



Plataforma Multiactor Cuenca Salar de Atacama

Informe Ejecutivo

Resultados de la Caracterización Geoquímica de Agua y Sedimento de la Cuenca del Río Vilama y sus Afluentes

Camilo Aróstica Vega

Matías Lacouture Lacouture

Supervisado por Mario Pereira Arredondo

Antofagasta, Agosto de 202

Contenido

Introducción	4
Contexto Geológico	4
Método de trabajo	5
Recopilación y revisión bibliográfica	5
Planificación de terreno	5
Campaña de terreno	5
Método de muestreo	7
Caracterización y determinación de la calidad de las aguas superficiales	8
Medición y cálculo de caudales	9
Geoestadística	10
Resultados	10
Geoestadística de las Aguas	10
Geoquímica de las aguas	13
Distribución de los elementos del agua	15
Arsénico (As)	15
Boro (B)	17
Bario (Ba)	19
Litio (Li)	19
Sílice (Si)	20
Estroncio (Sr)	20
Vanadio (V)	20
Manganeso (Mn)	20
Calidad de las aguas	21
Sedimentos y Caudales	22
Geoestadística de los sedimentos	23
Distribución elementos del Sedimento	26
Conclusiones	28
Sugerencias	28
Referencias	29
ANEXO	32
Resultados del Laboratorio	32
Estadística Básica para las Aguas	34
Estadística Aplicada para las Aguas	36
Modelamiento de los Elementos en las Aguas	38

Diagramas de Stiff	41
Distribución del Peso Acumulado	43
Aforo de los Caudales.	44
Estadística Básica para los Sedimentos	46
Estadística Aplicada para los Sedimentos	48
Distribución de Elementos en Sedimentos	51

Introducción

El Proyecto Mesa Multiactor de GIZ es un espacio de diálogo colaborativo entre las comunidades y los representantes de diversas organizaciones, empresas e instituciones, para lograr acuerdos sobre problemáticas planteadas por ellos mismos, respecto al cuidado del ecosistema de la Cuenca del Salar de Atacama, siendo los recursos hídricos el foco en este caso. La Plataforma cuenta con una Mesa Amplia que guía el proceso y una Mesa Técnica Hídrica (MTH) que contribuye con conocimiento e insumos.

La MTH busca mejorar la accesibilidad al conocimiento e incorporar los usos y costumbres en torno al agua que existen en el territorio. La MTH subdividió la Cuenca del Salar de Atacama en diversas Unidades Territoriales Hídricas (UTH), siendo la UTH-2, el territorio que abarca el norte de la cuenca donde ocurre el principal aporte de agua superficial a través de los ríos San Pedro y Vilama.

Este estudio se enfoca en las aguas superficiales del Río Vilama y sus afluentes, tomando en cuenta la composición hidroquímica de éstas, el origen de sus componentes, su disponibilidad y la interacción con los sistemas naturales y humanos impulsados por los procesos hidrológicos. Para lograr esto se realizaron mediciones y recolecciones de muestras de aguas y sedimentos a lo largo del Río Vilama, Purifica y Puripica.

Contexto Geológico

El Río Vilama y sus afluentes, el Río Puripica y el Río Purifica, se encuentran al norte de la Cuenca del Salar de Atacama. Los afluentes atraviesan las unidades ignimbríticas Puripicar y Chaxas, los cuales consisten en rocas piroclásticas de composición intermedia y ácida, respectivamente. El Río Vilama atraviesa coladas de lavas andesíticas basálticas, las ignimbríticas Pelón de composición ácida y, a la Formación Vilama, que corresponde a areniscas calcáreas poco consolidadas en los horizontes superficiales del suelo.

La Formación Vilama y las ignimbríticas Chaxas son las unidades más jóvenes, las cuales sobreyacen por discordancia al Grupo San Bartolo, el cual consta de las ignimbríticas Pelón y Puripicar. Este grupo sobreyace por discordancia angular a la Formación San Pedro, el cual se conforma por rocas sedimentarias evaporíticas que conforman la Cordillera de la sal. Sobre las ignimbríticas se depositan coladas de lavas asociadas a eventos eruptivos del Pleistoceno

Estos ríos se caracterizan por encontrarse encajonados en las quebradas que atraviesan, por las unidades ignimbríticas principalmente, formando cañones que llegan hasta 60 metros de alto y una anchura variable entre los 5 a 60 metros, por lo que su accesibilidad es bastante limitada.

El Salar de Atacama es uno de los más secos de la Tierra, con una precipitación promedio anual menor a 20 mm/año (Bobst et al.,2001). La hiperaridez de esta cuenca se debe a múltiples factores: (1) esta área está centrada a los 23°S, dentro del cinturón latitudinal permanente del subtrópico. (2) La corriente fría del Perú a través de la costa del Pacífico genera una inversión de temperatura que evita que la humedad del Pacífico entre tierras adentro. (3) El Desierto de Atacama, se encuentra en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes, yace en una zona de resguardo de la lluvia orográfica. Lo anterior, se debe a que la mayoría de las precipitaciones se ubica en el noreste, en la región del Altiplano al oeste de Bolivia, sur del Perú y el norte de Chile, que cae durante el verano (Diciembre-

Marzo) por el efecto de La Niña, recargando la cuenca por escorrentía lateral subterránea. Mientras que, los vientos ascendentes del este permite la entrada del aire húmedo, provenientes del Océano Atlántico, que recorren la cuenca del Amazonas y sobre el flanco oriental de los Andes (Johnson, