5	Indeterminado
Manzana 79*	Indeterminado	Indeterminado	20	Indeterminado

*Dentro del área de estudios solamente se encuentra una manzana urbana.

Fuente: INE, 2017.

5.3.1.3. Pertenencia a pueblos originarios

Un 52% de los habitantes de la comuna declaró pertenecer a algún pueblo originario. Dentro de ese total, un 74% se definió como perteneciente al pueblo Lican Antai. Ambas cifras se encuentran muy por sobre las regionales y nacionales y dan cuenta de la gran relevancia que posee la población indígena en el territorio. Ello se expresa, por ejemplo, en la existencia del Área de Desarrollo Indígena Atacama La Grande, creada en 1997 y en la existencia del Consejo de Pueblos Atacameños, que se articula como una instancia de reunión de los presidentes de las comunidades. Por ello, la efectiva consideración de la realidad indígena de la comuna será un elemento que acompañe permanentemente al estudio. Como pudo observarse en la figura del área de estudio, al menos 5 comunidades atacameñas, o Lican Antai, se encuentran al interior de los límites definidos para este proyecto.

De esta forma y como lo muestra el Cuadro 5-20: , el 37% de los habitantes de San Pedro de Atacama está representada por personas al pueblo Lican Antai (Atacameño) según datos del Censo 2017.

CUADRO 5-20: POBLACIÓN SEGÚN PUEBLO ORIGINARIO DECLARADO

Pueblo	Total	%
Alacalufe	5	0,05
Atacameño	4.068	37,95
Aymara	335	3,13
Colla	25	0,23
Mapuche	341	3,18
Quechua	531	4,95
Rapa Nui	4	0,04
Yámana	2	0,02
Diaguita	80	0,75
Otro pueblo	132	1,23
Total, pueblos originarios	5.523	51,53
Total, no pueblos originarios	5.196	48,47
Total, población comunal	10.719	100

Fuente: Elaboración propia, en base a estadísticas Censo 2017.

Para los sectores estudiados, la información posible de extraer respecto de la pertenencia a algún pueblo indígena u originario corresponde solamente al número total de personas que se considera en este grupo. El total para cada sector se presenta en el Cuadro 5-21: .

CUADRO 5-21: DISTRIBUCIÓN POBLACIÓN QUE SE CONSIDERA PERTENECIENTE A ALGÚN PUEBLO INDÍGENA U ORIGINARIO

Sector	Población pueblo indígena u originario (n°)	% población indígena
Cuchabrachi	6	85,7
Catarpe	32	76,2
Quitor	99	33,9
Condeduque	68	42,8
Yaye	82	36,9
Séquiton	113	51,4
Coyo	106	69,7
Tulor	Indeterminado	Indeterminado
Vilama	5	71,4
Manzana 79*	12	48,0

*Dentro del área de estudios solamente se encuentra una manzana urbana.

Fuente: INE, 2017.

5.3.1.4. Pobreza

En Chile existen dos formas de medir la pobreza. La primera corresponde a la pobreza por ingreso, que se define a partir de una canasta básica de alimentos, cuyo valor se actualiza según la evolución de los precios y se viene implementando desde el año 1987. Con ese valor se definen la línea de indigencia y la línea de pobreza respectivamente. La pobreza por ingresos es “medida como el porcentaje de personas cuyo ingreso es insuficiente para satisfacer sus necesidades básicas, es decir, que pertenecen a hogares cuyos ingresos no son suficientes para satisfacer las necesidades básicas de sus miembros”¹.

La segunda corresponde a la pobreza multidimensional, que es un “...método que busca determinar las carencias que sufren los hogares en distintas dimensiones del bienestar y luego suma estas carencias para identificar a los hogares en situación de pobreza multidimensional”². Las dimensiones corresponden a educación, salud, trabajo, seguridad social y vivienda.

En este contexto, según cifras de la encuesta CASEN 2017, se presenta el Cuadro 5-22: donde se muestra la pobreza en la población comunal en relación a la región y el país. De esta información es posible determinar que la comuna de San Pedro de Atacama supera la pobreza de la región de Antofagasta y del país, en la categoría de pobreza multidimensional. Sin embargo, es menor si consideramos la pobreza por ingresos en relación a la región y país.

CUADRO 5-22: TASA DE POBREZA POR INGRESO Y MULTIDIMENSIONAL

Territorio	% de Personas en Situación de Pobreza	
	Por ingreso	Multidimensional
Comuna San Pedro	4,04	22,05
Región de Antofagasta	5,1	16,4
País	8,6	20,7

Fuente: Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN 2017).

En el PLADECO 2017-2021 se describe con mayor detalle la situación de vulnerabilidad social de la comuna, según unidades donde se pueden distinguir las pertenecientes al sector estudiado (Ver Cuadro 5-23:), en que los tramos de mayor vulnerabilidad y bajos ingresos corresponden a las columnas entre el tramo 40 y el tramo 70.

¹ Pobreza Multidimensional en Chile: Una nueva mirada, Ministerio de Desarrollo Social, 2014.

² Pobreza Multidimensional en Chile: Una nueva mirada, Ministerio de Desarrollo Social, 2014.

CUADRO 5-23: TOTAL POBLACIÓN DE SAN PEDRO DE ATACAMA POR TRAMO DE CALIFICACIÓN SOCIOECONÓMICA, SECTORES ESTUDIADOS

Agregado Territorial	Tramo 40	Tramo 50	Tramo 60	Tramo 70	Tramo 80	Tramo 90	Tramo 100	Total
AYLLU CONDE DUQUE -ST	163	41	32	29	21	85	41	412
CAMAR -CI	23	5	2	5	4	2	1	42
CATARPE -CI	2	4	0	0	0	0	0	6
CONDE DUQUE -PB	151	18	16	24	23	44	11	287
COYO -CI	30	7	0	14	7	6	8	72
CUCHABRACHE -ST	3	0	0	0	0	0	0	3
HUACHAR -ST	0	0	0	0	0	2	0	2
QUITOR -CI	35	9	10	29	12	13	19	127
SEQUITOR -CI	81	13	15	9	2	13	22	155
TULOR -CI	1	0	0	3	0	0	0	4
VILAMA -ST	16	0	0	4	0	0	0	20
YAYE -CI	33	9	3	3	4	4	7	63

Fuente: Registro social de hogares, octubre 2017, en PLADECO.

5.3.1.5. Actividad Económica y Empleo

En términos económicos, San Pedro de Atacama se ha ido consolidando como un destino turístico privilegiado, buscando posicionarse en tanto capital arqueológica de Chile y dando valor a atributos como el desierto, la astronomía y la arqueología. Alrededor del desarrollo turístico se ha articulado un clúster económico, que incluye servicios turísticos, gastronomía, hotelería, transporte, entre otros. Es por ello, que cualquier intervención territorial debe considerar los valores paisajísticos y turísticos de la comuna a la hora de confeccionar ideas de proyectos.

El Cuadro 5-24: presenta la información de número de empresas por tamaño y el número de trabajadores por rama de actividad al año 2016, según reportes comunales de la Biblioteca del Congreso Nacional y la información territorial comunal.

CUADRO 5-24: NUMERO DE EMPRESAS SEGÚN TAMAÑO SEGÚN DATOS DE SII, AÑOS 2014-2016, SAN PEDRO DE ATACAMA

Tamaño Empresa	Comuna			Región			País		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Micro	402	505	511	10.485	11.323	11.105	560.916	564.626	577.698
Pequeña	745	739	826	49.277	52.092	50.976	1.787.437	1.813.497	1.828.392
Mediana	531	572	611	40.047	41.519	40.964	1.440.806	1.469.424	1.474.656
Grande	0	0	0	76.577	69.932	65.024	4.555.357	4.484.744	4.516.347
Sin ventas	8	12	13	9.405	9.522	9.694	580.156	607.413	640.694
Total	1.686	1.828	1.961	185.791	184.388	177.763	8.924.672	8.939.704	9.037.787

Fuente: SII (2018).

En lo relativo a las ramas de la actividad económica, la comuna de San Pedro de Atacama concentra su actividad en Comercio al por mayor/ menor y en Hoteles y restaurantes, lo que se condice con número de trabajadores por rubro los cuales se concentran en estas ramas económicas.

CUADRO 5-25: NÚMERO DE TRABAJADORES POR RAMA DE ACTIVIDAD ECONÓMICA, SEGÚN DATOS DE SII, AÑOS 2014-2016

Rubro Empresa	Comuna			Región			País		
	2014	2015	2016	2014	2015	2016	2014	2015	2016
Agricultura, Ganadería, Caza y Silvicultura	36	40	30	1.310	1.242	1.476	1.014.130	1.012.690	1.007.039
Pesca	0	0	0	812	617	406	92.997	85.275	77.761
Explotación De Minas y Canteras	0	0	0	10.581	11.863	9.735	117.476	111.757	102.305
Industrias Manufactureras No Metálicas	113	161	142	11.032	10.996	10.850	757.170	739.056	731.526
Industrias Manufactureras Metálicas	19	26	27	20.876	18.117	16.260	421.341	404.877	392.759
Suministro De Electricidad, Gas y Agua	33	42	47	3.156	4.129	3.697	71.134	72.356	69.181
Construcción	111	108	111	46.714	45.864	42.043	1.450.460	1.434.225	1.431.107
Comercio Al Por Mayor y Menor, Repuestos vehículos/Enseres Domésticos	513	491	514	1.011.691	1.022.311	1.055.425	1.423.595	1.440.507	1.484.304
Hoteles y Restaurantes	527	567	627	9.159	9.556	9.160	304.915	324.377	331.878
Transporte, Almacenamiento y Comunicaciones	45	56	86	12.744	11.936	12.128	490.545	485.464	493.584
Intermediación Financiera	0	0	0	866	988	1.441	250.003	263.745	270.762
Actividades Inmobiliarias, Empresariales y De Alquiler	17	21	22	18.873	18.274	18.206	1.188.020	1.164.950	1.197.007
Adm Publica y Defensa, Planes de Seg Social Afiliación Obligatoria	0	0	0	6.025	6.786	6.804	386.359	399.738	411.714
Enseñanza	0	0	0	7.977	8.315	8.951	451.777	466.663	484.458
Servicios Sociales y de Salud	265	310	343	4.805	4.816	4.627	235.263	247.119	257.528
Otras Actividades de Servicios Comunitarias, Sociales y Personales	7	6	12	4.012	4.047	3.895	260.072	276.375	283.794
Consejo de Administración de Edificios y Condominios	0	0	0	93	136	192	7.974	8.799	9.087
Organizaciones y Órganos Extraterritoriales	0	0	0	0	0	0	399	423	427
Sin información	0	0	0	9	25	23	1.042	1.308	1.566

Fuente: SII (2018).

El empleo en San Pedro de Atacama está directamente relacionado con la actividad turística, la cual tiene una alta gama de ofertas laborales que pueden ser de tipo informal, temporal, profesional y de servicios. Por otro lado, otras actividades comerciales, de servicios y de emprendimiento también generan ocupación de diferente índole (PLADECO, 2017).

El desarrollo y crecimiento de un turismo no planificado y poco regulado, está generando externalidades negativas que afectan la calidad de vida de la población comunal y que pueden menoscabar la cultura tradicional del pueblo atacameño. La falta de ordenamiento urbano, la informalidad de las actividades comerciales, la llegada de cargas turísticas que sobrepasan la capacidad

instalada de provisión de servicios urbanos (agua potable, vialidad, alcantarillado, estacionamientos, entre otros), son factores críticos que condicionarán el tipo de desarrollo presente y futuro de la comuna. El turismo puede ser un beneficio para todos, pero debe ser planificado participativamente y sus actividades reguladas de acuerdo a la normativa vigente y a objetivos de desarrollo compartidos y validados por la comunidad local y sus autoridades (PLADECO, 2017).

Dentro del área estudiada se presentan actividades de agricultura y ganadería. La agricultura del sector corresponde a unas 500 ha, en que los predios se concentran en aquellos menores a 1 ha. En general, la agricultura en la comuna de San Pedro de Atacama, corresponde a explotaciones productivas de subsistencia o al tipo de agricultura de autoconsumo que abastece de productos para la alimentación familiar y el intercambio. A pesar de la disminución de la superficie de explotación, la agricultura se niega a desaparecer debido al fuerte arraigo cultural con los ritos a la tierra, la fertilidad y a las celebraciones que recuerdan a los antepasados. Debido al desarrollo de la actividad agrícola se ha dado forma al oasis como paisaje natural y cultural (PLADECO, 2017). Al formar parte de actividades de subsistencia, su peso no se visualiza en la información cuya fuente es el SII,

La estructura de participación de los cultivos tradicionales tiene relación, a modo general, con la existencia y mantención de prácticas y técnicas intergeneracionales o ancestrales de manejo de los cultivos. Estas se han ido adaptando para enfrentar las condiciones productivas, ya sea por falta de agua, mano de obra, condiciones climáticas y otras condicionantes económicas productivas. En el caso de la alfalfa, este cultivo ocupa la mayor superficie en los ayllus de San Pedro de Atacama, debido a la relevancia que tiene en el mantenimiento del ganado, y la duración de muchos años de la planta, que ofrece en promedio tres cosechas al año y tiene una baja demanda de mano de obra. La alfalfa, además, es una especie vegetal adaptada a las condiciones de sequía, soportando riego cada 40 días. Sin embargo, la productividad de esta forrajera es baja pues se encuentra en la mayoría de los predios “enchampada”, o sea, agrupada de modo discontinuo en los potreros, debido a que tienen edad de siembra de entre veinte a cincuenta años y el manejo es muy básico (Rivera et al., 2015).

En la Figura 5-15 se puede apreciar la presencia territorial de la actividad agrícola, donde se puede visualizar el área predial que abarca.

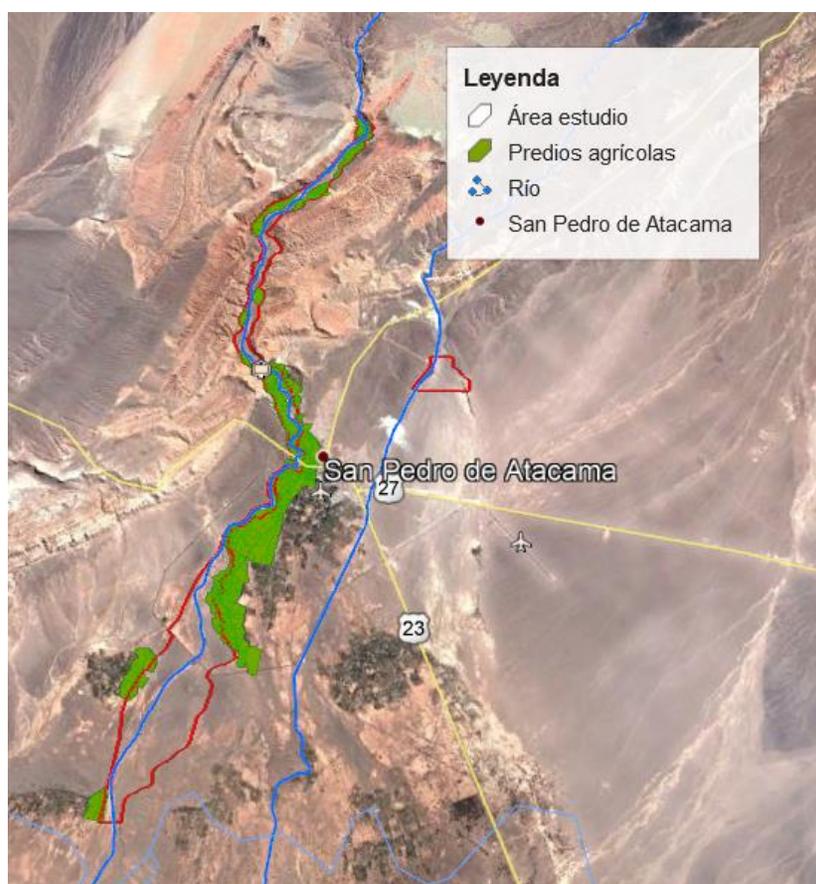


FIGURA 5-15: PREDIOS REGADOS RÍO SAN PEDRO

Fuente: Elaboración propia.

El riego se realiza a partir del río San Pedro, regándose por medio de una compleja red de canales, los ayllus que forman parte del denominado Oasis de San Pedro de Atacama. El sistema de turnos se encuentra conformado por 7 grupos de riego, los que se organizan por medio de un sistema de turnos, grupo N°1: Cuchabrache, Tambillo, Suchor, Guachar y Quitar; grupo N°2: Conde Duque (una parte), Yaye y Checar; grupo N°3: Conde Duque (una parte), Larache y Solcor; grupo N°4: Séquiton y Coyo; grupo N°5: Solor; grupo N°6: Cúcuter; y grupo N°7: Conde Duque (Estanque).

En las distintas entrevistas realizadas se indican daños tanto en los predios agrícolas como en los canales de riego, tranques, sifones, entre otra infraestructura (este aspecto se trata en el acápite de caracterización de daños). Además, se comenta que en ocasiones los trabajos que se realizan con maquinaria de emergencia dejan las bocatomas “colgadas”, lo que interrumpe el abastecimiento del sistema de riego. Esos mismos trabajos remueven la vegetación del cauce, la que es utilizada para el control de las crecidas.

En el sector de Catarpe en entrevista se señaló que en la crecida de 2019 se tardaron 3 meses en recuperar los canales, lo que ocasionó daños en la producción en toda la comunidad.

5.3.1.6. Educación

En términos educativos, la comuna de San Pedro de Atacama cuenta con una oferta total de 9 establecimientos educacionales en los que, según cifras del MINEDUC, estudian 1.618 alumnos para el año 2017. En la localidad de San Pedro de Atacama se ubican el Liceo Agrícola C-30F (7º básico a 4º medio) y la Escuela E-26 (educación parvularia hasta 8º básico).

5.3.1.7. Salud

En relación a los servicios de salud, en San Pedro de Atacama existe un departamento de Salud Municipal, el que tiene a su cargo 1 consultorio general rural ubicado en San Pedro de Atacama y 4 postas de salud rural ubicadas en Toconao, Peine, Socaire y Río Grande.

5.3.1.8. Cantidad y calidad de infraestructura de transporte

La principal vía de acceso a la comuna de San Pedro de Atacama es la Ruta 23, que conecta a la cabecera comunal con la ciudad de Calama para internarse varios kilómetros al sur de la localidad de San Pedro de Atacama. Variados caminos estructuran la red vial, lo que se presenta en la Figura 5-16.

Hacia los sectores estudiados en el río San Pedro los caminos están en regular o mal estado, sin infraestructura para el tránsito de buses. Al interior de los ayllus las calles son angostas con muros hacia los callejones y carpeta de tierra.

El camino que se dirige al ayllu de Catarpe en algunos sectores es una huella que cruza de un lado al otro del río, por lo que no puede ser transitado por cualquier tipo de vehículo. Durante las crecidas importantes este camino queda inhabilitado, dejando a los sectores de Catarpe, Tambillo, Guachar y Cuchabrachi aislados por un lapso de algunos días.

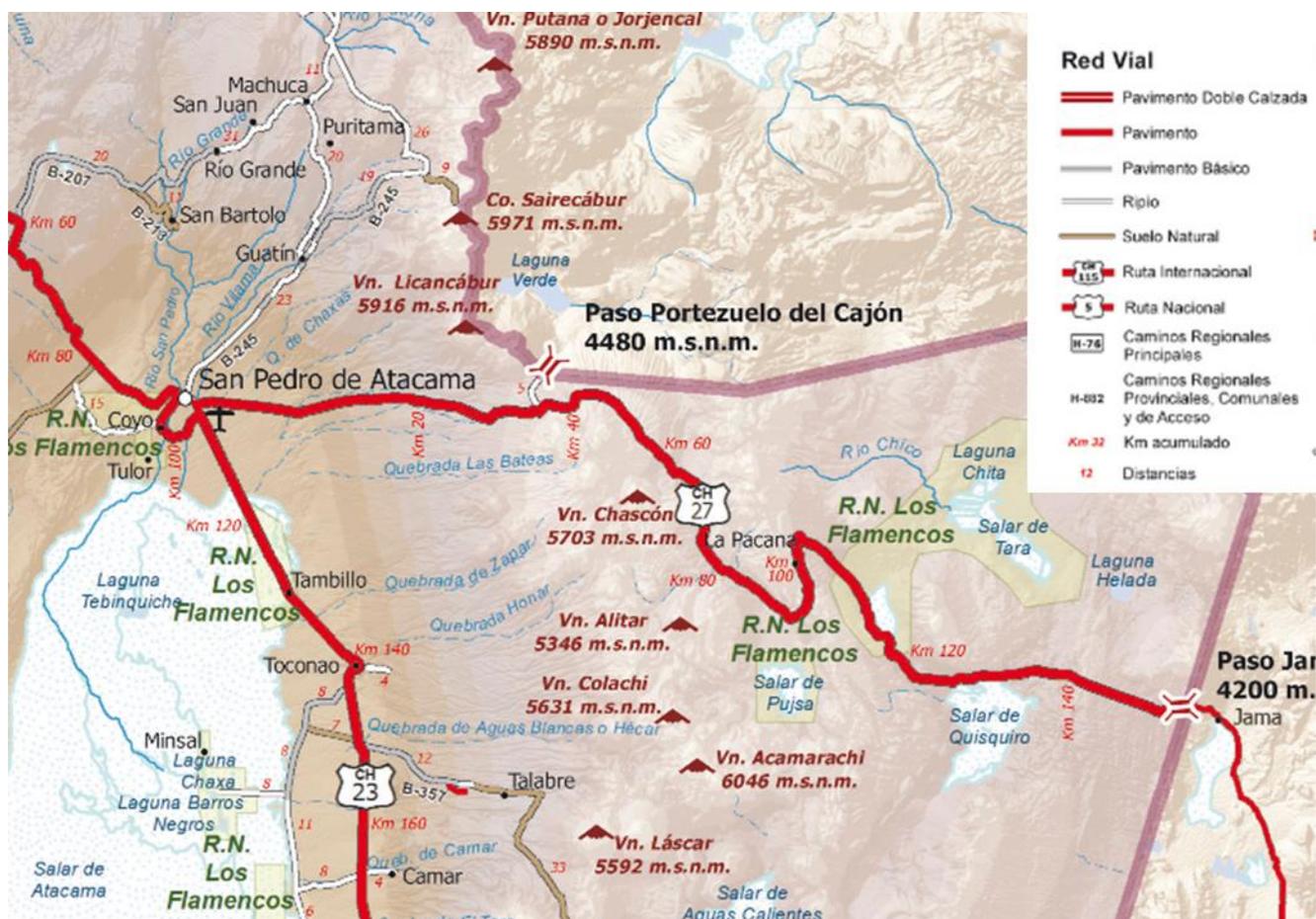


FIGURA 5-16: RED DE VIALIDAD

Fuente: Vialidad, 2021.

5.3.1.9. Vivienda

De acuerdo con el Censo 2017, en la comuna de San Pedro de Atacama hay 4.144 viviendas en total, de ellas 1.979 se ubica en zonas urbanas y 2.165 en zona rural. Mientras que, en la ciudad de San Pedro de Atacama, zona urbana que se encuentra próxima al área de estudio, se registró un total de 1.954 viviendas.

A continuación, se presentan antecedentes relacionados a la presencia de viviendas en el área de estudio:

a) Viviendas identificadas según el catastro

Según el catastro realizado en terreno con fecha 9 de enero de 2021, cuyos detalles se encuentran en el Capítulo 6 del Volumen de Ingeniería de la Etapa 2C, se observó la presencia de una serie de casas particulares y de hospedaje ubicada a un costado de la caja del río San Pedro, además, de una propiedad correspondiente al Hotel Kunza, las cuales podrían verse afectadas ante crecidas del cauce.

b) Viviendas informales

Según el catastro realizado por TECHO-Chile (2020-2021)³, en San Pedro de Atacama se registran dos campamentos: El Carmen y Hoiri Ckunza Pari, los cuales abarcan 292 y 150 familias respectivamente, además, el 100% de ellas no posee acceso formal al agua potable y ha habido un aumento del 104% en el número de familias desde el 2019. Al respecto, en el estudio “Asentamientos Informales en San Pedro de Atacama: Discusión sobre las causas de su localización” (Quinteros, 2017) se identificaron como principales factores de estos asentamientos urbanos: el turismo, la inmigración y la necesidad de vivienda. Estos campamentos se encuentran a una distancia aproximada de 400 metros del río San Pedro.

Por otra parte, se identificó mediante informante en reunión PAC y en terreno, la presencia de una toma en el tramo urbano del río San Pedro, en el sector entre calle Domingo Atienza y el puente, donde se observa un estrechamiento importante del cauce y existen viviendas muy cercanas al borde del mismo, por lo que se podrían ver afectadas ante una crecida.

Aun cuando situaciones de crecimiento inorgánico como tomas de terrenos, no tienen todavía una intensidad relevante y, tomando en cuenta que por sí solo, la existencia de un Plan Regulador no ha impedido que ello suceda, el contar con un Instrumento de Ordenamiento Territorial puede agilizar la materialización de una oferta de vivienda que desincentive estos procesos (PLADECO, 2017).

5.3.1.10. Infraestructura de Agua Potable

El suministro de Agua potable en la localidad de San Pedro de Atacama se logra gracias a la planta del Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama (CAPRA), instalación que necesita producir cerca de 200 metros cúbicos por hora para satisfacer los requerimientos de la localidad y que debe hacer frente a una contaminación por arsénico mediante el proceso tecnológico denominado “Osmosis Inversa”, incorporado en 1999, que permite disminuir de 0,29 mg/l a 0,0004 mg/l.

La cobertura de Agua Potable alcanza en la comuna al 89,43%, calculo efectuado del siguiente modo: Viviendas con Conexión a Red de Agua Potable, según Último Censo / Viviendas de la Comuna, según el Último Censo x 100 (IVAP / IVC) *100²⁷. No obstante, esta alta cifra, la comuna sufre pérdidas de presión en los periodos de mayor afluencia de visitantes. San Pedro de Atacama es la comuna con mayor cantidad de usuarios APR de la Región de Antofagasta, con 7.920 usuarios.

Para los sectores estudiados, la cobertura del origen del agua para consumo es variable, como se puede apreciar en el Cuadro 5-26.

³ TECHO-Chile. Catastro Nacional de Campamentos 2020-2021. Disponible en: <<https://ceschile.org/catastro/>>

CUADRO 5-26: ORIGEN DEL AGUA EN LA VIVIENDA

Sector	Cantidad de viviendas con origen del agua por red pública	Cantidad de viviendas con origen del agua por pozo o noria	Cantidad de viviendas con origen del agua por camión aljibe	Cantidad de viviendas con origen del agua por río, vertiente, estero, canal, lago, etc.
Cuchabrachi	0	0	4	0
Catarpe	1	2	3	4
Quitor	80	0	0	0
Condeduque	41	2	2	1
Yaye	42	1	1	1
Séquitur	83	0	0	1
Coyo	49	0	1	0
Tulor	0	7	4	0
Vilama	0	0	4	0

Fuente: INE, 2017.

5.3.2. Cuantificación y Valorización de Daños Producto del Evento de Febrero del 2019

5.3.2.1. Gestión para la recopilación de información

Los antecedentes que se presentan a continuación corresponden a una aproximación de la cuantificación y valorización de los daños en el área de estudio producto de las crecidas aluvionales de febrero de 2019.

Para la cuantificación y valorización de los daños se recurrió a información que han generado las instituciones gubernamentales, principalmente, cuyo respaldo de solicitudes se encuentra en el Anexo 5-3-1. Además, para complementar se realizó la búsqueda de información secundaria y en línea asociada al evento aluvional de febrero de 2019. Por otra parte, se realizaron encuestas de catastro de daños, las que se encuentran en el Anexo 5-3-2.

Sin embargo, en algunos casos no se ha contado con la información suficiente para cuantificar y valorizar de forma más aproximada los daños productos del evento, lo que ha significado recurrir a fuentes alternativas y en algunos casos a estimaciones indirectas.

5.3.2.2. Población fallecida o desaparecida

La información asociada a las personas fallecidas o desaparecidas en el evento de febrero de 2019 se ha obtenido directamente de los reportes de la Dirección Regional de la ONEMI Región de Antofagasta. De este modo, en los Informes de Incidente o de Emergencia Regional (Anexo 5-3-3), en el resumen a nivel comunal, se pudo constatar que no hubo personas fallecidas y tampoco se indica la existencia de denuncias de presunta desgracia que pudiesen catalogarse como personas desaparecidas.

5.3.2.3. Situación de las Viviendas

a) Viviendas afectadas en crecida de 2019

Según los reportes de la ONEMI, en base a información entregada por la Dirección Comunal de Protección Civil y Emergencias (DCPCE), se identificó para la comuna un total de 244 viviendas destruidas, 64 viviendas con daño mayor no habitable y 32 viviendas con daño menor habitable.

Por otra parte, en base a la información entregada por el MINVU (Anexo 5-3-4) se obtuvo el número de las viviendas dañadas por las lluvias altiplánicas del año 2019 en el área de estudio, para lo cual se dividieron en aquellas afectadas por las lluvias y aquellas afectadas por las crecidas, considerando este último tipo de afectación para el análisis en la cuantificación del daño. En la Figura 5-17 se presenta la ubicación de las viviendas mencionadas. Principalmente, dichas viviendas afectadas se encuentran en los sectores de Quitar, Conde Duque y San Pedro de Atacama, las cuales fueron afectadas especialmente en sus muros (interiores y exteriores), puertas, pisos y techumbre.

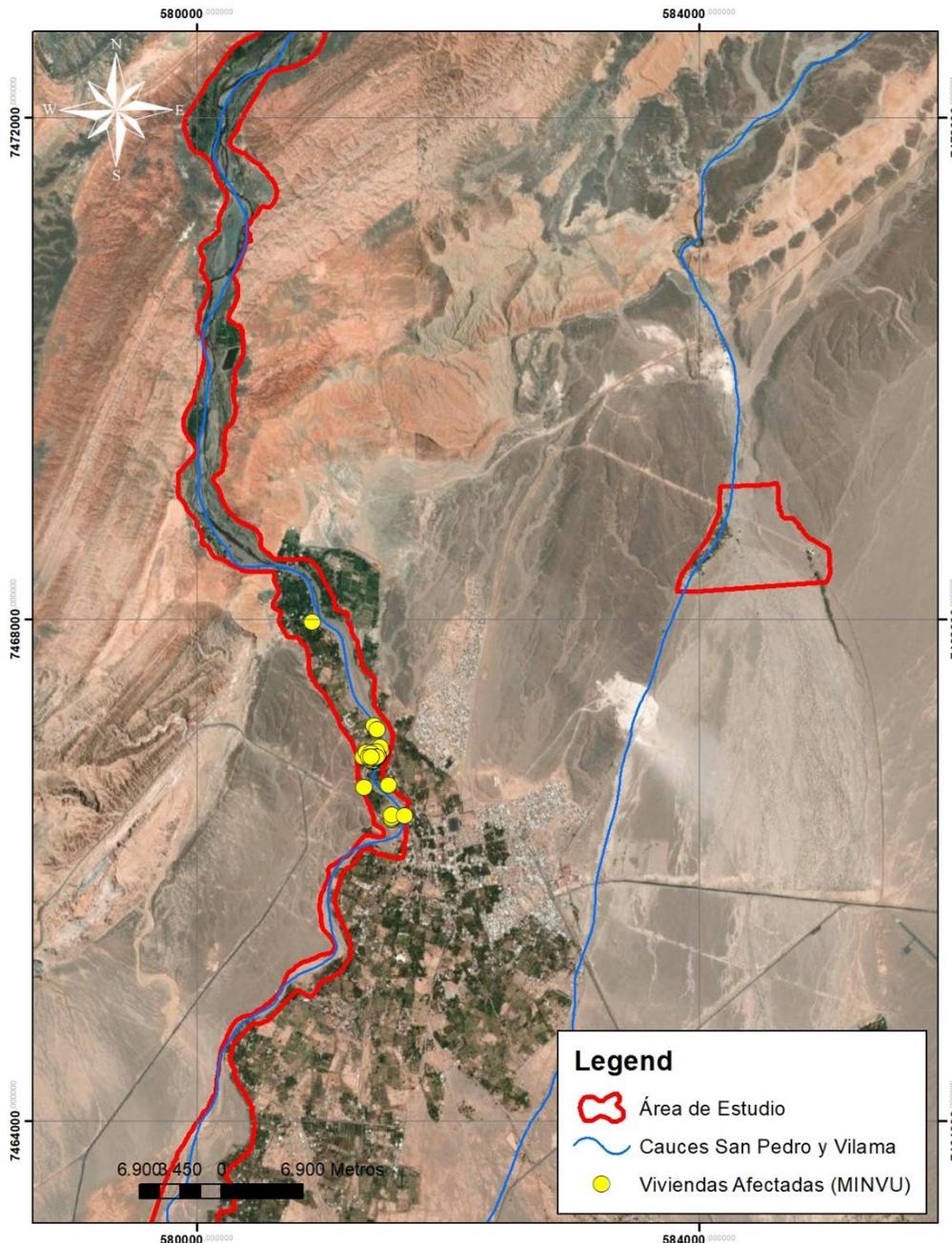


FIGURA 5-17: VIVIENDAS AFECTADAS POR CRECIDAS 2019.

Fuente: MINVU, 2019.

Para estas viviendas afectadas por las crecidas del 2019 se determinó la altura de inundación en base a la información y fotos disponible en las Fichas Básicas de Emergencia (FIBE) (Anexo 5-3-3), categorizándola en rangos y asociándola a daños en UF, según se define en la Metodología de Preparación y Evaluación de Proyectos de Defensas Fluviales del Ministerio de Desarrollo Social (2018). En el Cuadro 5-27 se presenta el número de viviendas afectadas categorizadas por daño según altura de inundación, viéndose afectadas 58 viviendas con una altura de inundación sobre los 60 cm y 5 con altura de inundación entre los 30 y 60 cm, lo que considerando el daño correspondiente en UF da un total de 7.857 UF en daño a las viviendas.

CUADRO 5-27: DAÑO DE VIVIENDAS AFECTADAS POR CRECIDAS 2019 SEGÚN ALTURA DE INUNDACIÓN

Altura de inundación (cm)	Descripción	El daño correspondiente (UF)	N° viviendas afectadas (MINVU)
≤ 20	No hay problemas de inundación al interior de la vivienda	0	0
> 20 y ≤ 30	Se inunda los pisos al interior de la vivienda	15,8	0
> 30 y ≤ 60	Se inunda total o parcialmente algunos enseres de la vivienda	89,0	5
> 60	Se inundan totalmente algunos enseres de la vivienda	127,8	58
TOTAL VIVIENDAS AFECTADAS POR CRECIDAS 2019			63

Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Desarrollo Social (2018) y MINVU (2019).

5.3.2.4. Número de Damnificados y Albergados

La ONEMI en su serie de Informes de Monitoreo cataloga la afectación de las personas como damnificadas, albergados, denuncias de presunta desgracia y fallecidos (estos últimos dos se presentan en el punto 7.1.2.).

a) Personas damnificadas

De acuerdo con el número de personas damnificadas, el Organismo Estatal declara en sus reportes un total de 334 damnificados para la comuna de San Pedro de Atacama.

b) Personas albergadas

En relación con los albergados, la ONEMI indica que en la comuna de San Pedro de Atacama sí hubo personas albergadas. En el Cuadro 5-28 se presenta un resumen con la cantidad de albergados y los albergues disponibles según la fecha del Informe de Monitoreo que lo reportó. Se puede observar que oficialmente hubo personas en 4 locales de albergue en el período comprendido entre el 30 de enero y el 16 de febrero.

CUADRO 5-28: NÚMERO DE PERSONAS ALBERGADAS Y ALBERGUES

Fecha Informe Monitoreo	N° de Albergados	Albergues
30-01-2019	8	Casa Parroquial de SPA
31-01-2019	0	Casa Parroquial de SPA
01-02-2019	99	Casa Parroquial de SPA (54), Centro de Madres de SPA (14) y Sede Social Alto del Carmen (31)
02-02-2019	99	Casa Parroquial de SPA (54), Centro de Madres de SPA (14) y Junta Vecinal Alto del Carmen (31)
03-02-2019	58	Escuela E-26
04-02-2019	70	Escuela E-26
05-02-2019	70	Escuela E-26
06-02-2019	61	Escuela E-26

CUADRO 5-28: NÚMERO DE PERSONAS ALBERGADAS Y ALBERGUES

Fecha Informe Monitoreo	N° de Albergados	Albergues
30-01-2019	8	Casa Parroquial de SPA
07-02-2019	61	Escuela E-26
08-02-2019	35	Escuela E-26
09-02-2019	49	Escuela E-26
10-02-2019	55	Escuela E-26
11-02-2019	45	Escuela E-26
12-02-2019	27	Escuela E-26
13-02-2019	27	Escuela E-26
14-02-2019	27	Escuela E-26
16-02-2019	26	Escuela E-26

Fuente: ONEMI.

c) Acciones de ayuda a las personas damnificadas y albergadas

Dentro de las acciones de ayuda a las personas damnificadas y albergadas se pudo constatar en los reportes de ONEMI aquellos recursos desplegados por dicho organismo, la cantidad de ellos y la fecha de salida, tal como se presenta en el Cuadro 5-29.

CUADRO 5-29: RECURSOS DESPLEGADOS POR ONEMI A LA COMUNA DE SAN PEDRO DE ATACAMA

Elementos o Servicios	Cantidad Aprobada	Fecha de Salida
Kit de alimentación para una semana	28	01/02/2019
Bobina film plástico	2	
Kit de aseo domiciliario	28	
Sacos de control aluvional	840	
Raciones de combate	270	
Carretillas	20	
Mascarillas	90	
Servicio de raciones de alimentos en JUNAEB	-	09/02/2019
Bidones 6 Lts de agua	200	
Linternas	10	
Colchones	80	
Raciones 12 horas	84	
Cajas de alimentos	36	08/02/2019
Colchones	20	
Bobinas plásticas	58	
Frazadas	40	10/02/2019
Kit de alimentos	85	
Kit de aseo domiciliario	89	
Bobinas plásticas	08	
Agua mineral SG	133	
Colchones	108	
Frazadas	108	12/02/2019
Raciones 12 hora	566	
Mascarillas	1000	
Colchones	197	
Frazadas	197	

Fuente: ONEMI.

Además, en los informes de ONEMI se registró la entrega de 1.041 raciones de JUNAEB al albergue Escuela E-26, entre los días 5 y 10 de febrero.

En base a la información anterior, se estimó según precios unitarios de mercado y aquellos identificados por el Estudio “Caracterización de Información debido a las Crecidas Aluvionales en la Cuenca del Huasco – Región de Atacama para el temporal del 25 y 26 de marzo de 2015” de la DOH, el costo total de los recursos entregados por ONEMI para los damnificados (Cuadro 5-30).

CUADRO 5-30: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE RECURSOS ENTREGADOS POR ONEMI A SAN PEDRO DE ATACAMA

Recursos	Precio Unitario (\$/un)	Cantidad	Costo total
Raciones Alimenticias (considera kit de alimentación, raciones de combate, raciones 12 horas)	\$ 2.164	4593	\$ 9.939.252
Raciones entregadas por JUANEB	\$ 2.164	1.041	\$ 2.251.724
Caja de alimentos	\$ 30.000	36	\$ 1.080.000
Agua (m ³) (se consideró que la cantidad de Agua Mineral SG corresponde a Litros)	\$ 645	1.333.000	\$859.785.000
Frazadas	\$ 8.000	345	\$ 2.760.000
Bobina film plástico	No hay información	68	-
Kit aseo domiciliario	\$ 25.990	117	\$ 3.040.830
Sacos control aluvional	\$ 11.900	840	\$ 9.996.000
Carretillas	\$ 30.000	20	\$ 600.000
Mascarillas	\$ 2000 por 50 unid.	21	\$ 42.000
Linternas	\$ 8.000	10	\$ 80.000
Colchones	\$ 31.035	405	\$ 12.569.175
		Total	\$899.892.257

Fuente: Elaboración propia.

d) Otros aportes a damnificados

Cabe mencionar otros aportes que fueron en pos de ayudar a los damnificados de la comuna de San Pedro de Atacama. Uno de ellos fue el aporte solidario entregado por la Municipalidad de Antofagasta, por un monto de \$10.000.0000, el cual correspondía a dineros que serían utilizados para el show pirotécnico del aniversario de Antofagasta y debido a la emergencia se destinó a ir en ayuda de las zonas afectadas, luego de la aprobación del Concejo Municipal⁴.

Además, se realizó una campaña solidaria municipal “Antofa Ayuda al Norte” en el cual se reunió gran cantidad de apoyo en alimentos no perecibles, para incluso las mascotas⁶. Otra campaña solidaria identificada fue la Caritas Chile “Calama también es Chile, la cual recaudó ayuda para las personas afectadas en su sede en Calama, que sumó el aporte del centro comercial Mall Plaza, que tuvo dos locales en Santiago como centros de acopio. La campaña de Caritas Chile reunió ropa, alimentos y

⁴ Karen Rojo entregó aporte solidario a Calama y San Pedro de Atacama. (15 de febrero de 2019). Recuperado en: <https://www.diarioantofagasta.cl/regional/105369/karen-rojo-entrego-aporte-solidario-a-calama-y-san-pedro-de-atacama/>

agua embotellada, además de aporte económico. Sin embargo, no se tienen registros de las cantidades donadas por dichas campañas.

Por otro lado, se constató la donación por parte de la Municipalidad de Lo Barnechea a la Municipalidad de San Pedro de Atacama, en virtud de su Convenio de Colaboración firmado entre ambos Municipios en 2013, esto fue en materiales de construcción y medicamentos veterinarios, por un monto de \$4.949.663. En el Anexo 5-3-5 se presenta la Sesión Ordinaria N°998/2019 del Consejo Municipal de Lo Barnechea, mediante la cual se aprueba la donación mencionada.

También, se identificó que la empresa CCU entregó un camión con ayuda a la comuna de San Pedro de Atacama, el cual llegó al albergue Escuela E-26 con más de 8.500 litros de agua, junto con artículos de primera necesidad tales como pañales, leche, frazadas, té, café, entre otros⁵. Se valorizó solo la cantidad de agua entregada, debido a que solo se cuenta con dicha cuantificación, para lo cual se asumió que fue entregada en botellas de 500 cc, ya que en la publicación⁷ de la donación se pueden observar fotos con dicho formato. De este modo, según el precio de mercado y la cantidad de litros de agua, se estimó la donación por un monto aproximado de \$9.578.000.

Cabe señalar, que se solicitó a la Municipalidad registros de donaciones realizadas a la comuna, cuyo respaldo de solicitud se presenta en el Anexo 5-3-1.

5.3.2.5. Daños en Cauces Naturales

En relación con los daños producidos en los cauces, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) ha establecido obras tendientes superar los problemas originados producto del fenómeno climático ocurrido en febrero de 2019. En el Cuadro 5-31 se presentan los daños identificados para el cauce San Pedro y los requerimientos de obras fluviales. En Anexo 5-3-6 se puede observar la Minuta de Requerimientos de obras fluviales para la región.

CUADRO 5-31: REQUERIMIENTOS DE OBRAS FLUVIALES PARA CAUCE SAN PEDRO

Sector	Descripción del daño	Obra necesaria	Plazo estimado de días corridos	Monto estimado (\$)
Ayllu de Quito, Sector Bajo	Colapso de un 40% de gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en aproximadamente 360 ml	300	660.000.000
Ayllu de Quito, Sector Medio	Colapso del 100% de los gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en aproximadamente 250 ml	150	280.000.000
Pucara de Quito Sector Alto	Colapso de un 30% de los gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en aproximadamente 180 ml	150	410.000.000
Ayllú de Conde	Durante la crecida, los gaviones existentes fueron sobrepasados	Peraltamiento de gaviones existentes	90	150.000.000

⁵ CCU. 2019. Entregamos donaciones por emergencias en el norte y sur de Chile. *Revista EnCCUentro Mayo 2019*.

CUADRO 5-31: REQUERIMIENTOS DE OBRAS FLUVIALES PARA CAUCE SAN PEDRO

Sector	Descripción del daño	Obra necesaria	Plazo estimado de días corridos	Monto estimado (\$)
Duque, Sector Medio	desbordando a los terrenos aledaños, afectando viviendas y terrenos agrícolas			
Sector alto de Ayllú Conde Duque	Colapso del 100% de los gaviones existentes	Reconstrucción de gaviones colapsados en ambas riberas en aproximadamente 700 ml de cauce	150	430.000.000
Ayllú de Tulor	Durante la crecida, los gaviones existentes fueron sobrepasados desbordando a los terrenos aledaños, afectando viviendas y terrenos agrícolas	Peraltamiento de gaviones existentes	120	455.000.000
TOTAL				2.385.000.000

Fuente: DOH, 2019.

Por otro lado, se identificó en la plataforma en línea de Mercado Público cuatro proyectos publicados y adjudicados luego de las crecidas de 2019, asociadas a la limpieza y conservación de riberas y cauces (Cuadro 5-32).

CUADRO 5-32 PROYECTOS ADJUDICADOS DE LIMPIEZA Y CONSERVACIÓN DE CAUCE Y RIBERAS

Nombre Licitación	Unidad	ID	Fecha publicación	Fecha adjudicación	Monto Adjudicado
Limpieza y desembanque de varios Ayllus SPA	DOH II Región	1501-24-LR20	16-10-2020	19-11-2020	\$ 237.881.000
Conservación de riberas de cauces naturales	DOH II Región	1501-15-O120	31-07-2020	09-10-2020	\$ 758.228.385
Conservación de riberas de cauces naturales Región de Antofagasta. CR - Calama - San Pedro - 19	DOH II Región	1501-7-O119	17-09-2019	02-09-2020	\$ 841.836.058
Servicio de conservación de riberas de cauces naturales región de Antofagasta Limpieza del Río San Pedro Sector Conde Duque 2020	DOH II Región	1501-17-LP20	31-08-2020	01-10-2020	\$ 87.167.500
TOTAL					\$ 1.925.112.943

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2.6. Daño en agricultura

a) Superficies de cultivos

Las superficies de cultivos existentes en las áreas afectadas por la crecida del 2019 también han resultado dañadas.

En base a la información entregada por el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), la que se presenta en el Anexo 5-3-7, se identificó para la comuna de San Pedro de Atacama la afectación de un total de 105,48 ha correspondiente a los rubros de frutales, hortalizas y forrajeras (Cuadro 5-33).

Para establecer los tipos y superficies de cultivos que han sido afectados en el área de estudio se ha contado con información de los predios existentes en la zona y se ha realizado un análisis del alcance de la crecida de 2019 mediante imágenes satelitales, determinando de este modo el nivel de afectación de cada predio en términos de superficie (ha). En la Figura 5-18 se pueden observar los predios afectados por la crecida en el área de estudio. El área total afectada en el área de estudio, correspondiente a los predios agrícolas afectados, es de 23,1 ha. De este modo, se realizó la relación según las superficies afectadas en la comuna por rubro con la superficie afectada en el área de estudio, como se muestra en el Cuadro 5-33.

CUADRO 5-33: RUBROS AGRÍCOLAS AFECTADOS EN LA COMUNA DE SAN PEDRO DE ATACAMA Y EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Rubro	Ha perdidas en Comuna	Superficie relativa	N° de agricultores afectados	Ha afectadas en Área de Estudio
Frutales	21,78	21%	56	4,77
Hortalizas	23,92	23%	34	5,24
Forrajeras	59,77	57%	35	13,09
TOTAL	105,48	100%	125	23,10

Fuente: MINAGRI.

Para cuantificar económicamente el daño en la agricultura se utilizó la información de ingresos y costos por rubros agrícolas a plena producción presentes en el “Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta” (CNR,2014). Se estimó que para el evento del año 2019 un agricultor alcanzó a invertir el 70% del costo normal y perdió la totalidad de los ingresos de ese año. Al contrastar el margen bruto del año normal y el obtenido el año 2019 se obtiene el daño neto por rubro y total del área afectada (Cuadro 5-34).

CUADRO 5-34: MÁRGENES BRUTOS DE LOS CULTIVOS AÑO NORMAL

Cultivo	Cultivo	Precios de mercado (\$/ha/año)		
		Ingreso	Costo	Margen Bruto
Frutales	Uva Vinífera (Goteo)	8.400.000	1.971.304	6.428.696
	Huerto Frutal (Membrillo)	900.000	383.119	516.881
	Promedio	4.650.000	1.177.212	3.472.788
Hortalizas	Maíz Choclo	5.000.000	2.621.531	2.378.469
	Maíz Choclo	7.500.000	937.382	6.562.618
	Tomate Aire Libre	10.500.000	5.303.861	5.196.139
	Zapallo Italiano	6.250.000	1.646.611	4.603.389
	Lechuga	6.000.000	2.113.880	3.886.120
	Chacra (Acelga)	2.640.000	1.644.525	995.475
	Otros Cultivos (Betarraga)	6.300.000	2.257.286	4.042.714
	Promedio	6.312.857	2.360.725	3.952.132
Forrajeras	Alfalfa	5.200.000	1.033.915	4.166.085

Fuente: CNR (2014).

CUADRO 5-35: DAÑO EN LA AGRICULTURA

Rubro	Superficie Afectada (ha)	Valores Unitarios (\$/ha)			Valores Totales (\$)		
		M. Bruto Año Normal	M. Bruto Año 2019	Daño Neto	M. Bruto Año Normal	M. Bruto Año 2019	Daño Neto
Frutales	4,77	3.472.788	-824.048	4.296.837	16.567.781	-3.931.322	20.499.103
Hortalizas	5,24	3.952.132	-1.652.508	5.604.640	20.707.179	-8.658.309	29.365.488
Forrajeras	13,09	4.166.085	-723.740	4.889.826	54.533.055	-9.473.583	64.006.638
Totales	23,10	-	-	-	91.808.015	-22.063.214	113.871.229

Fuente: Elaboración propia.

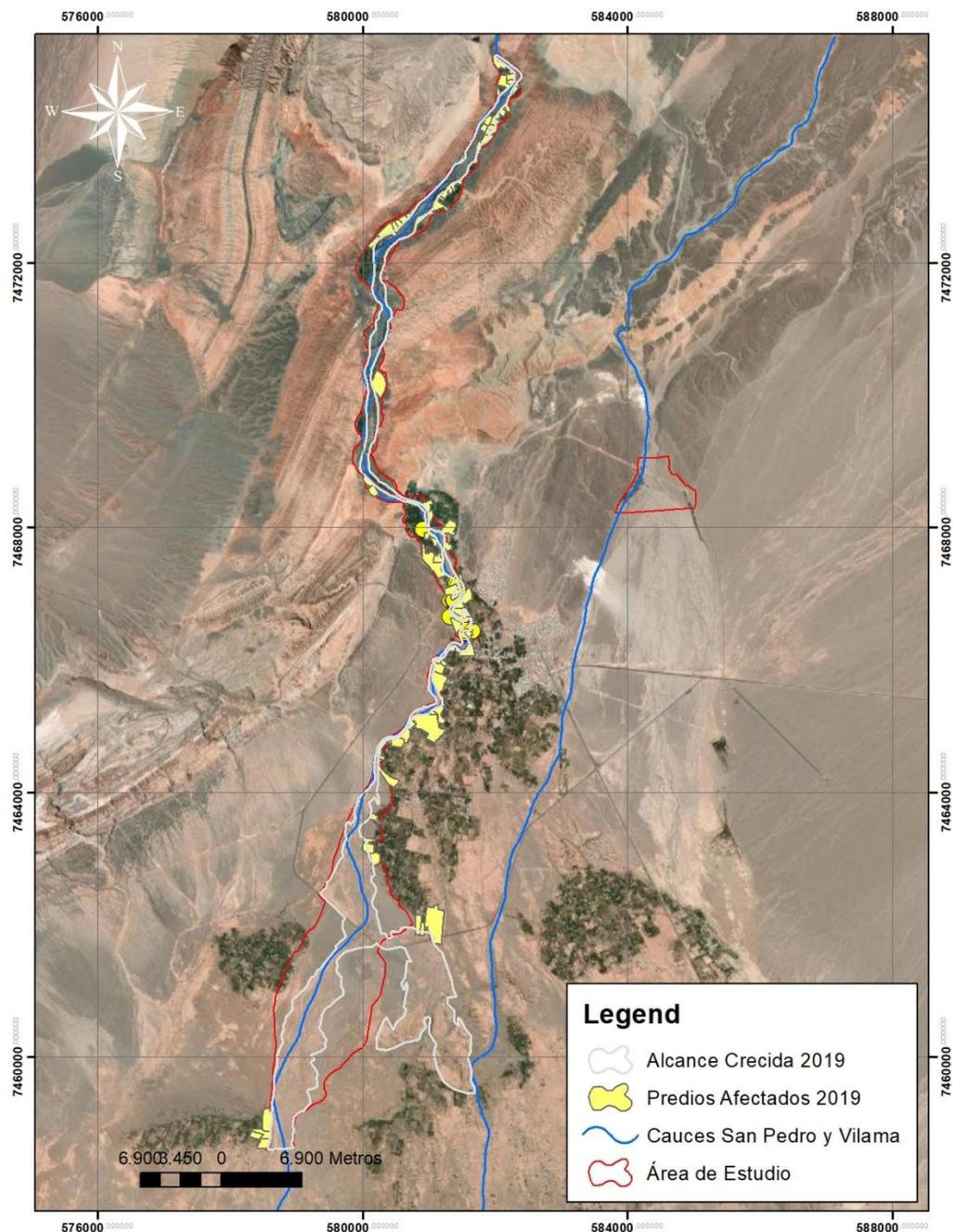


FIGURA 5-18: PREDIOS AGRÍCOLAS AFECTADOS POR CRECIDAS DE 2019

Fuente: Elaboración propia.

b) Ganado

En base al Informe de Catastro de Emergencia entregado por INDAP, se identificó para la comuna de San Pedro de Atacama el ganado afectado, lo que se presenta en el Cuadro 5-36.

CUADRO 5-36: INFORMACIÓN DE GANADO TRAS EVENTO 2019

N° de agricultores afectados	88
Total de Animales	4.225
N° Animales Muertos	245
N° Crías Muertas	121
N° de Animales heridos no recuperable	125

Fuente: INDAP.

En base a la estimación inicial de demanda de recursos de INDAP, se identificó la necesidad de adquisición de alimentación animal, correspondiente a 2.759 fardos para la localidad de San Pedro de Atacama y Ayllus, lo que implica un monto estimado de \$32.832.100 (Anexo 5-3-7)

c) Infraestructura agrícola

Según las pérdidas en el rubro agrícola y ganadero tras el evento de febrero de 2019, la Intendencia Regional junto con INDAP realizaron una estimación inicial de demanda por recursos. En el Cuadro 5-37 se observa la estimación inicial de demanda de recursos para la localidad de San Pedro de Atacama y Ayllus (Anexo 5-3-7).

CUADRO 5-37: ESTIMACIÓN INICIAL DE DEMANDA POR RECURSOS PARA LA LOCALIDAD DE SAN PEDRO DE ATACAMA Y AYLLUS

Recursos	Monto
Bodegas o Galpones	\$ 20.000.000
Corrales	\$ 107.333.710
Mangas Manejo Veterinario	\$ 4.000.000
TOTAL	\$ 131.333.710

Fuente: INDAP.

Además, en el Informe de Catastro de Emergencia entregado por INDAP (Anexo 5-3-7) se identificó la infraestructura de riego afectada, de la cual se pudo constatar la afectación en dos localidades del área de estudio: San Pedro de Atacama y Conde Duque, lo que en suma fue 205 metros de canales y 2 bocatomas afectadas.

d) Aportes de INDAP para emergencia en localidades

Además, INDAP informó de aportes realizados a usuarios en sectores aledaños a los ríos San Pedro y Vilama (Anexo 5-3-7), en el Cuadro 5-38 se presentan los aportes a las localidades que se encuentran en el área de estudio.

CUADRO 5-38: APORTES DE INDAP A LOCALIDADES EN ÁREA DE ESTUDIO

Localidad	Aporte INDAP (\$)
Catarpe	\$ 100.000
Conde Duque	\$ 2.000.000
Quitor	\$ 2.090.000
San Pedro de Atacama	\$ 8.462.650
Sequitor	\$ 800.000
Yaye	\$ 1.500.000
TOTAL	\$ 14.952.650

Fuente: INDAP.

5.3.2.7. Daño en infraestructura vial

En relación con la red vial, se presenta en el Cuadro 5-39 la situación de conectividad durante el evento de febrero de 2019, en base a la información disponible en los Informes de Monitoreo de ONEMI.

CUADRO 5-39: SITUACIÓN RED VIAL EVENTO FEBRERO 2019

Situación Red Vial	Fecha
Tránsito vehicular suspendido por la ruta CH-27 San Pedro de Atacama - Jama e Hito Cajón y CH-21	30-01-2019
Suspendido tránsito vehicular por las rutas B-155 y B-161	31-01-2019
Suspendido tránsito vehicular por las rutas B-155 y B-161	01-02-2019
Quitor y Catarpe se mantienen sin acceso vehicular. Tránsito por la Ruta CH-23 desde Calama a San Pedro de Atacama continúa habilitado para vehículos de emergencia, autoridades, reparto de insumos y residentes.	02-02-2019
Quitor y Catarpe sin acceso vehicular. Tránsito por la Ruta CH-23 desde Calama a San Pedro se mantiene habilitado solo para vehículos de emergencia, autoridades, reparto de insumos alimenticios y residentes.	03-02-2019
Quitor y Catarpe sin acceso vehicular. Habilitado tránsito vehicular por la Ruta CH-23 desde Calama a San Pedro de Atacama.	04-02-2019
Quitor y Catarpe sin acceso vehicular. Habilitado tránsito vehicular por la Ruta CH-23 desde Calama hasta Toconao	05-02-2019
Quitor y Catarpe sin acceso vehicular. Habilitado tránsito vehicular por la Ruta CH-23.	06-02-2019
Catarpe sin acceso vehicular. Se encuentra habilitado tránsito vehicular por la Ruta CH-23.	07-02-2019
Acceso a Quitor solo para vehículos 4x4. Catarpe sin acceso vehicular. Tránsito vehicular interrumpido por la Ruta CH-23 a la altura del kilómetro 3.	08-02-2019
Catarpe sin acceso vehicular. Tránsito vehicular interrumpido por la Ruta CH-23, a la altura del kilómetro 3.	09-02-2019

CUADRO 5-39: SITUACIÓN RED VIAL EVENTO FEBRERO 2019

Situación Red Vial	Fecha
Acceso a Quito solo para vehículos 4x4. Localidad de Catarpe sin acceso vehicular. Tránsito vehicular interrumpido en Ruta CH-23 a la altura de KM 3	10-02-2019
Acceso a Quito solo para vehículos 4x4. Localidad de Catarpe sin acceso vehicular	11-02-2019
Acceso a Quito solo para vehículos 4x4. Localidad de Catarpe sin acceso vehicular.	12-02-2019
Acceso a Quito solo para vehículos 4x4. Localidad de Catarpe sin acceso vehicular.	13-02-2019
Localidad de Catarpe sin acceso vehicular.	14-02-2019

Fuente: Elaboración propia en base a ONEMI.

En relación con la infraestructura vial se identificó el proyecto licitado por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas “Conservación De La Red Vial, Obras De Saneamiento Ruta 23-Ch By Pass -Río San Pedro De Atacama, Km. 99 Al Km. 100 Y Ruta B-245 5: Río Vilama, Km. 4,5 Al Km. 7, Provincia De El Loa, Región De Antofagasta. Nuevo 2019 – Reactivación”, el cual se enmarca en el Programa de Conservación de la Red Vial que posee la Dirección de Vialidad de la Región de Antofagasta para mantener y recuperar la superficie de rodadura y elementos anexos a las vías estructurales, y los efectos provocados a la red vial por la emergencia acontecida en febrero de 2019.

Dicho proyecto se desarrolla en dos Rutas contiguas a la localidad de San Pedro de Atacama, siendo estas: la Ruta 23-CH entre los Km 99.500 al 100.700 sector Río San Pedro y la Ruta B-245 entre los Km 4.500 al Km 7.000 sector Río Vilama. Específicamente las obras corresponden a un aumento de la capacidad de las obras de saneamiento existentes y que aunque no fueron dañadas por la emergencia, demostraron ser insuficientes para canalizar las aguas de los ríos involucrados según lo que se pudo observar en los informes de monitoreo de ONEMI.

En el Cuadro 5-40 se presenta el presupuesto del proyecto de conservación de la red vial. Por otro lado, en el Anexo 5-3-8 se incluye el detalle del proyecto.

CUADRO 5-40: PRESUPUESTO PROYECTO CONSERVACIÓN DE LA RED VIAL

Código	Operación	Unid	Contratado	Precio	Costo
CALAMA SAN PEDRO DE ATACAMA - PASO SICO CAPAS GRANULARES					
301-2	SUBBASE GRANULAR, CBR >= 50%	m3	200,76	24.000	4.818.240
DEMOLICIONES Y REMOCIONES					
101-4	REMOCIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	m2	408	4.500	1.836.000
DRENAJE					
7.303.10 b	PERALTAMIENTO DE RIBERA	m3	4.704,00	6.000	28.224.000
7.303.16 a	GAVIONES PARA DEFENSA DE RIBERAS	m3	680	115.000	78.200.000
ELEMENTOS DE CONTROL Y SEGURIDAD					
612-lb	CAJONES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN ARMADO 2,00 X 2,00 M	m	56	1.600.000	89.600.000
ESTRUCTURA Y OBRA CONEXA					
501-1	HORMIGÓN G05	m3	25,545	310.000	7.918.950
501-6	HORMIGÓN G25	rn3	158,863	350.000	55.602.050
503-2	ACERO PARA ARMADURAS A63-42H	kg	8.652,13	1.900	16.439.043
FAJA VIAL					

CUADRO 5-40: PRESUPUESTO PROYECTO CONSERVACIÓN DE LA RED VIAL

Código	Operación	Unid	Contratado	Precio	Costo
7.301.4a +	REMOCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	m3	164,7	8.000	1.317.600
MOVIMIENTO DE TIERRAS					
202-1	EXCAVACIÓN EN TERRENO DE CUALQUIER NATURALEZA PARA OBRAS DE DRENAJE	m3	1.285,00	6.500	8.352.500
204-4	GEOTEXTIL PARA CONTROL DE EROSIÓN	m2	816	2.800	2.284.800
206-1	RELLENO ESTRUCTURAL	m3	442,98	30.000	13.289.400
207-1	CONSTRUCCIÓN DE PRETILES	m3	1,080,000	25.000	27.000.000
209-1	PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE	m2	669,2	1.800	1.204.E
PAVIMENTOS ASFALTICOS					
7.304.4c	SELLO TIPO LECHADA ASFÁLTICA	m2	12.716,00	2.800	35.604.800
REVESTIMIENTOS Y PAVIMENTOS					
410-2	PAVIMENTO DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO	m2	564,04	120.000	67.684.800
SEGURIDAD VIAL					
7.308.5b	SEÑALES VERTICALES LATERALES TIPO 1 (SOLO ELEMENTOS DE APOYO), SP <= 0,5 M2	N°	28	230.000	6.440.000
7.308.5d	SEÑALES VERTICALES LATERALES TIPO 3, 1 m2 < SP <= 2 M2	No	1	350.000	350
7.308.5e	SEÑALES VERTICALES LATERALES TIPO 4, 2 M2 < SP <= 3 M2	No	2	500.000	1.000,00
7.308.9	TACHAS REFLECTANTES	N°	258	3.800	980.
7.308.11 a	DEMARCACIÓN, LÍNEA DE EJE CONTINUA DOBLE	km	490	1.500.000	285.000
7.308.11 c	DEMARCACIÓN, LÍNEA DE EJE SEGMENTADA	km	1,01	600.000	606.000
7.308.11 g	DEMARCACIÓN, LÍNEA LATERAL CONTINUA	km	2,4	900.000	2.160.000
CRUCE B-241 (SAN PEDRO DE ATACAMA) - GUATÍN - CRUCE B-155 (LINZOR)					
303-3	CARPETA GRANULAR DE RODADURA CON BISCHOFITA	m3	167,5	45.000	7.537.500
DRENAJE					
7.303.16 b	ENROCADOS DE PROTECCIÓN	m3	1.808,00	35.000	63.280.000
7.303.17 b	CONSTRUCCIÓN DE FOSOS Y CONTRAFOSOS EN TERRENO DE CUALQUIER NATURALEZA	m	1.990,00	16.000	31.840.000
ELEMENTOS DE CONTROL Y SEGURIDAD					
612-1k	CAJONES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN ARMADO, 2.00 x 1.00 M.	m	4	1.100.000	4.400.000
ESTRUCTURA Y OBRA CONEXA					
501-1	HORMIGÓN G05	m3	28,272	350.000	9.895.200
501-6	HORMIGÓN G25	m3	509,284	395.000	240.667.180
503-2	ACERO PARA ARMADURAS A63-42H	kg	41.348,42	2.100	86.831.682
FAJA VIAL					
7.301.4a	REMOCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	m3	323,958	8.000	2.591.664
7.301.41	REMOCIÓN DE BARRERAS DE CONTENCIÓN METÁLICAS Y OTRAS	m	50	4.500	225.000
MOVIMIENTO DE TIERRAS					
7.302.5d	TERRAPLENES	m3	132	18.000	2.376.000
202-1	EXCAVACIÓN EN TERRENO DE CUALQUIER NATURALEZA PARA OBRAS DE DRENAJE	m3	913,543	6.500	5.938.030
206-1	RELLENO ESTRUCTURAL	m3	808	38.000	30.704.000
207-1	CONSTRUCCIÓN DE PRETILES	m3	904	22.000	19.888.000
209-1	PREPARACIÓN DE LA SUBRASANTE	m2	717	2.200	1.577.400
OPERACIONES AUXILIARES, ESPECIFICACIONES Y MANEJO AMBIENTAL					
7.311.1	INSTALACIÓN DE FAENAS Y CAMPAMENTOS EN OBRAS DE MANTENIMIENTO	GI	1	1.000.000	1.000.000
7.311.2	APERTURA, USO Y ABANDONO DE BOTADEROS EN OBRAS DE MANTENIMIENTO	GI	1	500.000	500.000
7.311.3	APERTURA, EXPLOTACIÓN Y ABANDONO DE EMPRÉSTITOS EN OBRAS DE MANTENIMIENTO	GI	1	500.000	500.000
7.311.4	PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE MATERIALES EN OBRAS DE MANTENIMIENTO	GI	1	1.000.000	1.000.000
SEGURIDAD VIAL					

CUADRO 5-40: PRESUPUESTO PROYECTO CONSERVACIÓN DE LA RED VIAL

Código	Operación	Unid	Contratado	Precio	Costo
7.308.5c	SEÑALES VERTICALES LATERALES TIPO 2, SP <= 1 M2	No	4	320.000	1.280.000
7.308.8	BARRERAS METÁLICAS DE CONTENCIÓN	m	115	125.000	14.375.000
	TOTAL NETO				977.604.799
	IVA				185.744. ¹
	TOTAL C/IVA				
	TOTAL PRESUPUESTO				1.163.349.711

Fuente: Dirección de Vialidad, 2019.

Con respecto a los desvíos de tránsito, es importante mencionar que los cortes de caminos fueron subsanados gradualmente con accesos de emergencia o bypass en lugares adyacentes a las rutas originales, por lo que se estima que el incremento en el gasto de combustible y del tiempo de viaje no fue significativo, por lo que no se consideró para la estimación de daños.

5.3.2.8. Daños en salud

El evento de 2019 también tuvo efectos en la salud de las personas que se han visto afectadas, ya sea por sufrir algún tipo de afección que significó la asistencia a los servicios de salud o porque debieron ser vacunadas para evitar los problemas asociados a las condiciones higiénicas anormales que se produjeron en los sectores que sufrieron daño.

El día 9 de febrero se anunció la campaña de vacunación para la comuna de San Pedro de Atacama, por parte del presidente Sebastián Piñera, donde informó que se disponían de 400 vacunas contra la hepatitis A y 100 vacunas contra el tétano⁶.

Por otra parte, según los reportes de la ONEMI basados en información entregada por la SEREMI de Salud, el CESFAM de San Pedro de Atacama y los Servicios de Urgencia Rural (SUR) se encontraban operativos según se informó entre los días 11 y 15 de febrero. Además, el 11 de febrero se activó la célula de equipo médico de emergencia MINSAL (certificado) quienes arribaron ese día a San Pedro de Atacama con autonomía para 10 días.

En cuanto a personas con afecciones que significasen la asistencia a servicios de salud, solo se registró una el día 13 de febrero correspondiente a un caso confirmado de Hepatitis A de un varón de 34 años, funcionario municipal de la Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama.

Cabe señalar además, que según el reporte de ONEMI se programaron actividades de capacitaciones para pobladores, Carabineros, Bomberos y equipo de salud desde el 15 al 20 de febrero en temas relacionados a Primeros Auxilios, RCP y manejo inicial del paciente crítico.

⁶ <https://www.24horas.cl/nacional/presidente-pinera-visita-san-pedro-de-atacama-y-anuncia-bono-para-damnificados-3078837>

En relación con las vacunas administradas, se registró en el reporte de ONEMI del día 14 de febrero un total de 238 dosis administradas de Vacuna Hepatitis A, las cuales tienen un valor unitario de \$11.300⁷, lo que significa un total de \$2.689.400.

5.3.2.9. Daños en turismo

Según los reportes de la ONEMI las actividades turísticas se encontraron totalmente suspendidas en la comuna de San Pedro de Atacama, entre los días 8 y 13 de febrero. En el Cuadro 5-41 se presenta en mayor detalle la situación de los centros turísticos durante el evento de 2019 en la comuna de San Pedro de Atacama.

CUADRO 5-41: SITUACIÓN DE ACTIVIDAD TURÍSTICA DURANTE EVENTO DE 2019

Situación Centros Turísticos	Fecha
Solo "Aldea de Tulor", "Valle de la Luna", "Pucará de Quito/Mirador", "Valle de Marte" y "Laguna Baltinache" se mantienen abiertos al público	30-01-2019
Apertura de sitios turísticos en evaluación, solo sector de "Geysers del Tatio" se encuentra habilitado para vehículos con tracción 4x4	31-01-2019
	01-02-2019
	02-02-2019
	03-02-2019
Centros turísticos cerrados a excepción de "Aldea Tulor, Machuca" y "Geysers del Tatio", transitables solo con vehículos 4x4	04-02-2019
	05-02-2019
Centros turísticos permanecen cerrados, a excepción de "Aldea de Tulor", "Valle de la Luna", "Mirador Ckari", "Valle de Marte", "Petroglifos y Hierbas Buenas", "Pozo 3", "Machuca" y "Géyser del Tatio", cuyos caminos se encuentran transitables vehículos con tracción 4x4	06-02-2019
	07-02-2019
Todos los centros cerrados	08-02-2019
Todos los centros cerrados	09-02-2019
Todos los centros cerrados	10-02-2019
Todos los centros cerrados	11-02-2019
Todos los centros cerrados	12-02-2019
Todos los centros cerrados	13-02-2019

Fuente: Elaboración propia en base a Informes de Monitoreo de ONEMI.

Por otra parte, en base a la Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico (EMAT) del Instituto Nacional de Estadística (INE), se analizó la ocupación de Unidades de Alojamiento⁸ en el destino turístico San Pedro de Atacama para febrero de 2019, respecto a lo cual se identificó una significativa baja en relación con febrero de los años 2017 y 2018, como se puede observar en el Gráfico 5-1. En cuanto a cifras, se identificó que la Ocupación de las Unidades de Alojamiento en febrero de los años 2017 y 2018 en promedio fue de 924,3 unidades de alojamiento ocupadas, mientras que para febrero

⁷ Valor unitario de Vacunas Hepatitis A se obtuvo del Estudio Caracterización y Levantamiento de Información debido a las Crecidas Aluvionales en la Cuenca del Huasco – Región de Atacama para el temporal del 25 y 26 de Marzo de 2015 (DOH, 2015).

⁸ Corresponde a la suma de capacidades ofrecidas en habitaciones, departamentos, cabañas y sitios de camping (INE, 2017)

de 2019 fue de 626,6 unidades, lo que corresponde a una disminución de 297,8 unidades de alojamiento ocupadas, es decir, una baja del 32,2%.

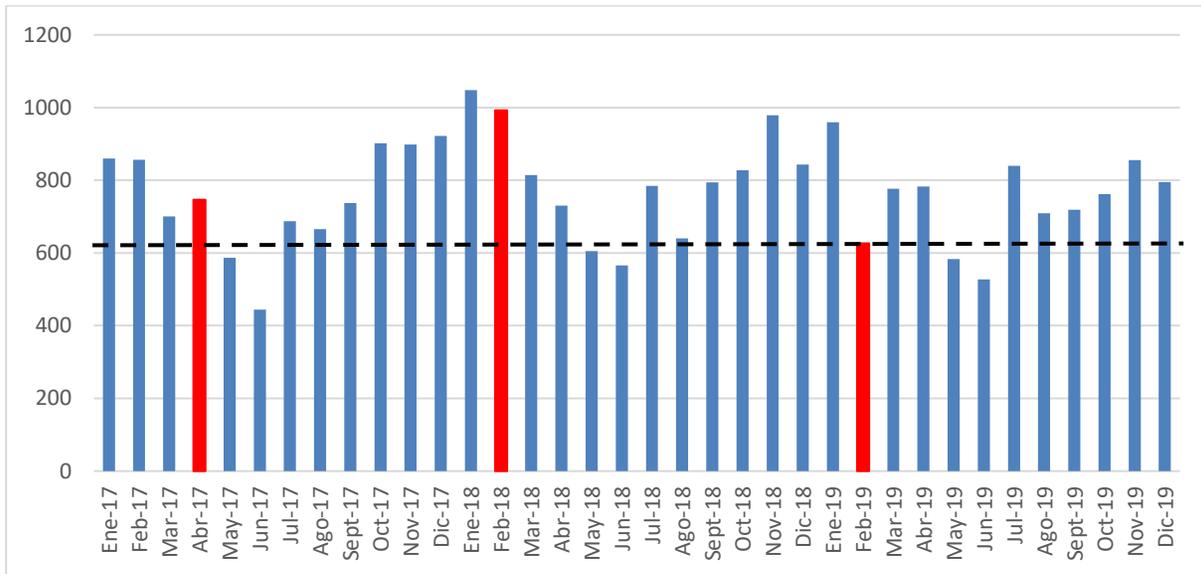


GRÁFICO 5-1: OCUPACIÓN DE LAS UNIDADES DE ALOJAMIENTO SAN PEDRO DE ATACAMA PERÍODO 2017-2019

Fuente: Elaboración propia en base a INE.

Considerando la variable de tarifas promedio por unidad de alojamiento se determinaron los ingresos por Ocupación de Unidades de Alojamiento. En base a este análisis se estimó una pérdida de \$31.215.153 debido la baja en la ocupación de unidades de alojamiento (Cuadro 5-42).

CUADRO 5-42: PÉRDIDA POR BAJA EN LA OCUPACIÓN DE UNIDADES DE ALOJAMIENTO

	Promedio Febrero 2017-2018	Febrero 2019
Ocupación de Unidades de Alojamiento	924,3	626,6
Ingresos por Ocupación de Unidades de Alojamiento	\$ 87.428.852	\$ 56.213.698
Variación Ingresos \$		\$ 31.215.153
Variación Ingresos %		35,7 %

Fuente: Elaboración propia en base a INE.

Además, en el Anexo 5-3-9 se presenta información entregada por SERNATUR en relación a los daños sufridos por el turismo.

5.3.2.10. Daños en comercio

En relación con los daños a las micro y pequeñas empresas debido al evento de febrero de 2019, SERCOTEC proporcionó un catastro con las pérdidas que éstas tuvieron en la Región de Antofagasta, para lo cual se identificaron aquellas correspondientes a las localidades en el área de estudio. Dichas pérdidas se resumen en el Cuadro 5-43, diferenciadas según pérdida de equipamiento

tales como computadores, televisores, refrigeradores, parlantes, muebles, camas, etc.; pérdida de infraestructura; y pérdida en capital de trabajo que incluye la mercancía dañada.

Cabe señalar que, mediante el Oficio N°681 del 14 de marzo de 2019, el Jefe de la División de Planificación y Desarrollo Regional del Gobierno Regional de Antofagasta solicitó a SERCOTEC gestionar un programa de emergencia para el fomento productivo de las zonas afectadas de la Región de Antofagasta, en función de lo cual SERCOTEC ejecutó el Programa Especial de Fomento Productivo “Programa de Emergencia Productiva Provincia de El Loa”, cuyo requisito para ser beneficiario era estar dentro del catastro ya mencionado, en el Cuadro 5-43 se presenta el monto total entregado a los beneficiarios en el área de estudio.

En el Anexo 5-3-10 se presenta el detalle de la información entregada por SERCOTEC correspondiente al catastro realizado y el “Programa de Emergencia Productiva de El Loa”.

CUADRO 5-43: PÉRDIDA POR DAÑO DE MICRO Y PEQUEÑAS EMPRESAS

Ítem	Monto (\$)
Pérdida de Equipamiento	\$ 512.120.000
Pérdida Infraestructura	\$ 421.310.000
Pérdida Capital de Trabajo	\$ 145.100.000
Daño Total	\$ 1.078.530.000
Monto Total entregado a beneficiarios	\$ 49.896.325

Fuente: Elaboración propia en base a información entregada por SERCOTEC.

5.3.3. Conclusiones

En el Cuadro 5-44 se presenta un resumen de los daños catastrados que se pudieron identificar señalando, en lo posible, las cantidades de las unidades que han sido estimadas para cada ítem.

CUADRO 5-44: RESUMEN DE CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS

Ítem	Unidad	Cantidad
Población fallecida o desaparecida	N°	0
Viviendas afectadas por crecida		
Altura de inundación 30 - 60 cm	N°	5
Altura de inundación >60 cm	N°	58
Damnificados y Albergados		
Damnificados	N°	334
Albergados (promedio de personas por día)	Pers/día	46
Raciones alimenticias	N°	4.593
Raciones alimenticias JUNAEB	N°	1.041
Caja de Alimentos	N°	36
Agua	m3	13.330.000
Frazadas	N°	8.000
Bobina film plástico	N°	68
Kit aseo domiciliario	N°	117
Sacos control aluvional	N°	840
Carretillas	N°	20

CUADRO 5-44: RESUMEN DE CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS

Ítem	Unidad	Cantidad
Mascarillas	caja 50	21
Linternas	N°	10
Colchones	N°	405
Agua (formato botellas 500 ML)	L	8.500
Daños en cauces naturales		
Colapso de gaviones existentes en Ayllu de Quito Sector Bajo	%	40
Colapso de gaviones existentes en Ayllu de Quito Sector Medio	%	100
Colapso de gaviones existentes en Pucara de Quito Sector Alto	%	30
Gaviones existentes sobrepasados Ayllu Conde Duque	S/I	S/I
Colapso de gaviones existente en Sector Alto de Ayllu Conde Duque	%	100
Gaviones existentes sobrepasados en Ayllu de Tulor	S/I	S/I
Daños agricultura		
Superficie Frutales afectada	Ha	4,77
Superficie Hortalizas afectadas	Ha	5,24
Superficie Forrajeras afectadas	Ha	13,9
Ganado afectado	N°	491
Canales	Metros	205
Bocatomas	N°	2
Daños Salud		
Vacunas Hepatitis A administradas	N°	238
Daños en turismo		
Disminución Unidades de Alojamiento Ocupadas en 2019	N°	297,8

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 5-45 se presenta el resumen de la valorización económica de los daños catastrado que se pudo identificar. Al observar estos valores, que corresponden solo a los directamente relacionados al área de estudio, se puede concluir que el 34% de los daños económicos corresponden al ítem “proyectos adjudicados de limpieza y conservación de cauce y riberas”, seguido por “proyectos conservación de la red vial” (20%) y “pérdida de micro y pequeñas empresas” (19%). Lo anterior da cuenta de lo importante que puede resultar como medida preventiva la consideración de obras para la contención y mitigación de los daños por crecidas, ya que, además de la protección de la vida humana y animal, los efectos positivos se pueden apreciar en el propio cauce y en la infraestructura pública y privada que sostiene el resto de la actividad económica.

CUADRO 5-45: RESUMEN DE DAÑOS ASIGNABLES A LAS CRECIDAS DE 2019 EN EL ÁREA DE ESTUDIO (\$)

Ítem	Monto total (\$)
Viviendas afectadas por crecida	
Altura de inundación > 30 y ≤ 60	\$ 12.257.570
Altura de inundación > 60	\$ 204.175.299
Damnificados y Albergados	
Recursos desplegados por ONEMI para damnificados y albergados	\$ 899.892.257
Raciones JUNAEB	\$ 2.252.724
Aportes de otros Municipios	\$ 14.949.663
Aportes de Privados	\$ 9.578.000

**CUADRO 5-45: RESUMEN DE DAÑOS ASIGNABLES A LAS
CRECIDAS DE 2019 EN EL ÁREA DE ESTUDIO (\$)**

Ítem	Monto total (\$)
Daños en Cauces Naturales	
Proyectos adjudicados de limpieza y conservación de cauce y riberas	\$ 1.925.112.943
Daños en Agricultura	
Superficies de cultivos afectadas	\$ 113.871.229
Ganado	\$ 32.832.100
Infraestructura agrícola	\$ 131.333.710
Aportes Emergencia INDAP	\$ 14.952.650
Daño Infraestructura vial	
Proyecto conservación de la Red Vial	\$ 1.163.349.711
Daños Salud	
Vacunas administradas Hepatitis A	\$ 2.689.400
Daños en Turismo	
Pérdida por baja en la ocupación de Unidades de Alojamiento	\$ 31.215.153
Daños en Comercio	
Pérdidas de micro y pequeñas empresas	\$ 1.078.530.000
TOTAL	\$ 5.634.739.685

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, es importante destacar que, en relación con los objetivos del presente estudio, en la proyección en el tiempo de las obras que se propondrán en las etapas siguientes se deben contemplar efectos indirectos en el mediano y largo plazo, los cuales resultan muy difícil de cuantificar con precisión, menos para un efecto en particular como el del 2019. Para ello el Ministerio de Desarrollo Social contempla metodologías para su incorporación en la evaluación social de proyectos.

CAPÍTULO 6

PLAN DE MANEJO DE CAUCE

0	06-12-2021	Aprobado	SPA	WLN/EKK	SPA
A	13-11-2021	Emitido para Revisión Interna	SPA/FCH	WLN	SPA
REV	FECHA	REVISIÓN PARA	POR	CHECK	JDP
		CÓDIGO DOCUMENTO			
		ARR104-IF-C06 0 PLAN MANEJO CAUCE.DOCX			

6. PLAN DE MANEJO DE CAUCE

6.1. Generalidades

El Plan de Manejo fue elaborado considerando las recomendaciones tanto de la Inspección Fiscal como de los acuerdos con la Comunidad.

El plan se estructura en medidas estructurales y medidas no estructurales, y las soluciones se clasifican según el horizonte de aplicación. Se indica el responsable principal de llevar a cabo las medidas indicando además aquellas que sean susceptibles de causar impacto en el medio ambiente y que por ello deban ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Los objetivos y acciones que se proyecten, que correspondan a la DOH, se estructuran en un Plan de Manejo a 5 años y 10 años de plazo, presentando un listado de las acciones propuestas para cada caso y de acuerdo con los objetivos definidos. Se incluyen costos asociados y organismos involucrados en su implementación.

Se presenta en la Figura 6-1 a la Figura 6-4 la ubicación en planta de todas las medidas propuestas por el Plan de Manejo de Cauce en los 4 sectores en que se ha subdividido el área de estudio.

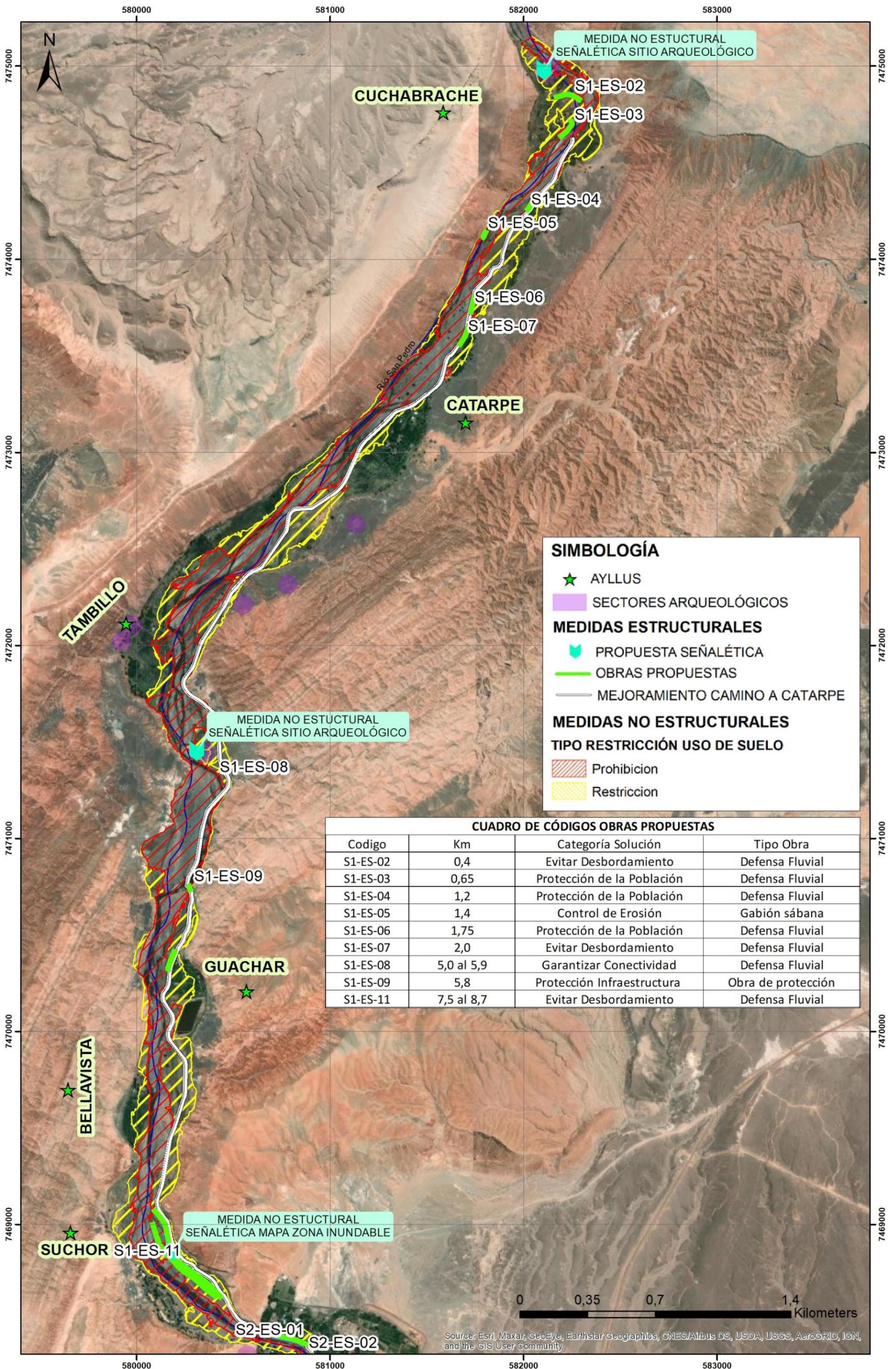


FIGURA 6-1: MEDIDAS PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 1

Fuente: Elaboración propia

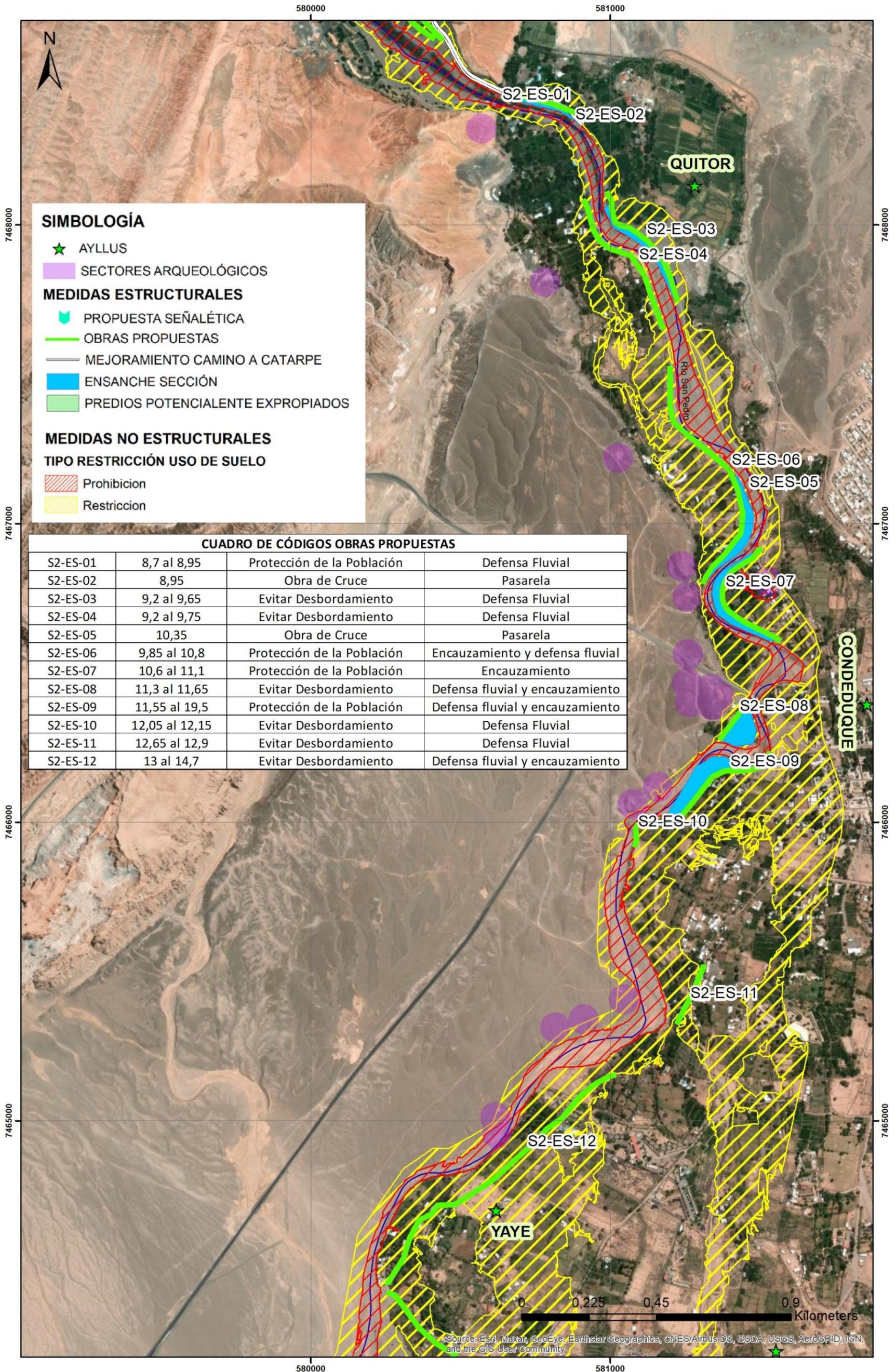


FIGURA 6-2: MEDIDAS PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 2

Fuente: Elaboración propia

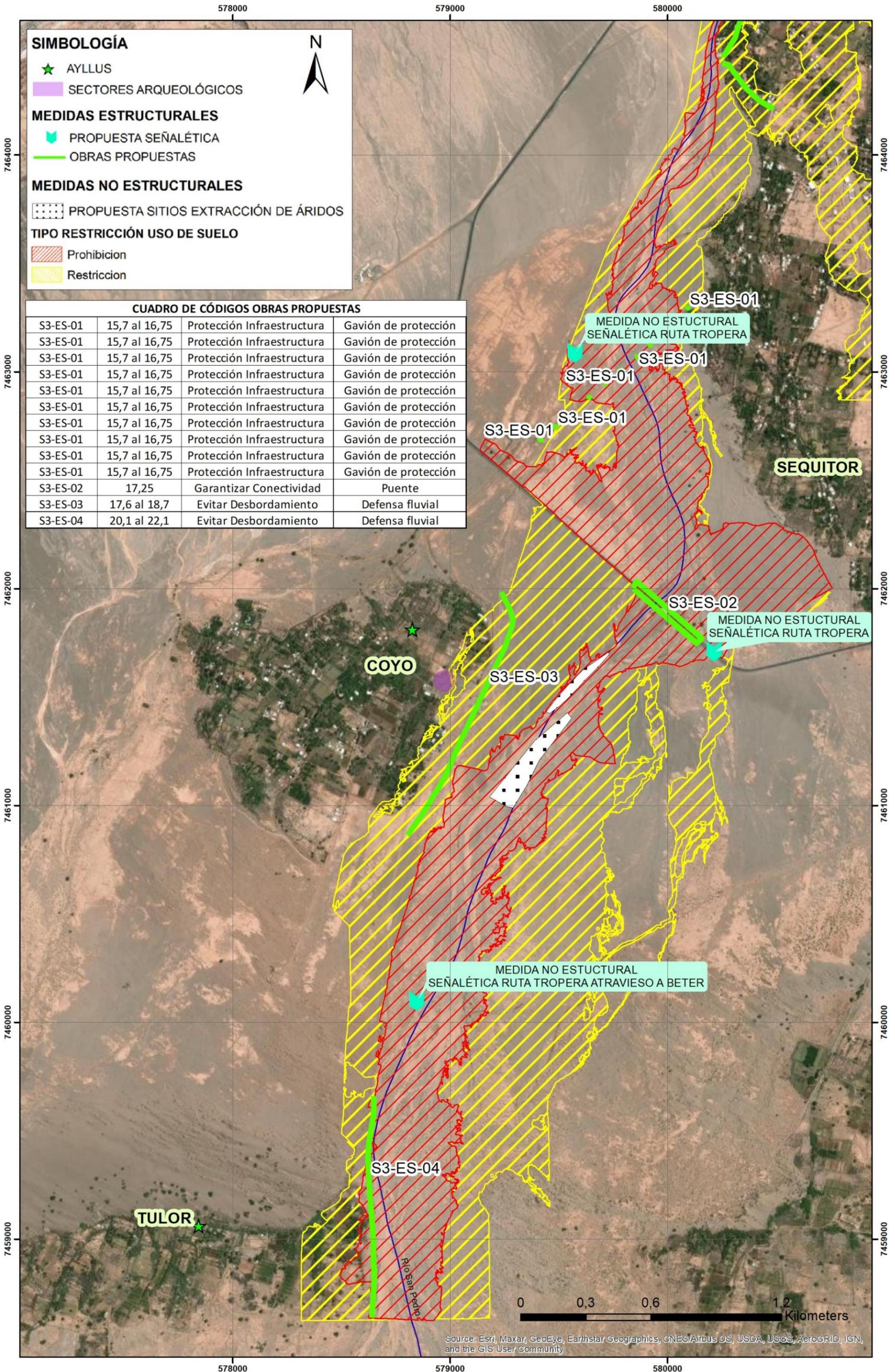


FIGURA 6-3: MEDIDAS PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 3

Fuente: Elaboración propia

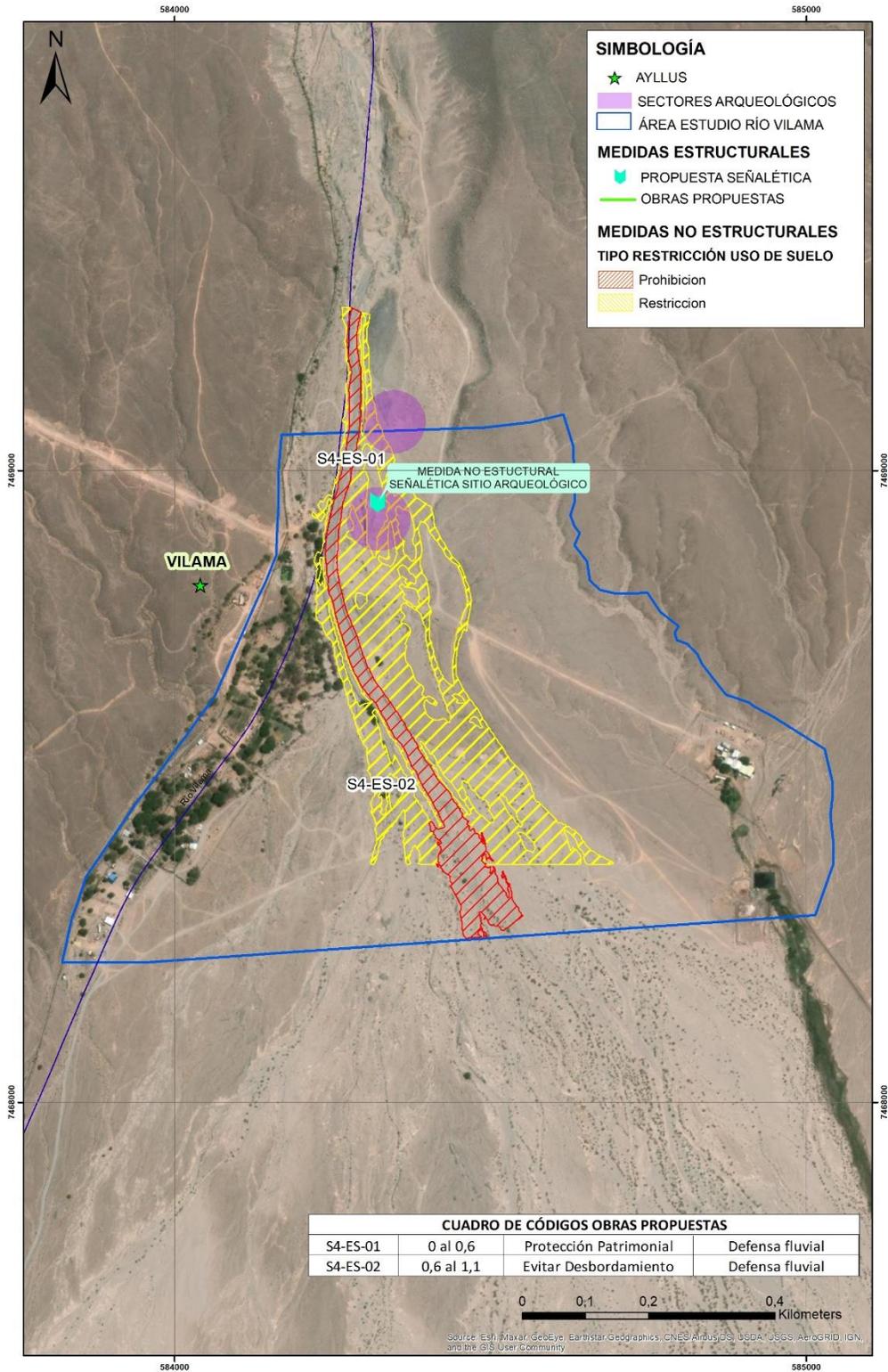


FIGURA 6-4: MEDIDAS PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 4

Fuente: Elaboración propia

6.2. Fundamentos y Criterios del plan de Manejo de Cauce

6.2.1. Introducción

En la Figura 6-5 se ha sintetizado los procesos y antecedentes necesarios para la elaboración del Plan de Manejo de Cauces.

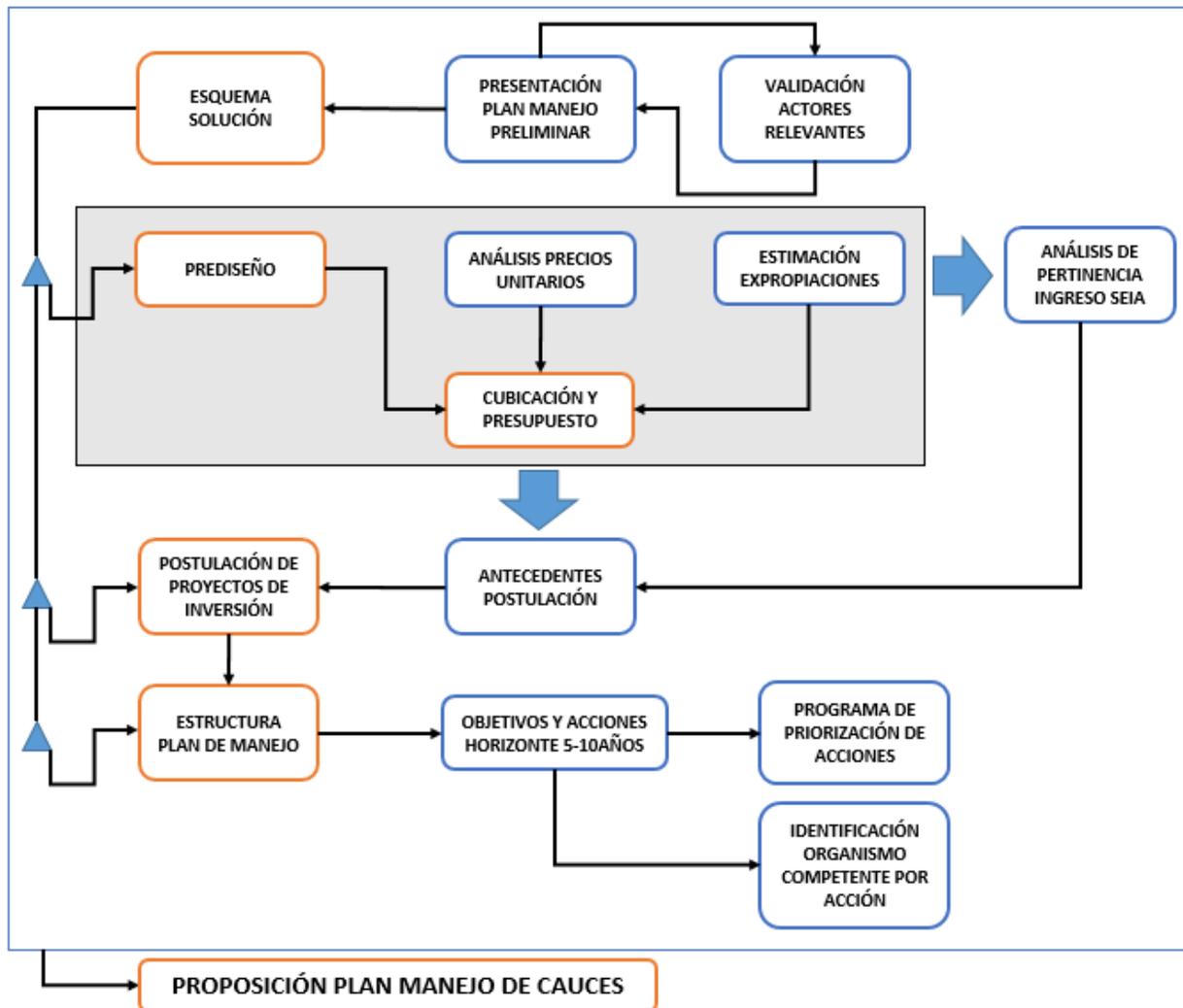


FIGURA 6-5: PROCESOS Y ANTECEDENTES PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN DE MANEJO DE CAUCES.

Fuente: Elaboración propia

El Plan de Manejo se estructurará considerando dos tipos de actuaciones, a saber: Medidas Estructurales (construcción, mejoramiento o reposición de obras fluviales y de infraestructura, extracciones de áridos) y Medidas No Estructurales (fijación de deslindes, zonificación de áreas de inundación, definición de franjas de mantención fluvial, proposición de áreas con restricción, acuerdos, procedimientos). Estas medidas son estudiadas, considerando sus costos y efectos ambientales cuando corresponda. Para cada acción propuesta, se identifica a los actores responsables de ejecutarla.

Dichas acciones se definen sobre la base de una sectorización (definición de zonas de características homogéneas) propuesta en etapas anteriores y validada con la comunidad.

Los principales criterios y fundamentos que, de acuerdo con la visión de la DOH, debe tener el Plan de Manejo de Cauce, son los siguientes:

- a) Todas las Medidas Estructurales son agrupadas por tipo de intervención a establecer en el ámbito del cauce. Por ejemplo: evitar desbordamiento, control de erosión, protección de la población, obras de cruce, planificación territorial, recreación, conservación ambiental, protección patrimonial, garantizar conectividad, etc.

En general, se consideran medidas que no escapen del ámbito de las competencias de la Dirección de Obras Hidráulicas. Cualquier medida estructural que escape de esta competencia, tienen que ser catalogada como propuesta o sugerencia, identificando la institución que debería enfrentar el problema.

Las medidas estructurales se priorizarán según la protección a la población y a la infraestructura relevante. En particular, sobre el problema de manejo de explotaciones de áridos, se propondrá las medidas de Plan, la sectorización para la explotación sustentable del río, tasas de extracción sustentables, los volúmenes máximos a extraer por sector y los plazos de extracción, etc., sobre la base de la estimación de la disponibilidad de áridos del cauce del Río y de su demanda,

- b) Otras medidas estructurales: Se refiere a todas aquellas medidas que por características escapan a las anteriores y se consideran significativas para un buen manejo del río. (mejoramiento de bocatomas, descargas, embalses, etc.).
- c) Las medidas no estructurales se agrupan en aquellas que son de directa tuición de la Dirección de Obras Hidráulicas, (zonas de extracción de áridos, áreas de restricción fluvial, etc.) y aquellas que pueden ser desarrolladas por otras instituciones y siempre a modo de sugerencia.
- d) Definir criterios de complejidad de proyectos.

El Plan considera hacer una proposición de la secuencia de acciones en el tiempo y determinar los correspondientes requerimientos presupuestarios, administrativos y técnicos para su ejecución, así como sus efectos esperados, implicancias ambientales y los servicios responsables en su aplicación y fiscalización.

Por lo anterior, se clasificará las soluciones según el horizonte de aplicación y tipo, ya sea estructural o no estructural u otros que se defina según las necesidades presupuestarias, responsables principales, impacto medioambiental, etc. Todo lo cual se expondrá en una tabla resumen de formato a definir.

6.2.2. Sectorización

Se identificaron 4 sectores en el área de estudio, cuya definición se basó en características comunes, considerando en ellos los problemas y riesgos a los cuales se ven expuestos.

De esta forma, se consideró que el tramo del río Vilama en estudio corresponderá a un sector independiente definiendo, a su vez 3 sectores más del Río San Pedro. La representación espacial de esta sectorización se muestra en la Figura 6-6, mientras que el Cuadro 6-1 detalla cada una de las zonas, el inicio y término de cada sector, las localidades o asentamientos afectados por problemas relacionados con los cauces y una descripción de cada sector con los principales riesgos/problemas identificados.

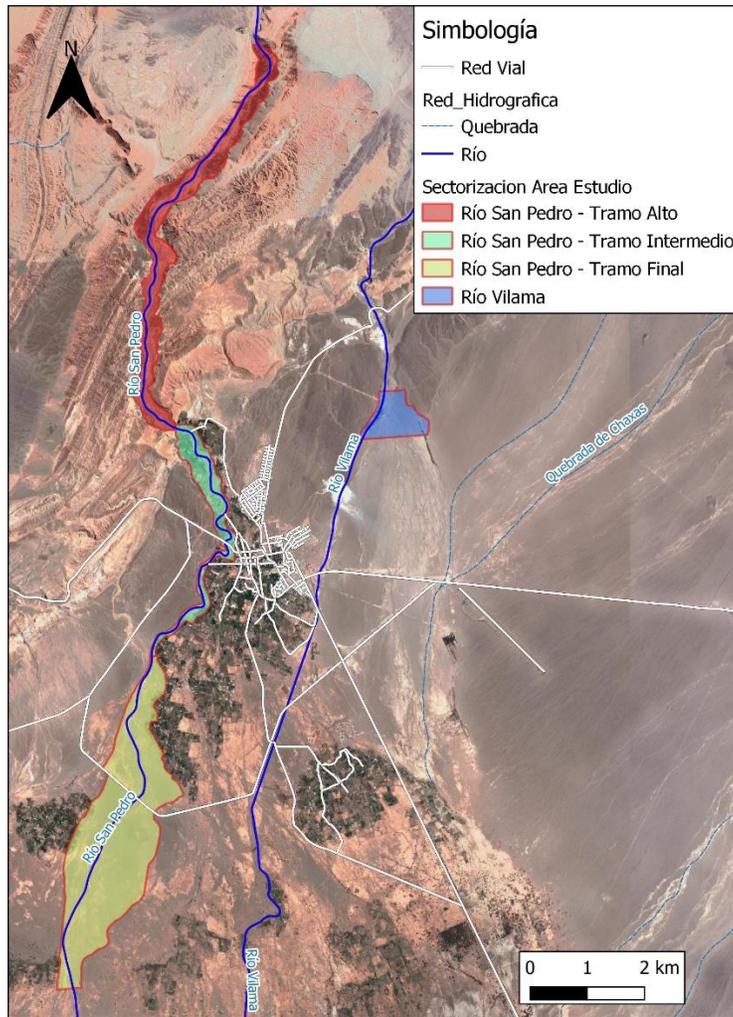


FIGURA 6-6: SECTORIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6-1: SECTORIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

ID Sector	Cauce	Punto Inicio	Punto Término	Longitud (km)	Descripción/Justificación	Localidades
S1	Río San Pedro	Aguas abajo estación San Pedro en Cuchabrachi	Pucará de Quito	8,6	<p>Tramo del cauce que se presenta confinado naturalmente por las laderas de cerro, presenta una sección amplia con intervenciones puntuales mediante defensas fluviales</p> <p>La infraestructura existente en este tramo y que puede ser crítica es:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 atravesos, corresponden a cruces desde camino principal a casas y un hotel, además de cruces sobre el río en sector Catarpe. • 13 tramos de defensas fluviales, las que corresponden principalmente a revestimiento de ribera con gaviones y en algunos casos pretiles de material fluvial. • Canal de riego deteriorado, posee revestimiento y compuertas de descargas, destruidas por crecidas <p>En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, los siguientes sectores que representan puntos críticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El sector de Catarpe posee riesgo de interrupción de caminos, inundación por desborde de cauce y anegamiento de caminos y pasos a desnivel. • Cuchabrache, tiene riesgo muy alto de inundación por desborde de cauce. 	Catarpe
S2	Río San Pedro	Pucará de Quito	Badén de acceso a Séquito	5,7	<p>Tramo cercano a zona urbana, el cauce se encuentra canalizado en varios tramos por obras de defensa fluvial y en otros tramos confinado por los asentamientos a ambas riberas del cauce</p> <p>La infraestructura existente en este tramo y que puede ser crítica es:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 4 atravesos, uno de ellos corresponde a un cruce de camino sobre el río, en sector de Pucará de Quito. Otro de estos atravesos es un cruce de camino a San Pedro Urbano. • 26 tramos de defensas fluviales, gran parte de ellas corresponde a revestimiento de ribera con gaviones. • Puente en ruta Paso Sico, posee obras de protección en construcción. • Casas particulares a un costado de la caja del río. • Canales de riego sin compuertas y las modificaciones del cauce incorporadas para protegerlos <p>En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, los siguientes sectores que representan puntos críticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quito, presenta riesgo muy alto de interrupción de caminos e inundaciones por desborde de cauces. • Domingo Atianza, tiene riesgo muy alto de inundación por desborde. • San Pedro de Atacama, presenta riesgo de inundación por desborde del cauce. 	Quito, San Pedro de Atacama

CUADRO 6-1: SECTORIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

ID Sector	Cauce	Punto Inicio	Punto Término	Longitud (km)	Descripción/Justificación	Localidades
S3	Río San Pedro	Badén de acceso a Séquitor	Tramo final frente a Tulor	6,9	<p>Tramo final en el que el cauce no se encuentra confinado, presenta cauces secundarios y planicies de inundación.</p> <p>La infraestructura existente en este tramo y que puede ser crítica es:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 8 atravesos, los que corresponden a cajones de hormigón y tuberías, un cruce de río bajo el camino que conecta a Calama a la altura de Coyo y viaductos. • 7 defensas fluviales que corresponden a pretiles de material fluvial y revestimientos de ribera con enrocado. <p>En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, los siguientes sectores que representan puntos críticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El sector de Coyo presenta riesgo de anegamiento de caminos y pasos a desnivel, además de interrupción de caminos. • Ayllu de Tulor, tiene riesgo de inundación por desborde. 	Sequitor, Checar, Coyo y Tulor
S4	Río Vilama		Fin encauzamiento existente	1,0	<p>El río se encuentra canalizado por pretiles de material del lecho fluvial. No presenta escurrimiento ni vegetación.</p> <p>La infraestructura existente en este tramo y que puede ser crítica es:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cruce de camino sobre el río Vilama, es un camino de tierra. • 4 tramos de defensas fluviales correspondientes a pretiles de material fluvial, encauzamiento de río y enrocado de menor tamaño. • Cámaras de inspección de APR de Vilama que cruzan el río. • Tranque de tratamiento de aguas servidas, aguas abajo de pozo APR de Vilama. <p>En relación con los riesgos presentes, se pudo identificar, mediante información de ONEMI, riesgo de inundación por desborde de cauce.</p>	Vilama

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Objetivos Propuestos para el plan de Manejo de Cauces

6.2.3.1. Introducción

El presente apartado tiene como finalidad presentar los objetivos particulares del Plan de Manejo de los ríos San Pedro y Vilama, que a su vez busca integrar de forma armónica los requerimientos hidráulicos del cauce con las actividades que ahí se realizan.

La primera definición necesaria de realizar es el establecimiento de un marco adecuado de criterios a seguir, plasmados en los Objetivos Generales, que son transversales, por tanto, aplican para toda el área de estudio. De ello, se desprenden los Objetivos Particulares o Específicos del Plan.

El Plan de Manejo debe ser coherente con las políticas públicas existentes, por esto es que se realizó una revisión de los Planes Estrategias vigentes, relacionadas con los objetivos del presente estudio, a fin de ser debidamente consideradas en los objetivos. Además, será complementado con las próximas instancias de Participación Ciudadana.

La Figura 6-7 expone la secuencia de pasos seguidos para definir los objetivos del presente Plan.

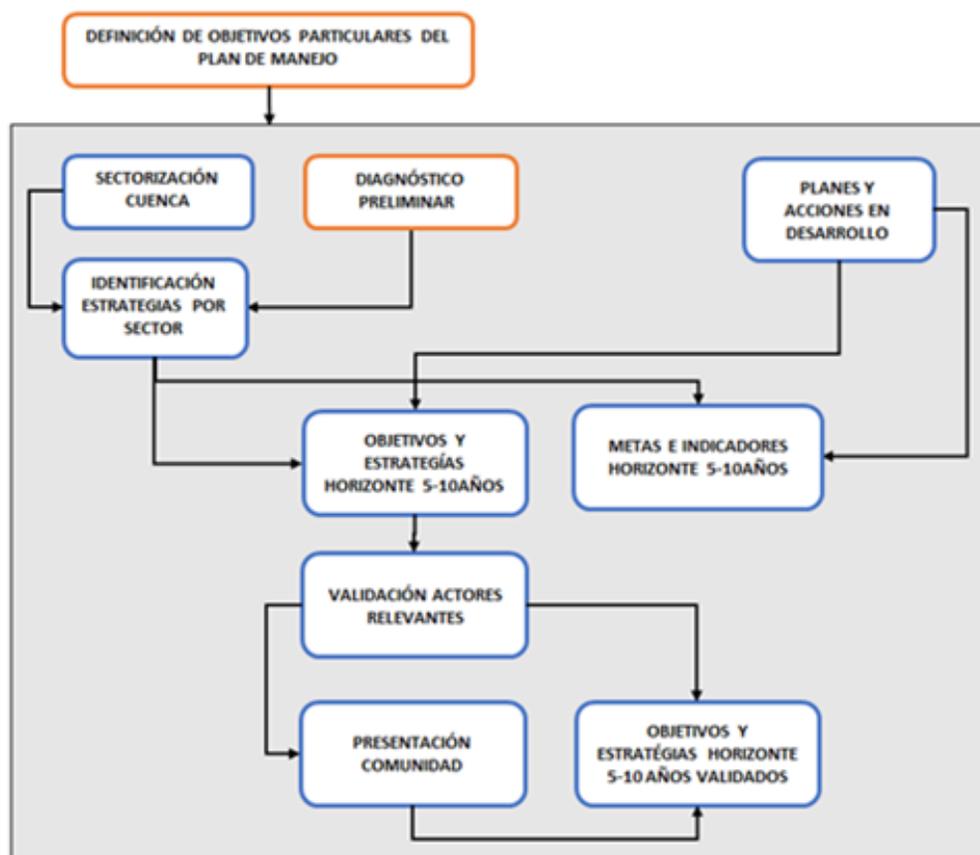


FIGURA 6-7: DIAGRAMA DE FLUJO DEFINICIÓN DE OBJETIVOS DEL PLAN DE MANEJO

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3.2. Objetivos Generales y Específicos

Con el fin de establecer un marco adecuado que permita dirigir las medidas que posteriormente, se propondrán en el presente Plan de Manejo, se definieron 5 objetivos generales transversales a toda el área de estudio, de los cuales se desprenden 10 objetivos específicos, también aplicables a toda el área que pueden responder a más de un objetivo general (Cuadro 6-2). Esta definición consideró un horizonte de cumplimiento de 5 hasta 10 años, lo cual se ve reflejado en las metas e indicadores que se presentan más adelante.

Se estableció como primer objetivo específico, dada su importancia y la incidencia sobre otros objetivos, al correspondiente a la definición del espacio mínimo fluvial, entendido esto como el ancho del cauce que este podría ocupar frente a los eventos periódicos de crecidas y que busca reducir los efectos negativos de estas crecidas frecuentes sobre personas, bienes e infraestructura. Se propone como espacio mínimo fluvial al asociado a la línea geomorfológica de la ribera propuesta como parte del análisis realizado en el presente estudio (Capítulo 3 Dinámica Fluvial, Etapa 2A).

Si bien los objetivos generales y específicos se definieron de forma transversal para toda el área de estudio, es necesario indicar que dicha área no es homogénea desde el punto de vista de las condiciones hidráulicas y mecánica fluviales, como tampoco respecto de los usos que aquí se presentan ni de las necesidades de la comunidad y usuarios de los cauces y quebradas afluentes. Por este motivo, se identificó los objetivos específicos atinentes a cada sector según sus necesidades (Cuadro 6-3). Sin embargo, se determinó como objetivos específicos transversales a todos los sectores: Mejorar la coordinación institucional, a distinto nivel, en los quehaceres referidos al manejo de cauces; y Promover la educación ambiental de la población, incentivando la participación ciudadana en el control de cauces y en la reducción de la vulnerabilidad.

Cabe mencionar que, lo que se presenta corresponde a un avance que se irá complementando en las etapas siguientes acorde a los avances de los estudios hidráulicos, ambientales y la información que se siga recabando en las actividades de participación ciudadana.

CUADRO 6-2: OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS DEL PLAN DE MANEJO

		OBJETIVOS GENERALES				
		A	B	C	D	E
OBJETIVOS ESPECÍFICOS		Ordenar las actividades y/o usos que se realicen en el cauce y en las riberas adyacentes, dentro del marco de las necesidades hidráulicas del cauce.	Fomentar el uso apropiado del suelo en aquellos sectores vulnerables por erosión y/o inundación o remoción en masa.	Reducir la vulnerabilidad de la población, actividad agrícola, e infraestructura relevante frente a riesgos de inundación y remoción en masa.	Favorecer el manejo sustentable del cauce, quebradas y su entorno, compatibilizando la reducción del riesgo frente a crecidas y remociones en masa con el cuidado ambiental.	Propiciar la coordinación institucional entre organismos públicos, en sus distintos niveles, para el manejo integrado de cauces ¹ .
1	Definición del espacio mínimo fluvial	X	X	X		
2	Regular botaderos formales e informales en el cauce y en zonas aledañas	X	X		X	X
3	Regular botaderos formales e informales en el cauce y en zonas aledañas	X	X		X	X
4	Orientar la protección de zonas agrícolas	X	X	X		X
5	Proteger zonas pobladas	X	X	X		X
6	Proteger la infraestructura pública (puentes, caminos)			X		X
7	Proteger el ambiente y prevenir la contaminación				X	X
8	Regular la actividad recreacional expuesta a riesgo	X	X	X		X
9	Generar una mesa de trabajo de coordinación interinstitucional para el manejo integrado de cauces ¹ .	X	X			X
10	Generar instancias de participación ciudadana para abordar temática de educación ambiental, con vinculación de organismos públicos, respecto al control de cauces y la reducción de la vulnerabilidad.			X	X	X

Fuente: Elaboración propia

¹Se entenderá por Manejo Integrado de Cauce, a las intervenciones directas o indirectas de un cauce, propiciadas por medidas estructurales y no estructurales, en ámbitos técnicos, administrativos y legales, que permitan, en su conjunto, abordar aspectos de manejo de cuencas y planificación territorial en zonas de riesgos de inundación por crecidas.

CUADRO 6-3: OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y SECTORES DEL PLAN DE MANEJO

ID SECTOR	CAUCE	OBJETIVOS ESPECÍFICOS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Definir el espacio mínimo fluvial	Realizar un manejo sustentable de extracción de áridos	Regular botaderos y basurales formales e informales en el cauce y en zonas aledañas	Orientar protección zonas agrícolas	Proteger zonas pobladas	Proteger la infraestructura de uso público (puentes, caminos, agua potable)	Proteger el ambiente y prevenir la contaminación	Regular la actividad recreacional expuesta a riesgo	Generar una mesa de trabajo de coordinación institucional para el manejo de cauces.	Generar instancias de participación ciudadana para abordar temática de educación ambiental, con vinculación de organismos públicos, respecto al control de cauces y la reducción de la vulnerabilidad.
S1	Río San Pedro	X			X	X	X		X	X	X
S2		X			X	X	X	X	X	X	X
S3		X	X			X	X			X	X
S4	Río Vilama	X		X	X	X	X	X		X	X

Fuente: Elaboración propia

6.2.3.3. Objetivos Particulares por Sector, Metas e Indicadores

Como se mencionó en la sección anterior, el área de estudio no es homogénea, por lo que, a partir de los objetivos generales y específicos previamente establecidos, se han definido objetivos particulares para cada sector del área de estudio.

Estos objetivos particulares pretenden guiar la estrategia a seguir para abordar las problemáticas específicas de cada sector. Para esto, se acompañan de metas e indicadores en un horizonte de 5 y 10 años, denominados mediano y largo plazo, respectivamente (Cuadro 6-4).

En términos generales y para el caso de las medidas estructurales, para el mediano plazo se espera tener diseños aprobados y construcción finalizada o con algún porcentaje de avance. Para el largo plazo, las metas dicen relación con el monitoreo de los efectos concretos de las obras ejecutadas (resultados), por ello es que los indicadores se inclinan más hacia el cumplimiento del objetivo propuesto (si es por proteger zonas pobladas, se mide directamente el n° de viviendas afectadas). Asimismo, en todos los casos donde proponen obras, se acompaña de una meta referida a la definición de un programa de mantención de dicha infraestructura pública.

Cabe señalar que, para el establecimiento preliminar de indicadores, se ha considerado la utilización de cuatro tipos: **a) Indicador de Ejecución Física**, que tienen relación con metas de ejecución física que se propone en el plan, normalmente son medibles y cuantificables (ej. Metros de defensas construidas y entregadas); **b) Indicador de Resultado**, que miden la contribución del proyecto al logro de los objetivos de un plan y tiene relación con el ámbito en el cual impacta la obra MOP (habitantes, localidades, entre otros), está asociado al cumplimiento de estándares y es tal vez el más importante de medir y el más difícil (ej. Disminución de viviendas); **c) Indicador de Gestión**, que tienen que ver con el avance de los proyectos, estudios básicos y medidas de gestión que señala la cartera de Proyectos (ej. Cuántos proyectos se iniciaron, cuántos se terminaron, que avance promedio se lleva); **d) Indicador Financiero**, comúnmente resulta más fácil de medir ya que tiene relación con las cifras conocidas del presupuesto (ej. Cuánto se gastó v/s cuánto se presupuestó).

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de desline promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico
S2	Río San Pedro – Tramo Intermedio	1. Definir espacio mínimo fluvial	Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	<ul style="list-style-type: none"> Decreto de desline promulgado 		<ul style="list-style-type: none">
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas	Evaluar las obras de defensas fluviales existentes y avanzar en su modificación y mejoramiento	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de deslinde promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico
		6. Proteger infraestructura pública (Calle Domingo Atienza, puente)	<ul style="list-style-type: none"> Disminuir riesgo de inundación del camino, realizando el análisis y mejoramiento de las obras fluviales existentes Incorporar obras de atravesio peatonal en sectores que lo ameriten 	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción de obras de cruce finalizada Tramos críticos de camino protegidos 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de deslinde promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de deslinde promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico
		habitacionales en el cauce)	zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 		
S3	Río San Pedro – Tramo Final	1. Definir espacio mínimo fluvial	Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	<ul style="list-style-type: none"> Decreto de deslinde promulgado 		
		2. Realizar un manejo sustentable de extracción de áridos	Mejorar las regulaciones referidas a la actividad	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza Municipal actualizada, protocolo Municipio-DOH actualizado 	Regulación actualizada de faenas de extracción de áridos	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódica (N°/año) Inclusión de zona de restricción en el Plan Regulador Comunal

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de deslinde promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico
				<ul style="list-style-type: none"> Inicio proceso de socialización de regulaciones y los efectos de las intervenciones no reguladas en el cauce 		<ul style="list-style-type: none"> N° de faenas relocalizadas Control Topográfico del volumen extraído
		5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año Días agua potable cortada

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)	
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de deslinde promulgado	
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año 	
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año 	
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión 	
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico 	
			Analizar y mejorar obra de atravesio existentes en ruta circunvalación				
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Metros de defensas mantenidos Metros de defensas a reforzar, según revisión 	

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de desline promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico 		
S4	Río Vilama	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	<ul style="list-style-type: none"> Decreto de desline promulgado
		Uso sustentable del río (2. Regular botaderos informales en el cauce y en zonas aledañas; 6.	Mejorar las regulaciones referidas a botaderos informales y limpieza de estos	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza Municipal generada (o actualizada) Fiscalización periódica Puntos identificados sin residuos ni escombros 	Infraestructura para el control de ingreso de vehículos; Señalética que indique multas por botar basura y escombros;	<ul style="list-style-type: none"> Caja del río sin puntos de acopio de basura Obras de control de ingreso de vehículos operativas y funcionales

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de deslinde promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
			Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico
		Proteger el ambiente y prevenir la contaminación)	Evaluar medidas de protección para planta de tratamiento aguas servidas		Recuperación de valor ambiental y paisajístico del río	
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura de	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año Días agua potable cortada

CUADRO 6-4: OBJETIVOS PARTICULARES POR SECTOR

ID SECTOR	SECTOR	OBJETIVOS PRELIMINARES	METAS MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	INDICADORES MEDIANO PLAZO (5 AÑOS)	METAS LARGO PLAZO (10 AÑOS)	INDICADOR LARGO PLAZO (10 AÑOS)
S1	Río San Pedro – Tramo Alto	1. Definir espacio mínimo fluvial			Decreto de definición de deslinde basada en la línea geomorfológica de la ribera	Decreto de deslinde promulgado
		4. Orientar protección de zonas agrícolas 5. Proteger zonas pobladas 6. Proteger infraestructura pública (obras de atravesio)	Contar con diseños de obras de defensas fluviales y avanzar en su construcción	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados Construcción finalizada Unidades de defensa construidos 	Obras de defensa operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> N° de eventos de desbordes/año N° de viviendas afectadas por inundaciones/año
			Disminuir riesgo de inundación del camino, analizando pertinencia y construyendo obras fluviales y de atravesio en sectores que lo ameriten	<ul style="list-style-type: none"> Diseños aprobados de defensas Construcción finalizada Metros de camino protegidos Obras protegidas 	Camino operativo y protegido; Obras de defensas operativas y funcionales	<ul style="list-style-type: none"> Días de camino bloqueado N° de desbordes/año
			Contar con Programa de Mantenimiento de obras asociadas al cauce	<ul style="list-style-type: none"> Programa elaborado, aprobado y disponible en Dirección competente Responsables y fechas definidas y publicadas 	Obras de defensa operativas, funcionales y en buen estado	<ul style="list-style-type: none"> N° de mantenciones efectuadas v/s programadas Unidades de defensas mantenidos Unidades de defensas a reforzar, según revisión
		8. Regular actividad recreacional expuesta a riesgo (y asentamientos habitacionales en el cauce)	Mejorar las regulaciones referidas a la instalación de viviendas permanentes o zonas de recreación en zonas de riesgo de inundación	<ul style="list-style-type: none"> Ordenanza municipal actualizada (Actualizar ordenanzas y PRC, proponer seccional) Inicio proceso de socialización de regulaciones (N° reuniones/año) 	PRC actualizado	<ul style="list-style-type: none"> Ejecución de fiscalizaciones periódicas (N°/año) Control Topográfico
		uso público (agua potable)				

Fuente: Elaboración propia

6.3. Medidas Estructurales

6.3.1. Esquema de Solución Propuesta

6.3.1.1. Gavión

Siendo de las estructuras de mayor uso en el país, se considera el uso de gaviones para la protección de riberas tanto en los ríos como en las quebradas.

En la Figura 6-8 se presenta un esquema de la proyección de estas obras.

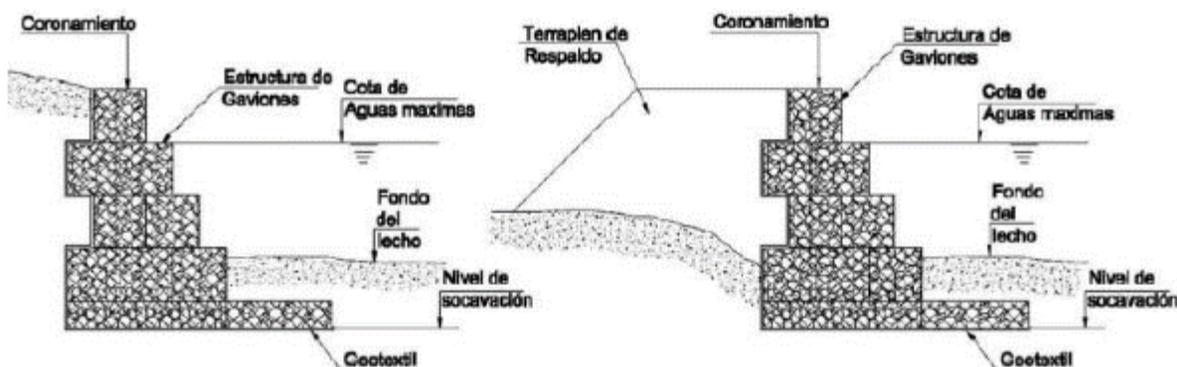


FIGURA 6-8: DEFENSA LONGITUDINAL DE GAVIONES

Fuente: Manual de carreteras.

Para cauces con velocidades sobre los 5 m/s y menores a 7 m/s se considera el revestimiento del primer tercio del muro de gaviones, considerando hormigón calidad H-20 y acero A63-42H; espesor de 0,15 m.

La cota de fundación de estas obras queda determinada por la profundidad de socavación calculada, si esta es inferior a un metro se asignará este valor como profundidad mínima.

6.3.1.2. Enrocados

Para condiciones de altas velocidades, mayores a 7 m/s y disponiendo del espacio suficiente, se proyecta el uso de enrocados para la protección de laderas.

La cota de fundación de estas obras queda determinada por la profundidad de socavación calculada, si esta es inferior a un metro se asignará este valor como profundidad mínima.

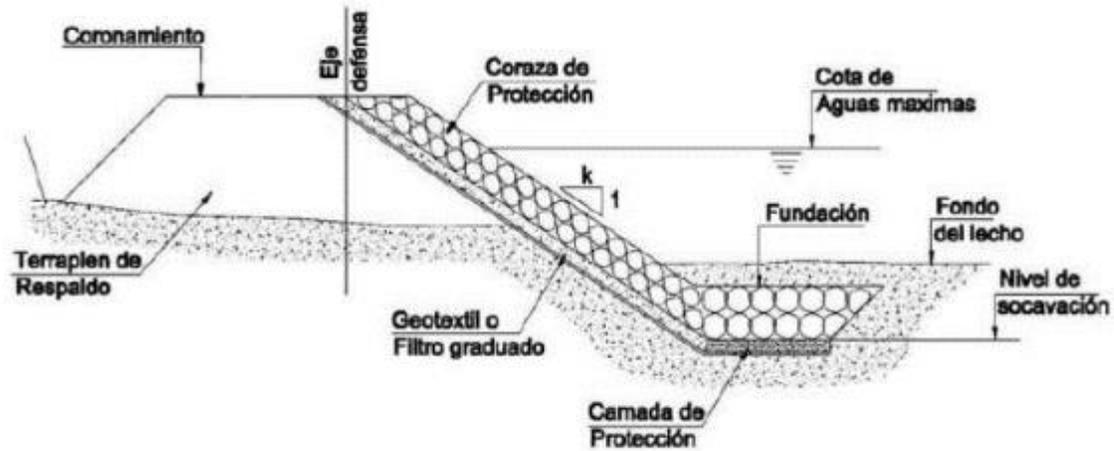


FIGURA 6-9: DEFENSA LONGITUDINAL DE ENROCADO

Fuente: Manual de carreteras.

6.3.1.3. Espigón de Roca

Para evitar que el escurrimiento erosione las riberas o tome un curso no deseado se propone la construcción de espigones.

El largo de estos puede ir entre la altura de escurrimiento y un cuarto de ancho del cauce, mientras que su fundación se desarrolla a una profundidad equivalente a la suma de la socavación general mas la socavación local.

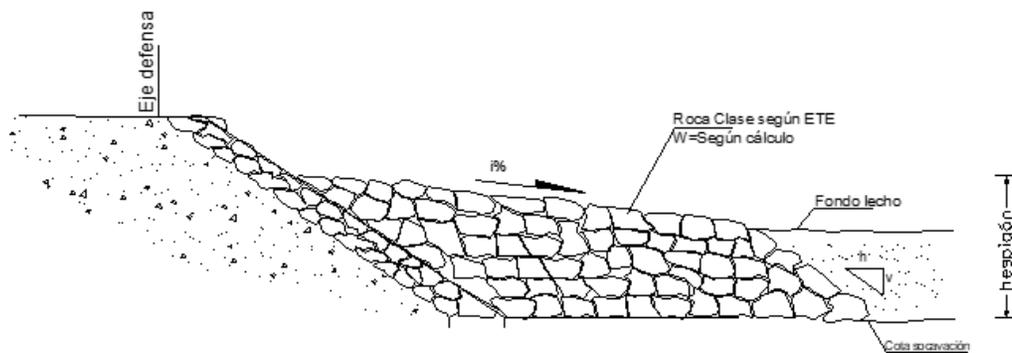


FIGURA 6-10: ESPIGÓN DE ROCA

Fuente: Manual de carreteras.

6.3.1.4. Badén

Para permitir la conectividad entre riberas en sectores no urbanizado se propone la construcción de badenes.

La cantidad de tubos y sus dimensiones serán tales que permitan se pueda transportar una crecida asociada a 5 años de periodo de retorno.

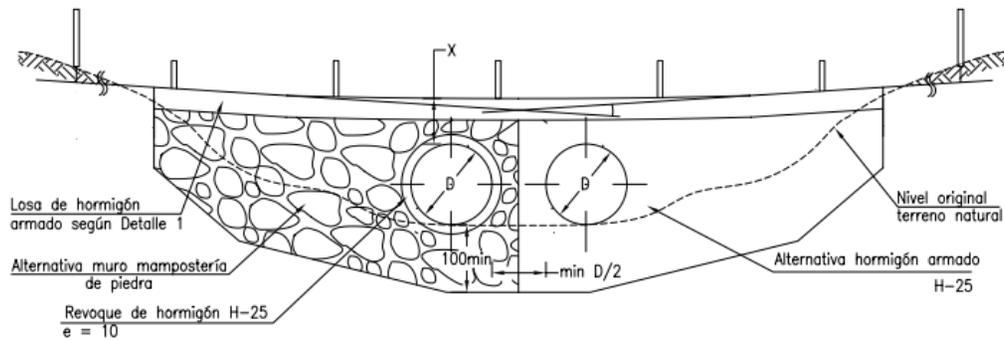


FIGURA 6-11: OBRA DE ATRAVIESO TIPO BADÉN

Fuente: Manual de carreteras.

6.3.2. Prediseño

6.3.2.1. Bases de Diseño

I. Referencias

A continuación, se indican los criterios de diseño para abordar los distintos aspectos geométricos e hidráulicos del diseño de conducciones abiertas.

Los criterios descritos, se basan en métodos de cálculo universalmente aceptados, citados y descritos en la literatura especializada. Entre los textos que se consideran, se tiene:

- Ref (1). Manual de Drenaje Urbano. DOH 2013.
- Ref (2). Manual de Carreteras. Volumen 3.
- Ref (3). Hidráulica Aplicada al Diseño de Obras. Horacio Mery
- Ref (4). Open Channel Flow. V. T. Chow
- Ref (5). Design of Small Canals Structures. U. S. Bureau of Reclamation
- Ref (6). Design of Small Dams. U.S. Bureau of Reclamation
- Ref (7). Canales de conducción del agua. Manual de Uso y Conservación del Agua en Zonas Rurales de América Latina y el Caribe". Ciancaglini, N. 1986

Para efectos de una ingeniería a nivel de pre factibilidad, los diseños propuestos se verifican conforme a escurrimiento normal de Manning.

II. Caudal de diseño

Para el diseño de las obras de defensa fluvial se consideró la crecida de periodo de retorno T=100 años y para el mejoramiento de camino de acceso a Catarpe se consideró la crecida de periodo de retorno de 25 años. Los caudales a utilizar, corresponden a los estimados para cada cuenca aportante, según se explica en el Estudio Hidrológico presentado en Etapa 2C.

III. Altura de escurrimiento

Para el cálculo y dimensionamiento de conducciones abiertas se utilizó la fórmula de Manning, cuya expresión es la siguiente:

$$Q = \frac{\sqrt{J}}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot A$$

Donde se tiene:

$$R = \frac{A}{P}$$

- Q: Caudal (m³/s)
- J: Pendiente de la línea de energía
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning
- A: Sección mojada (m²)
- P: Perímetro mojado (m)
- R: Radio hidráulico (m)
- hn: Altura normal de escurrimiento (m)

Con el fin de verificar el tipo de escurrimiento, subcrítico o supercrítico, se requiere calcular la altura crítica (hc) del escurrimiento. La altura crítica se determina resolviendo para h la siguiente ecuación:

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{g \cdot A}{l}}$$

En esta última expresión, "l" es el ancho superficial de la sección mojada y "g" la aceleración de gravedad.

Cabe mencionar que, para el diagnóstico de los cauces en estudio se realizó el modelo del eje hidráulico mediante el software FLO-2D, según se detalla en el informe de Etapa 3. Mientras que, para el diseño de las obras se utiliza el software HEC-RAS en su versión 5.1.

IV. Materiales considerados en las Obras

Para el diseño de las obras de encauzamiento y de defensa fluvial se consideraron los siguientes materiales:

- Pretil de tierra o material del lecho fluvial compactado
- Gaviones para protección de riberas y sábana de gaviones para protección del lecho fluvial
- Hormigón para materialización de muro de protección
- Enrocado de protección de taludes

En función del talud que se deba proteger, el espacio disponible, la velocidad de escurrimiento del cauce para la crecida de diseño y la disponibilidad del material requerido es que se selecciona el tipo de material a utilizar en cada solución.

V. Pendiente longitudinal

La pendiente longitudinal del fondo de los tramos en estudio está dada, generalmente, por la topografía existente. Para altas pendientes, como es el caso de la mayoría de las conducciones en este estudio, resulta inviable disminuir pendientes producto del excesivo movimiento de tierras que esto implica, además de la no disponibilidad de espacio para generar nuevas plataformas.

De esta manera, la pendiente longitudinal para cada tramo, es determinada conforme a la pendiente natural del terreno.

VI. Velocidades admisibles

Para el revestimiento con gaviones se considera una velocidad máxima de 5 m/s. En el caso de proyectar gaviones con revestimiento del cauce principal con hormigón se consideran 7 m/s.

De la Tabla 6.6.2, Ref (1), para canales revestidos en hormigón, la velocidad máxima recomendada para conducciones eventuales (solo en crecidas) es 5,0 m/s. Esta restricción está dentro del marco de canales de pendiente fuerte.

Cabe señalar que tramos con velocidades mayores a 10 o 20 m/s deberán ser revestidos con hormigón de muy buena terminación (tipo rápidos de descarga) y generar superficies de contacto, lo más lisas posibles para evitar la degradación del hormigón.

De lo anterior, es que el diseño para estos revestimientos se considera una conducción con caídas, de pendiente baja, que permiten alcanzar las velocidades indicadas.

De acuerdo a la Ref (4), la velocidad mínima en canales debe ser superior a los 0,6 - 0,7 m/s. Esto permite evitar la depositación de sedimentos en suspensión.

El Cuadro 6-5 resume las velocidades admisibles por revestimiento.

CUADRO 6-5: VELOCIDADES MÁXIMAS ADMISIBLES

Revestimiento	Máxima Eventual (m/s)
Gaviones sin revestimiento hormigón	5,0
Gaviones con revestimiento hormigón	7,0
Enrocados	> 7,0
Tablestacas	10,0
Hormigón	7,0

Fuente: Elaboración Propia.

VII. Rugosidad de Manning y revestimiento

Para la realización de los cálculos es necesario definir los coeficientes de rugosidad de Manning para los diferentes revestimientos en análisis. En el Cuadro 6-6 se resumen los coeficientes adoptados.

CUADRO 6-6: COFICIENTES DE MANNING REVESTIMIENTOS

Material Revestimiento	Coficiente de Manning
Gaviones sin revestimiento hormigón	0,025
Gaviones con revestimiento hormigón	0,018
Enrocados	0,028
Tablestacas	0,018
Hormigón	0,015

Fuente: Elaboración Propia en base a referencias técnicas.

VIII. Cota fundación y revancha

Tanto gaviones, enrocados como espigones y tablestacas se fundarán bajo la cota de socavación estimada.

Para la determinación de las revanchas en cauce, se considera revanchas con un mínimo de 0,50 m.

6.3.2.2. Soluciones Estructurales Propuestas por Sector

En el Cuadro 6-7 se expone las medidas estructurales de tipo general (código "ES") propuestas para toda el área de estudio, con el correspondiente resumen del diagnóstico hidráulico que justifica la solución. Así mismo, se presenta en la Figura 6-12 a la Figura 6-15 la ubicación de soluciones estructurales propuestas por el plan de manejo de cauce.

Cabe mencionar que, en las figuras presentadas, se incluye también los predios que potencialmente se deba expropiar para materializar algunas de las soluciones estructurales propuestas. Si bien es cierto se busca evitar realizar expropiación, existen sectores en el tramo intermedio (Sector 2) en que el cauce del río San Pedro se encuentra confinado a una sección menor a la sección natural que el cauce presenta en el sector 1 y en los que se requiere ampliar la capacidad de porteo del cauce. Por lo tanto, en dichos sectores la medida propuesta se justifica en que la superficie potencialmente a expropiar es significativamente menor a la superficie inundable.

CUADRO 6-7: SOLUCIONES ESTRUCTURALES

DIAGNÓSTICO			DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES				
SECTOR	Km	DESCRIPCION	CÓDIGO	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
S1	0,7 al 8,4	Camino principal de Catarpe queda interrumpido en los puntos de atraveso del cauce y en los tramos en que el trazado está en la caja del cauce para crecidas de bajo periodo de retorno	S1-ES-01	Garantizar Conectividad	Pretil Defensa Fluvial y Mejoramiento camino	Realizar un mejoramiento de trazado del camino, junto con las obras de arte necesarias para que cumpla su función al menos hasta T=25 años	Vialidad
S1	0,4	Canal de riego, predio y sector de vivienda en ribera derecha son inundados por la crecida de T=100 años	S1-ES-02	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega defensa fluvial siguiendo el trazado del canal de riego existente	DOH
S1	0,65	Defensa fluvial de gaviones ubicada en la ribera derecha (km 0,65) en sector Cuchabrachi, es sobrepasada para T=25 años.	S1-ES-03	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Extensión y Mejoramiento de la obra existente, con altura aproximada de 3 m	DOH
S1	0,73	Acceso a vivienda en ribera derecha no cuenta con obra de arte de cruce del río	S1-ES-OA1	Garantizar Conectividad	Baden	Se agrega un badén diseñado para periodo de retorno T=5 años	Vialidad
S1	1,2	Viviendas en ribera izquierda (km 1,2) en sector Cuchabrachi, se inundan para T=50 años y se presentan velocidades erosivas en el tramo	S1-ES-04	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Se agrega tramo de gaviones de altura aproximada 3 m que permitan proteger el camino de acceso y las viviendas. La obra se mejora para T=100 años.	DOH
S1	1,4	La bocatoma del canal Patilla en la ribera derecha, se encuentra “colgada”, producto de la erosión del fondo del lecho (km 1,4)	S1-ES-05	Control de Erosión	Gavión sábana	Obra tipo muro guarda radier en forma puntual en sector de bocatoma, combinado con la propagación de vegetación ribereña que permita estabilizar el lecho y controlar el efecto erosivo del flujo	DOH/CNR/Regantes
S1	1,75	Defensa fluvial en ribera izquierda en sector Catarpe	S1-ES-06	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Se elimina obra existente, ya que no cierra paso al flujo tras los gaviones	DOH

CUADRO 6-7: SOLUCIONES ESTRUCTURALES

DIAGNÓSTICO			DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES				
SECTOR	Km	DESCRIPCION	CÓDIGO	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
		(km 1,75), es sobrepasada para T=25 años					
S1	1,86	Descarga de la quebrada el Diablo está ubicada sobre el nuevo trazado de camino a Catarpe, se requiere obra de arte	S1-ES-OA2	Garantizar conectividad	Puente de Madera	Se agrega un puente de madera para el cruce del sector de descarga de la quebrada	Vialidad
S1	2,0	Sector cercano a sede comunitaria Catarpe en ribera izquierda (km2,0) se inunda para T=25 años	S1-ES-07	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega obra de defnsa fluvial que empalma con ladera de cerro, se une a defensa fluvial existente en Sede de Catarpe y permite direccionar la descarga de quebrada lateral y evitar desborde del cauce hacia sector de viviendas. La obra se mejora para T=100 años.	DOH
S1	4,24	Acceso a vivienda y predios agrícolas en ribera derecha no cuenta con obra de arte de cruce del río	S1-ES-OA3	Garantizar Conectividad	Badén	Se agrega un badén diseñado para periodo de retorno T=5 años	Vialidad
S1	5,0 al 5,9	Atravesio camino principal de acceso a Catarpe (km 5,1). La obra es sobrepasada a partir de T=5 años	S1-ES-08	Garantizar Conectividad	Defensa Fluvial	Se realiza encauzamiento del río San Pedro y obra de defensa fluvial	DOH
S1	5,15	Descarga de la quebrada el Chulakao está ubicada sobre el nuevo trazado de camino a Catarpe, se requiere obra de arte	S1-ES-OA4	Garantizar Conectividad	Puente de Madera	Se agrega un puente de madera para el cruce del sector de descarga de la quebrada	Vialidad
S1	5,8	Bocatoma canal Huachar en ribera izquierda (km 5,8). Se producen velocidades potencialmente erosivas a partir de T=10años y desborde	S1-ES-09	Protección Infraestructura	Obra de protección	Se cambia el punto de captura de la bocatoma al km 5,4 se protege la toma con muro de hormigón y se realiza canalización de conexión	DOH/CNR/Regantes

CUADRO 6-7: SOLUCIONES ESTRUCTURALES

DIAGNÓSTICO			DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES				
SECTOR	Km	DESCRIPCION	CÓDIGO	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
		hacia la obra a partir de T=25 años					
S1	6,3	Inundación de viviendas para T=100 años aguas arriba de tranque Huachar (km6,3), en ribera izquierda	S1-ES-10	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Tramo puntual de gaviones para evitar inundación de viviendas. La obra se diseña para T=100 años.	DOH
S1	7,0	Acceso a vivienda y predios agrícolas en ribera derecha no cuenta con obra de arte de cruce del río	S1-ES-OA5	Garantizar Conectividad	Badén	Se agrega un badén diseñado para periodo de retorno T=5 años	Vialidad
S1	7,5 al 8,7	Pretil ribera izquierda en sector de barrera de acceso a Catarpe (km8,05) es sobrepasado a partir de T=10 años	S1-ES-11	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Encauzamiento río San Pedro. Modificación pretil existente, aumentando cota de coronamiento a al menos 3 m sobre nivel del fondo del cauce. La obra se mejora para T=25 años.	DOH
S1	8,4	Sector que se utiliza como atraveso de una ribera a otra del río San Pedro en punto de garita de acceso a Catarpe no cuenta con obra de arte de cruce del río	S1-ES-OA6	Garantizar Conectividad	Badén	Se agrega un badén diseñado para periodo de retorno T=5 años	Vialidad
S2	8,7 al 8,95	La Defensa Fluvial de ambas riberas en Sector Quito es sobrepasada a contar de T=25 años	S2-ES-01	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Rediseño y mejoramiento de la obra existente. La obra se debe desplazar para aumentar sección del cauce para T=100 años.	DOH
S2	8,95	Atraveso camino acceso a sector Pucará de Quito, no es factible el atraveso para T=5 años	S2-ES-02	Obra de Cruce	Pasarela	Implementar pasarela peatonal que permite cruzar el cauce de Quito alto a Quito bajo en periodo de lluvias estivales	Municipalidad/Serviu
S2	9,2 al 9,65	Se produce desborde del cauce en ribera izquierda para la crecida de T=100 años, generándose un escurrimiento	S2-ES-03	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega obra de defensa fluvial aumentando la sección de escurrimiento del cauce y	DOH

CUADRO 6-7: SOLUCIONES ESTRUCTURALES

DIAGNÓSTICO			DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES				
SECTOR	Km	DESCRIPCION	CÓDIGO	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
		paralelo detrás del pretil existente que continúa e ingresa hacia el poblado de San Pedro por calle Domingo Atienza				evitando desborde para T=100 años	
S2	9,2 al 9,75	Se produce desborde del cauce en ribera izquierda para la crecida de T=100 años, generándose inundación de viviendas y un escurrimiento paralelo al cauce	S2-ES-04	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega obra de defensa fluvial aumentando la sección de escurrimiento del cauce y evitando desborde para T=100 años	DOH
S2	10,35	Defensa fluvial ribera derecha y atraveso Domingo Atienza, no es factible el atraveso para T=5 años	S2-ES-05	Obra de Cruce	Pasarela	Implementar pasarela peatonal que permite cruzar el cauce desde Domingo Atienza hacia la ribera poniente	Municipalidad/Serviu
S2	9,85 al 10,8	Defensas fluviales en Sector angostamiento cauce en Domingo Atienza. Las obras se desbordan a contar de T=5 años	S2-ES-06	Protección de la Población	Encauzamiento y defensa fluvial	Se propone devolver la sección original al cauce en este tramo. En una longitud de aproximadamente 1050 m se debe ampliar el ancho del cauce hasta los márgenes que delimitan la línea de árboles en cada ribera. Lo anterior implica desalojar toma y realizar expropiaciones	DOH
S2	10,6 al 11,1	Defensas fluviales en Sector angostamiento cauce en Domingo Atienza. Las obras se desbordan a contar de T=5 años	S2-ES-07	Protección de la Población	Encauzamiento	Se propone devolver la sección original al cauce en este tramo. En una longitud de aproximadamente 475 m se debe ampliar el ancho del cauce hasta los márgenes que delimitan la línea de árboles en cada ribera. Lo anterior implica eliminar camino lateral en ribera	DOH

CUADRO 6-7: SOLUCIONES ESTRUCTURALES

DIAGNÓSTICO			DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES				
SECTOR	Km	DESCRIPCION	CÓDIGO	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
						izquierda y realizar expropiaciones	
S2	11,3 al 11,65	Se produce desborde del cauce en la ribera derecha, aguas abajo del puente de acceso a San Pedro para la crecida de 100 años. Se inunda vivienda.	S2-ES-08	Evitar Desbordamiento	Puente-Defensa fluvial y encauzamiento	Se propone incrementar el ancho del puente, para que esta solución sea efectiva se debe mejorar eje del trazado del cauce aguas abajo, mejorar la sección e incluir obra de defensa en ribera derecha	DOH
S2	11,9	Sector de cruce del río desde la calle Caracoles, que permite conectar hacia camino a Calama y hacia camino a Coyo no cuenta con obra de cruce del río	S2-ES-OA1	Garantizar Conectividad	Badén	Se agrega un badén diseñado para periodo de retorno T=5 años	Vialidad
S2	11,55 al 19,5	Defensa fluvial sector Conde Duque (km 11,65). Se produce desborde hacia las viviendas para T=25 años	S2-ES-09	Protección de la Población	Defensa fluvial y encauzamiento	Se debe aumentar la altura de la defensa junto con mejorar el encauzamiento del río en sector de curva pronunciada. La obra se mejora para T=100 años.	DOH
S2	12,05 al 12,15	Defensa fluvial sector Cruce calle Caracoles (km 12). Se desborda para T=25 años	S2-ES-10	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agregan 3 espigones botadores y se debe extender la obra de defensa existente hacia aguas abajo hasta empalmar con tramo recto del cauce. La obra se mejora para T=100 años.	DOH
S2	12,65 al 12,9	Se produce desborde del cauce en Km 12,75 generándose un brazo secundario y paralelo al río para la crecida de 100 años. Dicho desborde inunda camino y viviendas de Ayllu Yaye	S2-ES-11	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se incorpora obra de defensa fluvial para el camino existente que permite evitar desborde para T100 años	DOH

CUADRO 6-7: SOLUCIONES ESTRUCTURALES

DIAGNÓSTICO			DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES				
SECTOR	Km	DESCRIPCION	CÓDIGO	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
S2	13 al 14,7	Sector badén acceso Séquitor. Se produce inundación de viviendas a contar de T=25	S2-ES-12	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial y encauzamiento	Deshabilitar las construcciones que se encuentran en el borde y proteger el resto de viviendas que están más alejadas del borde	DOH
S2	14,3	Sector de cruce del río desde la rotonda Séquitor, que permite conectar hacia camino a Calama y hacia camino a Coyo no cuenta con obra de cruce del río	S2-ES-OA2	Garantizar Conectividad	Badén	Se agrega un badén diseñado para periodo de retorno T=5 años	Vialidad
S3	15,7 al 16,75	Canal de riego y Postación eléctrica hacia Coyo (km15,95). Se produce inundación a partir de T=5 años	S3-ES-01	Protección Infraestructura	Gavión de protección	Se agrega obra de protección de contorno mediante 2 niveles de gaviones	Regantes/empresa servicio electricidad
S3	17,25	Atraveso ruta Circunvalación. A partir de T=5 años, el cauce desborda por sobre la ruta	S3-ES-02	Garantizar Conectividad	Puente	Se debe rediseñar la obra de atraveso considerando un puente de mayor tamaño, aumentando la cota de rasante de la ruta e incluir al menos una obra de arte adicional para el paso de las aguas de un brazo del cauce que se activa por la ribera derecha para caudales de mayor periodo de retorno. Esta obra debe ser diseñada para T=100 años	Vialidad
S3	17,6 al 18,7	Ayllu de Coyo. Se produce desborde para T=50 años en km 18,3	S3-ES-03	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	Se plantea un tramo de defensa fluvial tipo pretil a lo largo de todo el Ayllu que permita evitar que las aguas desborden hacia el camino. En la zona de mayor afectación, la defensa debe ser de un material más resistente	DOH

CUADRO 6-7: SOLUCIONES ESTRUCTURALES

DIAGNÓSTICO			DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES				
SECTOR	Km	DESCRIPCION	CÓDIGO	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
S3	19,6	Sector de cruce del río desde camino que une Coyo y Tulor, que permite conectar hacia Ayllú de Better no cuenta con obra de cruce del río	S3-ES-OA1	Garantizar Conectividad	Badén	Se agrega un badén diseñado para periodo de retorno T=5 años	Vialidad
S3	20,1 al 22,1	Pretil camino acceso a Tulor, se desborda a partir de T=10 años	S3-ES-04	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	Extensión y mejoramiento del pretil, que proteja al menos para T=100 años. Se propone que la defensa sea de enrocados acorde a lo solicitado por la Comunidad	DOH
S4	0 al 0,6	Se produce desborde del pretil existente en ribera izquierda hacia sector de sitio arqueológico	S4-ES-01	Protección Patrimonial	Defensa fluvial	Mejoramiento de la sección del cauce y protección de ambas riberas mediante enrocado	DOH
S4	0,6 al 1,1	Pretil ribera derecha Vilama. Se produce desborde para T=100 años	S4-ES-02	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	Perfilamiento del cauce siguiendo la línea geomorfológica de la ribera. Se incluye pretil de protección ribera derecha	DOH
S1, S2 y S3	-	-	GEN-ES-01	-	Señalética en Cauces	Incorporar señalética de áreas inundables del cauce, de usos del cauce, sectores patrimoniales y otros.	Municipalidad

Fuente: Elaboración propia

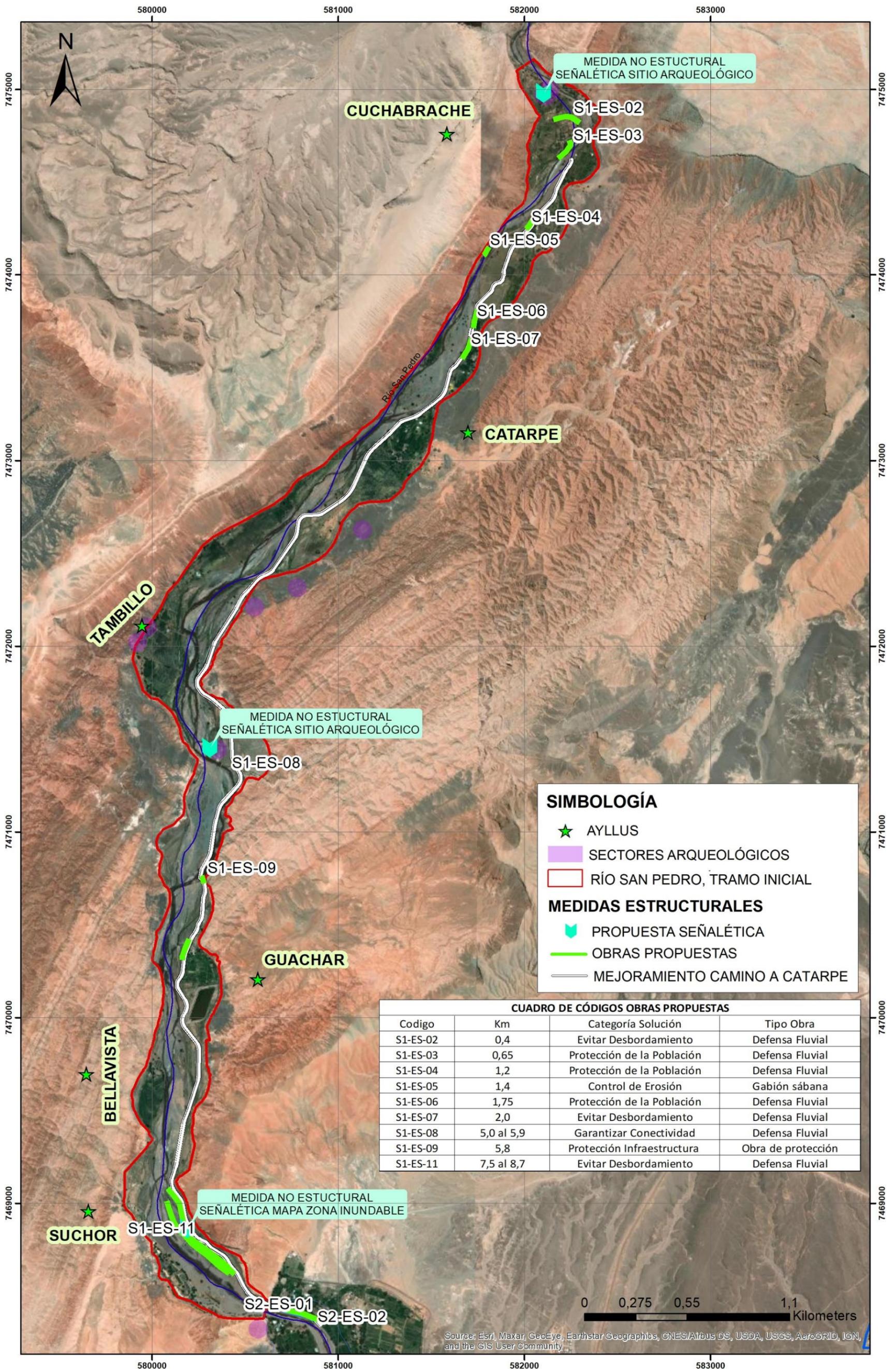


FIGURA 6-12: SOLUCIONES PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 1

Fuente: Elaboración propia.

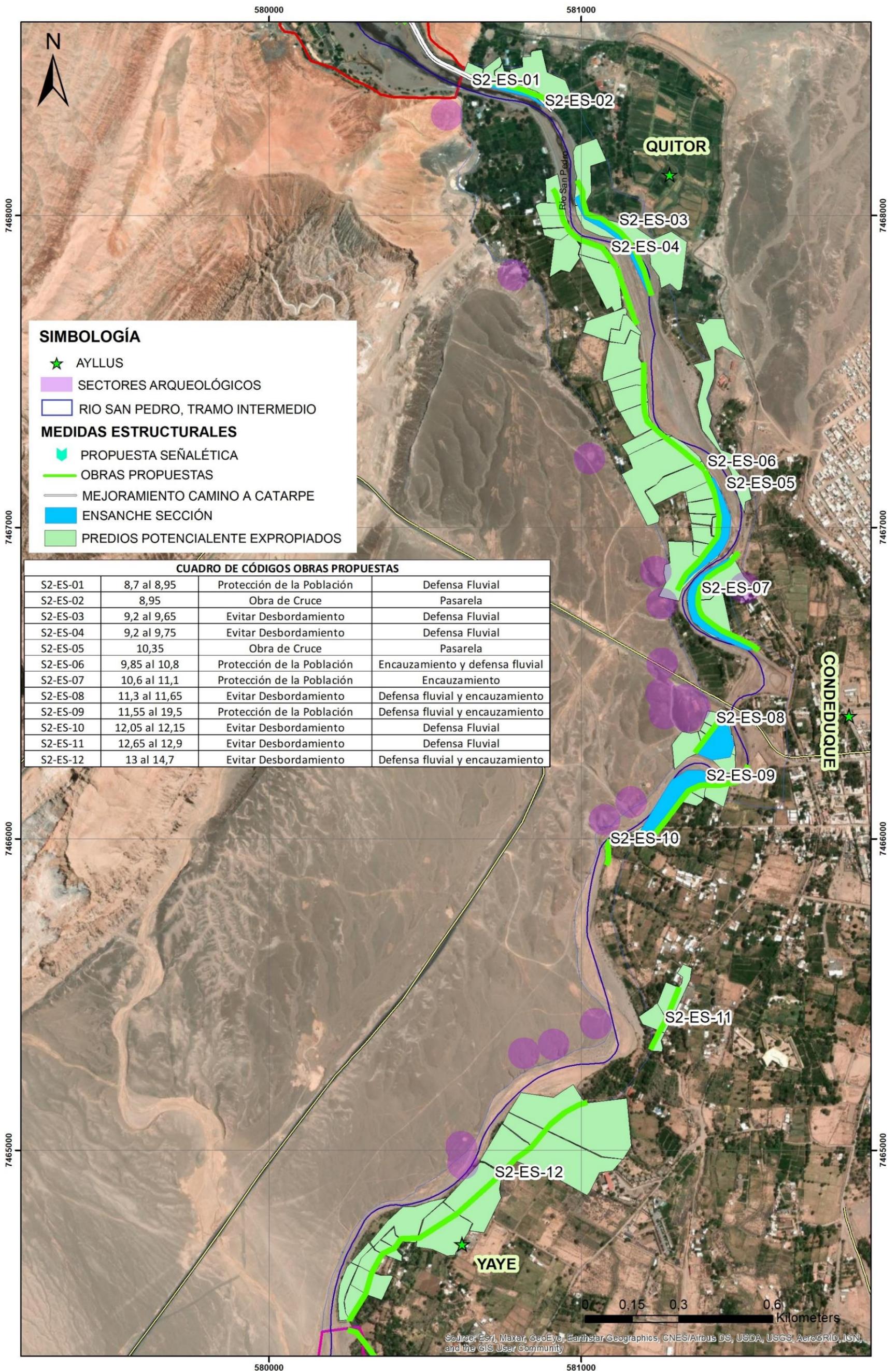


FIGURA 6-13: SOLUCIONES PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 2

Fuente: Elaboración propia.

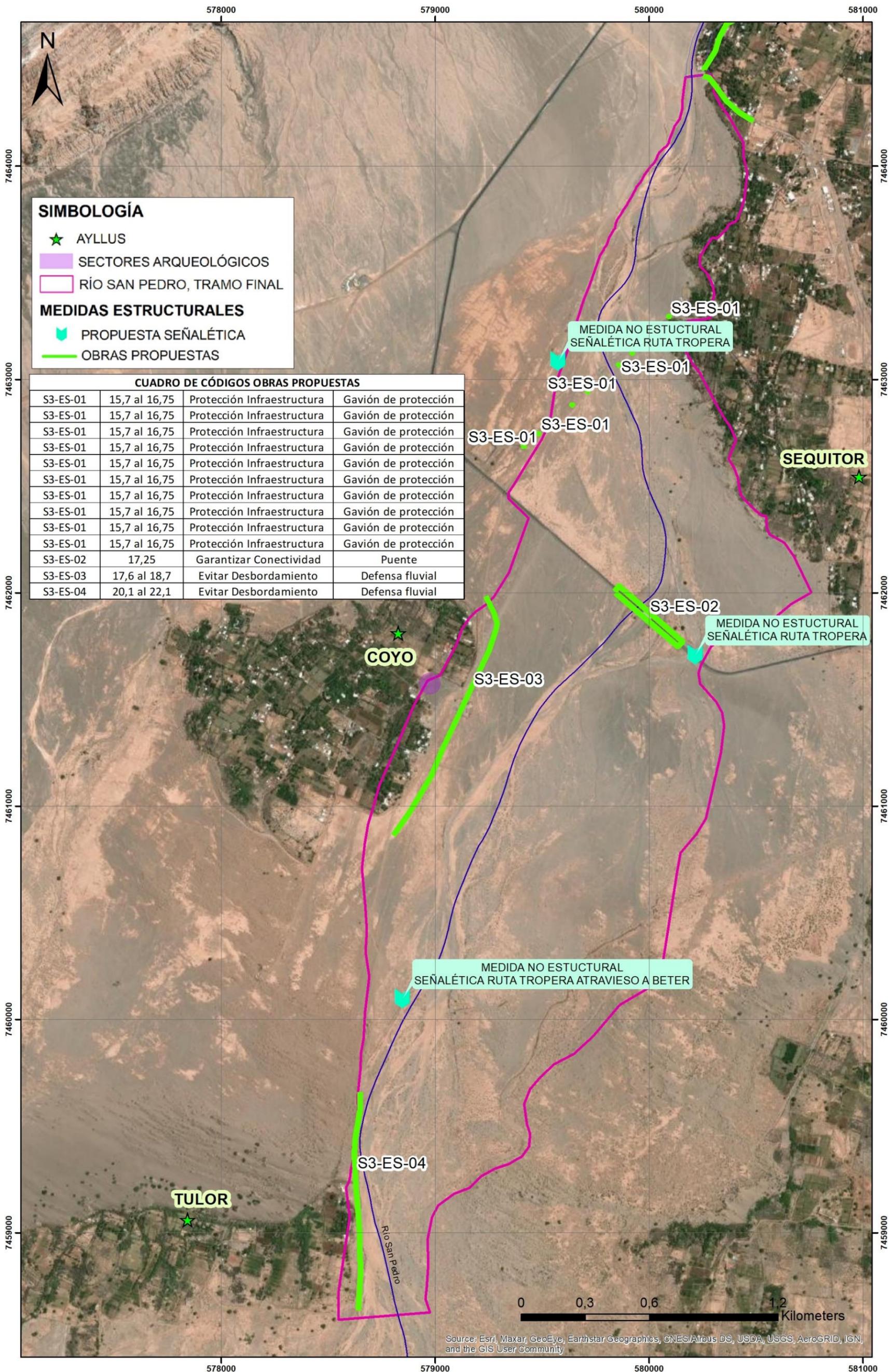


FIGURA 6-14: SOLUCIONES PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 3

Fuente: Elaboración propia.

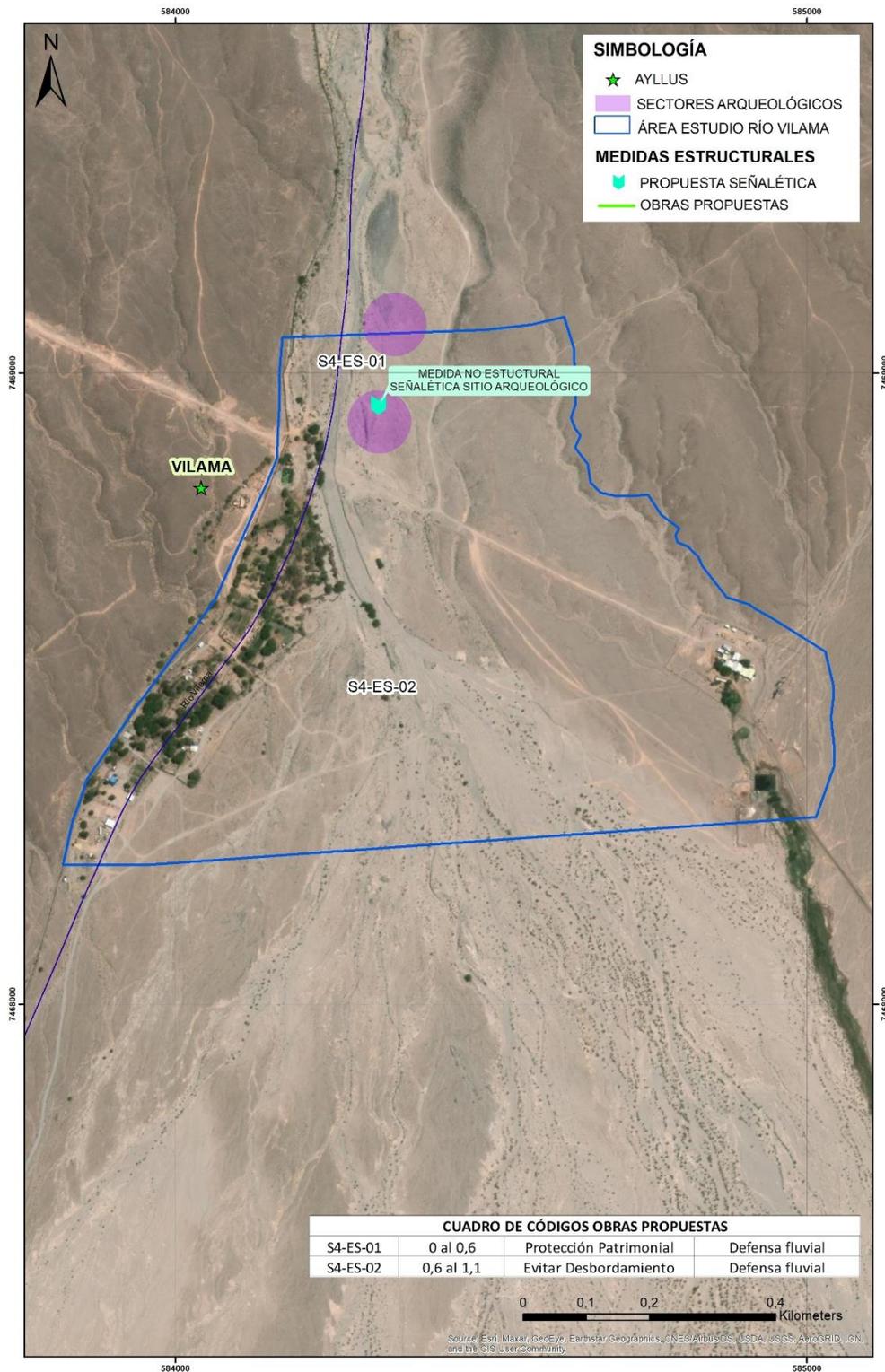


FIGURA 6-15: SOLUCIONES PROPUESTAS POR EL PLAN DE MANEJO – SECTOR 4

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Modelación Hidráulica con Plan de manejo de cauces

6.4.1. Introducción

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de la modelación hidráulica para los ríos San Pedro y Vilama, implementando las soluciones estructurales propuestas en el plan de manejo preliminar.

Respecto a la información de entrada que requiere el modelo como condiciones de borde, caudales, rugosidades, etc. Corresponderán a los mismos valores utilizados para realizar el diagnóstico.

Para una mejor presentación de los resultados estos serán agrupados en función de los sectores en que se dividió el área de estudio y que se mencionan a continuación.

- Sector 1 (S1): Río San Pedro entre estación Cuchabrachi y Pucara de Quito.
- Sector 2 (S2): Río San Pedro entre Pucara de Quito hasta acceso a Sequitor.
- Sector 3 (S3): Río San Pedro entre acceso a Sequitor hasta Ayllu de Tulo.
- Sector 4 (S4): Río Vilama.

6.4.2. Río San Pedro entre estación Cuchabrachi y Pucara de Quito

En el sector norte del río San Pedro correspondiente al sector entre estación Cuchabrachi y Pucara de Quito, se proyectaron diversas medidas estructurales como, pretiles, gaviones, remoción de algunas defensas fluviales existentes, entre otras. Las que buscaran mitigar los daños a viviendas asociados la crecida con periodo de retorno de 100 años.

Además de estas medidas se considera el trazado de un camino que permita la conectividad de la localidad de San Pedro con el sector norte, el cual no colapse ante las crecidas dado que esto es difícil implementarlo para una crecida con periodo de retorno de 100 años se propondrá una ruta que no sea afectada para crecidas asociadas a periodos de retorno de hasta 25 años.

En el Cuadro 6-8 se presentan de las soluciones estructurales propuestas, indicando su ubicación, descripción y dimensiones.

CUADRO 6-8 SOLUCIONES ESTRUCTURALES PROPUESTAS SECTOR 1

DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES					
CÓDIGO	Km	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES
S1-ES-01	0,7 al 8,4	Garantizar Conectividad	Pretil Defensa Fluvial y Mejoramiento camino	Realizar un mejoramiento de trazado del camino, junto con las obras de arte necesarias para que cumpla su función al menos hasta T=25 años	2 m alto y 8 Km de largo
S1-ES-02	0,4	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega defensa fluvial siguiendo el trazado del canal de riego existente	2 m alto y 160 m de largo
S1-ES-03	0,65	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Extensión y Mejoramiento de la obra existente	3 m alto y 130 m de largo
S1-ES-04	1,2	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Se agrega tramo de gaviones de altura aproximada 3 m que permitan proteger el camino de acceso y las viviendas. La obra se mejora para T=100 años.	3 m alto y 100 m de largo
S1-ES-05	1,4	Control de Erosión	Gavión sábana	Obra tipo "sábana" de gavión en forma puntual en sector de bocatoma, combinado con la propagación de vegetación ribereña que permita estabilizar el lecho y controlar el efecto erosivo del flujo	1 m alto y 40 m de largo
S1-ES-06	1,75	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Se elimina obra existente, ya que no cierra paso al flujo tras los gaviones	-
S1-ES-07	2,0	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega obra de defensa fluvial que empalma con ladera de cerro y permite direccionar la descarga de quebrada lateral. La obra se mejora para T=100 años.	2 m alto y 200 m de largo
S1-ES-08	5,0 al 5,9	Garantizar Conectividad	Defensa Fluvial	Se realiza encauzamiento del río San Pedro y obra de defensa fluvial	Encauzamiento de 60 m de ancho 900 m de largo. Gavión 3 m alto y 200 m de largo

CUADRO 6-8 SOLUCIONES ESTRUCTURALES PROPUESTAS SECTOR 1

DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES					
CÓDIGO	Km	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES
S1-ES-09	5,8	Protección Infraestructura	Obra de protección	Se cambia el punto de captura de la bocatoma al km 5,4 se protege la toma con muro de hormigón y se realiza canalización de conexión	Diseñar para 2,5 m altura y 1 m de socavación
S1-ES-10	6,3	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Tramo puntual de gaviones para evitar inundación de viviendas. La obra se diseña para T=100 años.	3 m alto y 200 m de largo
S1-ES-11	7,5 al 8,7	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Encauzamiento río San Pedro. Modificación pretil existente, aumentando cota de coronamiento a al menos 3 m sobre nivel del fondo del cauce. La obra se mejora para T=25 años.	3 m alto y 900 m de largo

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 6-16 y Figura 6-17 se presentan los resultados de la modelación hidráulica para la crecida asociada a periodos de retorno de 25 y 100 años, se observa las obras de defensa proyectadas no se ven sobrepasadas por la crecida centenaria, no así el trazado camino lo cual no es preocupante ya que este si satisface su periodo de retorno de diseño de 25 años.

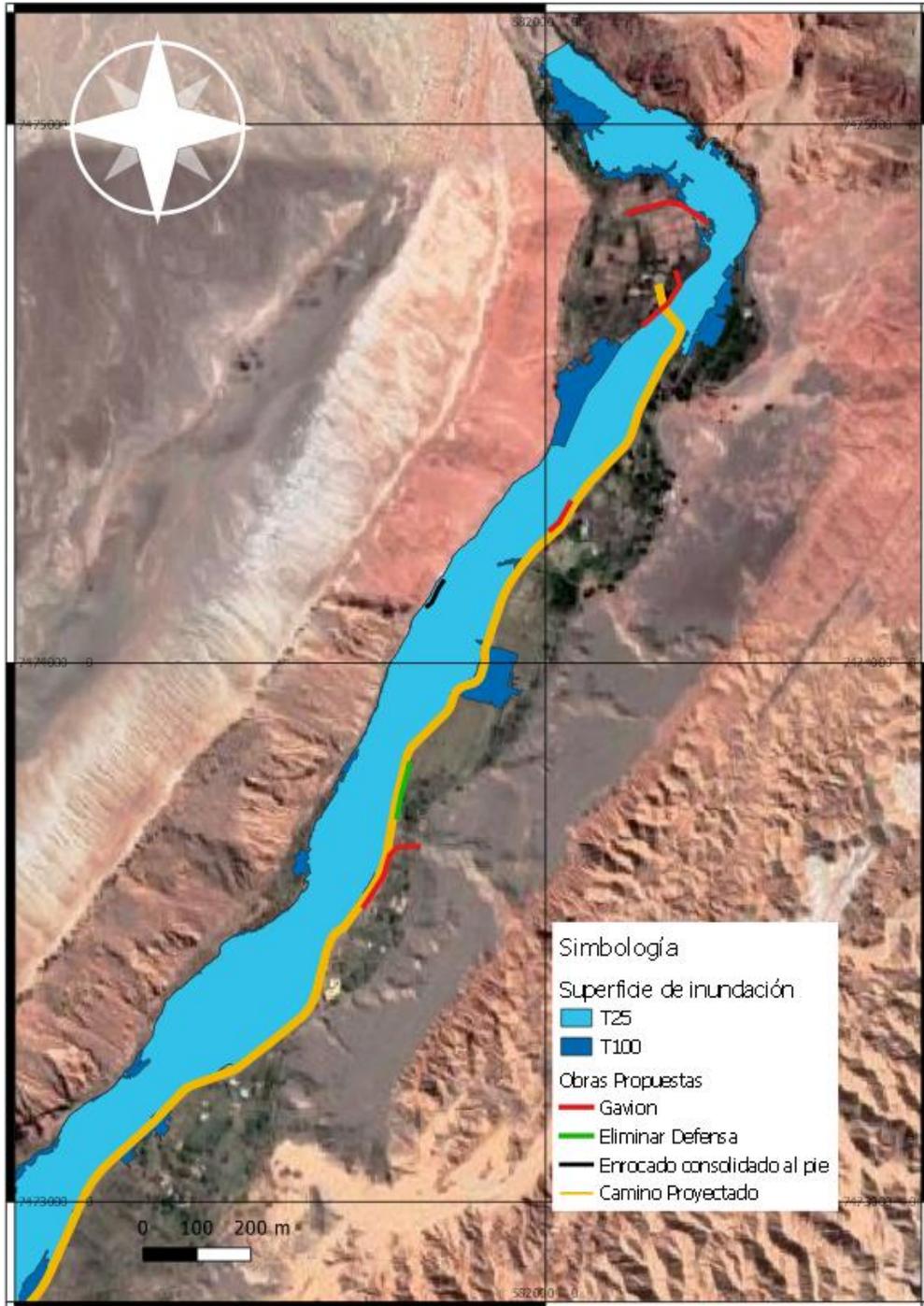


FIGURA 6-16: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO (S1) CON OBRAS PROYECTADAS

Fuente: Elaboración Propia.

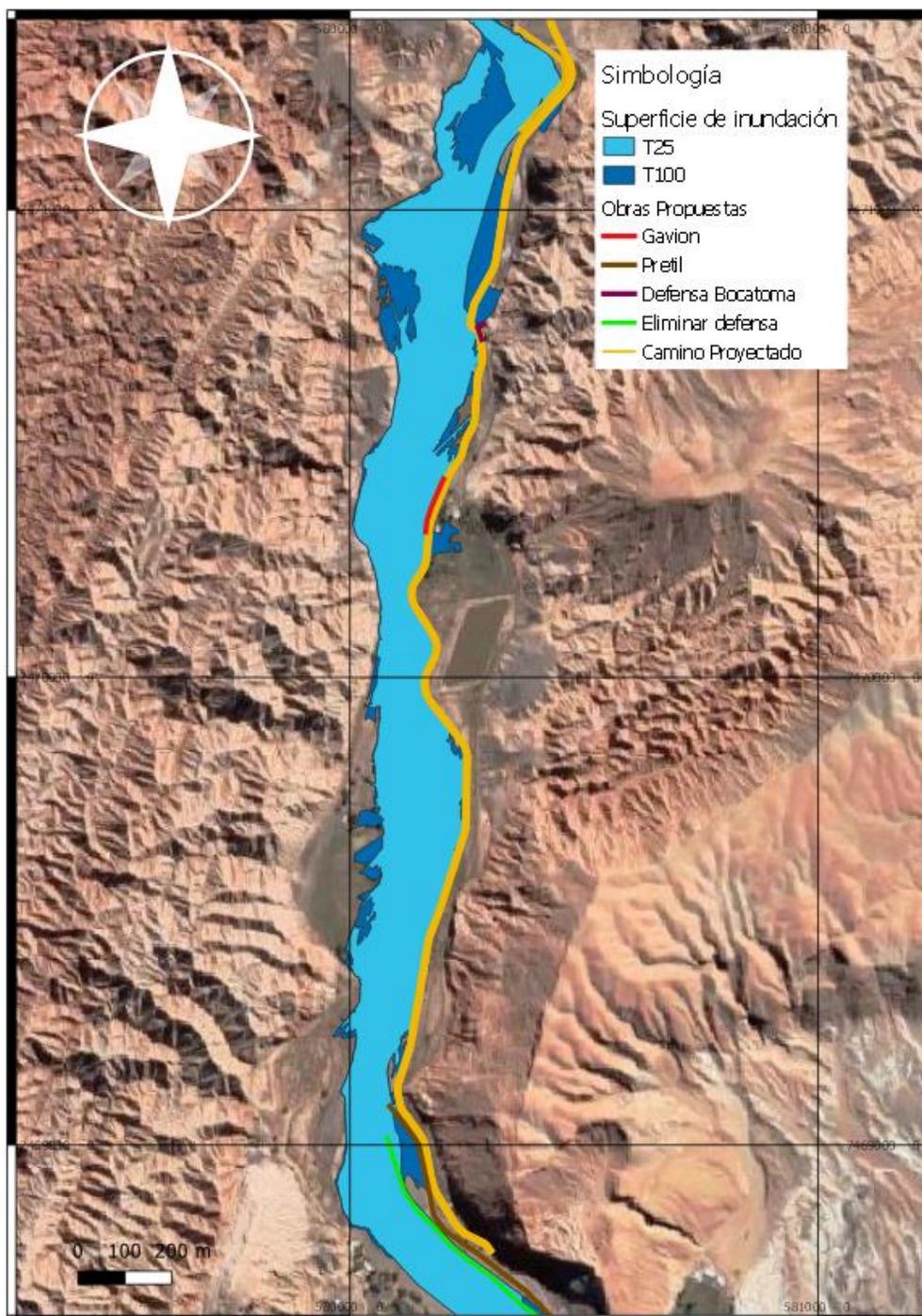


FIGURA 6-17: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO (S1) CON OBRAS PROYECTADAS

Fuente: Elaboración Propia.

6.4.3. Río San Pedro entre Pucara de Quito hasta acceso a Sequitor

En el sector urbano del Río San Pedro se proyectan obras que buscan contener los desbordes identificados en el diagnóstico, para las inundaciones leves se proyectaron muros de hormigón de baja altura buscando generar las menores intervenciones posibles. Por otro lado, cuando el cauce se ve muy restringido es inevitable proponer intervenciones mayores como incrementar la sección del río y a su vez complementarlo con una nueva configuración de los gaviones, este tipo de medidas es necesaria en el sector de Domingo de Atienza y aguas abajo del puente de acceso a San Pedro.

En el Cuadro 6-9 se presentan de las soluciones estructurales propuestas, indicando su ubicación, descripción y dimensiones.

CUADRO 6-9 SOLUCIONES ESTRUCTURALES PROPUESTAS SECTOR 2

DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES					
CÓDIGO	Km	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES
S2-ES-01	8,7 al 8,95	Protección de la Población	Defensa Fluvial	Rediseño y mejoramiento de la obra existente. La obra se debe desplazar para aumentar sección del cauce para T=100 años.	5 m alto y 120 m de largo
S2-ES-03	9,2 al 9,65	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega obra de defensa fluvial aumentando la sección de escurrimiento del cauce y evitando desborde para T=100 años	5 m alto y 400 m de largo
S2-ES-04	9,2 al 9,75	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se agrega obra de defensa fluvial aumentando la sección de escurrimiento del cauce y evitando desborde para T=100 años	5 m alto y 400 m de largo
S2-ES-06	9,85 al 10,8	Protección de la Población	Encauzamiento y defensa fluvial	Se propone devolver la sección original al cauce en este tramo. En una longitud de aproximadamente 1050 m se debe ampliar el ancho del cauce hasta los márgenes que delimitan la línea de árboles en cada ribera. Lo anterior implica desalojar toma y realizar expropiaciones	5 m alto y 1 Km de largo

CUADRO 6-9 SOLUCIONES ESTRUCTURALES PROPUESTAS SECTOR 2

DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES					
CÓDIGO	Km	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES
S2-ES-07	10,6 al 11,1	Protección de la Población	Encauzamiento y defensa fluvial	Se propone devolver la sección original al cauce en este tramo. En una longitud de aproximadamente 475 m se debe ampliar el ancho del cauce hasta los márgenes que delimitan la línea de árboles en cada ribera. Lo anterior implica eliminar camino lateral en ribera izquierda y realizar expropiaciones	5 m alto y 475m de largo
S2-ES-08	11,3 al 11,65	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial y encauzamiento	Se propone incrementar el ancho del puente, para que esta solución sea efectiva se debe mejorar eje del trazado del cauce aguas abajo, mejorar la sección e incluir obra de defensa en ribera derecha	5 m alto y 350 m de largo
S2-ES-09	11,55 al 11,95	Protección de la Población	Defensa fluvial y encauzamiento	Se debe aumentar la altura de la defensa junto con mejorar el encauzamiento del río en sector de curva pronunciada. La obra se mejora para T=100 años.	5 m alto y 400 m de largo
S2-ES-10	12,05 al 12,15	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se debe extender la obra hacia aguas abajo hasta empalmar con tramo recto del cauce. La obra se mejora para T=100 años.	2m alto y 100 m de largo
S2-ES-11	12,65 al 12,9	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	Se incorpora obra de defensa fluvial paralela a camino existente que permite evitar desborde para T100 años	2 m alto y 200 m de largo
S2-ES-12	13 al 14,7	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial y encauzamiento	Deshabilitar las construcciones que se encuentran en el borde y proteger el resto de viviendas que están más alejadas del borde	3 m alto y 1,1 Km de largo

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 6-18 se presentan los resultados de la modelación hidráulica para la crecida de 100 años, se observa que las obras de defensa proyectadas no se ven sobrepasadas por la crecida.

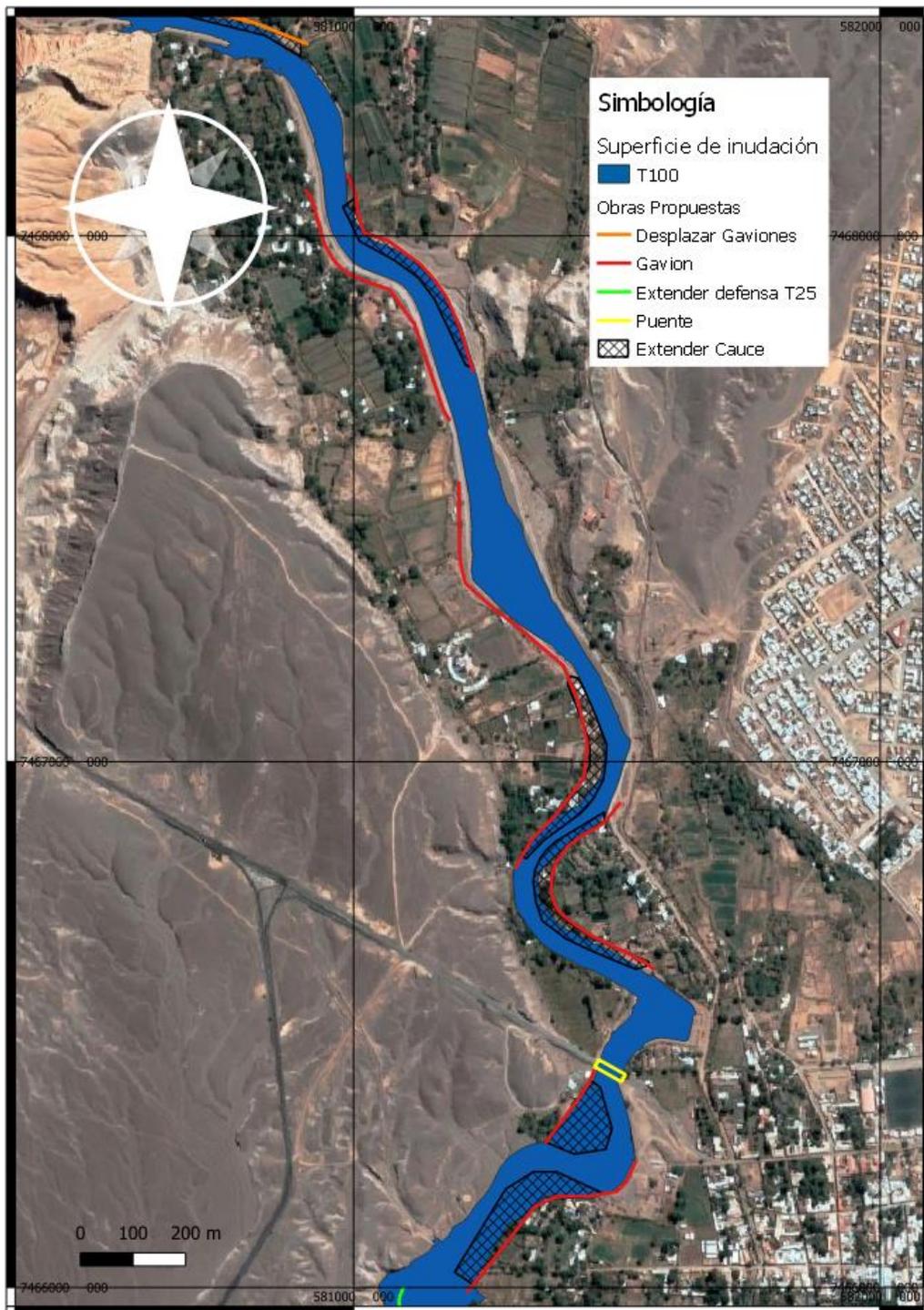


FIGURA 6-18: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO (S2) CON OBRAS PROYECTADAS

Fuente: Elaboración Propia.

6.4.3.1. Análisis situación Puente San Pedro

Uno de los puntos de mayor interés en el sector urbano de San Pedro corresponde al Puente de acceso a la localidad, en el diagnóstico realizado por el modelo bidimensional se identificó que este era rebasado, mientras que el modelo unidimensional se obtiene que el escurrimiento está a centímetros de tocar la zona inferior del tablero.

La situación identificada se puede remediar con las soluciones indicadas en el Cuadro 6-9. donde sin indicar cambios en la sección transversal del puente se logra obtener una revancha adecuada para la crecida centenaria.

En la Figura 6-19 se presentan las cotas del escurrimiento identificadas en el diagnóstico y la cota asociada a la situación con proyecto.

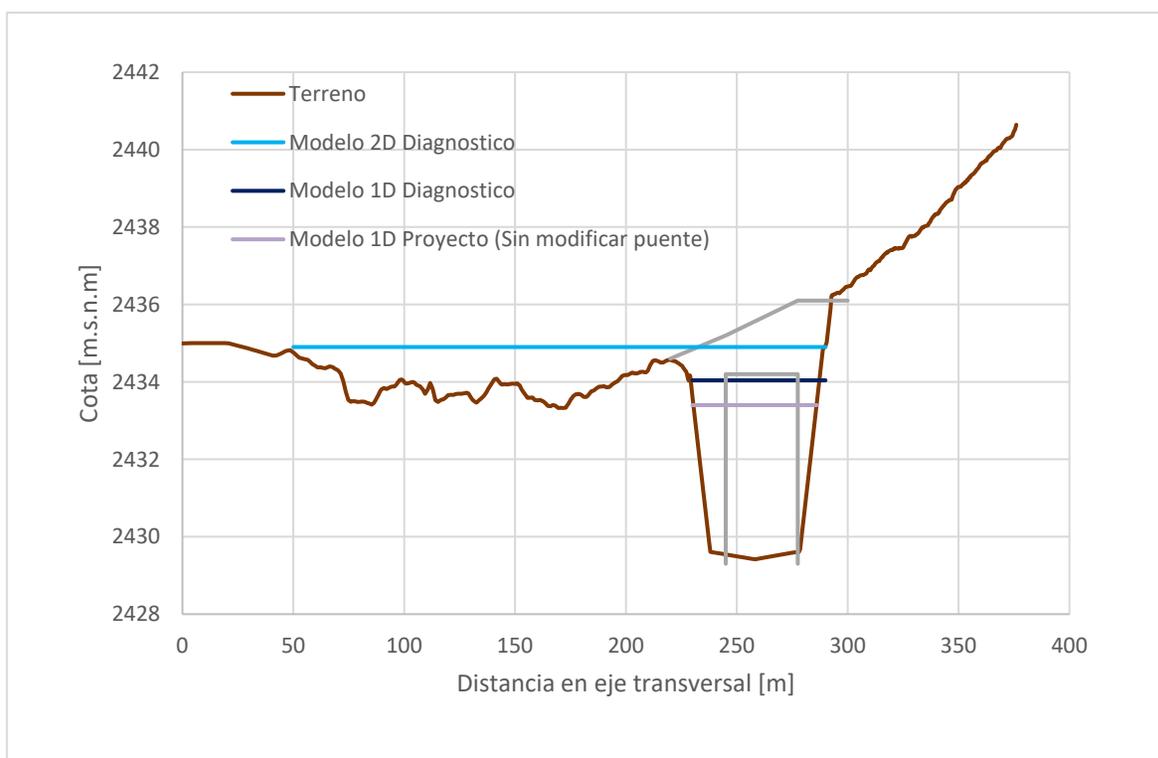


FIGURA 6-19: COTAS DE ESCURRIMIENTO EN PUENTE SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

Dado que las soluciones estructurales no serán implementadas al mismo tiempo, se busca analizar como remediar la situación del Puente sin la necesidad de implementar todas las soluciones.

Para esto se procede a realizar un análisis del eje hidráulico del puente, donde se analiza como varían las cotas del eje al incrementar la sección transversal del puente, este análisis es válido solo si se produce un incremento de la sección transversal aguas abajo del puente (despejar la ribera derecha).

De la Figura 6-20 se concluye que aumentos de 5 metros en el ancho del puente implican una disminución de aproximadamente 50 cm en la cota de escurrimiento, relación que es efectiva para incrementos en el ancho de hasta 10 metros. Respecto a la influencia de la sección del puente en el eje hidráulico aguas arriba, se observa que esta llega hasta el Km 11,1 lugar que corresponde a un tramo bastante canalizado del Río.

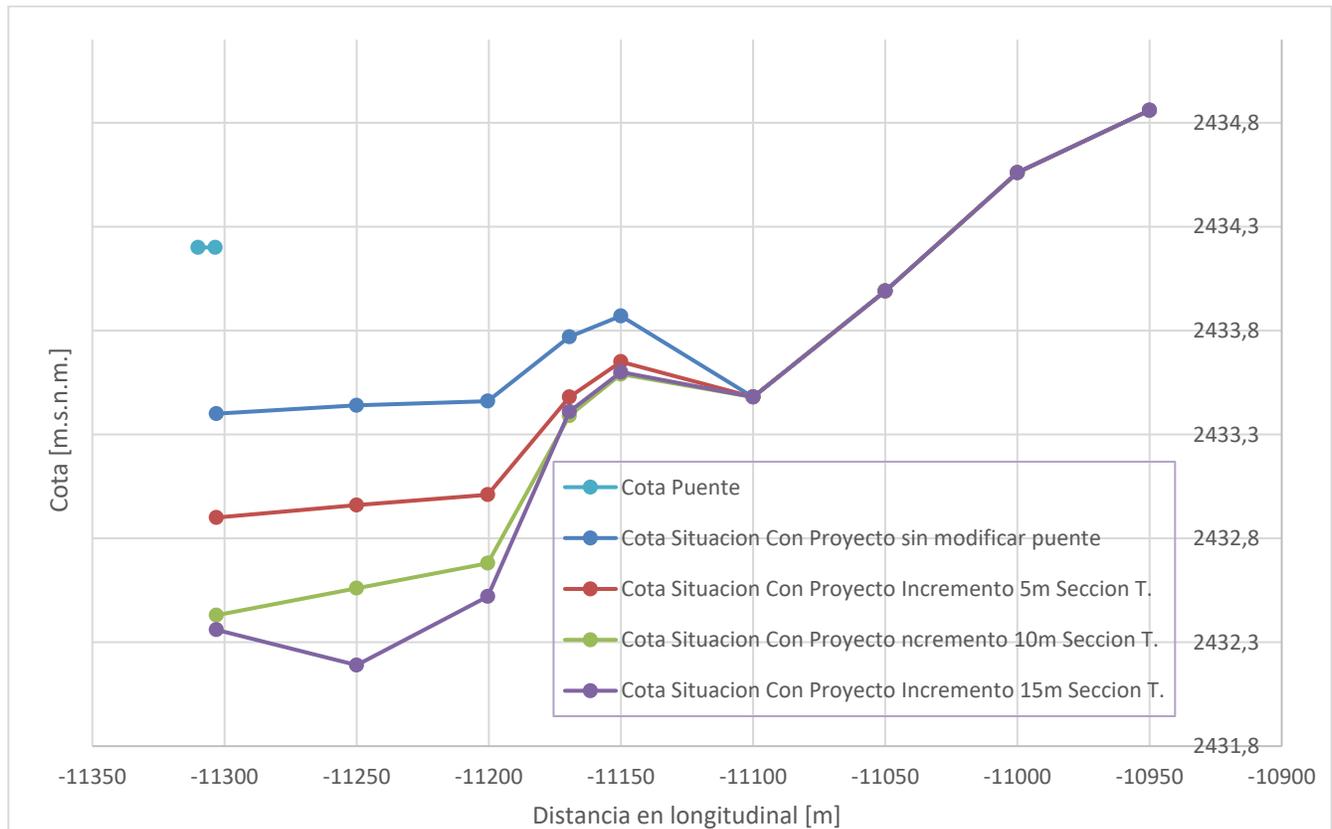


FIGURA 6-20: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EJE HIDRÁULICO EN PUENTE SAN PEDRO

Fuente: Elaboración Propia.

Asumiendo que el incremento de 5 metros en el ancho del puente disminuye 50 cm la cota de escurrimiento, se podría remediar la situación crítica identificada en el diagnóstico para el modelo 1D, ya que la revancha pasaría de los 15 a los 65 cm, con esto se cumpliría el caso especial para las revanchas mencionado en el Acápite 3.1003.106 MC Volumen 3.

“En casos puntuales, de excepción, en zonas urbanas de cauce canalizado y caudal controlado y si las condiciones específicas del entorno referidas a topografía y concentración habitacional lo justifiquen, la Dirección de Vialidad, ante un documento que lo fundamente, podrá autorizar reducir la revancha hasta un mínimo de 0,5 m, lo que debe realizarse por escrito previo a su materialización.”

Si se incrementa la sección del puente en 10 metros de ancho, la revancha se cumpliría satisfactoriamente acuerdo al modelo 1D. Se recomienda realizar estudio 2D para ingeniería de detalle.

Por lo tanto, se considera el aumento de la sección útil del puente en 10 m, con lo que el ancho útil del puente queda en 42,5 m y el largo total en 50 m.

6.4.4. Río San Pedro entre acceso a Sequitor hasta Ayllu de Tulor

Para el sector sur del Río San Pedro aguas abajo del acceso a Sequitor, se proyectan obras de defensas para proteger los ayllus, en el caso de Coyo se propone un pretil conformado con material acumulado en el lecho, mientras que para el Ayllu de Tulor se propone un gavión dado que en este sector el flujo se acelera por el estrechamiento.

Respecto a las obras de cruce en la ruta de circunvalación estas no pudieron ser remediadas por medio de la implementación de más alcantarillas, es por esto que se propone un puente de 65 metros de largo y 3 metros de alto el cual permite transportar la crecida centenaria de buena forma. En la Figura 6-21 se presenta un esquema de la obra propuesta, donde se observa que no se requiere modificar en gran medida la cota del camino para implementar la solución.

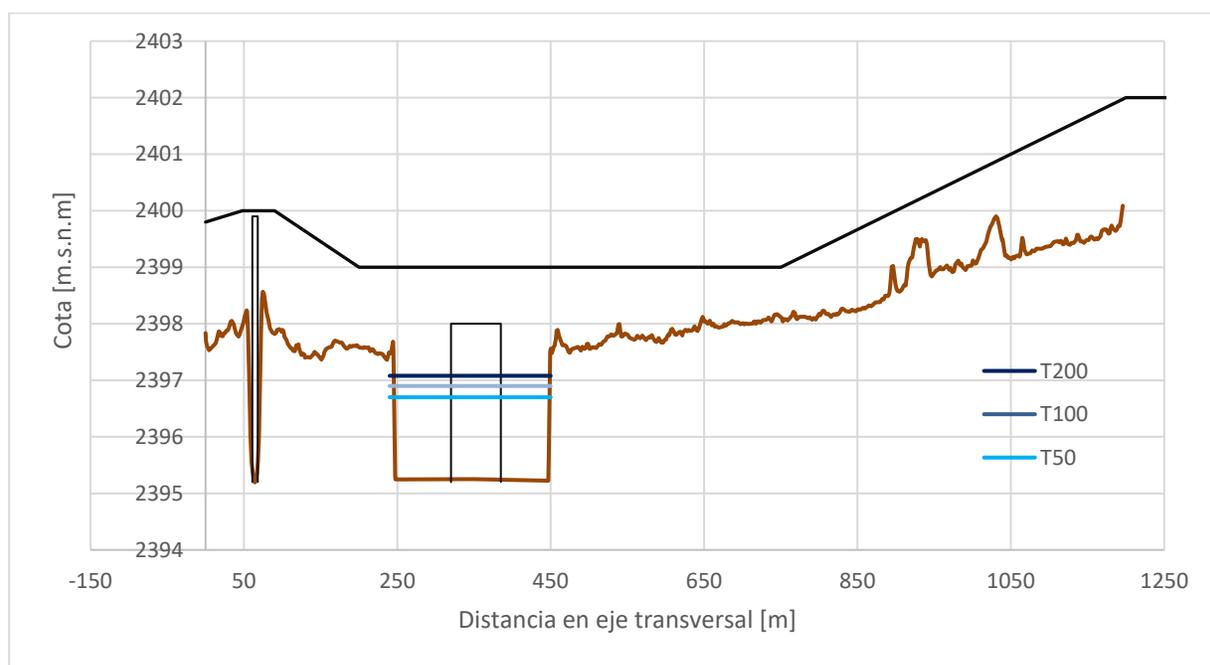


FIGURA 6-21: PUENTE PROPUESTO EN LA RUTA DE CIRCUNVALACIÓN

Fuente: Elaboración Propia.

Nota: La sección de la caja del río fue modificada para disponer de espacio que permitiría iterar sobre la longitud del puente necesaria.

En el Cuadro 6-10 se presentan de las soluciones estructurales propuestas, indicando su ubicación, descripción y dimensiones.

CUADRO 6-10 SOLUCIONES ESTRUCTURALES PROPUESTAS SECTOR 3

DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES					
CÓDIGO	Km	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES
S3-ES-01	15,7 al 16,75	Protección Infraestructura	Gavión de protección	Se agrega obra de protección de contorno mediante niveles de gaviones	2 m alto
S3-ES-02	17,25	Garantizar Conectividad	Puente	Se debe rediseñar la obra de atraveso considerando una obra de mayor tamaño, aumentando la cota de rasante de la ruta e incluir al menos una obra de arte adicional para el paso de las aguas de un brazo del cauce que se activa por la ribera derecha para caudales de mayor periodo de retorno. Esta obra debe ser diseñada para T=100 años	La sección de escurrimiento debe considerar una altura de a lo menos 3 m de alto y 65 m de ancho
S3-ES-03	17,6 al 18,7	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	Se plantea un tramo de defensa fluvial tipo pretil a lo largo de todo el Ayllu que permita evitar que las aguas desborden hacia el camino. En la zona de mayor afectación, la defensa debe ser de un material más resistente	2 m alto y 1,2 Km de largo
S3-ES-04	20,1 al 22,1	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	Extensión y mejoramiento del pretil, que proteja al menos para T=100 años	2 m alto y 1 Km de largo

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 6-22 se presentan los resultados de la modelación hidráulica para la crecida de 100 años, se observa que las obras de defensa proyectadas no se ven sobrepasadas por la crecida y que no se genera acumulación de flujo en la zona del puente.

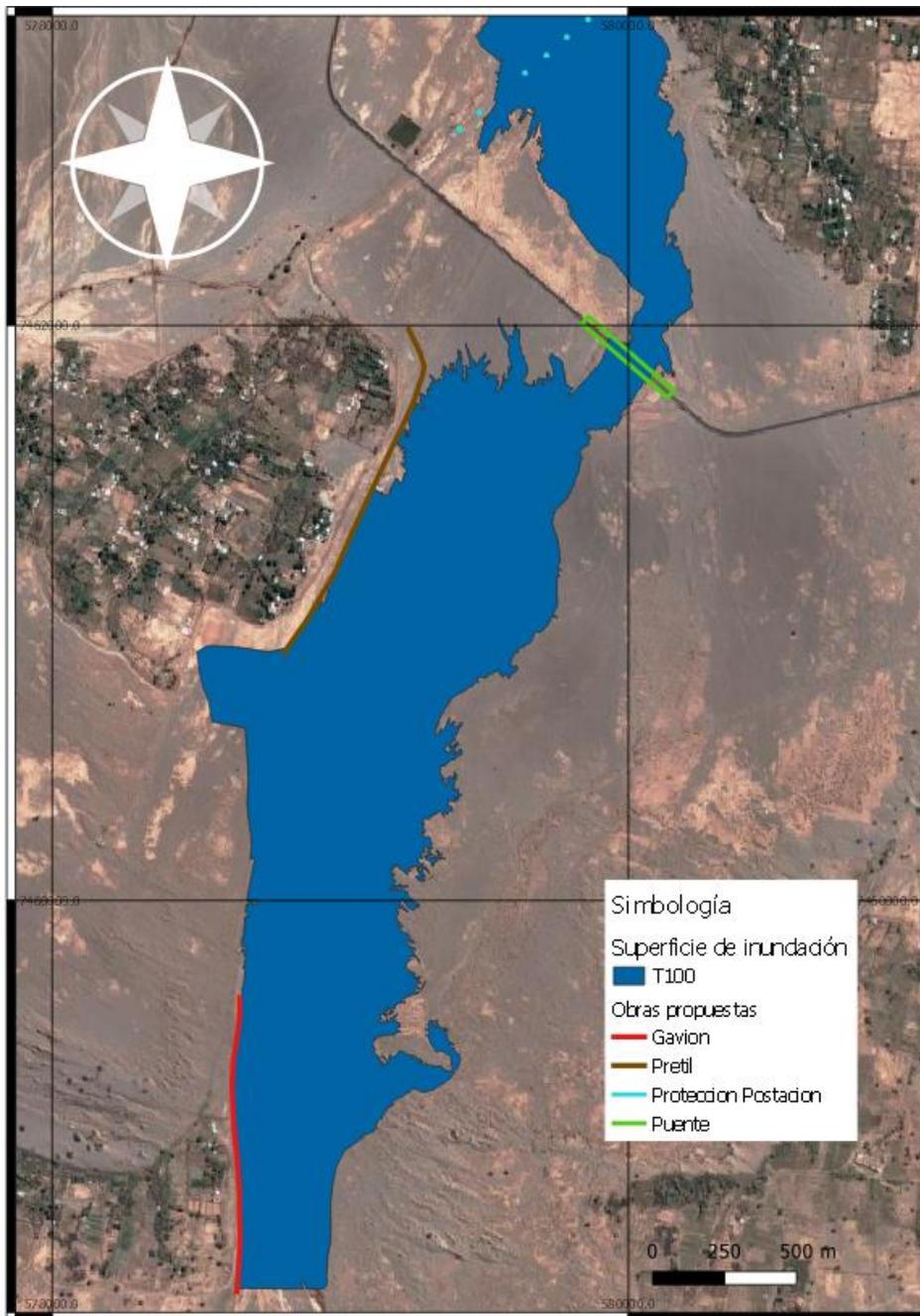


FIGURA 6-22: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO SAN PEDRO (S3) CON OBRAS PROYECTADAS

Fuente: Elaboración Propia.

6.4.5. Rio Vilama

En el rio Vilama se proyectan obras de defensa como una canalización de enrocado y un pretil en la ribera derecha para contener los desbordes que fueron identificados en el diagnóstico.

En el Cuadro 6-10 se presentan de las soluciones estructurales propuestas, indicando su ubicación, descripción y dimensiones.

CUADRO 6-11 SOLUCIONES ESTRUCTURALES PROPUESTAS SECTOR 4

DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES					
CÓDIGO	Km	CATEGORÍA	OBRA	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES
S4-ES-01	0 al 0,6	Protección Patrimonial	Defensa fluvial	Mejoramiento de la sección del cauce y protección de ambas riberas mediante enrocado	3 m alto y 600 m de largo
S4-ES-02	0,6 al 1,1	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	Perfilamiento del cauce siguiendo la línea geomorfológica de la ribera. Se incluye pretil de protección ribera derecha	2 m alto y 500 m de largo

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 6-23 se presentan los resultados de la modelación hidráulica para la crecida asociada a un periodo de retorno de 100 años para el rio Vilama en la situación con proyecto, se observa que la canalización por medio de enrocados logra remediar las inundaciones del rio hacia el Ayllu y sector arqueológico.

En la Figura 6-24 se presenta se presenta la velocidad que afecta a cada una de las obras, se observa que las velocidades promedio a los que se ven afectados tanto el pretil como los enrocados son inferiores a los máximos valores admisibles.

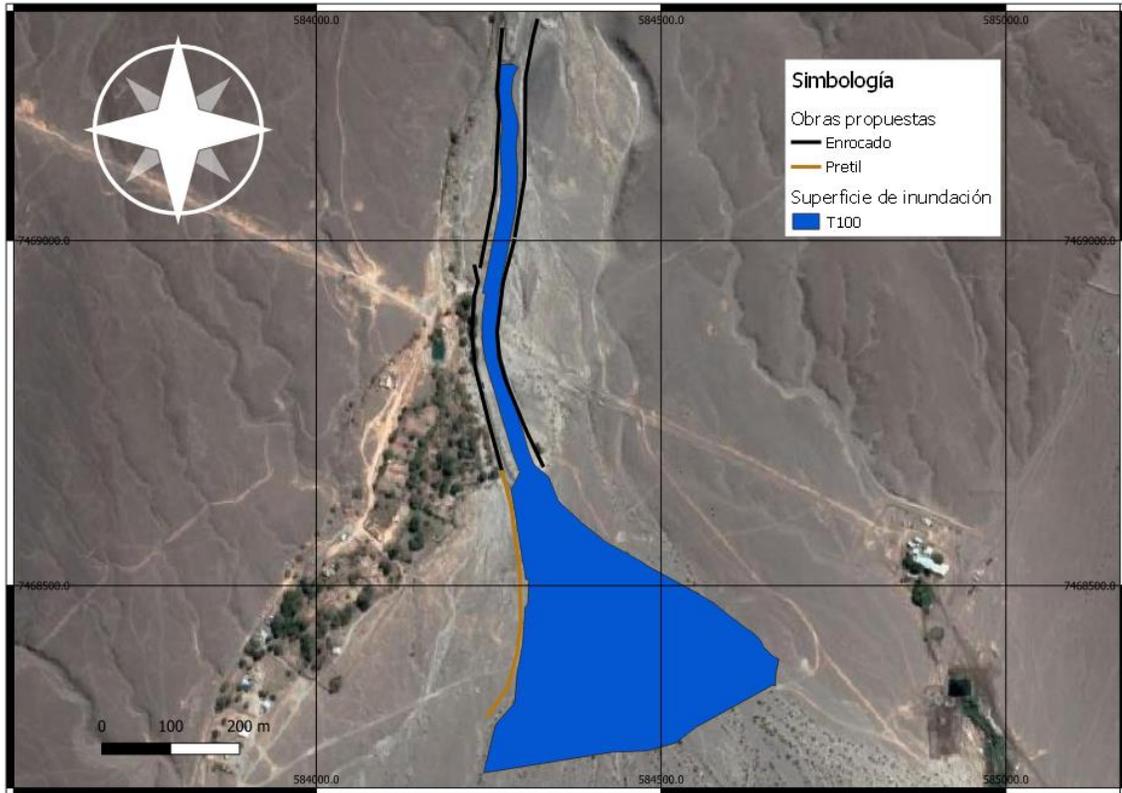


FIGURA 6-23: SUPERFICIE DE INUNDACIÓN RIO VILAMA (S4) CON OBRAS PROYECTADAS

Fuente: Elaboración Propia

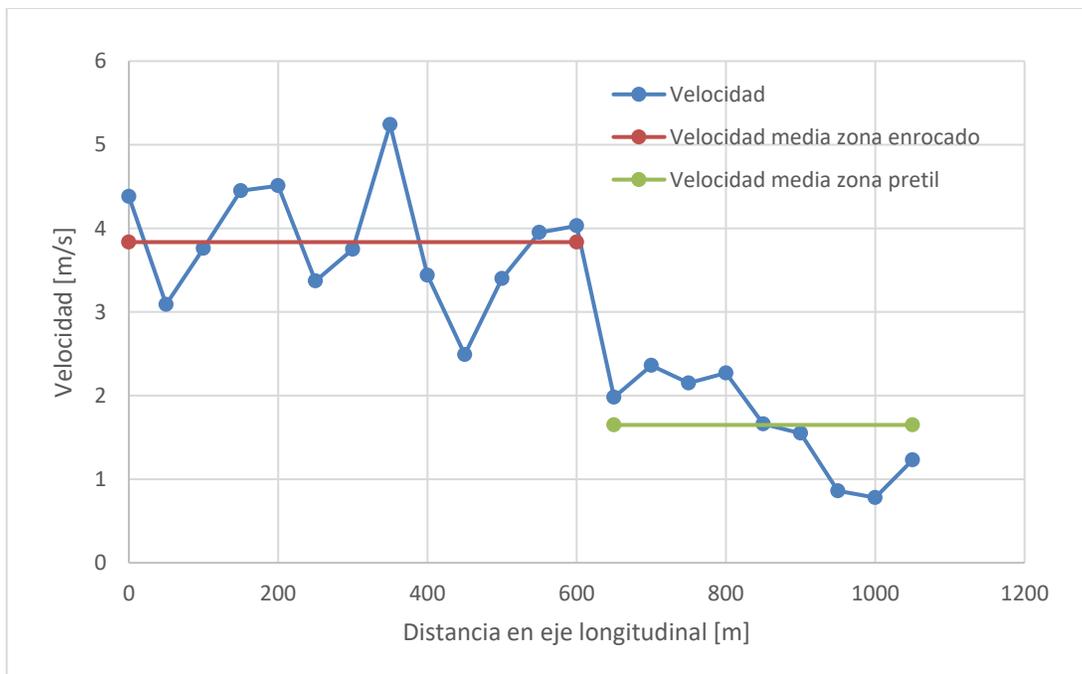


FIGURA 6-24: PERFIL DE VELOCIDADES EN EL EJE LONGITUDINAL DEL RIO VILAMA

Fuente: Elaboración Propia.

6.5. Precios Unitarios, Cubicaciones y Presupuesto Estimativo

6.5.1. Generalidades

La estimación de los presupuestos de las obras comprometidas en el presente estudio, se elaboran en base a precios unitarios de las principales partidas del proyecto.

Los indicadores monetarios utilizados corresponden a:

Valor dólar: \$ 779,31 (agosto de 2021)

Valor UF: \$ 29.758,6 (01 de agosto de 2021)

Anexos que acompañan este Capítulo

- Anexo 6.2-1 Precios Unitarios
- Anexo 6.2-2 Cubicaciones
- Anexo 6.2-3 Expropiaciones Deslindes
- Anexo 6.2-4 Presupuestos

6.5.2. Precios Unitarios

Los precios unitarios se determinan de acuerdo con la base de datos propia del Consultor, recopilación de antecedentes de estudios similares y presupuestos de licitaciones cercanas a la zona del proyecto.

Las licitaciones cercanas encontradas son las que se presentan a continuación.

- [LIC-1] Mejoramiento Ruta B-241, Eje Licancabur, Pasada Urbana San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. (5048-49-O119)
- [LIC-2] Conservación de Obras de Riego Fiscal CORF - Sistemas Matrices San Pedro de Atacama 2020 (1501-6-O120)
- [LIC-3] Conservación de Riberas de Cauces Naturales Región de Antofagasta (1501-15-O120)
- [LIC-4] Conservación de la Red Vial Básica, Conservación Ruta 23-CH S: By Pass (Rio San Pedro de Atacama (1369-14-O119)

La licitación [LIC-1] corresponde a una realizada el año 2019, cuyo proyecto contemplaba la reposición de la ruta B-241 con pavimento de hormigón delgado, Drenaje y Saneamiento, Seguridad Vial, Defensas Fluviales y otras obras asociadas. Como dentro de esta licitación se encuentran partidas similares a la de este proyecto, se identifican las más importantes.

La licitación [LIC-2] corresponde a una licitación realizada el año 2020, en la cual el proyecto consideraba la conservación obras de riego fiscales en San Pedro de Atacama. Sin embargo, dentro de las partidas del proyecto no se encontraron algunas que puedan ser relevantes para este estudio.

La licitación [LIC-3], corresponde a un proyecto de conservación de riberas de cauces naturales desarrollado el año 2020, en San Pedro de Atacama, al igual que este estudio. se identifican las partidas más importantes.

Finalmente, la [LIC-4] corresponde a un proyecto desarrollado el año 2019, en donde, similar a la [LIC-1], el objetivo era la conservación de la red vial básica para la ruta 23-CH. Como en este proyecto también se encuentran partidas similares a las que se usarán este estudio, se identifican las más importantes.

Para efectos de comparación, los costos totales netos² de las partidas más influyentes, obtenidos de las licitaciones anteriores, se presentan a continuación en el Cuadro 6-12.

CUADRO 6-12: ESTUDIO DE PRECIOS UNITARIOS RELEVANTES Y VALORES ADOPTADOS

Partidas	Unidad	Valores Obtenidos de: (\$CLP)					Valores Adoptados ³
		LIC-1	LIC-2	LIC-3	LIC-4	Este Consultor	
Excavaciones TCN	m ³	7.826	-	6.091	6.372	8.034	8.034
Construcción Pretiles	m ³	11.717	-	-	16.321	19.985	16.321 ⁴
Enrocado Protección	m ³	-	-	-	63.671	180.419	63.671 ⁵
Rell. material de excavación	m ³	3.710	-	-	-	-	3.710
Relleno Compactado ⁶	m ³	-	-	6.399	-	22.169	6.399
Gaviones	m ³	69.903	-	82.353	118.395	74.696	82.353
Hormigón G-20	m ³	403.120	-	-	-	156.348	156.348 ⁷
Hormigón G-25	m ³	404.740	-	-	437.218	181.848	181.848
Armadura A63-42H	Kg	1.838	-	-	2.095	1.788	1.788
Geotextil control de Erosión	m ²	11.831		1.071	3.114	11.200	11.200 ⁸

Este cuadro presenta el resumen del análisis de precios unitarios encontrados en las licitaciones mencionadas anteriormente. La columna Valores Adoptados, se refiere a los valores a utilizar

Fuente: Elaboración a partir de Valores de Licitaciones Expuestas y Propios.

² Valores consideran gastos generales y utilidades.

³ Se refiere a los valores, luego del análisis de precios unitarios de otras licitaciones, que se utilizarán en el presente estudio.

⁴ Se considera utilizar este valor por estar dentro del promedio de los valores encontrados por licitaciones

⁵ Se considera utilizar este valor por pertenecer a una empresa que se dedica a este tipo de actividades. Además, el valor que tiene este consultor en su base de datos considera una cantera de rocas alejada.

⁶ También llamado Relleno Estructural

⁷ Se considera utilizar este valor porque está dentro del valor promedio que presentan los hormigones.

⁸ El valor de la LIC-3, en comparación a los otros es muy bajo. Probablemente se trate de un geotextil más delgado, cuya especificación no se aprecia en los precios unitarios.

Finalmente, para los precios unitarios se deben calcular valores privados y sociales, para esto, los valores privados de mano de obra se deben multiplicar por un factor de corrección mano de obra, de acuerdo a la siguiente tabla del Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

CUADRO 6-13: FACTOR DE CORRECCIÓN MANO DE OBRA

Ítem	Factor
Mano de Obra Calificada	0,98
Mano de Obra Semi-Calificada	0,68
Mano de Obra No Calificada	0,62

Fuente: Precios Sociales 2021, marzo 2021, MIDESO

6.5.3. Cubicaciones

Las cubicaciones de los elementos correspondientes a cada obra civil proyectada se realizaron conforme a la topografía existente y la proyección de las obras en el terreno. La cubicación de estos volúmenes se realiza mediante software que utiliza la topografía, se modifica la topografía según el requerimiento y entrega los volúmenes a excavar y rellenar.

Se consideraron obras tipo del Manual de Carreteras.

Para el revestimiento lateral con gaviones, se considera lo dispuesto en el Manual de Carreteras sección 4.501.001, donde se obtienen dimensiones y cubicaciones de esta obra. Esta misma disposición se considera para la protección de los pozos APR existentes en el proyecto.

Para el revestimiento lateral con enrocados, se considera lo dispuesto en el Manual de Carreteras sección 4.502.001, donde se obtienen dimensiones tipo de esta obra.

El esponjamiento del movimiento de tierras se considera de un 20%. En situaciones en que existan mayores volúmenes de rellenos, todo el material de corte se utiliza como relleno, con su porcentaje de esponjamiento correspondiente. En los casos que, el volumen de corte sea mayor que el de relleno, este volumen extra de material podría ser utilizado para rellenar partidas de obras dentro del mismo sector, optimizando el manejo del material al botadero. Esta optimización se realiza solo por sector de mejoramiento. No se contempla llevar material desde un sector a otro.

Se considera instalación de faenas para cada uno de los sectores con proyecto.

6.5.4. Costo Expropiación Potencial Deslinde

Como parte de las medidas no estructurales propuestas se encuentra la medida de fijación de deslindes en el río San Pedro, en particular en lo que respecta al Sector 2 o tramo intermedio del cauce. Se consideró como definición del límite del cauce la línea geomorfológica de la ribera propuesta por el presente estudio, a la cual se le superpuso la capa de propiedades obtenida del estudio CNR 2014 y del portal del SII, cuyo detalle se incluye en Anexo 6.2-3.

Por otro lado, para la estimación de precio de propiedades por unidad de superficie, se realizó una revisión de publicaciones de venta de propiedades en el área de estudio, separándola por tipo comercial, habitacional y parcela, cuyos valores promedio resultantes se presentan en el siguiente cuadro, mientras que el detalle de los antecedentes consultados se consigna en el Anexo 6.2-3:

CUADRO 6-14: PRECIO UNITARIO PROPIEDADES ÁREA ESTUDIO

Tipo de Propiedad	UF/m ²	\$/m ²
Agrícola	3.4	\$ 100.985
Comercial	8.3	\$ 247.270

Fuente: Elaboración Propia

Considerando los valores promedio de precio según tipo de propiedad y la superficie que se requiere expropiar en el sector 2 para la fijación de deslinde correspondiente a 90.387 m², se obtiene un costo total de \$11.404.936.400.

Se estima un costo de elaboración del estudio asociado a la medida no estructural de fijación de deslinde equivalente a \$100.000.000, el cual ha sido establecido teniendo en cuenta presupuesto oficial publicado en el portal de Mercado Público de la licitación ID 1504-16-O120.

6.5.5. Presupuestos Estimativos San Pedro Sector 1

Desde el Cuadro 6-15 al Cuadro 6-31 se presentan los presupuestos estimativos del Sector 1.

CUADRO 6-15: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-01

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Camino Principal Catarpe							
1.1	Instalación de Faenas	mes	3	5.580.000	5.580.000	16.740.000	16.740.000	
1.2	Excavación en material común	m ³	12.616	5.356	4.374	67.571.296	55.182.384	
1.3	Relleno Estructural	m ³	31.313	4.266	3.600	133.581.258	112.726.800	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 217.892.554	\$ 184.649.184	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 108.946.277	\$ 92.324.592	
TOTALES NETO								
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						CLP	\$ 326.838.831	\$ 276.973.776
						UF	10.983	9.307

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-16: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-02

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1.4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	1.270	54.902	51.984	69.725.540	66.019.680	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 75.305.540	\$ 71.599.680	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 37.652.770	\$ 35.799.840	
TOTALES NETO								
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						CLP	\$ 112.958.310	\$ 107.399.520
						UF	3.796	3.609

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-17: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-03

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	2.360	54.902	51.984	129.568.720	122.682.240	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 135.148.720	\$ 128.262.240	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 67.574.360	\$ 64.131.120	
TOTALES NETO						CLP	\$ 202.723.080	\$ 192.393.360
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	6.812	6.465

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-18: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-04

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	1.600	54.902	51.984	87.843.200	83.174.400	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 93.423.200	\$ 88.754.400	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 46.711.600	\$ 44.377.200	
TOTALES NETO						CLP	\$ 140.134.800	\$ 133.131.600
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	4.709	4.474

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-19: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-05

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Construcción Muro Guarda Radier	Un	1	6.569.070	5.405.324	6.569.070	5.405.324	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 12.149.070	\$ 10.985.324	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 6.074.535	\$ 5.492.662	
TOTALES NETO						CLP	\$ 18.223.605	\$ 16.477.986
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	612	554

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-20: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-06

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Relleno Estructural para Pretilos	m ³	1.632	10.882	7.926	17.759.424	12.935.232	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 23.339.424	\$ 18.515.232	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 11.669.712	\$ 9.257.616	
TOTALES NETO						CLP	\$ 35.009.136	\$ 27.772.848
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	1.176	933

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-21: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-07

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	1.520	54.902	51.984	83,451,040	79,015,680	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 89,031,040	\$ 84,595,680	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 44,515,520	\$ 42,297,840	
TOTALES NETO						CLP	\$ 133,546,560	\$ 126,893,520
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	4,488	4,264

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-22: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-08

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Encauzamiento + Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Excavación en material común	m³	71.105	5.356	4.374	380.837.041	311.012.177	
1,3	Relleno Estructural	m³	2.492	4.266	3.600	10.630.360	8.970.768	
1,4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m³	2.704	54.902	51.984	148.455.008	140.564.736	
1,5	Transporte a Botadero 10km	m³	65.028	4.500	3.779	292.626.090	245.740.888	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 838.128.499	\$ 711.868.568	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 419.064.250	\$ 355.934.284	
TOTALES NETO						CLP	\$ 1.257.192.749	\$ 1.067.802.852
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	42.246	35.882

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-23: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-09

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales + Canal							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Excavación Terreno Fluvial	m³	55	5.356	4.374	292.438	238.820	
1,3	Relleno Material Excavación	m³	49	2.471	1.881	121.425	92.432	
1,4	Hormigón H-30 (G-25)	m³	115	129.732	126.841	14.924.369	14.591.789	
1,5	Armadura Refuerzo A63-42H	kg	11.504	1.192	1.049	13.712.768	12.067.696	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 34.631.000	\$ 32.570.737	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 17.315.500	\$ 16.285.369	
TOTALES NETO						CLP	\$ 51.946.500	\$ 48.856.106
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	1.746	1.642

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-24: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-10

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Suministro e Instalaciones Gaviones	m³	1.781	54.902	51.984	97.780.462	92.583.504	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 103.360.462	\$ 98.163.504	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 51.680.231	\$ 49.081.752	
TOTALES NETO						CLP	\$ 155.040.693	\$ 147.245.256
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	5.210	4.948

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-25: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-11

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Encauzamiento							
1,1	Instalación de Faenas	mes	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Excavación en material común	m³	m³	138.861	5.356	4.374	743.738.016	
1,3	Relleno Estructural	m³	m³	0	4.266	3.600	0	
1,4	Transporte a Botadero 10km	m³	m³	166.633	4.500	3.779	749.847.888	
2	Total Costo Directo	\$	\$				\$ 1.499.165.904	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%	50%				\$ 749.582.952	
TOTALES NETO						CLP	\$ 2.248.748.856	\$ 1.863.993.574
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	75.566	62.637

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-26: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-OA1

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Encauzamiento							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Construcción Badén MDC 4.704.002	Un	1	44.153.502	40.662.262	44.153.502	40.662.262	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.733.502	\$ 46.242.262	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.866.751	\$ 23.121.131	
TOTALES NETO						CLP	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	2.507	2.331

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-27: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-OA2

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Encauzamiento						
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5,580,000	5,580,000	5,580,000	5,580,000
1.1	Suministro e Instalaciones Gaviones	m³	720	54,902	51,984	39,529,440	37,428,480
1.2	Construcción Puente10 m. Madera MDC 4.603.001	Un.	1	23,135,564	20,567,484	23,135,564	20,567,484
2	Total Costo Directo	\$				\$ 68,245,004	\$ 63,575,964
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 34,122,502	\$ 31,787,982
TOTALES NETO					CLP	\$ 102,367,506	\$ 95,363,946
NOTA : Valores Netos no consideran IVA					UF	3,440	3,205

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-28: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-OA3

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Encauzamiento						
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1.2	Construcción Badén MDC 4.704.002	Un	1	44.153.502	40.662.262	44.153.502	40.662.262
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.733.502	\$ 46.242.262
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.866.751	\$ 23.121.131
TOTALES NETO					CLP	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
NOTA : Valores Netos no consideran IVA					UF	2.507	2.331

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-29: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-OA4

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Encauzamiento						
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5,580,000	5,580,000	5,580,000	5,580,000
1.1	Suministro e Instalaciones Gaviones	m³	1,600	54,902	51,984	87,843,200	83,174,400
1.2	Construcción Puente10 m. Madera MDC 4.603.001	Un.	1	23,135,564	20,567,484	23,135,564	20,567,484
2	Total Costo Directo	\$				\$ 116,558,764	\$ 109,321,884
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 58,279,382	\$ 54,660,942
TOTALES NETO					CLP	\$ 174,838,146	\$ 163,982,826
NOTA : Valores Netos no consideran IVA					UF	5,875	5,510

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-30: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-OA5

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Encauzamiento						
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1.2	Construcción Badén MDC 4.704.002	Un	1	44.153.502	40.662.262	44.153.502	40.662.262
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.733.502	\$ 46.242.262
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.866.751	\$ 23.121.131
TOTALES NETO					CLP	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
NOTA : Valores Netos no consideran IVA					UF	2.507	2.331

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-31: PRESUPUESTO SECTOR S1-ES-OA6

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Encauzamiento						
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1.2	Construcción Badén MDC 4.704.002	Un	1	44.153.502	40.662.262	44.153.502	40.662.262
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.733.502	\$ 46.242.262
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.866.751	\$ 23.121.131
TOTALES NETO					CLP	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
NOTA : Valores Netos no consideran IVA					UF	2.507	2.331

Fuente: Elaboración Propia

6.5.6. Presupuestos Estimativos San Pedro Sector 2

Desde el Cuadro 6-32 al Cuadro 6-45 se presentan los presupuestos estimativos del Sector 2.

CUADRO 6-32: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-01

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	7.163	54.902	51.984	393.263.026	372.361.392	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 398.843.026	\$ 377.941.392	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 199.421.513	\$ 188.970.696	
TOTALES NETO						CLP	\$ 598.264.539	\$ 566.912.088
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	20.104	19.050

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-33: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-02

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Puente Pasarela Peatonal							
1,1	Construcción Pasarela Peatonal	m	62	825.348	742.814	51.171.576	46.054.468	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 51.171.576	\$ 46.054.468	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 25.585.788	\$ 23.027.234	
TOTALES NETO						CLP	\$ 76.757.364	\$ 69.081.702
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	2.579	2.321

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-34: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-03

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Perfilamiento de Cauce y Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Excavación Terreno Fluvial	m ³	56.523	5.356	4.374	302.735.795	247.230.465	
1,3	Relleno Material Excavación	m ³	16.548	2.471	1.881	40.889.886	31.126.619	
1,4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	16.250	54.902	51.984	892.157.500	844.740.000	
1,5	Transporte a Botadero 10km	m ³	51.279	4.500	3.779	230.757.201	193.784.769	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 1.472.120.382	\$ 1.322.461.853	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 736.060.191	\$ 661.230.926	
TOTALES NETO						CLP	\$ 2.208.180.573	\$ 1.983.692.779
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	74.203	66.659

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-35: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-04

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	9.399	54.902	51.984	516.023.898	488.597.616	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 521.603.898	\$ 494.177.616	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 260.801.949	\$ 247.088.808	
TOTALES NETO						CLP	\$ 782.405.847	\$ 741.266.424
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	26.292	24.909

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-36: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-05

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Puente Pasarela Peatonal							
1,1	Construcción Pasarela Peatonal	m	60	825.348	742.814	49.520.880	44.568.840	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.520.880	\$ 44.568.840	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.760.440	\$ 22.284.420	
TOTALES NETO						CLP	\$ 74.281.320	\$ 66.853.260
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	2.496	2.247

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-37: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-06

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Nivelación Terreno + Defensas Fluviales						
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1,2	Excavación Terreno Fluvial	m ³	35.232	5.356	4.374	188.703.770	154.105.730
1,3	Relleno Material Excavación	m ³	75	2.471	1.881	185.374	141.113
1,4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	11.726	54.902	51.984	643.780.852	609.564.384
1,5	Transporte a Botadero 10km	m ³	42.204	4.500	3.779	189.916.398	159.487.571
2	Total Costo Directo	\$				\$ 1.028.166.395	\$ 928.878.798
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 514.083.197	\$ 464.439.399
TOTALES NETO						CLP	\$ 1.542.249.592
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	51.825
							46.821

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-38: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-07

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Nivelación Terreno + Defensas Fluviales						
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1,2	Excavación Terreno Fluvial	m ³	20.318	5.356	4.374	108.824.011	88.871.588
1,3	Relleno Material Excavación	m ³	0	2.471	1.881	0	0
1,4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	6.162	54.902	51.984	338.306.124	320.325.408
1,5	Transporte a Botadero 10km	m ³	24.382	4.500	3.779	109.718.010	92.138.747
2	Total Costo Directo	\$				\$ 562.428.145	\$ 506.915.743
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 281.214.073	\$ 253.457.871
TOTALES NETO						CLP	\$ 843.642.218
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	28.350
							25.551

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-39: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-08

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Nivelación Terreno + Defensas Fluviales						
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1.2	Excavación Terreno Fluvial	m ³	26.202	5.356	4.374	140.340.429	114.609.604
1.3	Relleno Material Excavación	m ³	13	2.471	1.881	32.123	24.453
1.4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	2.119	54.902	51.984	116.337.338	110.154.096
1.5	Construcción Puente Vehicular	m	50	21.009.200	18.908.280	1.050.460.000	945.414.000
1.6	Transporte a Botadero 10km	m ³	31.430	4.500	3.779	141.434.838	118.773.834
2	Total Costo Directo	\$				\$ 1.454.184.728	\$ 1.294.555.987
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 727.092.364	\$ 647.277.993
TOTALES NETO						CLP	\$ 2.181.277.092
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	73.299
							65.253

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-40: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-09

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Nivelación Terreno + Defensas Fluviales						
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1.2	Excavación Terreno Fluvial	m ³	41.890	5.356	4.374	224.363.483	183.227.385
1.3	Relleno Material Excavación	m ³	65	2.471	1.881	160.022	121.814
1.4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	5.551	54.902	51.984	304.761.002	288.563.184
1.5	Transporte a Botadero 10km	m ³	50.255	4.500	3.779	226.148.148	189.914.189
2	Total Costo Directo	\$				\$ 761.012.655	\$ 667.406.572
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 380.506.327	\$ 333.703.286
TOTALES NETO						CLP	\$ 1.141.518.982
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	38.359
							33.641

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-41: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-10

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1.2	Excavación Terreno Fluvial	m³	1.856	5.356	4.374	9.942.878	8.119.894	
1.3	Enrocado de Protección	m³	585	42.245	40.335	24.713.325	23.595.975	
1.4	Suministro e Instalaciones Gaviones	m³	600	54.902	51.984	32.941.200	31.190.400	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 73.177.403	\$ 68.486.269	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 36.588.702	\$ 34.243.134	
TOTALES NETO						CLP	\$ 109.766.105	\$ 102.729.403
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	3.689	3.452

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-42: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-11

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1.2	Excavación Terreno Fluvial	m³	1.207	5.356	4.374	6.462.871	5.277.931	
1,3	Relleno Material Excavación	m³	1.086	2.471	1.881	2.683.491	2.042.755	
1,4	Hormigón H-30 (G-25)	m³	477	129.732	126.841	61.928.868	60.548.820	
1,5	Armadura Refuerzo A63-42H	kg	47.736	1.192	1.049	56.901.312	50.075.064	
1,6	Transporte a Botadero 10km	m³	362	9.692	8.549	3.508.485	3.094.721	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 133.556.542	\$ 123.524.569	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 66.778.271	\$ 61.762.285	
TOTALES NETO						CLP	\$ 200.334.812	\$ 185.286.854
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	6.732	6.226

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-43: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-12

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1.2	Suministro e Instalaciones Gaviones	m³	9.160	54.902	51.984	502.902.320	476.173.440	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 508.482.320	\$ 481.753.440	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 254.241.160	\$ 240.876.720	
TOTALES NETO						CLP	\$ 762.723.480	\$ 722.630.160
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	25.630	24.283

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-44: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-OA1

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1.2	Construcción Badén MDC 4.704.002	Un	1	44.153.502	40.662.262	44.153.502	40.662.262	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.733.502	\$ 46.242.262	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.866.751	\$ 23.121.131	
TOTALES NETO						CLP	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	2.507	2.331

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-45: PRESUPUESTO SECTOR S2-ES-OA2

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales							
1.1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1.2	Construcción Badén MDC 4.704.002	Un	1	44.153.502	40.662.262	44.153.502	40.662.262	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.733.502	\$ 46.242.262	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.866.751	\$ 23.121.131	
TOTALES NETO						CLP	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	2.507	2.331

Fuente: Elaboración Propia

6.5.7. Presupuestos Estimativos San Pedro Sector 3

Desde el Cuadro 6-46 al Cuadro 6-50 se presentan los presupuestos estimativos del Sector 3.

CUADRO 6-46: PRESUPUESTO SECTOR S3-ES-01

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Defensas Fluviales Postación Eléctrica							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Suministro e Instalaciones Gaviones	m ³	1.680	54.902	51.984	92.235.360	87.333.120	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 97.815.360	\$ 92.913.120	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 48.907.680	\$ 46.456.560	
TOTALES NETO						CLP	\$ 146.723.040	\$ 139.369.680
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	4.930	4.683

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-47: PRESUPUESTO SECTOR S3-ES-02

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Obra de Atravesio Vial							
1,1	Construcción Puento Vehicular	m	65	21.009.200	18.908.280	1.365.598.000	1.229.038.200	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 1.365.598.000	\$ 1.229.038.200	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 682.799.000	\$ 614.519.100	
TOTALES NETO						CLP	\$ 2.048.397.000	\$ 1.843.557.300
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	68.834	61.950

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-48: PRESUPUESTO SECTOR S3-ES-03

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Pretil Ribera Derecha. km 17,55 - km 18,75							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Relleno Estructural para Pretiles	m ³	14.964	10.882	7.926	162.838.248	118.604.664	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 168.418.248	\$ 124.184.664	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 84.209.124	\$ 62.092.332	
TOTALES NETO						CLP	\$ 252.627.372	\$ 186.276.996
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	8.489	6.260

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-49: PRESUPUESTO SECTOR S3-ES-04

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Pretil Ribera Derecha. km 20,15 - km 21,22							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,1	Relleno Estructural para Pretiles	m ³	38.165	10.882	7.926	415.311.530	302.495.790	
1,2	Enrocado de Protección	m ³	14.405	42.245	40.335	608.539.225	581.025.675	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 1.029.430.755	\$ 889.101.465	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 514.715.378	\$ 444.550.733	
TOTALES NETO						CLP	\$ 1.544.146.133	\$ 1.333.652.198
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	51.889	44.816

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-50: PRESUPUESTO SECTOR S3-ES-OA1

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)	
1	Pretil Ribera Derecha. km 20,15 - km 21,22							
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000	
1,2	Construcción Badén MDC 4.704.002	Un	1	44.153.502	40.662.262	44.153.502	40.662.262	
2	Total Costo Directo	\$				\$ 49.733.502	\$ 46.242.262	
3	Gastos Generales y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 24.866.751	\$ 23.121.131	
TOTALES NETO						CLP	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						UF	2.507	2.331

Fuente: Elaboración Propia

6.5.8. Presupuestos Estimativos Vilama Sector 4

Desde el Cuadro 6-51 al Cuadro 6-52 se presentan los presupuestos estimativos del Sector 4.

CUADRO 6-51: PRESUPUESTO SECTOR S4-ES-01

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Mejoramiento del Cauce y Enrocado						
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1,2	Excavación Terreno Fluvial	m ³	17.717	5.356	4.374	94.894.234	77.495.776
1,3	Relleno Material Excavación	m ³	8.430	2.471	1.881	20.829.542	15.856.078
1,4	Enrocado de Protección	m ³	5.950	42.245	40.335	251.357.750	239.993.250
1,5	Transporte a Botadero 10km	m ³	12.831	4.500	3.779	57.740.598	48.489.271
2	Total Costo Directo	\$				\$ 430.402.123	\$ 387.414.375
3	G.G. y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 215.201.062	\$ 193.707.188
TOTALES NETO							
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						CLP	\$ 645.603.185
						UF	21.695
							19.528

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-52: PRESUPUESTO SECTOR S4-ES-02

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario Privado (\$)	P. Unitario Social (\$)	P. TOTAL Privado (\$)	P. TOTAL Social (\$)
1	Perfilamiento del Lecho del Cauce + Pretil Defensa						
1,1	Instalación de Faenas	mes	1	5.580.000	5.580.000	5.580.000	5.580.000
1,2	Excavación Terreno Fluvial	m ³	60.591	5.356	4.374	324.524.807	265.024.553
1,3	Relleno Material Excavación	m ³	5.983	2.471	1.881	14.784.981	11.254.775
1,4	Transporte a Botadero 10km	m ³	66.726	4.500	3.779	300.265.506	252.156.299
2	Total Costo Directo	\$				\$ 645.155.294	\$ 534.015.628
3	G.G. y Utilidades e Imprevistos	50%				\$ 322.577.647	\$ 267.007.814
TOTALES NETO							
NOTA : Valores Netos no consideran IVA						CLP	\$ 967.732.941
						UF	32.519
							26.917

Fuente: Elaboración Propia

6.5.9. Costos Ambientales

Los costos presentados corresponden a los estudios ambientales futuros, tanto considerando Declaraciones de Impacto Ambiental en los casos que corresponde, PAS necesarios para algunas labores y estudios propuestos como adicionales, principalmente enfocados a temáticas que no fueron desarrolladas en detalle durante la elaboración del PMC y que podrían entregar información relevante respecto a las áreas a intervenir por las obras, determinar nuevas causales de ingreso al SEIA o establecer bases para las medidas de mitigación de impactos ambientales.

En el cuadro 6-1 se presenta un resumen de los costos asociados a estudios ambientales y en el Anexo EAA-7 del Estudio de Análisis Ambiental se presenta una planilla de detalle con la información.

CUADRO 6-1. RESUMEN COSTOS ESTUDIOS AMBIENTALES

PROYECTO	COSTOS UF					
	DIA	PAS-120	PAS 156	PAS-136	ESTUDIOS SUGERIDOS	TOTAL
S1-ES-01				60	315	375
S1-ES-02					315	315
S1-ES-03					315	315
S1-ES-04					315	315
S1-ES-05					315	315
S1-ES-06				60	315	375
S1-ES-07					315	315
S1-ES-08	1487			60	65	1612
S1-ES-09					315	315
S1-ES-10					315	315
S1-ES-11	1617			60	65	1737
S2-ES-01					235	235
S2-ES-02					65	65
S2-ES-03	1862			60	65	1987
S2-ES-04					235	235
S2-ES-05					65	65
S2-ES-06			75	60	235	370
S2-ES-07			75	60	235	370
S2-ES-08			75	60	235	370
S2-ES-09			75	60	205	340
S2-ES-10					235	235
S2-ES-11					235	235
S2-ES-12					235	235
S3-ES-01					220	220
S3-ES-02					220	220
S3-ES-03	1737	60		60	65	1922
S3-ES-04	1737	60			65	1862
S4-ES-01				60	205	265
S4-ES-02	1562		75	60	65	1762

Fuente: Elaboración propia.

6.5.10. Resumen

En el Cuadro 6-53, Cuadro 6-54, Cuadro 6-55 y Cuadro 6-56, se presentan un resumen del costo de medidas estructurales de los sectores 1, 2, 3 y 4, respectivamente los cuales incluyen los costos de los estudios ambientales. Finalmente, en el Cuadro 6-57 se presenta un resumen de costo total del proyecto de manejo de cauce.

CUADRO 6-53: RESUMEN COSTOS MEDIDAS ESTRUCTURALES SECTOR 1

SOLUCIÓN	COSTO TOTAL PRIVADO	COSTO TOTAL SOCIAL
S1-ES-01	\$ 326.838.831	\$ 276.973.776
S1-ES-02	\$ 112.958.310	\$ 107.399.520
S1-ES-03	\$ 202.723.080	\$ 192.393.360
S1-ES-04	\$ 140.134.800	\$ 133.131.600
S1-ES-05	\$ 18.223.605	\$ 16.477.986
S1-ES-06	\$ 35.009.136	\$ 27.772.848
S1-ES-07	\$ 133.546.560	\$ 126.893.520
S1-ES-08	\$ 1.257.192.749	\$ 1.067.802.852
S1-ES-09	\$ 51.946.500	\$ 48.856.106
S1-ES-10	\$ 155.040.693	\$ 147.245.256
S1-ES-11	\$ 2.248.748.856	\$ 1.863.993.574
S1-ES-OA1	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
S1-ES-OA2	\$ 102.367.506	\$ 95.363.946
S1-ES-OA3	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
S1-ES-OA4	\$ 174.838.146	\$ 163.982.826
S1-ES-OA5	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
S1-ES-OA6	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-54: RESUMEN COSTOS MEDIDAS ESTRUCTURALES SECTOR 2

SOLUCIÓN	COSTO TOTAL PRIVADO	COSTO TOTAL SOCIAL
S2-ES-01	\$ 598.264.539	\$ 566.912.088
S2-ES-02	\$ 76.757.364	\$ 69.081.702
S2-ES-03	\$ 2.208.180.573	\$ 1.983.692.779
S2-ES-04	\$ 782.405.847	\$ 741.266.424
S2-ES-05	\$ 74.281.320	\$ 66.853.260
S2-ES-06	\$ 1.542.249.592	\$ 1.393.318.196
S2-ES-07	\$ 843.642.218	\$ 760.373.614
S2-ES-08	\$ 2.181.277.092	\$ 1.941.833.980
S2-ES-09	\$ 1.141.518.982	\$ 1.001.109.857
S2-ES-10	\$ 109.766.105	\$ 102.729.403
S2-ES-11	\$ 200.334.812	\$ 185.286.854
S2-ES-12	\$ 762.723.480	\$ 722.630.160
S2-ES-OA1	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393
S2-ES-OA2	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-55: RESUMEN COSTOS MEDIDAS ESTRUCTURALES SECTOR 3

SOLUCIÓN	COSTO TOTAL PRIVADO	COSTO TOTAL SOCIAL
S3-ES-01	\$ 146.723.040	\$ 139.369.680
S3-ES-02	\$ 2.048.397.000	\$ 1.843.557.300
S3-ES-03	\$ 252.627.372	\$ 186.276.996
S3-ES-04	\$ 1.544.146.133	\$ 1.333.652.198
S3-ES-OA1	\$ 74.600.253	\$ 69.363.393

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-56: RESUMEN COSTOS MEDIDAS ESTRUCTURALES SECTOR 4

SOLUCIÓN	COSTO TOTAL PRIVADO	COSTO TOTAL SOCIAL
S4-ES-01	\$ 645,603,185	\$ 581,121,563
S4-ES-02	\$ 967,732,941	\$ 801,023,441

Fuente: Elaboración Propia

CUADRO 6-57: RESUMEN COSTO TOTAL PROYECTO DE MANEJO DE CAUCE

Sector	COSTO TOTAL PRIVADO	COSTO TOTAL SOCIAL
Sector 1	\$ 5.257.969.784	\$ 4.545.740.742
Sector 2	\$ 10.670.602.430	\$ 9.673.815.103
Sector 3	\$ 4.066.493.798	\$ 3.572.219.567
Sector 4	\$ 1.613.336.126	\$ 1.382.145.004
Total Costo Plan Manejo de Cauce	\$ 21.608.402.138	\$ 19.173.920.41619.173

Fuente: Elaboración Propia

6.6. Evaluación Técnico-Económica de las Medidas Estructurales

6.6.1. Antecedentes Generales

Para el caso de las obras en cauces naturales, las especificaciones y requerimientos de la metodología utilizada se basan en los siguientes documentos.

- Normas de evaluación indicadas en los Términos de Referencias.
- Metodología Preparación y Evaluación de Proyectos de Defensas Fluviales (MIDESO, 2018).

Adicionalmente se utilizó la Metodología para Formulación y Evaluación de Proyectos Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias (MIDESO, 2016) como fuente de información para la valoración de algunos de los tipos de daños que se describen a continuación.

Dicho método supone que, debido a la construcción de las obras, se evitan los daños que producen las crecidas de un período de retorno dado. Los beneficios asociados a este evento, corresponden entonces a la diferencia entre los daños generados en las situaciones con proyecto (situación futura) y sin proyecto (situación actual). En este caso, en la situación con proyecto se

consideran los daños nulos si el evento que se presenta tiene asociado un período de retorno menor o igual que el de diseño, que corresponde en este caso a 100 años.

De acuerdo a lo anterior, los beneficios que se obtienen con la ejecución del proyecto, dependen directamente de los caudales que se presenten año a año, debiendo definirse curvas de daños en función del período de retorno.

El problema de cómo estimar los beneficios futuros, al no conocer a priori la magnitud ni secuencia de los caudales que se pueden presentar hacia adelante, es posible resolverlo en base al cálculo de la esperanza matemática de los daños. Este valor se obtiene a partir de la relación daño-probabilidad de excedencia, multiplicando cada incremento de probabilidad, asociado a cada nivel de inundación, por el monto de daños correspondiente. La suma de estos productos corresponde al monto de daños evitados (beneficios) anuales esperados.

Finalmente, cabe destacar que, según disposiciones de MIDESO, los proyectos de defensas fluviales o manejo de cauces que posean un costo menor a \$200.000.000 no requieren ser evaluadas mediante un **análisis costo – beneficio**, por lo que solo se debe realizar un **análisis costo-efectividad**. Además, los proyectos de traslado y mejoramientos de sistemas de agua potable rural (APR) fueron evaluados independiente de su costo, con un análisis costo-efectividad.

El análisis costo-efectividad asume que los beneficios son deseados por la sociedad por lo que no se calcula un valor monetario de los beneficios. El objetivo de este enfoque es evaluar alternativas e identificar aquella que permita obtener el beneficio buscado, utilizando la menor cantidad de recursos.

6.6.2. Condiciones de Evaluación

Los parámetros básicos para el cálculo de estos indicadores son:

- Costos sociales de inversión
- Costos sociales de operación y mantenimiento anual.
- Beneficio anual esperado (daño evitado)
- Tasas de descuento social corresponde a 6%.
- Horizonte de evaluación igual a 30 años.
- Valor residual de las obras, definido como un beneficio al final del horizonte de análisis, estimado en un 40% del costo de las obras, suponiendo que éstas poseen una vida útil de 50 años, 20 años por sobre el horizonte de evaluación.
- No se consideran impuestos de ningún tipo.

Adicionalmente el IVAN se calcula como la razón entre el VAN calculado anteriormente y la inversión actualizada (I_{act}) dada por:

$$I_{act} = \sum_{i=1}^{30} \frac{I_i}{(1+r)^i} + I_0$$

6.6.3.2. Costo - Efectividad

Los indicadores utilizados bajo un enfoque, siendo los principales el Valor Actual de Costos (VAC) y el Costo Anual Equivalente (CAE), resumen todos los costos del proyecto, tanto de inversión, como de operación, mantención y conservación.

a) **Valor Actual de Costos (VAC)**

El valor actual de costos, VAC, permite comparar alternativas de igual vida útil. Se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

En general, el VAC se calcula con la siguiente ecuación:

$$VAC = I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

Donde:

VAC: Valor actual de costos

I_0 : Inversión inicial

C_i : Operación y mantención anual al año i

r : Tasa de descuento

n : Número de años de la inversión

El criterio de decisión al utilizar el VAC será aquella alternativa de solución evaluada que presente el menor valor actual de costos.

b) **Costo Anual Equivalente (CAE)**

El costo anual equivalente, CAE, permite comparar alternativas de distinta vida útil. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

A partir de la ecuación del VAC, se determina el CAE como:

$$CAE = VAC \frac{r (1 + r)^n}{(1 + r)^n - 1}$$

Donde VAC es el valor actual de los flujos de costos referido previamente.

El criterio de decisión al utilizar el CAE será aquella alternativa de solución evaluada que presente el menor valor actual de costos.

6.6.4. Beneficios o Daños Evitados

6.6.4.1. Introducción

Los beneficios de cada proyecto se encuentran asociados a los daños originados por la crecida en la Situación Sin Proyecto para un periodo de retorno de 100 años, que serán evitados como consecuencia de la materialización de las obras requeridas para solucionar el problema que origina la inundación o daños por erosión y pérdidas materiales de bienes públicos y privados. Como base para su estimación, se realizó una exhaustiva recopilación de antecedentes de daños y valorizaciones para los eventos hidrometeorológicos más recientes.

En relación a la información básica utilizada para la estimación de beneficios, cabe señalar que no existen instituciones y/u organismos que mantengan registros sistemáticos o regulares de los daños generados durante este tipo de eventos. En general se dispone sólo de cifras o valores globales que no permiten efectuar estimaciones asociadas a zonas o sectores económicos específicos, afectados por las inundaciones.

La valorización de daños contempló la subdivisión en componentes directos, indirectos e intangibles. Se consideraron como daños directos aquellos originados por el contacto directo del agua con la infraestructura pública y/o privada. En el caso de la infraestructura se consideraron los daños, tanto en los sectores agrícolas y urbanos, de viviendas, propiedades comerciales, caminos, plantas de agua potable y puentes, entre otros.

Los daños indirectos se clasificaron como aquellos que no se originan necesariamente por el contacto físico con el agua, haciendo sentir sus efectos a nivel de la economía local, regional y nacional. Para el estudio se consideraron en este contexto los gastos asociados a la pérdida de productividad y mayores tiempos de viaje y ausentismo escolar.

En relación a los beneficios intangibles, ellos se consideraron relacionados con el valor económico de las pérdidas de vidas humanas, pérdidas del bienestar y seguridad de las personas, pérdida de las condiciones sanitarias de la ciudad, etc. En las evaluaciones realizadas se asumió que corresponden al 10% del tipo de beneficios.

La estimación de los daños evitados o beneficios de los proyectos se realiza exclusivamente para el área de influencia del proyecto, definida ésta como el área de inundación. En el Cuadro 6-58 se muestran los métodos de valoración de los beneficios.

CUADRO 6-58: BENEFICIOS A CALCULAR SEGÚN METODOLOGÍA MDS

Tipo de Beneficios	Metodología
Menor daño en propiedades	Daño Evitado y Precio Hedónico
Menor daño en producciones agrícolas	Daño Evitado
Menor deterioro de la infraestructura vial	Daño Evitado
Menores gastos de emergencia y limpieza de vías y sumideros	Ahorro de costos
Menor ausentismo laboral	Daño Evitado
Menor ausentismo escolar	Daño Evitado
Liberación de recursos públicos en salud	Ahorro de costos
Liberación de recursos públicos en ONEMI	Ahorro de costos

Fuente: MIDESO 2013 y 2016.

Para determinar el daño evitado esperado se debe primero determinar el daño directo asociado a cada periodo de retorno considerado (2, 5, 10, 25, 50 y 100) en la Situación Sin Proyecto. Para ello se estimó un daño proporcional al caudal de crecida representativo del periodo de retorno de cada sector de cauces del área de estudio (Cuadro 6-59).

$$Daño\ directo\ T_n = Daño\ directo\ T_{100} * \frac{Q_{T_n}}{Q_{T_{100}}}$$

Donde:

T_n =Periodo de retorno de n años.

T_{100} =Periodo de retorno de 100 años.

Q_{T_n} =Caudal de crecida para un periodo de retorno n.

$Q_{T_{100}}$ =Caudal de crecida para un periodo de retorno 100.

CUADRO 6-59: CAUDALES CRECIDAS POR SECTOR

T (años)	Caudal por Sector con Obras (m3/s)			
	1	2	3	4
2	42,4	40,3	39,5	16,1
5	111,3	105,6	103,4	37,5
10	168,6	163,3	158,4	52,9
25	251,0	241,0	237,2	72,9
50	353,4	341,2	336,4	88,0
100	431,9	419,0	413,7	103,3

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se debe determinar el daño esperado en relación a la probabilidad de excedencia ($P=1/T$) del cada daño directo obtenido en el paso anterior. La suma de estos resultados es el daño esperado total de la Situación Sin Proyecto, que, a su vez, corresponde al beneficio anual esperado del proyecto (daño evitado) con un periodo de retorno de diseño $T=100$.

$$\text{Daño evitado esperado Total} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Daño directo } T_i + \text{Daño directo } T_{i-1}}{2} \right) * (P_i - P_{i-1})$$

Donde:

i = Periodo de retorno.

P = Probabilidad de Excedencia 1/T.

6.6.4.2. Tipos de Daños Evitados

Daños Directos

- **Reposición de obras:** Se relaciona con el costo asociado volver a construir las obras destruidas o deterioradas por un evento de crecidas por el desgaste constante en el tiempo. Esta reposición se ha dividido en la remoción y reposición de material (movimiento de tierra) y la reconstrucción de gaviones.
- **Plantas de agua potable o de tratamiento de aguas servidas:** Existen casos en donde existe el riesgo de destrucción de la extracción de agua potable o del tratamiento de las aguas servidas para un sector en específico, lo que implica un daño en los equipos de bombeo y la pérdida de servicio, estimándose este daño en 1200 UF.
- **Infraestructura Vial:** Corresponde a los daños que experimenta la infraestructura vial se encuentran asociados a la reparación o reposición de pavimentos, de caminos de ripio y de puentes, en aquellos sectores donde se produce el escurrimiento de las aguas de desborde o que por erosión se destruye la infraestructura existente.
- **Daños a Viviendas:** Para el sector vivienda se dispone de algunas estimaciones respecto del número total de viviendas afectadas a nivel comunal y la magnitud del daño en cada una de ellas. Junto con ello se realizó para cada proyecto un conteo de vivienda con imágenes áreas disponibles para la máxima crecida, valor que será ajustado en proporción al caudal periodo de retorno.

Como criterio de valorización de daños por inundación en viviendas se supuso que las viviendas registraron pérdidas en su valor comercial proporcionales a la altura de inundación, más el costo de sus enseres.

Se adoptó un valor medio de la vivienda (precio comercial más enseres), representativo según su ubicación al interior de la envolvente de inundación.

- **Daños Sector Agrícola:** Se efectuó una estimación de las pérdidas representadas en primer lugar por los costos de las labores e insumos requeridos en cada cultivo y en segundo lugar por concepto de los ingresos netos (utilidades) no percibidos.

Para la estandarización los precios que intervienen en las evaluaciones de los proyectos se consideró el "Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego

en Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta” (CNR,2014)., el que posee datos representativos del área de estudio con respecto al margen bruto (ingreso-costo) por hectárea. Estos valores fueron presentados en la Etapa 3.

Daños Indirectos

- Costo Asociado a Albergues por Inundación de Viviendas: Los valores que dispone este Consultor corresponden a los presentados en la Etapa 3 con respecto al evento del año 2019, lo que se llevará a un gasto por día para cada persona.
Por cada vivienda afectada se estimó un grupo familiar compuesto por 4 personas. Se estimó que el 20 % de las viviendas requiere atención en albergues.
- Costo Asociado a la Permanencia de las Personas por corte de vías de Comunicación: Corresponde al costo que se debe incurrir al no poder trasladarse de una localidad a otra ya sea por corte de la línea férrea o vial, se estiman estos cortes en 3 días con un costo de 1 UF/hab/día.
- Limpieza de Calles: Incluye el barrido de calles, extracción de barro y escombros pequeños de las calles, además del pago a los trabajadores mediante los fondos correspondientes a empleos de emergencia. Para estimar este valor, ya que no se dispone de valores de referencia al respecto, se ha estimado que dicha faena se desarrolla mediante una cuadrilla básica compuesta por los siguientes equipos y operarios, considerando un rendimiento de 2 cuadras por día (alrededor de 200 m).
- Ausentismo Laboral y Escolar: Para la estimación de las pérdidas asociadas al ausentismo laboral y escolar, se utilizaron los valores referenciales que se entregan en el documento de “Metodología de Evaluación de Proyectos de Aguas Lluvias” de MIDESO, en donde recomienda estimar el costo por este concepto como el correspondiente a un trabajador y dos estudiantes por vivienda inundada.
- El costo del ausentismo laboral, corresponde al ingreso autónomo promedio de la población urbana (con referencia a la encuesta CASEN 2017) en donde se recomienda un valor de \$ 641.497 como ingreso autónomo mensual. Dicha cifra fue actualizada a septiembre de 2020, utilizando para ello la variación del IPC.

Daños Intangibles

En forma conservadora, para la evaluación económica, se incluyeron como parte de la presente evaluación los daños de tipo intangible, definidos como el valor económico en términos del menoscabo de la calidad de vida de los habitantes afectados por las crecidas de los ríos, que se expresan en pérdidas de vidas humanas, pérdidas de bienestar y de seguridad de las personas. Dicho daño se estimó en un 10% del valor de las pérdidas directas e indirectas.

6.6.4.3. Resumen Parámetros

En el Cuadro 6-60 se presentan los datos básicos para la estimación del daño en las Situaciones Sin Proyecto, Con Proyecto y, por ende, del daño evitado. Además, en el Cuadro 6-61 se

presenta el catastro de daños identificados en los sectores de influencia de las obras propuestas, bajo el supuesto que corresponden a las afectaciones de un evento con un periodo de retorno T=100.

CUADRO 6-60: BASE DE CÁLCULO PARA LA ESTIMACIÓN DEL DAÑO EVITADO

Costo de Reposición en Ribera		
Movimiento Tierra en Ribera (\$/m3)	4.302	(0,15 UF/m3 MIDESO, Met aguas Iluvias 2016)
Remoción de Sedimentos (\$/m3)	4.302	(0,15 UF/m3 MIDESO, Met aguas Iluvias 2016)
Gaviones (\$/m)	105.000	\$/m
APR o PTA (\$/unidad)	146.812.500	
Costo de Reposición de Calles		
Pavimentadas (\$/m2)	57.648	(2,01 UF/m2 MIDESO, Met. aguas Iluvias 2016)
Sin Pavimentar (\$/m2)	9.465	(0,33 UF/m2 MIDESO, Met. aguas Iluvias 2016)
Ancho Calle Pavimentada (m/ml)	8	
Ancho Calle sin Pavimento (m/ml)	6	
Costo Total Con Pavimento (\$/ml)	461.180	
Costo Total Sin Pavimentar (\$/ml)	56.787	
Daños en Viviendas		
Valor Vivienda Rural + Enseres (\$)	14.340.185	(127,8 UF Enseres inundados completamente MIDESO, Met. aguas Iluvias 2016 +372 UF)
Valor Vivienda Urbana + Enseres (\$)	20.076.259	(127,8 UF Enseres inundados completamente MIDESO, Met. aguas Iluvias 2016 +572 UF)
Estimación de 30% de Pérdidas por Casa		
Daño Vivienda Rural (\$)	4.302.056	
Daño Vivienda Urbana (\$)	6.022.878	
Daño por Destrucción de Terreno		
Pérdida de Terreno Rural (\$)	57.360.740	(2.000 UF)
Pérdida de Terreno Urbano (\$)	64.244.029	(2.240 UF)
Daños Agrícolas		
Beneficio Neto Nogal (\$/ha)	3.472.788	37,1% (CNR, 2014)
Beneficio Neto Uva Pisquera (\$/ha)	3.952.132	32,1% (CNR, 2014)
Beneficio Neto Palto (\$/ha)	4.166.085	30,8% (CNR, 2014)
Promedio ponderado (\$/ha)	3.840.144	

Albergues		
Costo Persona Albergada (\$/hab/día)	37.284	(1,3 UF/hab/día)
Días Promedio Albergue	10	
Costo Total por Persona (\$/hab)	372.845	
Casas Damnificadas		
		Personas
Rurales	0	0
Urbanas	2	8
Necesidad de Albergue		
		albergados
Casa Rurales	30%	0
Casa Urbanas	30%	2,4
Aislamiento		
Costo Persona Aislada (\$/hab/día)	28.680	(1 UF/hab/día)
Personas Afectadas (%)	50%	
Días Aislados	4	
Total Afectados Rural (hab)	0	
Total Afectados Urbanos (hab)	8	
Costo de Limpieza de Calles		
Costo de Limpieza de Calles (\$/ml)	3.155	\$/ml
Total de Calles a Limpiar (m)	250	m
Ausentismo Escolar y Laboral		
Ingreso Autónomo año 2017 (\$/mes)	641.497	(CASEN 2017)
Ingreso Autónomo año 2020 (\$/mes)	697.307	
Variación IPC 2017-2020 (%)	8,70%	(INE, 2020)
Subvención Promedio por Alumno 2012 (\$/mes)	55.575	(MINEDUC, 2012)
Trabajadores por Vivienda	0,67	(INE, 2017 y 2018)
Alumnos por Vivienda	0,71	(INE, 2017 y MINEDUC, 2019)
Ausentismo Escolar (\$/vivienda/día)	1.804	
Ausentismo Laboral (\$/vivienda/día)	21.371	
Días Ausentismo	4	(3 días máximo ausent. Laboral; 5 días ausent. Escolar. MIDESO, met. aguas lluvias 2016)
Total por Vivienda (\$/vivienda)	92.699	

Fuente: Elaboración propia a partir de manuales MIDESO (2016), INE (2017 y 2018), MINEDUC (2012 y 2018) y Encuesta CASEN (2017).

CUADRO 6-61: RESUMEN DE CATASTRO DE DAÑOS SECTORES CON NECESIDAD DE OBRAS

Proyecto	Superficie Inundada (ha)		N° Personas Afectadas		N° Viviendas Afectadas		N° Terrenos Destruídos		Longitud Caminos Afectados (m)		Reposición Ribera - Remoción de material (m3)	Sedimentos Acumulados (m3)	Reposición Gavión Existente (m)
	Agrícola	Urbana	Agrícola	Urbana	Agrícola	Urbana	Agrícola	Urbana	Tierra	Hormigón/Asfalto			
S1-ES-08	1,1	0,0	0	0	0	0	1	0	850	0	6.778	0	0
S1-ES-11	1,5	0,0	0	0	0	0	1	0	900	0	5.773	0	0
S2-ES-01	1,1	0,0	0	0	0	0	1	0	550	0	8.541	0	250
S2-ES-03	2,3	0,0	0	0	0	0	1	0	650	0	12.453	0	650
S2-ES-04	3,2	0,0	8	0	2	0	2	0	715	0	11.442	0	715
S2-ES-06	6,3	0,0	8	0	2	0	2	0	450	0	30.435	0	880
S2-ES-07	2,3	0,0	8	0	2	0	2	0	100	0	27.634	0	475
S2-ES-08	1,7	0,0	0	0	0	0	1	0	0	330	0	11.247	150
S2-ES-09	14,7	0,0	16	0	4	0	4	0	0	0	12.122	0	0
S2-ES-12	22,3	0,0	12	0	3	0	3	0	0	0	12.244	0	0
S3-ES-02	18,7	0,0	12	0	3	0	3	0	0	1.200	0	387.179	0
S3-ES-04	14,2	0,0	12	0	3	0	3	0	1.227	0	70.010	0	0
S4-ES-01	2,7	0,0	0	0	0	0	1	0	0	0	3.000	6.075	350
S4-ES-02	1,4	0,0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	7.422	0

Fuente: Elaboración propia.

6.6.5. Costos

Definidas las soluciones propuestas a nivel preliminar, se determinaron los montos de inversión requeridos por las diferentes soluciones estructurales. Los presupuestos de inversión se componen de los costos directos, que incluyen las distintas actividades a ejecutar (valores de los materiales, la mano de obra y equipos necesarios para su materialización), así como el costo de los estudios necesarios para desarrollar las etapas de diagnóstico ante proyecto y de ingeniería de detalle que corresponda.

Para la evaluación económica de los proyectos se adoptó para el caso de las obras civiles un costo anual de operación y mantenimiento estimado en 0,5% del valor de la inversión inicial, basándose en evaluaciones anteriores realizadas por el Ministerio de Obras Públicas para obras de defensas fluviales en los ríos Camarones, Camiña, Copiapó, Limarí y Elqui, por nombrar algunos.

CUADRO 6-62: COSTOS DE INVERSIÓN

Solución	Costo Obras (\$)		Método de Evaluación	
	Precio Privado	Precio Social	Costo-Efectividad	Costo-Beneficio
S1-ES-02	112.958.310	107.399.520	X	
S1-ES-03	202.723.080	192.393.360	X	
S1-ES-04	140.134.800	133.131.600	X	
S1-ES-05	18.223.605	16.477.986	X	
S1-ES-06	35.009.136	27.772.848	X	
S1-ES-07	133.546.560	126.893.520	X	
S1-ES-08	1.257.192.749	1.067.802.852		X
S1-ES-09	51.946.500	48.856.106	X	
S1-ES-10	155.040.693	147.245.256	X	
S1-ES-11	2.248.748.856	1.863.993.574		X
S1-ES-OA1	74.600.253	69.363.393	X	
S1-ES-OA2	102.367.506	95.363.946	X	
S1-ES-OA3	74.600.253	69.363.393	X	
S1-ES-OA4	174.838.146	163.982.826	X	
S1-ES-OA5	74.600.253	69.363.393	X	
S1-ES-OA6	74.600.253	69.363.393	X	
S2-ES-01	598.264.539	566.912.088		X
S2-ES-02	76.757.364	69.081.702	X	
S2-ES-03	2.208.180.573	1.983.692.779		X
S2-ES-04	782.405.847	741.266.424		X
S2-ES-05	74.281.320	66.853.260	X	
S2-ES-06	1.542.249.592	1.393.318.196		X
S2-ES-07	843.642.218	760.373.614		X
S2-ES-08	2.181.277.092	1.941.833.980		X
S2-ES-09	1.141.518.982	1.001.109.857		X
S2-ES-10	109.766.105	102.729.403	X	
S2-ES-11	200.334.812	185.286.854	X	
S2-ES-12	762.723.480	722.630.160		X
S2-ES-OA1	74.600.253	69.363.393	X	

CUADRO 6-62: COSTOS DE INVERSIÓN

Solución	Costo Obras (\$)		Método de Evaluación	
	Precio Privado	Precio Social	Costo-Efectividad	Costo-Beneficio
S2-ES-OA2	74.600.253	69.363.393	X	
S3-ES-01	146.723.040	139.369.680	X	
S3-ES-02	2.048.397.000	1.843.557.300		X
S3-ES-03	252.627.372	186.276.996	X	
S3-ES-04	1.544.146.133	1.333.652.198		X
S3-ES-OA1	74.600.253	69.363.393	X	
S4-ES-01	645.603.185	581.121.563		X
S4-ES-02	967.732.941	801.023.441		X

Fuente: Elaboración propia.

6.6.6. Resultados

En el Cuadro 6-63 Se presentan los resultados del análisis costo-efectividad en términos del valor actual de los costos (VAC) y el costo anual equivalente (CAE). Los flujos detallados se encuentran en el Anexo 6.4.

CUADRO 6-63: RESULTADOS ANÁLISIS COSTO-EFECTIVIDAD

N°	Sector	Proyecto	VAC (\$)	CAE (\$)
1	S1	S1-ES-02	124.165.160	9.020.464
2	S1	S1-ES-03	215.008.630	15.620.143
3	S1	S1-ES-04	151.668.229	11.018.532
4	S1	S1-ES-05	26.986.028	1.960.506
5	S1	S1-ES-06	40.843.766	2.967.255
6	S1	S1-ES-07	145.000.818	10.534.152
7	S1	S1-ES-09	61.592.545	4.474.631
8	S1	S1-ES-10	166.753.245	12.114.442
9	S1	S1-ES-OA1	75.699.596	5.499.493
10	S1	S1-ES-OA2	103.489.616	7.518.408
11	S1	S1-ES-OA3	176.831.132	12.846.589
12	S1	S1-ES-OA4	176.831.132	12.846.589
13	S1	S1-ES-OA5	75.699.596	5.499.493
14	S1	S1-ES-OA6	75.699.596	5.499.493
15	S2	S2-ES-02	75.770.501	5.504.644
16	S2	S2-ES-05	73.388.688	5.331.608
17	S2	S2-ES-10	116.792.938	8.484.880
18	S2	S2-ES-11	205.032.336	14.895.376
19	S2	S2-ES-OA1	75.699.596	5.499.493
20	S2	S2-ES-OA2	75.699.596	5.499.493
21	S3	S3-ES-01	155.508.573	11.297.529
22	S3	S3-ES-03	256.293.382	18.619.435
23	S3	S3-ES-OA1	75.699.596	5.499.493

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en el Cuadro 6-64 se resumen los principales resultados de la evaluación costo beneficio realizada cada obra propuesta para el área de estudio. En el Anexo 6.4 se presenta la evaluación específica de cada proyecto, incluyendo todos los pasos para la determinación de costos y

beneficios. Como puede observarse, solo dos proyectos presentan de rentabilidad positiva S3-ES-02 y S3-ES-04, obteniendo la gran mayoría resultados muy bajos, principalmente debido a la poca densidad de población en las zonas afectadas y a que la infraestructura dañada es de tipo básico.

CUADRO 6-64: RESULTADOS ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

N°	Sector	Proyecto	VAN (\$)	TIR (%)	VAN / Inv.	Sup. / Inv. (m2/\$)	Infr. / Inv.	Superficie beneficiada (ha)	Infraestructura protegida (\$)
1	S1	S1-ES-08	-843.313.956	-1,1%	-0,79	0,000	0,1	1,3	84.370.304
2	S1	S1-ES-11	-1.640.531.711	-2,2%	-0,88	0,000	0,0	1,9	82.830.296
3	S2	S2-ES-01	-255.585.686	2,1%	-0,45	0,000	0,2	1,3	100.813.357
4	S2	S2-ES-03	-1.511.245.352	-0,9%	-0,76	0,000	0,1	2,9	166.167.906
5	S2	S2-ES-04	-143.882.667	4,4%	-0,19	0,000	0,2	4,0	185.268.538
6	S2	S2-ES-06	-496.577.374	2,9%	-0,36	0,000	0,2	7,9	271.759.964
7	S2	S2-ES-07	-146.907.650	4,4%	-0,19	0,000	0,3	2,9	196.109.178
8	S2	S2-ES-08	-1.245.650.690	0,2%	-0,64	0,000	0,1	2,2	177.692.046
9	S2	S2-ES-09	-526.636.725	1,3%	-0,53	0,000	0,1	18,4	88.089.267
10	S2	S2-ES-12	-161.738.943	4,1%	-0,22	0,000	0,1	27,9	80.139.048
11	S3	S3-ES-02	5.311.584.191	27,6%	2,88	0,000	0,3	23,3	599.706.349
12	S3	S3-ES-04	37.206.132	6,2%	0,03	0,000	0,3	17,8	410.290.777
13	S4	S4-ES-01	-307.429.155	1,3%	-0,53	0,000	0,1	3,4	54.172.381
14	S4	S4-ES-02	-720.190.278	-2,1%	-0,90	0,000	0,0	1,8	4.031.011

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se presentan en el Cuadro 6-65 y Cuadro 6-66 muestran la variación de la rentabilidad de cada proyecto evaluado con la metodología costo-beneficio en función del cambio de la inversión y los daños en Situación Sin Proyecto (daño evitado con la obra), respectivamente. Estos análisis confirman la no conveniencia, desde el punto de vista económico, de los proyectos que originalmente son no rentables.

CUADRO 6-65: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIACIÓN DE LA INVERSIÓN

N°	Sector	Proyecto	Inversión -10%			Inversión +10%			Variación Necesaria para VAN=0
			VAN (\$)	TIR (%)	Variación VAN (%)	VAN (\$)	TIR (%)	Variación VAN (%)	
1	S1	S1-ES-08	-736.621.219	-0,8%	-12,65%	-950.006.692	-1,3%	12,65%	-79,0%
2	S1	S1-ES-11	-1.454.285.182	-2,0%	-11,35%	-1.826.778.240	-2,4%	11,35%	-88,1%
3	S2	S2-ES-01	-198.940.958	2,6%	-22,16%	-312.230.414	1,6%	22,16%	-45,1%
4	S2	S2-ES-03	-1.313.038.717	-0,6%	-13,12%	-1.709.451.988	-1,2%	13,12%	-76,2%
5	S2	S2-ES-04	-69.816.801	5,1%	-51,48%	-217.948.533	3,7%	51,48%	-19,4%
6	S2	S2-ES-06	-357.359.792	3,6%	-28,04%	-635.794.956	2,4%	28,04%	-35,7%
7	S2	S2-ES-07	-70.932.631	5,1%	-51,72%	-222.882.668	3,7%	51,72%	-19,3%
8	S2	S2-ES-08	-1.051.626.502	0,6%	-15,58%	-1.439.674.878	-0,2%	15,58%	-64,2%
9	S2	S2-ES-09	-426.607.820	1,8%	-18,99%	-626.665.630	0,9%	18,99%	-52,6%
10	S2	S2-ES-12	-89.535.176	4,8%	-44,64%	-233.942.711	3,5%	44,64%	-22,4%
11	S3	S3-ES-02	5.495.788.768	30,7%	3,47%	5.127.379.613	25,1%	-3,47%	288,4%
12	S3	S3-ES-04	170.462.006	7,1%	358,16%	-96.049.742	5,5%	-358,16%	2,8%
13	S4	S4-ES-01	-249.364.644	1,8%	-18,89%	-365.493.665	0,9%	18,89%	-52,9%
14	S4	S4-ES-02	-640.153.609	-2,0%	-11,11%	-800.226.946	-2,3%	11,11%	-90,0%

Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 6-66: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD VARIACIÓN DEL DAÑO EVITADO

N°	Sector	Proyecto	Daños Sin Proyecto -10%			Daños Sin Proyecto +10%			Variación Necesaria para VAN=0
			VAN (\$)	TIR (%)	Variación VAN (%)	VAN (\$)	TIR (%)	Variación VAN (%)	
1	S1	S1-ES-08	-870.472.383	-1,4%	3,22%	-816.155.529	-0,9%	-3,22%	310,5%
2	S1	S1-ES-11	-1.667.894.138	-2,4%	1,67%	-1.613.169.284	-2,1%	-1,67%	599,6%
3	S2	S2-ES-01	-287.371.172	1,5%	12,44%	-223.800.200	2,6%	-12,44%	80,4%
4	S2	S2-ES-03	-1.564.240.487	-1,2%	3,51%	-1.458.250.218	-0,6%	-3,51%	285,2%
5	S2	S2-ES-04	-204.259.594	3,6%	41,96%	-83.505.741	5,1%	-41,96%	23,8%
6	S2	S2-ES-06	-587.238.287	2,3%	18,26%	-405.916.461	3,5%	-18,26%	54,8%
7	S2	S2-ES-07	-209.292.972	3,7%	42,47%	-84.522.328	5,1%	-42,47%	23,5%
8	S2	S2-ES-08	-1.316.210.877	-0,2%	5,66%	-1.175.090.503	0,5%	-5,66%	176,5%
9	S2	S2-ES-09	-575.013.750	0,9%	9,19%	-478.259.700	1,8%	-9,19%	108,9%
10	S2	S2-ES-12	-218.468.144	3,4%	35,07%	-105.009.743	4,8%	-35,07%	28,5%
11	S3	S3-ES-02	4.595.566.505	24,8%	-13,48%	6.027.601.876	30,4%	13,48%	-74,2%
12	S3	S3-ES-04	-105.311.407	5,4%	-383,05%	179.723.670	7,1%	383,05%	-2,6%
13	S4	S4-ES-01	-335.539.352	0,8%	9,14%	-279.318.957	1,8%	-9,14%	109,4%
14	S4	S4-ES-02	-733.451.384	-2,3%	1,84%	-706.929.172	-2,0%	-1,84%	543,1%

Fuente: Elaboración propia.

6.7. Medidas No Estructurales

6.7.1. Aspectos Generales

En este capítulo se presentan las medidas no estructurales referidas al manejo de cauces en los ríos San Pedro y Vilama. Estas medidas hacen referencia a aquellas que no implican una intervención directa en el territorio y, están referidas a acciones, planificación del territorio, consideraciones en el desarrollo de obras, entre otras.

6.7.2. Medidas Propuestas

En términos generales, como medidas no estructurales se utiliza la regulación de áreas con riesgo de inundación y/o erosión a través de planes reguladores.

Básicamente, los tipos de medidas No Estructurales que se plantean son:

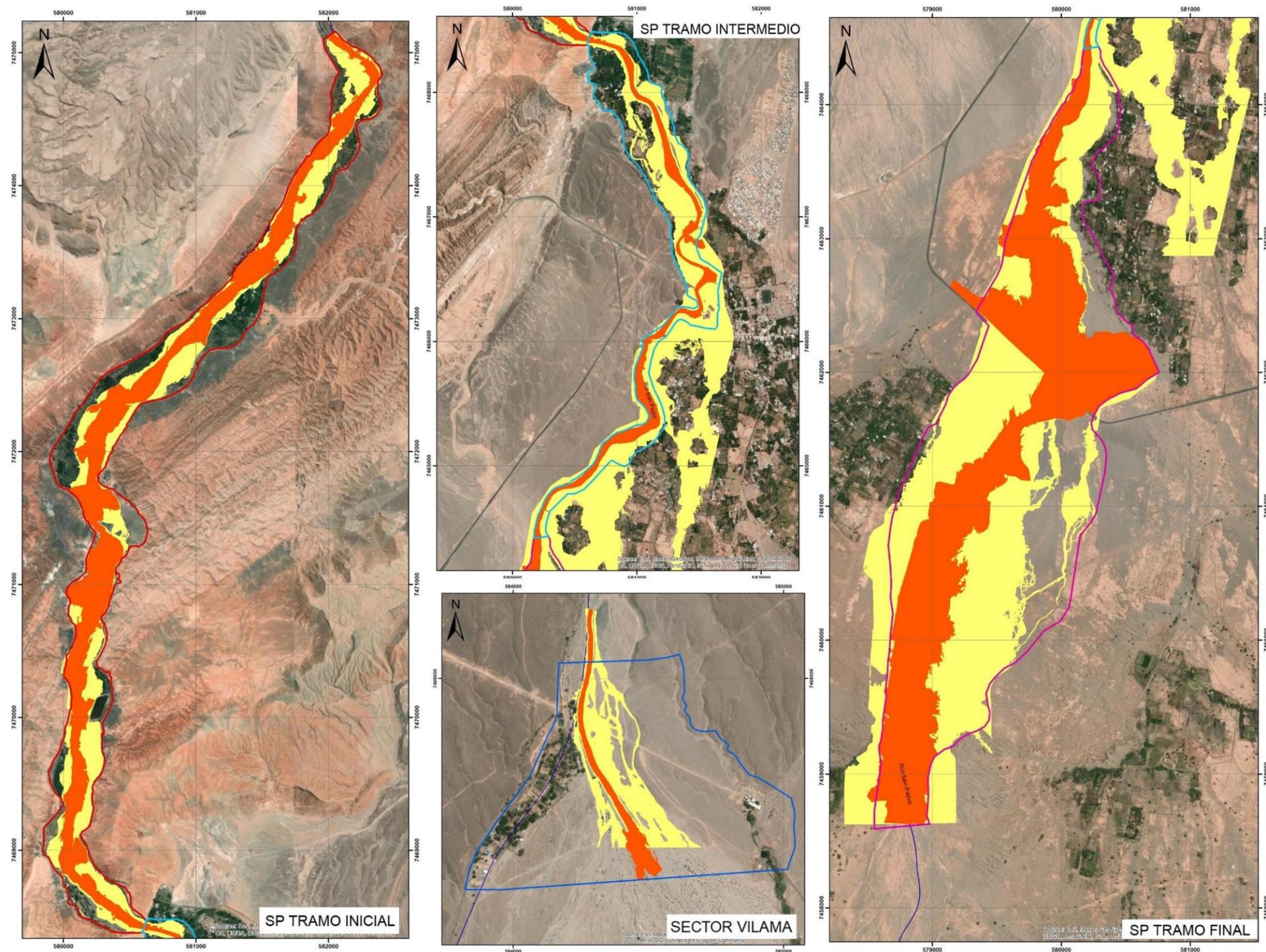
- Franja de restricción cauces naturales por inundación
- Establecimiento de áreas de exclusión para edificación permanente
- Fijación de deslindes
- Actualización de plan regulador intercomunal.
- Zonas donde la solución fluvial no es posible y debe buscarse una alternativa en la construcción de viviendas y similares.
- Plan de evacuación de aguas lluvias
- Señalización vial durante las obras
- Difusión de resultados
- Programa de educación

6.7.2.1. Franja de restricción cauces naturales por inundación

Con la finalidad de proteger los cauces, y mantener las obras que se propondrá construir a futuro en cada una de las quebradas y evitar la instalación de otras actividades o infraestructuras que puedan afectar las obras, se propone una franja de restricción, que corresponde a un área definida en función de la geometría de las obras propuestas y de las características de los cauces.

Esta zonificación deberá ser considerada para integrar o complementar lo indicado en el Plan Regulador Comunal de San Pedro, mediante ordenanza municipal.

En la Figura 6-1 se presentan las áreas de restricción y prohibición.



SIMBOLOGÍA	
TIPO RESTRICCIÓN USO DE SUELO	ÁREA DE ESTUDIO
 Prohibición	 Río San Pedro - Tramo Alto
 Restricción	 Río San Pedro - Tramo Intermedio
	 Río San Pedro - Tramo Final
	 Río Vilama

FIGURA 6-1. DISTRIBUCIÓN ÁREAS DE RESTRICCIÓN DE USO DE SUELO

Fuente: Elaboración propia.

Esta medida corresponde a la definición de estas áreas, las cuales deberán ser informadas a las autoridades regionales/locales vinculadas con la planificación territorial (MINVU y Municipalidad de San Pedro de Atacama) a fin de que la propuesta se pueda materializar en el territorio.

6.7.2.2. Establecimiento de áreas de exclusión para edificación permanente

Considerando la determinación de áreas de inundación, zonas de restricción ambiental, y otras áreas de riesgo y preservación establecidas e identificadas en este estudio, se propone una zonificación de restricción para fines de edificación permanente.

Esta propuesta tiene como base las áreas potencialmente afectadas por las crecidas para diferentes periodos de retorno, a saber:

- Zona de prohibición: corresponde al área con un periodo de retorno menor a 10 años, lo que se considera dentro del PMC como el espacio fluvial del cauce activo. En esta zona se propone prohibir todo tipo de instalación, actividad u obras. Solamente están permitidas aquellas que sean fundamentales para el funcionamiento del territorio, como por ejemplo, bocatomas, pilas de puentes, etc.
- Zona de Restricción: corresponde al área potencialmente inundable para un periodo de retorno mayor a 10 años y menor a 100. En esta zona se podrá desarrollar agricultura y actividades recreativas, siempre que solamente consideren instalación de infraestructura “fusible”, por ejemplo, pequeñas bodegas, mesas de camping, plazas, etc.
- Zona de advertencia: esta área se encuentra fuera del área inundable para 100 años de periodo de retorno, y en ella es posible establecer todo tipo de infraestructura (vivienda, comercio, servicios, etc). Aunque esta área presenta un riesgo mucho menor, en caso de una crecida de mayor intensidad, las obras de protección se pueden ver sobrepasadas y podrían verse afectados estos sectores, por lo cual es importante recalcar en la población la importancia de estar alerta ante las crecidas.

La distribución detallada se resume en el esquema de la figura 6-2.

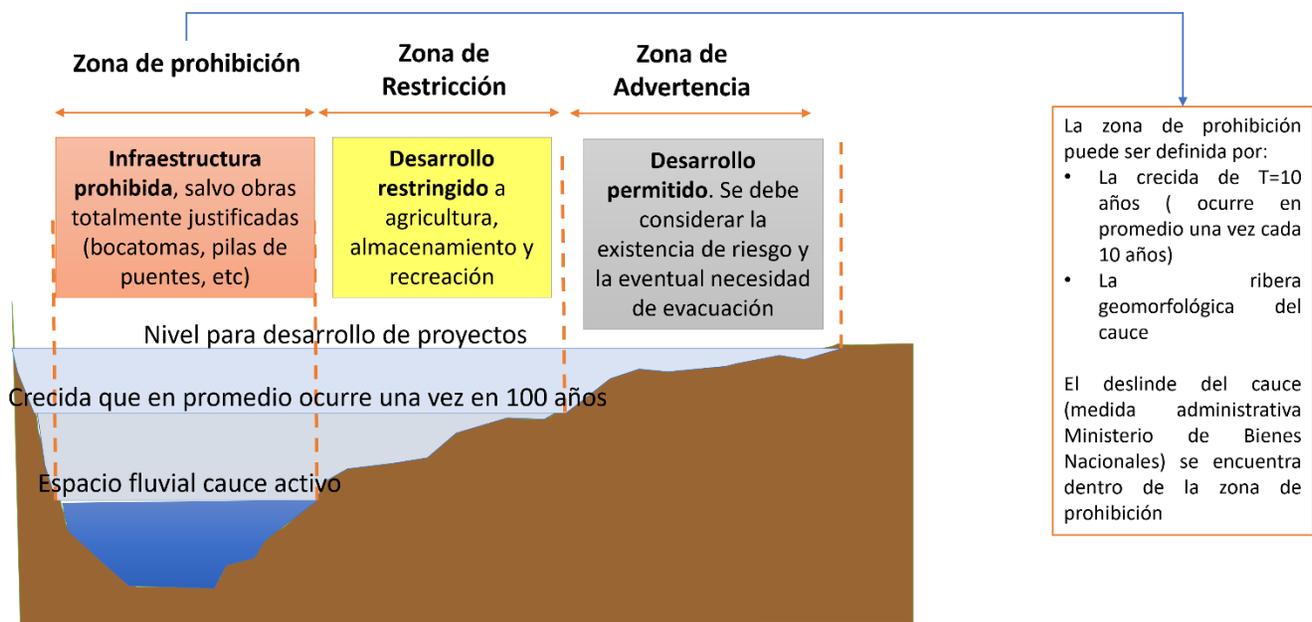


FIGURA 6-2. ESQUEMA ZONAS DE EXCLUSIÓN DE EDIFICACIÓN

Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que mayor parte del área de estudio corresponde a suelos rurales, por lo cual estas áreas de restricción deben quedar incorporadas en los Instrumentos de Planificación Territorial aplicables al área de estudio. Por una parte, en el Plan Regulador Intercomunal se deben señalar como áreas de riesgo y limitar con ello la posibilidad de edificaciones. Al momento de actualizar el Plan Regulador Comunal (PRC), se deberá realizar un estudio de riesgos, dentro del cual deberá considerarse la información propuesta en el PMC, con el fin de incorporar como “áreas de riesgo” o “zonas restringidas al desarrollo urbano” las áreas de restricción que se encuentren dentro de los límites urbanos. En caso de no realizar una actualización del PRC, es posible realizar una modificación en sus ordenanzas para su incorporación al menos dentro del área definida como urbana en la comuna.

6.7.2.3. Fijación de deslindes

Considerando las áreas con riesgo de inundación en propiedades privadas, se propone posterior al establecimiento de estas, la fijación de deslindes. Entendiendo estos, como una delimitación de una zona de exclusión, en la que no se puede instalar edificaciones permanentes.

Esta actividad queda en responsabilidad del Ministerio de Bienes Nacionales.

6.7.2.4. Actualización de Plan Regulador Intercomunal

Según se identificó en la plataforma en línea Seguimiento de Instrumentos de Planificación Territorial del MINVU⁹, el Plan Regulador Intercomunal (PRI) Oasis Andino, unidad territorial a la que

⁹Disponible en: <http://seguimientoipt.minvu.cl>

pertenece la comuna de San Pedro de Atacama, se encuentra en formulación, sin encontrarse un PRI previo vigente asociado a la comuna.

Este instrumento de planificación territorial (IPT), se espera incorpore en sus definiciones las zonas con riesgo de inundación definidas en este estudio.

6.7.2.5. Zonas donde la solución fluvial no es posible y se propone alternativa en la construcción de viviendas y similares

Se considera evaluar esta medida en aquellos sectores, principalmente correspondientes al tramo intermedio del río San Pedro, en que la solución estructural de modificaciones en el cauce resulte compleja de implementar, debido a los aspectos ambientales, sociales y culturales, como también a la dificultad de relocalización de viviendas producto de la escasa disponibilidad de suelos para uso en proyectos habitacionales en la comuna.

En consecuencia, se propone que se cree un **programa de mejoramiento de la habitabilidad de las viviendas** de forma que permita que estas sean modificadas con el objetivo de que sean **resilientes a la inundación**, ya sea que se encuentren sobre una base con altura superior a la de inundación o que tengan habilitado solo el segundo nivel y el primer nivel con uso restringido a estacionamiento, jardín, y espacios fácilmente recuperables en caso de inundación.

Como ejemplo a esta medida se encuentran los programas que realiza el SERVIU de mejoramiento de viviendas.

Se propone que el organismo encargado de esta medida es el Ministerio de Vivienda y Urbanismo en coordinación con la DOH y el Municipio.

6.7.2.6. Plan de Evacuación de Aguas Lluvias

Se propone promover la realización de un plan maestro de la evacuación de las aguas lluvias en toda el área urbana y el área de expansión (informal) de San Pedro.

Esta medida tiene por finalidad mantener un control del drenaje superficial de los cauces que se insertan en el área urbana, y así también permitir la disposición de mayores recursos al municipio para tomar medidas de mitigación y reparación en las vías de evacuación de aguas lluvias.

6.7.2.7. Señalización vial durante las obras

Se deberá establecer las señalizaciones adecuadas relacionadas con el movimiento de maquinarias y camiones que puedan existir durante el proceso de construcción, de modo de informar adecuadamente para minimizar la afectación del uso vial en las zonas de intervención.

Se espera que la Dirección de Tránsito de la Municipalidad de San Pedro sea quien defina las señalizaciones que les parezca adecuadas para dar a conocer a los vehículos la presencia de los

riesgos inherentes a la construcción de las obras. Lo cual, por normativa deberá ser abordado durante la solicitud, gestión y tramitación de los permisos de construcción municipales, recomendándose que estas sean incluidas en la licitación de la fase constructiva.

6.7.2.8. Programa de difusión de resultados

Se propone implementar las acciones necesarias para garantizar la adecuada difusión de los avances del Plan de Manejo de Cauces. Estas medidas consisten en difusión radial, prensa, y principalmente a través de medios electrónicos de uso local y regional.

De igual forma, es recomendable dejar a disposición de la ciudadanía, los resultados del presente estudio en formato impreso físico, como digital a través de un sitio web.

En este contexto, se sugiere formular un Programa de Promoción para la implementación del Plan de Manejo de cauce de los ríos San Pedro y Vilama.

6.7.2.9. Programa de educación

Las acciones propuestas deben incluir la organización y puesta en práctica de actividades referidas a cursos, charlas y seminarios destinados a entregar información sobre los programas, planes y proyectos en desarrollo en los cauces por parte de la Dirección de Obras Hidráulicas, así como nociones básicas sobre la normativa vigente relacionada con el manejo de los cauces.

La campaña educativa debe ir acompañada de difusión periódica en diarios, radio y también mediante el uso de las nuevas tecnologías como es internet, usando para esto el sitio web de la municipalidad como canal de comunicaciones.

El Programa de Educación debe abordar por lo menos las siguientes líneas de trabajo:

- Desarrollar una estrategia educacional orientada a lograr una conceptualización clara y asequible a toda la población, respecto a los aspectos básicos del manejo y conservación de los cauces.
- Promover y generar la participación de los actores públicos, privados y comunitarios, para favorecer una disposición común, concertada y global, en la ejecución, sustentación y mantención de los proyectos.
- Promover y fortalecer la participación de los actores relevantes relacionados con los cauces en estudio, para favorecer actitudes conservacionistas en relación con su medioambiente.
- Desarrollar, afianzar y dar sustentabilidad a estructuras participativas y representativas de actores públicos, privados y comunitarios, para hacer efectiva y eficiente la gestión futura de los proyectos y acciones propuestas.

6.7.2.10. Medidas en el marco de la Gestión del Riesgo

a) Plan de Evacuación y Emergencia para el uso del camino en sector de Catarpe

El camino hacia el sector de Catarpe, históricamente se ve afectado por las crecidas, quedando parte de la población de la zona aislada incluso por varios días. La alternativa propuesta en el Plan para este camino considera que este se encuentre habilitado en caso de crecidas hasta T=25.

Considerando este límite, debe definirse un sistema de alertas según los datos que presente la estación pluviométrica más cercana al área de estudio que se encuentre en funcionamiento. Actualmente la estación más cercana al área de estudio corresponde a la Estación Río Grande, que registra datos de pluviometría, por lo que en primera instancia se propone una escala de niveles de alerta en función de este tipo de información, escala que se presenta en el cuadro 6-2.

CUADRO 6-2. PROPUESTA DE ALERTAS DE EMERGENCIA PARA EL CAMINO AL SECTOR DE CATARPE CON DATOS DE ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA RIO GRANDE

Nivel de Alerta	Precipitación (mm)	Acción
Verde	Menor a 65	Este nivel de precipitación tiene un periodo de retorno menor a 10 años. Riesgo bajo de inundación del camino. Se mantiene el acceso libre al sector de Catarpe.
Amarilla	Entre 65 y 80	Este nivel de precipitaciones equivale a un periodo de retorno entre 10 y 20 años. En este caso se emite la alerta temprana a los habitantes del sector y se cierra totalmente el acceso peatonal y se limita el acceso vehicular a no residentes en la zona.
Roja	Mayor a 80	Este nivel de precipitación equivale a un periodo de retorno de 20 años. Se emite la alerta y se procede con la evacuación de los habitantes que así lo requieran, cierre total del camino de acceso al sector.

Fuente: Elaboración propia.

Si bien los datos de la Estación Río Grande son de utilidad, se requiere tener algún punto de información más cercano al área de estudio, por lo cual se hace necesaria la reparación de la Estación Río San Pedro en Cuchabrachi, estación pluviométrica dentro del área de estudio, que además debería estar conectada al sistema de información en línea de la DGA, facilitando así el acceso a los datos y permitiendo la emisión de alertas en forma oportuna.

Una vez que entre en funcionamiento dicha estación, los niveles de alerta a utilizar se presentan en el cuadro 6-3

CUADRO 6-3. PROPUESTA DE ALERTAS DE EMERGENCIA PARA EL CAMINO AL SECTOR DE CATARPE CON DATOS DE ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA RIO SAN PEDRO EN CUCHABRACHE

Nivel de Alerta	Condiciones	Acción
Verde	Cuando el caudal que pasa por la estación más cercana al área de estudio es menor que el caudal correspondiente a T=10	Se mantiene el acceso libre al sector de Catarpe.
Amarilla	Cuando el caudal que pasa por la estación más cercana al área de estudio es mayor al caudal correspondiente a T=10.	En este caso se emite la alerta temprana a los habitantes del sector y se cierra totalmente el acceso peatonal y se limita el acceso vehicular a no residentes en la zona.
Roja	Cuando el caudal que pasa por la estación más cercana al área de estudio es mayor que el caudal correspondiente a T=20.	Se emite la alerta y se procede con la evacuación de los habitantes que así lo requieran, cierre total del camino de acceso al sector.

Fuente: Elaboración propia.

Este Plan se debe diseñar en coordinación entre el Municipio de San Pedro de Atacama, ONEMI y la Comunidad de Catarpe, manteniendo un catastro actualizado de la población en la zona, los requerimientos de evacuación, formas de comunicación para informar alertas, etc.

b) Plan de Evacuación y Emergencia para Zonas con Restricción de uso de suelo

La definición de zonas de restricción de usos de suelo obedece al objetivo primordial que es proteger a las personas de los efectos de las crecidas, busca reducir el riesgo reduciendo la vulnerabilidad que está dada por su ubicación en zonas potencialmente inundables.

Tal como se presentó en el punto 7.2.2, se propone el establecimiento de áreas de exclusión de usos de suelos, en donde además de una zona de prohibición se plantea un área de restricción, en la cuál es posible desarrollar algunos tipos de actividades, pero se excluye la instalación de cualquier tipo de infraestructura como viviendas, comercio, etc.

Este plan de Evacuación y Emergencia se enfoca fundamentalmente al área considerada de restricción, puesto que en esta zona se permite el uso agrícola, la instalación de áreas recreativas y deportivas, por lo cual en una eventual crecida del cauce existiría riesgo para vida de las personas. Se recomienda de igual forma, considerar el área de prohibición, en situaciones de emergencia y evacuación, teniendo en consideración el alto flujo turístico en el territorio que podría implicar la presencia de personas dentro de esta área del cauce, principalmente en periodos estivales.

Para definir los niveles de alerta, al igual que en el “Plan de Evacuación y Emergencia para el uso del camino en sector de Catarpe” detallado en el punto anterior, se considerarán los datos correspondientes a la Estación Río Grande, pero se recomienda la reparación y puesta en línea de la Estación Río San Pedro en Cuchabrachi.

**CUADRO 6-4. PROPUESTA DE ALERTAS DE EMERGENCIA PARA EL CAMINO AL SECTOR DE CATARPE
CON DATOS DE ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA RIO GRANDE**

Nivel de Alerta	Precipitación (mm)	Equivalencia en periodo de retorno de caudal	Acción
Verde	Menor a 27,5	Este nivel de precipitación tiene un periodo de retorno menor a 2	Nivel de riesgo bajo. Se mantiene el funcionamiento normal del área
Amarilla	Entre 27,5 y 65	Este nivel de precipitaciones equivale a un periodo de retorno entre 2 y 10 años.	En este caso se emite la alerta temprana. Se debe realizar inspección en área de prohibición para descartar la presencia de personas.
Roja	Mayor a 65	Este nivel de precipitación equivale a un periodo de retorno de 10 años.	Se emite la alerta y se procede con el cierre del acceso a las áreas de restricción y se realiza evacuación en caso de ser necesario (sectores agrícolas/presencia de ganado, áreas recreativas, etc.)

Fuente: Elaboración propia.

Esta medida debe incorporarse en el plan de emergencias municipal, y debe ser acompañada de una fuerte campaña de difusión entre la comunidad y los visitantes de la zona.

6.7.2.11. Medidas Respecto a la Explotación de Áridos

I. Aspectos Generales

Uno de los objetivos generales del presente Plan Maestro de Manejo de Cauces, se refiere a la elaboración de un diagnóstico y proposición de soluciones a los problemas de manejo de explotación de áridos en la zona de estudio.

Al respecto, como solución general al problema citado anteriormente, sobre la base de la estimación de la disponibilidad de áridos del cauce de cada río y su demanda, en esta sección se presenta una proposición de zonas de exclusión y zonas admisibles para extracción sustentable de áridos en los cauces de la zona de estudio. Lo anterior, constituye una medida de tipo no estructural, cuyo principal objetivo es lograr un ordenamiento territorial en el ámbito de las intervenciones de los cauces naturales, específicamente en lo que se refiere a facilitar los procesos de evaluación técnica de solicitudes que realiza la DOH, como también la fiscalización de las extracciones de áridos, que llevan a cabo las Municipalidades.

Al respecto, cabe señalar que la proposición de sectorización o sitios para extracción de áridos, se basa en el análisis de transporte de sedimentos realizada en el presente Plan Maestro, para cada uno de los sectores del área de estudio, además de la consideración de los antecedentes recopilados y visitas a terreno realizadas.

El análisis de transporte de sedimentos mencionado, corresponde al cálculo de la variación temporal de la forma, geometría del cauce y de la morfología de la cuenca aportante, todos los cuales dan como resultado los procesos de socavación, transporte de sedimentos y depositación de sedimentos en el cauce.

II. Criterios para definir los Sitios para Extracción de Áridos

La Proposición de Sitios para Extracción de Áridos se ha realizado considerando básicamente los siguientes criterios:

- a) Equilibrio sedimentológico: Se definen los sitios para extracción de áridos en los cuales se verifica depositación de sedimentos, en un volumen anual máximo que no sea superior al volumen anual máximo de depositación en ese lugar. De esta forma, se puede verificar que, en el largo plazo, se puede reponer en forma natural el volumen de árido que ha sido extraído.
- b) Uso de lugares de uso público, de propiedad fiscal: Los lugares se han definido en los cauces naturales, de modo que estén dentro del área de inundación de período de retorno de 5 años. Con lo anterior, es posible asegurar que su propiedad es pública, por lo cual no habría interferencia con propiedades particulares ni requeriría expropiaciones.

El citado criterio tiene por objeto asegurar que, los sitios de extracción de áridos que posteriormente recomiende desde el punto de vista técnico la DOH a las Municipalidades, para efecto de las respectivas autorizaciones o aprobaciones técnicas de solicitudes de extracción de áridos, no presenten conflictos con el uso de propiedades de particulares ribereños. En efecto, se ha observado que, en general, las propiedades particulares ribereñas están sobre la cota de las inundaciones correspondientes a un período de retorno de 5 años. Es decir, bajo la cota de inundación de 5 años sería más probable que fuese de uso público o fiscal. Este criterio para definir la ubicación de sitios de extracción de áridos, es sin perjuicio que, en cada solicitud o caso particular, se deba verificar otros antecedentes del sitio de extracción de áridos que se solicite, tales como el dominio de la propiedad que se postule utilizar (público o privado), uso actual del suelo, entre otros.

- c) Evitar interferencias con infraestructura existente: Los sitios para extracción de áridos que se proponen, no tienen interferencia con obras actuales en los cauces, tales como puentes, badenes, bocatomas, sifones, pozos APR, defensas fluviales y otras.
- d) Se considera los sitios con superficie mayor a 0,5 hectáreas: Los sitios con superficie menor a 0,5 hectáreas no tendrían interés por el pequeño volumen de áridos que podría obtenerse, por la falta de espacio necesario para las instalaciones y maquinarias. Además, la extracción del volumen máximo anual se realizaría en muy poco tiempo, lo cual dificultaría la fiscalización.
- e) Volumen máximo a extraer de cada sitio: Se define como el menor valor entre: (i) el volumen máximo anual determinado en el análisis de depositación; y (ii) el resultado de multiplicar el área del sitio por una profundidad máxima de excavación de 6 metros.

III. Propuesta de Zonas de Exclusión para Extracción de Áridos

La cuenca del río San Pedro tiene una producción de sedimento considerable, la que se genera principalmente en su zona alta donde se concentra la mayor área aportante y quebradas con alta disponibilidad de arenas, esto se condice con la gran cantidad de material que se ha acumulado en la zona urbana durante las últimas crecidas.

Si bien es cierto, a partir del balance sedimentológico se puede observar que en el sector alto del Río San Pedro existe una zona candidata para la extracción de áridos entre los kilómetros 4,0 y 6,0 (referido al eje longitudinal del cauce), esta debe ser descartada por la presencia de bocatomas las cuales pueden verse afectadas producto de las modificaciones de las cotas a causa de las extracciones en el río, tal como se señala en el criterio c) definido en el numeral anterior.

Asimismo, en el sector intermedio del río San Pedro existe una zona a la altura de Pucara de Quito que desde el punto de vista numérico podría ser candidato a sectores de extracción de áridos, sin embargo, esta zona se descarta al verse localizada en un lugar urbano y que podría comprometer la integridad de las defensas fluviales.

Finalmente, en el Río Vilama no se observa dentro del balance sedimentológico un lugar con una tendencia a la depositación de sedimentos, tampoco se sugiere instalar zonas de extracciones de áridos dentro del área de estudio ya que existen defensas fluviales las cuales podrían verse comprometidas por los efectos erosivos de la extracción, además de encontrarse cercano a zonas de interés arqueológico.

En resumen, **se establecen como zonas de exclusión para la extracción de áridos a los siguientes sectores:**

- Sector 1 del río San Pedro, correspondiente al tramo inicial comprendido entre el Km 0 y el Km 8,65
- Sector 2 del río San Pedro, correspondiente al tramo intermedio comprendido entre el Km 8,65 y el Km 14,3
- Sector 4, correspondiente al tramo de estudio del río Vilama comprendido entre el Km 0 y el Km 1,0

IV. Propuesta de Sitio para la Extracción de Áridos

En el sector bajo del río San Pedro (Sector 3), existe una zona candidata a la altura del Ayllu de Coyo entre los kilómetros 17,5 y 18,5, la cual no presentaría ninguno de los inconvenientes previamente nombrados. En terreno se identificó que esta zona si presenta una zona de extracción, la cual no tiene permisos de extracción de áridos otorgados (según lo informado por la municipalidad). En la Figura 6-25 se presenta el sitio mencionado donde se observa que esta zona de extracción no presenta una antigüedad considerable al menos en la magnitud que posee actualmente.

Se propone un área de intervención de 5,3 ha con una tasa máxima anual de extracción de 21.000 m³, cuyo detalle se presenta en anexo 6.3.

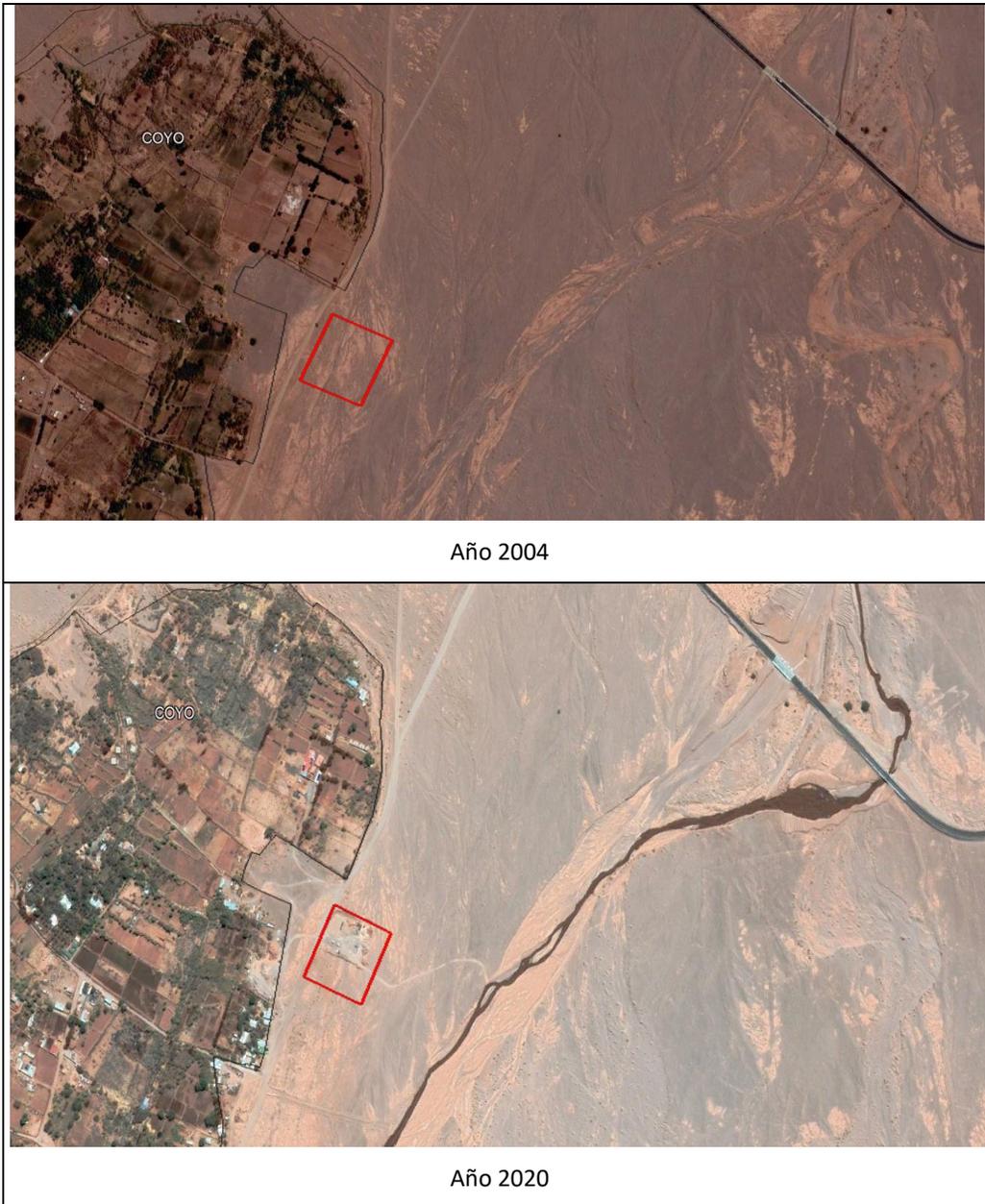


FIGURA 6-25: EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS EN COYO

Fuente: Elaboración propia.

6.8. Priorización de las Medidas Propuestas por el Plan

6.8.1. Medidas No Estructurales

La priorización de las medidas no estructurales se realiza teniendo en cuenta el nivel de dificultad de implementar cada medida propuesta. En este análisis se consideraron 3 variables:

- Plazo total estimado (años)
- Potencial requerimiento de incorporar Consulta Indígena en el proceso de implementación de la medida. Se refiere a la posibilidad, ya que la determinación de la necesidad de implementar la consulta requiere un diálogo previo e informado con las comunidades.
- Instituciones participantes, en lo referido a la cantidad, entendiendo que a mayor cantidad de actores involucrados se requiere mayor nivel de coordinación para la ejecución de una iniciativa

A partir de la combinación de estas variables, se estableció la escala de dificultades que se observa en el Cuadro 6-67.

CUADRO 6-67. NIVELES DIFICULTAD IMPLEMENTACIÓN MEDIDAS PROPUESTAS

Nivel	Criterio
BAJO	Plazo menor a 2 años y sin requerimientos ni tramitaciones paralelas
MEDIO	Plazo entre 2 y 4 años con requerimientos de trabajos y/o estudios específicos. Ejemplo: estudios de títulos, prospecciones arqueológicas
ALTO	Plazo mayor a 2 años, involucra una mayor coordinación entre servicios y que podría requerir la implementación de consulta indígena

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 6-68 se presenta el resultado del análisis del nivel de dificultad de implementación de las medidas no estructurales.

CUADRO 6-68. EVALUACIÓN DIFICULTAD IMPLEMENTACIÓN MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Medida	Plazo Total (años)*	Potencialmente Requiere Consulta Indígena	Instituciones participantes	Nivel
Definición de áreas de restricción de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama por riesgo de inundación	N/A	Si	DOH	ALTO
Establecimiento de áreas de exclusión para edificación permanente en los ríos San Pedro y Vilama	2	Si	Minvu, DOH, Municipalidad	ALTO
Fijación de deslindes en los ríos San Pedro y Vilama	3	Si	Ministerio de Bienes Nacionales, DOH	ALTO
Actualización de plan regulador intercomunal	3	Si	Minvu y Municipalidad	ALTO
Plan de evacuación de aguas lluvias del área urbana y de expansión	4 (Considera campaña arqueológica con exploraciones)	Si	DOH, Municipalidad, Serviu	ALTO

CUADRO 6-68. EVALUACIÓN DIFICULTAD IMPLEMENTACIÓN MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Medida	Plazo Total (años)*	Potencialmente Requiere Consulta Indígena	Instituciones participantes	Nivel
(informal) de la comuna de San Pedro de Atacama				
Definición de zonas donde se debe prohibir la extracción de áridos en los ríos San Pedro y Vilama (* referido a extracción mecanizada)	1 (Considera publicación de ordenanza municipal)	Si	DOH, Municipalidad Comunidades Indígenas	ALTO
Programa de Difusión de resultados del Plan de Manejo de Cauces	1	No	DOH	BAJO
Programa de Educación sobre los programas, planes y proyectos en desarrollo en los cauces	1	No	DOH	BAJO
Plan de Evacuación y Emergencia para el uso del camino en sector de Catarpe	1	No	Municipalidad, ONEMI y Comunidad de Catarpe	BAJO
Plan de Evacuación y Emergencia para zonas con restricción de uso de suelo	1	No	Municipalidad, ONEMI	BAJO

Fuente: Elaboración propia. (*) Plazo total incluye plazo de licitación, ejecución e implementación

En el siguiente cuadro se presenta la priorización de las medidas no estructurales propuestas:

CUADRO 6-69-: PRIORIZACIÓN MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

N°	Tipo de Medida	Letra	Medida a Ejecutar	Institución Responsable	Dificultad para Implementar		Priorización
					Análisis	Nivel	
1	Definición del espacio fluvial de los cauces y sus usos	a	Definición de áreas de restricción de los cauces de los ríos San Pedro y Vilama por riesgo de inundación	Esta zonificación deberá ser considerada para integrar o complementar lo indicado en el Plan Regulador Comunal de San Pedro, mediante ordenanza municipal	Esta medida afecta todo tipo de propiedades, potencialmente requiere consulta indígena	ALTO	3° Prioridad
		b	Establecimiento de áreas de exclusión para edificación permanente en los ríos San Pedro y Vilama		Esta medida afecta todo tipo de propiedades, potencialmente requiere consulta indígena	ALTO	3° Prioridad
		c	Fijación de deslindes en los ríos San Pedro y Vilama	Ministerio de Bienes Nacionales	Requiere de estudio de títulos de toda el área de estudio.	ALTO	2° Prioridad
		d	Actualización de plan regulador intercomunal	Ministerio de Vivienda y Urbanismo	Se encuentra en ejecución. Este instrumento de planificación territorial (IPT), se espera incorpore en sus definiciones las zonas con riesgo de inundación definidas en este estudio.	ALTO	1° Prioridad
		e	Plan de evacuación de aguas lluvias del área urbana y de expansión (informal) de la comuna de San Pedro de Atacama	DOH	Requiere de un exhaustivo estudio arqueológico de toda el área urbana y de expansión	ALTO	2° Prioridad
2	Explotación de Áridos	a	Definición de zonas donde se debe prohibir la extracción de áridos en los ríos San Pedro y Vilama	DOH y ordenanza Municipal – Comunidades Indígenas	Existen comunidades indígenas que realizan esta actividad ancestralmente, e incluso en forma mecanizada como la Comunidad de Coyo, por lo cual esta medida requiere diálogo con las comunidades y potencialmente una consulta indígena.	ALTO	1° Prioridad

CUADRO 6-69:- PRIORIZACIÓN MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

N°	Tipo de Medida	Letra	Medida a Ejecutar	Institución Responsable	Dificultad para Implementar		Priorización
					Análisis	Nivel	
3	Difusión y Educación	a	Programa de Difusión de resultados del Plan de Manejo de Cauces	DOH	Esta medida solo requiere de los resultados del PMC	BAJO	1° Prioridad
		b	Programa de Educación sobre los programas, planes y proyectos en desarrollo en los cauces	DOH	Esta medida solamente requiere del diseño y programación de las actividades por lo cual se considera de una baja dificultad de implementación	BAJO	1° Prioridad
4	Gestión del Riesgo	a	Plan de Evacuación y Emergencia para el uso del camino en sector de Catarpe	Municipalidad de San Pedro y Comunidad de Catarpe	Esta medida se plantea considerando ya implementadas las modificaciones al camino propuestas en este PMC, por lo cual requiere ir en paralelo con la materialización de dichas obras, que tendrían primera prioridad de ejecución.	BAJO	2° Prioridad
		b	Plan de Evacuación y Emergencia para zonas con restricción de uso de suelo	Municipalidad de San Pedro	Para la implementación de esta medida se requiere que estén implementadas las medidas de restricción al uso de suelo, o que se realice en forma paralela.	BAJO	2° Prioridad

Fuente: Elaboración propia en base a los Términos de Referencia del Estudio

Nota: Las medidas 4ª y 4b se indican en 2da prioridad porque dependen de que se ejecuten otras medidas o se hagan en paralelo

6.8.2. Medidas Estructurales

La priorización corresponde a un insumo fundamental para poder determinar el cronograma de ejecución de las iniciativas propuestas. Dado el número de soluciones que se pueden presentar, se requerirá de una metodología que logre combinar las distintas dimensiones y objetivos que se hallan envueltos en el proceso de toma de decisiones, sin sacrificar la calidad, confiabilidad y consenso en los resultados.

Se considerará como enfoque metodológico la Evaluación Multicriterio (EMC) que, en términos generales, surge del resultado de matrices de análisis, las cuales permiten determinar la importancia relativa de un conjunto de criterios de evaluación por parte de distintos participantes, cuya priorización se basa en la definición de pesos para cada criterio, y posteriormente, al ser aplicados a cada iniciativa de inversión, entrega como producto final un ranking de prioridad.

Una de las principales características de estas metodologías es la diversidad de factores que se logran integrar en el proceso de evaluación, pudiendo transformar las mediciones y percepciones en una escala única, de modo de poder comparar los elementos y establecer órdenes de prioridad.

Dentro de los distintos tipos de evaluación multicriterio, se utilizará el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), el que fue propuesto inicialmente por Thomas Saaty en el año 1980¹⁰. Este proceso requiere que un número determinado de participantes proporcionen evaluaciones subjetivas respecto de la importancia relativa de cada uno de los criterios.

En el siguiente cuadro se presentan los criterios y subcriterios que se propone considerar para la evaluación de las alternativas.

CUADRO 6-70: EJEMPLO DE CRITERIOS DE PRIORIZACIÓN DE SOLUCIONES

Criterios		Subcriterios		Definición	Indicadores
1.	Económico	1.1.	Rentabilidad	Prioriza iniciativas con mayor rentabilidad	VAN social mayor o menor a 0
2.	Estratégico y Gestión	2.1.	Lineamiento institucional	Prioriza iniciativas según objeto de protección, según orden definido por DOH Regional.	1° Población 2° APR 3° Infraestructura vial 4° Otra Infraestructura 5° Zonas agrícolas
		2.2.	Espacio físico de ejecución	Discrimina negativamente las iniciativas que deban someterse a procedimientos legales o administrativos, tales como expropiaciones, deslindes o servidumbres.	Aplica / No aplica
3.	Ambiental	3.1.	Susceptibilidad de causar impacto ambiental	Discrimina negativamente aquellas iniciativas que se sometan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, al ser	Aplica / No aplica

¹⁰ Saaty, T. 1980. The Analytic Hierarchy Process, New York: McGraw Hill. Pittsburgh, U. S. A.

CUADRO 6-70: EJEMPLO DE CRITERIOS DE PRIORIZACIÓN DE SOLUCIONES

Criterios		Subcriterios		Definición	Indicadores
				susceptible de causar impacto ambiental (Ingreso al SEIA, Dto. 40/13 Art. 3).	
		3.2.	Complejidad ambiental	Discrimina negativamente a aquellas iniciativas que, de manera preliminar, se haya definido que ingresan al SEIA vía Estudio de Impacto Ambiental.	Aplica / No aplica

Fuente: DOH-Arrau (2020).

Asimismo, se tomaron en cuenta los criterios y cuadros indicados por la DOH en los términos de referencia, que jerarquizan según el riesgo que la obra elimina o aminora, donde un menor puntaje le da mayor orden de prioridad, lo que se presenta a continuación.

CUADRO 6-71: EJEMPLO PRIORIZACIÓN PRESENTE EN LOS TR

Riesgo que la obra elimina o aminora	Rangos	Ponderación
Hidrológico	Anegamiento de viviendas	1
	Daño a la infraestructura crítica	2
	Anegamiento de predios agrícolas	3
	Anegamiento de propiedades comerciales e industriales	4
Riesgo a las personas	Pérdidas de vidas	1
	Heridos	2
	Sin muertos ni heridos	3
Aislamiento	Mayor a 100	1
	Entre 1 y 100	2
	Sin aislados	3
Daño a las propiedades	Mayor a 10	2
	Entre 1 y 10	2
	Sin daño a las propiedades	3
Daño a los cultivos	Más de 1 ha	1
	Entre 0 y 1 ha	2
	Sin daños	3
Daños a la infraestructura	Infraestructura sanitaria relevante	1
	Infraestructura productiva	2
	Infraestructura de telecomunicaciones y conectividad	3
	Sin daño a la infraestructura	4
Daño patrimonial	Daño total	1
	Daño parcial	2
	Sin daño	3
Daño ambiental	Daño significativo	1
	Daño no significativo	2
	Sin daño	3

Fuente: Términos de referencia.

CUADRO 6-72: MATRIZ DE PRIORIZACIÓN PLAN DE MANEJO DE CAUCE

MEDIDA N°	TIPO DE MEDIDA	DIAGNÓSTICO PROBLEMA	REQUERIMIENTO	MEDIDA A EJECUTAR	EVALUACIÓN DEL RIESGO QUE LA OBRA ELIMINA O AMINORA												EVALUACIÓN ECONÓMICA				PRIORIZACIÓN		
					HIDROLÓGICO		RIESGO A LAS PERSONAS		AISLAMIENTO		DAÑO A LAS PROPIEDADES		DAÑO A LOS CULTIVOS		DAÑO A LA INFRAESTRUCTURA		TOTAL DE PONDERACIÓN POR RIESGO	PRIORIZACIÓN POR RIESGO	INVERSIÓN			RENTABILIDAD	RESULTADO DE LA PONDERACIÓN DEL RIESGO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA
					EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN			BENEFICIO MEDIBLE	PONDERACIÓN POR INVERSIÓN			
1	Garantizar Conectividad	Camino principal de Catarpe queda interrumpido en los puntos de atravesado del cauce y en los tramos en que el trazado está en la caja del cauce para crecidas de bajo periodo de retorno	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Pretil Defensa Fluvial y Mejoramiento camino	No	4	No	3	Si	1	No	3	No	3	No	4	18	4	Si	3	No	7	4a prioridad
2	Evitar Desbordamiento	Canal de riego, predio y sector de vivienda en ribera derecha son inundados por la crecida de T=100 años	Requerimiento del estudio	Defensa Fluvial	Si	1	Si	2	No	3	Si	2	Si	1	Si	2	11	2	Si	2	No	4	1a prioridad
3	Protección de la Población	Defensa fluvial de gaviones ubicada en la ribera derecha (km 0,65) en sector Cuchabrachi, es sobrepasada para T=25 años.	Requerimiento del estudio	Defensa Fluvial	Si	1	Si	2	No	3	Si	2	Si	2	Si	4	14	3	Si	3	No	6	3a prioridad
4	Garantizar Conectividad	Acceso a vivienda en ribera derecha no cuenta con obra de arte de cruce del río	Requerimiento del estudio	Baden	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
5	Protección de la Población	Viviendas en ribera izquierda (km 1,2) en sector Cuchabrachi, se inundan para T=50 años y se presentan velocidades erosivas en el tramo	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	1	Si	2	No	3	Si	2	Si	2	Si	4	14	3	Si	2	No	5	2a prioridad
6	Control de Erosión	La bocatoma del canal Patilla en la ribera derecha, se encuentra "colgada", producto de la erosión del fondo del lecho (km 1,4)	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Gabión sábana	No	4	No	3	No	3	No	3	No	3	Si	2	18	4	Si	1	No	5	2a prioridad
7	Protección de la Población	Defensa fluvial en ribera izquierda en sector Catarpe (km 1,75), es sobrepasada para T=25 años	Requerimiento del estudio	Defensa Fluvial	Si	3	Si	3	No	3	Si	3	Si	3	Si	4	19	4	Si	1	No	5	2a prioridad
8	Garantizar conectividad	Descarga de la quebrada el Diablo está ubicada sobre el nuevo trazado de camino a Catarpe, se requiere obra de arte	Requerimiento del estudio	Puente de Madera	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
9	Evitar Desbordamiento	Sector cercano a sede comunitaria Catarpe en ribera izquierda (km2,0) se inunda para T=25 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	1	Si	2	No	4	Si	2	Si	2	Si	4	15	3	Si	2	No	5	2a prioridad
10	Garantizar Conectividad	Acceso a vivienda y predios agrícolas en ribera derecha no cuenta con obra de arte de cruce del río	Requerimiento del estudio	Badén	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
11	Garantizar Conectividad	Atravesado camino principal de acceso a Catarpe (km 5,1). La obra es sobrepasada a partir de T=5 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	No	4	No	3	Si	1	No	3	No	3	No	4	18	4	Si	5	No	9	6a prioridad
12	Garantizar Conectividad	Descarga de la quebrada el Chulakao está ubicada sobre el nuevo trazado de camino a Catarpe, se requiere obra de arte	Requerimiento del estudio	Puente de Madera	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
13	Protección Infraestructura	Bocatoma canal Huachar en ribera izquierda (km 5,8). Se producen velocidades potencialmente erosivas a partir de T=10años y desborde hacia la obra a partir de T=25 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Obra de protección	No	4	No	3	No	3	No	3	No	3	Si	2	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad

CUADRO 6 72: MATRIZ DE PRIORIZACIÓN PLAN DE MANEJO DE CAUCE

MEDIDA N°	TIPO DE MEDIDA	DIAGNÓSTICO PROBLEMA	REQUERIMIENTO	MEDIDA A EJECUTAR	EVALUACIÓN DEL RIESGO QUE LA OBRA ELIMINA O AMINORA												EVALUACIÓN ECONÓMICA				PRIORIZACIÓN		
					HIDROLÓGICO		RIESGO A LAS PERSONAS		AISLAMIENTO		DAÑO A LAS PROPIEDADES		DAÑO A LOS CULTIVOS		DAÑO A LA INFRAESTRUCTURA		TOTAL DE PONDERACIÓN POR RIESGO	PRIORIZACIÓN POR RIESGO	INVERSIÓN			RENTABILIDAD	RESULTADO DE LA PONDERACIÓN DEL RIESGO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA
					EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN			BENEFICIO MEDIBLE	PONDERACIÓN POR INVERSIÓN			
14	Protección de la Población	Inundación de viviendas para T=100 años aguas arriba de tranque Huachar (km6,3), en ribera izquierda	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	1	Si	2	Si	3	Si	2	Si	2	Si	4	14	3	Si	2	No	5	2a prioridad
15	Garantizar Conectividad	Acceso a vivienda y predios agrícolas en ribera derecha no cuenta con obra de arte de cruce del río	Requerimiento del estudio	Badén	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
16	Evitar Desbordamiento	Pretil ribera izquierda en sector de barrera de acceso a Catarpe (km8,05) es sobrepasado a partir de T=10 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	No	1	No	3	Si	1	No	2	No	3	No	4	14	3	Si	5	No	8	5a prioridad
17	Garantizar Conectividad	Sector que se utiliza como atravesado de una ribera a otra del río San Pedro en punto de garita de acceso a Catarpe no cuenta con obra de arte de cruce del río	Requerimiento del estudio	Badén	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
18	Protección de la Población	La Defensa Fluvial de ambas riberas en Sector Quito es sobrepasada a contar de T=25 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	1	Si	1	Si	1	Si	1	No	4	9	1	Si	4	No	5	2a prioridad		
19	Obra de Cruce	Atravesado camino acceso a sector Pucará de Quito, no es factible el atravesado para T=5 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Pasarela	No	4	No	3	Si	1	No	3	No	3	No	4	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
20	Evitar Desbordamiento	Se produce desborde del cauce en ribera izquierda para la crecida de T=100 años, generándose un escurrimiento paralelo detrás del pretil existente que continúa e ingresa hacia el poblado de San Pedro por calle Domingo Atienza	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	3	Si	1	Si	1	Si	3	Si	1	Si	4	13	2	Si	5	No	7	4a prioridad
21	Evitar Desbordamiento	Se produce desborde del cauce en ribera izquierda para la crecida de T=100 años, generándose inundación de viviendas y un escurrimiento paralelo al cauce	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	1	Si	1	Si	2	Si	1	Si	2	Si	4	11	2	Si	4	No	6	3a prioridad
22	Obra de Cruce	Defensa fluvial ribera derecha y atravesado Domingo Atienza, no es factible el atravesado para T=5 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Pasarela	No	4	No	3	Si	1	No	3	No	3	No	4	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
23	Protección de la Población	Defensas fluviales en Sector angostamiento cauce en Domingo Atienza. Las obras se desbordan a contar de T=5 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Encauzamiento y defensa fluvial	Si	1	Si	1	No	3	Si	1	Si	1	Si	4	11	2	Si	5	No	7	4a prioridad
24	Protección de la Población	Defensas fluviales en Sector angostamiento cauce en Domingo Atienza. Las obras se desbordan a contar de T=5 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Encauzamiento	Si	1	Si	1	No	3	Si	2	Si	1	Si	4	12	2	Si	4	No	6	3a prioridad
25	Evitar Desbordamiento	Se produce desborde del cauce en la ribera derecha, aguas abajo del puente de acceso a San Pedro para la crecida de 100 años. Se inunda vivienda.	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Puente-Defensa fluvial y encauzamiento	Si	1	Si	1	Si	1	Si	2	Si	1	Si	4	10	1	Si	5	No	6	3a prioridad

CUADRO 6 72: MATRIZ DE PRIORIZACIÓN PLAN DE MANEJO DE CAUCE

MEDIDA N°	TIPO DE MEDIDA	DIAGNÓSTICO PROBLEMA	REQUERIMIENTO	MEDIDA A EJECUTAR	EVALUACIÓN DEL RIESGO QUE LA OBRA ELIMINA O AMINORA												EVALUACIÓN ECONÓMICA				PRIORIZACIÓN		
					HIDROLÓGICO		RIESGO A LAS PERSONAS		AISLAMIENTO		DAÑO A LAS PROPIEDADES		DAÑO A LOS CULTIVOS		DAÑO A LA INFRAESTRUCTURA		TOTAL DE PONDERACIÓN POR RIESGO	PRIORIZACIÓN POR RIESGO	INVERSIÓN			RENTABILIDAD	RESULTADO DE LA PONDERACIÓN DEL RIESGO Y EVALUACIÓN ECONÓMICA
					EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN	EVALUACIÓN	PONDERACIÓN			BENEFICIO MEDIBLE	PONDERACIÓN POR INVERSIÓN			
26	Garantizar Conectividad	Sector de cruce del río desde la calle Caracoles, que permite conectar hacia camino a Calama y hacia camino a Coyo no cuenta con obra de cruce del río	Requerimiento del estudio	Badén	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
27	Protección de la Población	Defensa fluvial sector Conde Duque (km 11,65). Se produce desborde hacia las viviendas para T=25 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa fluvial y encauzamiento	Si	1	Si	1	Si	3	Si	1	Si	1	Si	4	11	2	Si	5	No	7	4a prioridad
28	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial sector Cruce calle Caracoles (km 12). Se desborda para T=25 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	3	Si	2	Si	3	Si	1	Si	3	Si	4	16	3	Si	2	No	5	2a prioridad
29	Evitar Desbordamiento	Se produce desborde del cauce en Km 12,75 generándose un brazo secundario y paralelo al río para la crecida de 100 años. Dicho desborde inunda camino y viviendas de Ayllu Yaye	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa Fluvial	Si	1	Si	3	Si	3	Si	1	Si	1	Si	4	13	2	Si	2	No	4	1a prioridad
30	Evitar Desbordamiento	Sector badén acceso Séquitur. Se produce inundación de viviendas a contar de T=25 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa fluvial y encauzamiento	Si	1	Si	2	Si	3	Si	1	Si	1	Si	4	12	2	Si	4	No	6	3a prioridad
31	Garantizar Conectividad	Sector de cruce del río desde la rotonda Séquitur, que permite conectar hacia camino a Calama y hacia camino a Coyo no cuenta con obra de cruce del río	Requerimiento del estudio	Badén	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
32	Protección Infraestructura	Canal de riego y Postación eléctrica hacia Coyo (km15,95). Se produce inundación a partir de T=5 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Gavión de protección	No	4	No	3	No	3	No	3	No	3	Si	1	17	4	Si	2	No	6	3a prioridad
33	Garantizar Conectividad	Atraveso ruta Circunvalación. A partir de T=5 años, el cauce desborda por sobre la ruta	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Puente	Si	1	Si	2	Si	1	Si	2	Si	3	Si	4	13	2	Si	5	Si	1	2a prioridad
34	Evitar Desbordamiento	Ayllu de Coyo. Se produce desborde para T=50 años en km 18,3	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa fluvial	Si	1	Si	2	Si	3	Si	1	Si	1	Si	4	12	2	Si	2	No	4	1a prioridad
35	Garantizar Conectividad	Sector de cruce del río desde camino que une Coyo y Tulor, que permite conectar hacia Ayllú de Better no cuenta con obra de cruce del río	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Badén	No	4	No	3	Si	2	No	3	No	3	Si	3	18	4	Si	2	No	6	3a prioridad
36	Evitar Desbordamiento	Pretil camino acceso a Tulor, se desborda a partir de T=10 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa fluvial	Si	1	Si	2	Si	2	Si	2	Si	1	Si	4	12	2	Si	5	Si	1	2a prioridad
37	Protección Patrimonial	Se produce desborde del pretil existente en ribera izquierda hacia sector de sitio arqueológico	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa fluvial	Si	3	Si	3	Si	3	Si	3	Si	3	Si	4	19	4	Si	4	No	8	5a prioridad
38	Evitar Desbordamiento	Pretil ribera derecha Vilama. Se produce desborde para T=100 años	Requerimiento del estudio y del proceso de PAC	Defensa fluvial	Si	2	Si	3	Si	2	Si	3	Si	3	Si	2	15	3	Si	4	No	7	4a prioridad

Fuente: Elaboración propia

6.8.3. Programa de Ejecución Dirección de Obras Hidráulicas

El cronograma se define de acuerdo al marco presupuestario del servicio y a otros factores que se consideren pertinentes.

Para definir este orden temporal y distribuir de la mejor manera posible las soluciones que se plantean, se propone utilizar el siguiente procedimiento:

- Primero, se asignarán los primeros periodos a los proyectos con mejor ranking.
- Segundo, se distribuirán los proyectos procurando repartir el presupuesto en los años definidos, de manera equitativa. Cuando las obras presentan presupuestos mayores a un cierto umbral a definir junto a la IF, se distribuirá su ejecución en más de 1 año. Se hace hincapié que esto debe ser definido por la Dirección de Obras Hidráulicas.

Un ejemplo de esto, es lo efectuado en el Plan de Manejo del río Elqui, en que se muestra la distribución teórica de los 13 proyectos de competencia DOH, en el tiempo asignado para el Plan de Manejo.

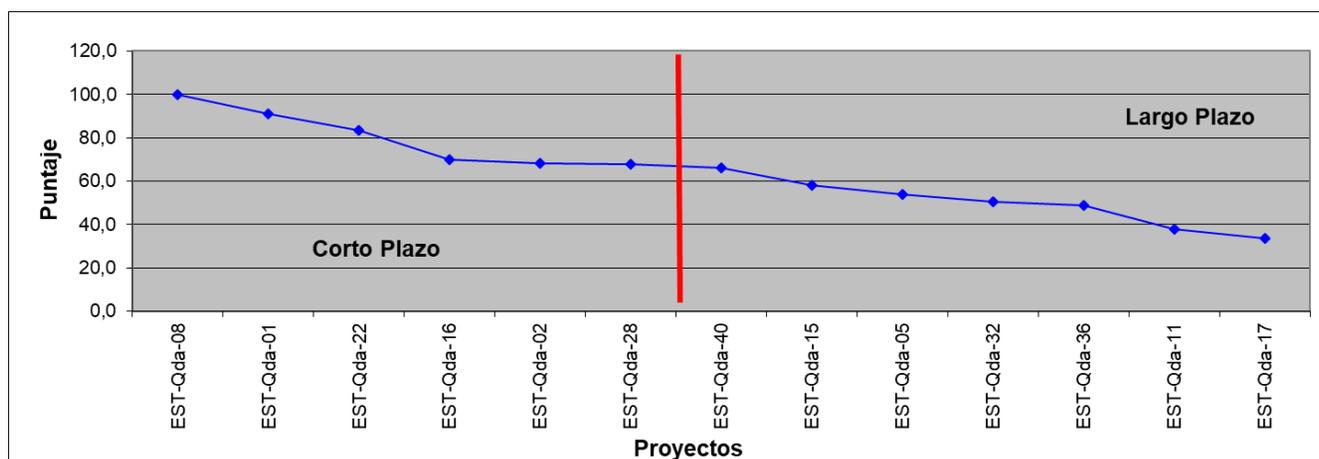


FIGURA 6-26: CRONOGRAMA TEÓRICO DE EJECUCIÓN DE PROYECTOS DOH

Fuente: DOH, 2019.

Ahora bien, el cronograma debe definirse institucionalmente de acuerdo al marco presupuestario del servicio y a otros factores que se consideren pertinentes. Por ello, el Cuadro 6-73 presenta un cronograma, a modo de ejercicio, considerando una distribución de los costos de las obras a lo largo de los 10 años establecidos para el Plan. El costo total de las obras DOH es de MM\$ 18.065.

Para definir este orden temporal y distribuir de la mejor manera posible las soluciones planteadas, se utilizó el siguiente procedimiento:

- Primero, se asignaron los primeros periodos a los proyectos con mejor ranking.

- Segundo, se distribuyeron los proyectos procurando repartir el presupuesto en los años definidos, de manera equitativa. Cuando las obras presentan presupuestos mayores 2.500 millones de pesos, se distribuye la ejecución en más de 1 año. Nuevamente se hace hincapié que esto debe ser definido por la Dirección de Obras Hidráulicas.

CUADRO 6-73: PROGRAMA EJECUCIÓN OBRAS

PRIORIZACIÓN	CATEGORÍA	SOLUCIONES	CÓDIGO	HORIZONTE DE EJECUCIÓN (MM\$/AÑO)											
				CORTO PLAZO					LARGO PLAZO						
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-02	107,4											
1a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S2-ES-11	185,3											
1a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	S3-ES-03	186,3											
2a prioridad	Protección de la Población	Defensa Fluvial	S1-ES-04	133,1											
2a prioridad	Control de Erosión	Gavión sábana	S1-ES-05	16,5											
2a prioridad	Protección de la Población	Defensa Fluvial	S1-ES-06	27,8											
2a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-07	126,9											
2a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-10	147,2											
2a prioridad	Protección de la Población	Defensa Fluvial	S2-ES-01	566,9											
2a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S2-ES-10		102,7										
3a prioridad	Protección de la Población	Defensa Fluvial	S1-ES-03		192,4										
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-09		48,9										
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-OA1		69,4										
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-OA2		95,4										
3a prioridad	Garantizar Conectividad	Badén	S1-ES-OA3		69,4										
3a prioridad	Garantizar Conectividad	Puente de Madera	S1-ES-OA4		164,0										
3a prioridad	Garantizar Conectividad	Badén	S1-ES-OA5		69,4										
3a prioridad	Garantizar Conectividad	Badén	S1-ES-OA6		69,4										
3a prioridad	Obra de Cruce	Pasarela	S2-ES-02		69,1										
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S2-ES-04			741,3									
3a prioridad	Obra de Cruce	Pasarela	S2-ES-05		66,9										

CUADRO 6-73: PROGRAMA EJECUCIÓN OBRAS

PRIORIZACIÓN	CATEGORÍA	SOLUCIONES	CÓDIGO	HORIZONTE DE EJECUCIÓN (MM\$/AÑO)										
				CORTO PLAZO					LARGO PLAZO					
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
3a prioridad	Protección de la Población	Encauzamiento	S2-ES-07			760,4								
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Puente-Defensa fluvial y encauzamiento	S2-ES-08				970,9	970,9						
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial y encauzamiento	S2-ES-12				361,3	361,3						
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial y encauzamiento	S2-ES-OA1				69,4							
3a prioridad	Garantizar Conectividad	Badén	S2-ES-OA2				69,4							
3a prioridad	Protección Infraestructura	Gavión de protección	S3-ES-01					139,4						
3a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	S3-ES-OA1				69,4							
4a prioridad	Garantizar Conectividad	Pretil Defensa Fluvial y Mejoramiento camino	S1-ES-01							277,0				
4a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S2-ES-03							1983,7				
4a prioridad	Protección de la Población	Encauzamiento y defensa fluvial	S2-ES-06								1393,3			
4a prioridad	Protección de la Población	Defensa fluvial y encauzamiento	S2-ES-09								1001,1			
4a prioridad	Garantizar Conectividad	Puente	S3-ES-02									614,5	614,5	614,5
4a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	S3-ES-04									1333,7		
4a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa fluvial	S4-ES-02									801,0		
5a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-11										932,0	932,0
5a prioridad	Protección Patrimonial	Defensa fluvial	S4-ES-01										290,6	290,6
6a prioridad	Evitar Desbordamiento	Defensa Fluvial	S1-ES-08										533,9	533,9
TOTAL (MM\$)				1497,4	1016,7	1501,6	1540,3	1471,6	2260,7	2394,4	2749,2	2371,0	2371,0	

Fuente: Elaboración propia

6.8.4. Recomendaciones Programa de Ejecución Otros Organismos

El Plan de Manejo de Cauces, considera medidas estructurales y no estructurales, cuya ejecución queda en manos de diversos organismos vinculados. Teniendo en cuenta la priorización de soluciones, se incluyen las recomendaciones para la ejecución de las Medidas Estructurales y No Estructurales de otros Organismos, distintos a DOH.

- Las obras asociadas a protección de canales, deben ejecutarse en coordinación con las obras DOH que se encuentren asociadas
- En relación a las soluciones de competencia de Vialidad, se propone separar su ejecución en 2 grupos. El primer grupo, que se visualiza prioritario y debería abordarse en el primer periodo, correspondiente a los proyectos que involucran a la ruta Calama-San Pedro y al cruce con la Circunvalación. El segundo grupo, corresponde a proyectos de badenes o puentes interiores en quebradas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

0	06-12-2021	Aprobado	SPA/CLZ	EKK	SPA
A	13-11-2021	Emitido para Revisión Interna	SPA	EKK	SPA
REV	FECHA	REVISIÓN PARA	POR	CHECK	JDP
		CÓDIGO DOCUMENTO			
		ARR104-IF-C07 0			

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

A continuación, se presentan comentarios y conclusiones referentes a los estudios realizados como parte de la caracterización y manejo de cauces de los ríos San Pedro y Vilama:

- a) Como resultado de la recopilación y revisión de los antecedentes, se concluyó que hay información disponible suficiente para elaborar los diferentes temas que comprende el estudio, en especial para actualizar y desarrollar la hidrología necesaria. Asimismo, la información topográfica existente fue valiosa para complementar la realización de la topografía y los vuelos Lidar programados en el presente estudio, mejorando de esta manera la cobertura del área, lo cual fue considerado en los respectivos informes de modelación unidimensional y bidimensional de crecidas.
- b) Respecto del Reconocimiento detallado de terreno, se concluye lo siguiente:
 - i En el río San Pedro, en la parte alta del sector de estudio, se aprecia la existencia de cerros con nula vegetación y mucha disponibilidad de limos y arcillas, que producto de la escorrentía explican el color de las aguas. En cambio, en el lecho del cauce predominan gravas y gravillas en matriz arenosa de tamaño medio a grueso.
 - ii El sector urbano del río San Pedro se aprecia intervenido por defensas de gaviones que respetan el trazado del río, pero en algunos puntos restringen de forma importante su sección y en otros se aprecia la existencia de curvas con radios de giro pequeños que provocarán que el escurrimiento cambie bruscamente de dirección, por lo que deben ser estudiados en profundidad con los modelos numéricos respectivos. En este tramo no se aprecia margen para pensar en intervenciones distintas a las defensas ribereñas. Cualquier intervención que signifique cambiar el trazado implicaría procesos expropiatorios.
 - iii Aguas abajo del paso por la zona urbana del río San Pedro, se aprecia una amplia llanura de inundación, en que por la ribera derecha cauces principales y secundarios se acercan peligrosamente al camino que une San Pedro con los Ayllus de Coyo y Tulo. En este tramo el lecho está conformado por grava en matriz arenosa y en algunos sectores en los estratos superficiales se aprecia una costra conformada por limo y arcillas, la cual se observa que se produce en zonas de apozamiento de cauces secundarios.
 - iv En el sector de Vilama, aguas arriba del inicio del área de estudio existe un embanque bien consolidado que, ante la presencia de crecidas de gran magnitud, podría generar la bifurcación del escurrimiento, activando eventualmente un brazo por la ribera izquierda del cauce, en donde existe

una zona que posee mucho valor de acuerdo a la información entregada por DOH en terreno, ya que posee vestigios arqueológicos del primer asentamiento de Vilama.

- v Referente al lecho del río Vilama en el tramo de estudio, se aprecia abundante arena gruesa con presencia de gravilla y gravas de tamaño grande, además de una cantidad moderada de bolones de tamaño medio. No se aprecian depósitos de limo, lo que demuestra que en este escurrimiento el transporte de sedimentos es aluvial.
- c) En relación al estudio de dinámica fluvial realizado, se presentan las siguientes conclusiones:
- i Si bien la elaboración del cauce histórico se hizo en función de múltiples fuentes de información, esta entrega un resultado bastante satisfactorio, indicando cuales zonas serían vulnerables antes las crecidas y estas superficies coinciden a la vez con la información recopilada en terreno. De los años donde se delimitó la superficie del cauce llama la atención el año 2019 donde su crecida tuvo consecuencias en el Ayllu de Beter, esta inundación pareciera no ser una característica natural del cauce sino más bien ser provocada por las obras que interfieren con el flujo, este sector al encontrarse fuera del área de estudio no se dispone de información suficiente para analizarlo, pero se indica que es necesario realizar un análisis de la interacción del río con la carretera en este sector.
 - ii Respecto a las obras de infraestructura las defensas fluviales existentes si bien no han modificado el eje del cauce si han cambiado la sección transversal del escurrimiento lo que tendrá como consecuencia mayores velocidades y altura de escurrimiento lo que para crecidas de gran magnitud podría tener consecuencias desastrosas, otras obras que llaman la atención son las localizadas en la ruta de circunvalación las cuales históricamente no han tenido buen comportamiento frente a las crecidas, si bien se han construido nuevas obras la efectividad de estas no es suficiente acorde a lo que se pudo observar a partir de los resultados de la modelación hidráulica realizada en el presente estudio.
 - iii Al analizar las fotos de históricas se ve un incremento de las construcciones en las riberas del cauce de casi un 1000% respecto a 1980, donde muchas de estas se verían afectadas a partir del análisis del cauce histórico, lo cual se confirma según los resultados de la modelación hidráulica realizada.
 - iv Referente a la actividad agrícola en las riberas del río, esta históricamente se ha desarrollado, pero deberían corresponder a cultivos estacionales asumiendo a que pueden ser afectadas por las crecidas.

- d) A partir de los trabajos realizados en terreno y gabinete, además de los antecedentes geológicos – geotécnicos recopilados, se puede concluir lo siguiente respecto del sitio de proyecto:
- i El suelo de fundación en la caja de los ríos San Pedro y Vilama, aparece adecuado para el apoyo de las estructuras asociadas a las defensas fluviales de las riberas; el suelo de fundación debe corresponder en cualquier caso a una grava algo arenosa, con un enterramiento mínimo de 1,0 m respecto de la superficie actual de terreno y 0,60 m respecto del nivel de socavación estimados;
 - ii Existe abundante material, grandes bloques y bolones en el cauce del río San Pedro, aguas arriba de la “sede social de Catarpe” para la materializar de enrocados de protección;
 - iii Se detecta abundante disponibilidad de gravas en el sector del río Vilama para la materialización de gaviones, lo que aparece también respaldado en la carta geología de San Pedro;
 - iv Los lentes de arena, arena limosa y limo arenoso detectados en los pozos de exploración presentan una abundante cantidad de sales solubles en su matriz, por sobre los 1000 mg/kg; por lo que es esperable que se produzcan asentamientos diferenciales a causa de lluvias y crecidas de ríos y quebradas, dañando con ello las obras que se proyecten en el sector, así como en sus vías de acceso, puentes, terraplenes, etc. La atenuación de estos daños pasa por considerar una mayor profundidad de fundación adecuada para cada caso, con una exploración específica a través de calicatas según la importancia de la obra proyectada (NCh1508 Of.2014);
 - v Todas las calicatas prospectadas llegaron a la profundidad de 6 metros con excepción de seis de ellas que no se pudieron excavar más debido a la aparición de napa subterránea.
 - vi Se observa coeficientes de uniformidad mayores en los estratos más profundos ($h > 0,40$ m), lo cual es concordante pues a menores profundidades predominan las partículas finas del material.
 - vii En el río San Pedro, la matriz predominante en los materiales corresponde a arenas, con un promedio del 67%. Luego los materiales gravas y finos corresponden ambos a aproximadamente 16%, no se observa predominancia de un material sobre otro.
 - viii Se observa homogeneidad en los diámetros D50 y D90 durante el recorrido del río San Pedro, a excepción del kilometraje 12 y 15, donde se observan diámetros menores, debido a la aparición de un lente de materiales limosos en esos sectores.

- e) Terminado el estudio hidrológico es posible indicar que, en términos generales, se cumplieron los objetivos perseguido dentro de los alcances de la consultoría. El estudio desarrollado permitió definir las principales variables que inciden en la caracterización hidrológica de las cuencas estudiadas y de su análisis se puede concluir lo siguiente:
- i La información hidrológica disponible espacialmente permitió cubrir las cuencas en estudio, sin embargo, solo se ubica una estación dentro de la cuenca del río San Pedro y ninguna en la cuenca del río Vilana.
 - ii La extensión de la información es adecuada para un estudio hidrológico como el de la presente consultoría, sin embargo, no está completa, requiriendo procedimientos estadísticos para su relleno y extensión.
 - iii Las estaciones de El Tatio, San Pedro y Toconao, presentaron valores nulos (El Tatio – Año 2016, San Pedro – Año 1988 y Toconao Experimental – Años 1988, 2006 y 2008), a pesar de que los años con información nulo son pocos, con el objeto de representar rigurosamente la verdadera distribución de las lluvias, se procedió a utilizar un procedimiento de corrección.
 - iv Conformada la serie de datos estadísticos de precipitación máxima diaria, se procedió a su ajuste probabilístico para las funciones de distribución utilizadas comúnmente en hidrología, calificando los ajustes logrados mediante el test de Chi-cuadrado y el método gráfico de Weibull.
 - v De este modo se logró definir las precipitaciones máximas en 24 horas para distintos períodos de retorno de la cuenca, que se muestran en la siguiente tabla:

CUADRO 7-1: PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS

T (Años)	P(X≥x) %	Linzor	El Tatio (DGA)	Caspana (DGA)	Rio Grande	San Pedro (DGA)	Toconao Exp.
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
		Gumbel	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Pearson	Log Normal
2	50	23.2	21.8	22.7	28.1	7.8	5.6
5	20	35.7	35.0	41.3	50.3	16.3	9.7
10	10	44.0	43.7	53.7	65.0	23.4	12.9
25	4	54.5	54.7	69.3	83.5	33.6	17.5
50	2	62.2	62.8	80.9	97.3	41.8	21.2
100	1	69.9	70.9	92.4	110.9	50.2	25.2

Fuente: Elaboración propia

- vi También fue posible determinar la distribución espacial de la precipitación y calcular una precipitación media para la cuenca mediante el método de las isoyetas.

- vii Finalmente, mediante coeficientes duración y una curva IDF para la zona, fue posible establecer la distribución temporal de la precipitación y definir hietogramas de diseño.
- viii Terminado el estudio de las precipitaciones se estuvo en condiciones de analizar la tormenta del enero-febrero del año 2019. Dicho análisis permitió concluir que la precipitación tuvo un período de retorno de 28 años.
- ix El análisis del hietograma de la tormenta del 2019 mostró que existieron dos pulsos de precipitación importantes, que corresponden a dos tormentas sucesivas. La primera ocurrida el día 29-01-2019, se inicia a las 21:30 horas con una duración aproximada de 7 horas y con una intensidad máxima, a las 22 horas, de 21,6/mm hora y con un volumen total aproximado de 23,0 mm, suficientes para saturar las cuencas. La segunda tormenta se presentó el día 31-01-2019 y se inició a las 22:30 horas, con 15 horas de duración presentando un máximo a las 24 horas del mismo día, con una intensidad máxima de 26,3 mm/hora y un volumn toral de 52,3 mm.
- x La precipitación máxima en 24 horas (media para la cuenca) estimada en la cuenca del río San Pedro para el evento del año 2019, es de 52,52 mm. De acuerdo con los registros históricos de la estación Río Grande (única estación ubicada al interior de la cuenca) esta precipitación, en 56 años de registro, ha sido superada en 5 oportunidades: el año 1977 (87,5 mm), el año 1981 (71,2 mm), el año 1986 (93,1 mm), el año 1995 (67,1 mm) y el año 2012 (94,1 mm). Esto reafirma la conclusión que lo ocurrido el año 2019 no fue una situación meteorologica excepcional, correspondiendo más bien a una situación de baja ocurrencia, pero enmarcada dentro un un régimen hidrológico normal.
- xi En relación a la serie estadística de caudales, estos presentan más interrupciones, ya sea por no operación de la estación fluviométrica o porque se destruyó durante la crecida misma. Lo anterior obligó a un doble esfuerzo para complementar la estadística con estimaciones efectuadas después de los eventos destructivos. De esta forma se conformó una serie de caudales para el río San Pedro que permitió una estimación de los caudales de crecida para distintos períodos de retorno. No ocurrió lo mismo con el río Vilama ya que sus datos son extremadamente bajos, lo que impidió efectuar un análisis de frecuencia.
- xii Los caudales calculados para la crecida del año 2019, por métodos hidrológicos, también entregaron, para dicha crecida, un período de retorno entorno a los 25 años. Lo anterior permite concluir que los daños observados no se debieron a una crecida excepcional sino, más bien, a un mal uso de los espacios cercanos a los cursos fluviales. Por la naturaleza de las precipitaciones de la zona, que permiten espacios prolongados de tiempos

sin actividad, es importante definir y respetar los espacios reservados para el escurrimiento fluvial.

- xiii Debido a la poca confianza de la estadística de caudales, se recurrió a los métodos hidrológicos basados en la relación precipitación-escorrentía. Se utilizó la Fórmula de Verni-King Modificada, la Fórmula Racional Modificada, el Hidrograma Unitario Sintético y el modelo SWMM5 de la EPA.
- xiv Los métodos hidrológicos que mejor resultado dieron fueron el Hidrograma Unitario Sintético y la modelación con el modelo SWMM5, recomendándose los resultados obtenidos con este último método para el cálculo de crecidas líquidas. La siguiente tabla presenta los caudales recomendados para los diseños:

CUADRO 7-2: CAUDALES LÍQUIDOS RECOMENDADOS PARA DISEÑO

T (años)	Rio San Pedro (m ³ /s)	Rio Vilama (m ³ /s)
2	33,0	12,0
5	87,0	29,0
10	133,0	41,0
25	198,0	57,0
50	252,0	70,0
100	309,0	82,0

Fuente: Elaboración propia

- f) En relación al catastro de elementos, interés y usos del espacio fluvial se concluye:
 - i Se catastró un total de 110 obras de infraestructura, correspondiendo aproximadamente un 42% a obras de defensa fluvial conformadas principalmente por gaviones o por pretil de material del lecho fluvial. Del total de obras catastradas un 65% de ellas se encuentran en buen estado de conservación.
 - ii A lo largo del río San Pedro, solo se observó una zona en donde se realizaban labores de procesamiento de áridos. El cual, se encontraba ubicado a un costado del camino que conecta los Ayllu de Coyo y Tulor. En este lugar, se observaron equipos mecánicos para la extracción, el procesamiento y clasificación de áridos. En el área de estudio del río Vilama, no se observaron zonas de extracción de áridos, ni otros sitios de remoción de material fluvial.
 - iii Con respecto a las zonas de riesgo, se logró recabar información detallada para toda el área de estudio, respecto a riesgos por desborde, inundación, activación de quebradas y flujos de barro, la cual fue elaborada por ONEMI en conjunto con el departamento de seguridad de la municipalidad de San Pedro de Atacama.
 - iv Finalmente, en lo que se refiere a zonas de conflicto por deslinde, **es importante señalar que no existe definición de deslinde en el río San Pedro**

ni en el río Vilama. Sin embargo, se realizó la caracterización de los potenciales sectores que presentarían conflicto si es que el cauce es definido como la línea geomorfológica de la ribera propuesta en el análisis de dinámica fluvial realizado en el presente estudio. De lo anterior, es posible concluir que habría infraestructura en los sectores de Catarpe, Conde Duque y Yaye en potencial conflicto, mientras que serían un total de 117 predios con superficies entre 1 m² hasta 1,5 ha que pudieran tener conflicto por deslinde.

g) A partir de los resultados obtenidos de la modelación hidráulica de crecidas podemos concluir lo siguiente:

- i que tanto el modelo unidimensional como el bidimensional desarrollados logran replicar de manera bastante aceptable el comportamiento de los cauces en estudio.
- ii Referente a las diferencias entre los modelos desarrollados, el modelo unidimensional tiene la ventaja de ofrecernos resultados bastante aceptables a partir de información discreta y tiempos de cálculo bastante pequeños, lo que sirve para tener una primera aproximación a los principales problemas que podrían generarse y de esta manera adelantar soluciones del tipo conceptual. Por otro lado, el modelo bidimensional al calcularse sobre una superficie “continua” (no perfiles transversales), nos ofrece la virtud de delatar los puntos por donde se podría “filtrar” el escurrimiento, además al tener una distribución espacial de las velocidades detallada, nos permite evaluar el comportamiento de las defensas existentes o proyectadas, para así poder realizar un diagnóstico o diseño más detallado. Esto se ve reforzado al analizar por ejemplo los resultados obtenidos en el sector del Puente San Pedro donde los resultados de la modelación 2D entrega valores más desfavorables que los del modelo 1D.
- iii Es importante recalcar que, si bien los modelos generados representan los principales problemas identificados en terreno, existen limitaciones dada la extensión de la superficie sobre la que se desarrollan. En particular el sector de la ribera izquierda en la ruta de circunvalación no se puede representar de forma totalmente correcta por falta de información topográfica, al tener antecedentes de inundación en el sector aguas abajo en el Ayllu de Beter este análisis debería complementarse en estudios posteriores.

h) De los resultados del análisis de mecánica fluvial se concluye lo siguiente:

- i Respecto a la socavación general, los sectores que presentaran mayor erosión corresponderán a aquellos donde el cauce se encuentre más intervenido como por ejemplo el sector intermedio del Río San Pedro y la sección encauzada del río Vilama, esto es de esperarse ya que al transportar la crecida en una sección transversal menor se generaran mayores esfuerzos

de corte lo que implicara una mayor erosión, para disminuir estos efectos una sugerencia seria incrementar la sección transversal con el fin de disminuir la velocidad del flujo

- ii Al complementar los resultados de socavación general con los valores locales obtenidos para obras de interés como el Puente de acceso a San Pedro, podemos concluir que esta estructura se encuentra amenazada para crecidas de periodos de retorno igual o superior a 10 años, esto sin considerar el efecto de las obras del tipo gavión que se están desarrollando en el sector las cuales al reducir la sección transversal implicarían valores de socavación aún mayores. **Ante estos escenarios se sugiere considerar un mejoramiento del Puente.**
 - iii La cuenca del rio San Pedro tiene una producción de sedimento considerable, la que se genera principalmente en su zona alta donde se concentra la mayor área aportante y quebradas con alta disponibilidad de arenas, esto se condice con la gran cantidad de material que se ha acumulado en la zona urbana durante las últimas crecidas.
 - iv A partir del balance sedimentológico se puede observar que en el sector alto del Rio San Pedro existe una zona candidata para la extracción de áridos entre los kilómetros 4,0 y 6,0 (referido al eje longitudinal del cauce), la que debe ser descartada por la presencia de bocatomas las cuales pueden verse afectadas producto de las modificaciones de las cotas a causa de las extracciones en el rio.
 - v En el sector intermedio del rio San Pedro existe una zona a la altura de Pucara de Quito que desde el punto de vista numérico podría ser candidato a sectores de extracción de áridos, sin embargo, esta zona se descarta al verse localizada en un lugar urbano y que podría comprometer la integridad de las defensas fluviales.
 - vi En el sector bajo del rio San Pedro (Sector 3), existe una zona candidata a la altura del Ayllu de Coyo, la cual no presentaría ninguno de los inconvenientes previamente nombrados, en terreno se identificó que esta zona si presenta una zona de extracción, la cual no tiene permisos de extracción de áridos otorgados (según lo informado por la municipalidad).
- i) Se pudo realizar el análisis de vulnerabilidad y el diagnóstico hidráulico del cauce y de la infraestructura existente que se ve afectada por las crecidas de los ríos San Pedro y Vilama en los tramos estudiados, concluyéndose lo siguiente:
- i Respecto al río San Pedro, se observa que el sector que presenta mayor infraestructura vulnerable a riesgos es el sector 2 o intermedio, encontrándose la mayor parte de la infraestructura catastrada dentro de la zona de riesgo alto para la crecida de periodo de retorno 100 años. Asimismo, el sector 2 es el que presenta mayor superficie de terrenos

agrícolas y de edificaciones que se encuentran dentro de la zona de riesgo alto.

- ii Respecto a los caminos que se ven afectados, es importante señalar que en el sector 1, el camino de acceso a Catarpe en la mayor parte de su trazado se encuentra en zona de riesgo alto, ya que transcurre por la caja del cauce, lo cual es consistente con los antecedentes de riesgo catastrados que indican el corte o interrupción de dicho camino en variados sectores.
- iii Por otro lado, en el sector 2 el puente de la ruta 23 que une Calama y San Pedro presenta riesgo alto y de acuerdo al diagnóstico realizado este puente para periodos de retorno menores a 100 años no presenta la revancha mínima acorde a los criterios del Manual de Carreteras, siendo sobrepasado el nivel mínimo de la viga para la crecida detrítica de 100 años de periodo de retorno. También, en este sector se produce desborde del cauce y activación de escurrimiento secundarios mediante la inundación de varios caminos, como son Domingo Atienza, Callejón Reales, Ada. Selti y Camino a Beter, los cuales presentan nivel de riesgo bajo en la mayor parte de la extensión inundada a excepción de sectores puntuales como lo son la rotonda Sequitor.
- iv Finalmente, en el sector 4 correspondiente al tramo de análisis del río Vilama, se produce riesgo alto en las obras de defensa fluvial existente y se observa que el riesgo hacia los sitios arqueológicos identificados es bajo para una crecida de 100 años de periodo de retorno, mientras que los terrenos agrícolas del Ayllu de Vilama no presentarían riesgo siempre y cuando no se produzca falla de la obra de defensa existente.
- v Se observa que para las crecidas de periodo de retorno bajo, como lo es el caudal formativo que se ha definido como el del evento de periodo de retorno 2 años, los resultados de la modelación 1D y 2D presentan coincidencia en el alcance de las áreas inundadas para la mayor parte de los tramos estudiados, a excepción del tramo cercano a la ruta de circunvalación, que se encuentra en el sector 3 del río San Pedro, en donde la inundación dada por la modelación 2D alcanza una superficie considerablemente mayor. Lo anterior se debe a que en este tramo el comportamiento del cauce se divide en distintos cauces secundarios por lo que toma relevancia la componente 2D del escurrimiento.
- vi Para el caudal formativo, el cauce se observa que se mantiene dentro de las márgenes definidas como línea geomorfológica de la ribera y no sobrepasa las obras de defensa construidas recientemente
- vii Ninguna de las obras de defensa fluvial existentes entrega protección frente a la crecida de 100 años de periodo de retorno. La mayoría de ellas son sobrepasadas por la crecida de 25 años de periodo de retorno, siendo los

casos más desfavorables los de la defensa recientemente construida frente a la sede de Catarpe, la cual se ve sobrepasada para 5 años de periodo de retorno y de la misma manera se ve sobrepasada la defensa de ambas riberas del río San Pedro en todo el tramo comprendido entre el angostamiento que se produce en el sector de Domingo Atienza hasta el sector cercano al puente de la ruta 23.

- viii La comparación de resultados de los modelos 1D y 2D para periodos de retorno altos, muestra diferencias significativas en el área inundada desde el sector de Domingo Atienza hacia aguas abajo. Esto debido a que se produce el desborde del cauce en varios puntos de la ribera izquierda, los cuales si bien es cierto el modelo 1D también los representa como desborde de la sección transversal, no simula de forma adecuada la activación de escurrimientos secundarios al cauce principal a través de las calles del área de estudio, lo cual si es representado por el modelo 2D.
 - ix En consecuencia, se observa que en el sector 2 el cauce se desborda a partir de 25 años de periodo de retorno y dicha inundación escurre por las calles Domingo Atienza, Callejón Reales, Avda. Selti y camino a Beter, formándose a través de estas calles un cauce secundario paralelo al cauce principal.
 - x Finalmente, respecto al sector de Vilama, se produce desborde de la obra de defensa existente hacia ambas riberas para la crecida de 100 años de periodo de retorno. Sin embargo, no se genera afectación sobre la infraestructura de la planta de agua potable rural ni tampoco la inundación alcanza a cubrir los terrenos agrícolas del Ayllu de Vilama, ya que escurre por el borde posterior de la defensa a través del drenaje que quedó producto de las crecidas anteriores.
- j) En relación a la cuantificación y valorización económica de los daños producto del evento de febrero del 2019, se estimó un monto total de daños de \$ 5.634.739.685. Al observar los valores estimados, que corresponden solo a los directamente relacionados al área de estudio, se puede concluir que el 34% de los daños económicos corresponden al ítem “proyectos adjudicados de limpieza y conservación de cauce y riberas”, seguido por “proyectos conservación de la red vial” (20%) y “pérdida de micro y pequeñas empresas” (19%). Lo anterior da cuenta de lo importante que puede resultar como medida preventiva la consideración de obras para la contención y mitigación de los daños por crecidas, ya que, además de la protección de la vida humana y animal, los efectos positivos se pueden apreciar en el propio cauce y en la infraestructura pública y privada que sostiene el resto de la actividad económica.

7.2. Recomendaciones

- a) Se recomienda mejorar la red de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca, para a futuro contar con mayor información que permita caracterizar el fenómeno en términos de la magnitud y frecuencia de eventos, considerando la estimación del período de retorno y del caudal líquido y detrítico ocurrido. Asimismo, se recomienda que posterior a eventos de importancia en magnitud y/o eventuales daños, se efectúen los trabajos in situ para detectar el tipo de escurrimiento, las trazas dejadas por el paso del flujo, el levantamiento topográfico con mayor detalle en aquellas zonas donde el cauce esté bien definido, sin intervenciones o alteraciones post evento, y donde además se constaten trazas en el cauce. Posteriormente, llevar a cabo una modelación hidráulica, determinando el rango de caudales para el cual se logra una mayor concordancia con las trazas remanentes de la crecida.
- b) Considerando que, a la fecha de realización de los estudios, aún se estaban desarrollando obras en el entorno del puente San Pedro, se recomienda integrar la información topográfica del presente estudio con los proyectos de ingeniería as built, de Vialidad.
- c) Llama la atención el año 2019 donde su crecida tuvo consecuencias en el Ayllu de Beter, esta inundación pareciera no ser una característica natural del cauce sino más bien ser provocada por las obras que interfieren con el flujo, este sector al encontrarse fuera del área de estudio no se dispone de información suficiente para analizarlo, pero **se indica que es necesario realizar un análisis de la interacción del río San Pedro con la ruta de circunvalación en este sector.**
- d) Es importante destacar que **en el caso del río Vilama se sugiere incorporar en estudios posteriores toda el área aguas abajo del tramo de estudio hasta el Ayllu de Solor**, ya que en visita a terreno y de acuerdo a lo indicado por las comunidades, en ese tramo y en las quebradas afluentes existe población e infraestructura vulnerable a la inundación del río Vilama. Se recomienda que el análisis hidráulico se realice mediante modelación 2D y que, en las siguientes etapas de ingeniería, se verifique mediante modelación 2D las soluciones propuestas por el Plan, especialmente las del tramo intermedio del río San Pedro.
- e) Se sugiere en estudios posteriores realizar el análisis específico del eventual aporte aluvional de las quebradas laterales más importantes, como son la quebrada Del Diablo. Asimismo, se recomienda realizar estudio específico que considere embalses de control de crecidas en las cuencas de cabecera y quebradas laterales en los cuales se pueda infiltrar las aguas o entregar en forma controlada hacia aguas abajo. Cabe destacar que, la necesidad de estudio futuro para obras de regulación permitirá dar respuesta a la solicitud de comunidades en actividades de PAC.
- f) Por la naturaleza de las precipitaciones de la zona, que permiten espacios prolongados de tiempos sin actividad, es importante definir y respetar los espacios reservados para el escurrimiento fluvial. Se recomienda que los sectores aledaños a

las riberas que presentan actividades agrícolas no cambien su uso del suelo ya que edificar estas zonas podría aumentar la situación de vulnerabilidad de la población, es por esto que la línea geomorfológica de la ribera propuesta indica que estos terrenos corresponden a zonas inundables.

- g) Desde el punto de vista geotécnico se recomienda lo siguiente:
- i) Dado el ambiente salino del sector de proyecto, cualquier obra de hormigón debe considerar un recubrimiento mínimo de 7,0 cm;
 - ii) En aquellos sectores, en los que no se han perfilado los cauces, será necesario materializar una vía preferente para las escorrentías y crecidas de las quebradas de modo de proteger los pies de los muros de gaviones existentes;
 - iii) Los sellos de fundaciones de enrocados, gaviones o estructuras de hormigón deberá ser recibido conforme por un ingeniero especialista en el área geotécnica, antes de su materialización;
 - iv) Antes de la extracción de materiales desde el empréstito seleccionado o cantera será necesario su aprobación por parte del proyectista involucrado, además de la ejecución de ensayos de laboratorio específicos como lo son el peso específico de partículas sólidas, desgaste en la máquina de los ángeles, porcentaje de Lajas, presencia de sales solubles totales, límites de atterberg y clasificación USCS;
- h) Respecto de las medidas no estructurales propuestas se recomienda que, en el corto plazo, las instituciones correspondientes aborden las soluciones definidas como de primera prioridad, siendo éstas la de actualización del Plan Regulador Comunal y la de difusión y educación respecto a los resultados del Plan de Manejo de Cauce y Programa de Educación sobre los programas, planes y proyectos en desarrollo en los cauces.
- i) Respecto de las medidas estructurales propuestas, se recomienda que, en el corto plazo se aborden las soluciones que por su tipología corresponden a protección de la población y que de acuerdo a la priorización realizada se encuentren en 1ra y 2da prioridad.
- j) En aquellos sectores en que la solución estructural de modificaciones en el cauce resulte compleja de implementar, debido a los aspectos ambientales, sociales y culturales, como también a la dificultad de relocalización de viviendas producto de la escasa disponibilidad de suelos para uso en proyectos habitacionales en la comuna, se recomienda que se cree un **programa de mejoramiento de la habitabilidad de las viviendas** de forma que permita que estas sean modificadas con el objetivo de que sean **resilientes a la inundación**, ya sea que se encuentren sobre una base con altura superior a la de inundación o que tengan habilitado solo el segundo nivel y el primer

nivel con uso restringido a estacionamiento, jardín, y espacios fácilmente recuperables en caso de inundación.

- k) Se recomienda evaluar, dentro de los criterios de diseño de futuras obras en el cauce, técnicas asociadas a la Ingeniería Naturalística, que permitan mantener la naturalidad o mitigar los impactos en el paisaje y ecosistema acuático, lo que sería coherente con el enfoque de restauración fluvial adoptado en el Plan, que permiten devolver la calidad ecológica a estos ambientes. Las especies de plantas presentes en los ecosistemas ribereños del área de estudio se encuentran adaptadas a múltiples factores estresantes locales como las dinámicas de inundación, el régimen de sedimentos, la escasez estacional de agua y la salinidad, por lo que se sugiere que la restauración fluvial se efectúe con especies presentes en los mismos cauces.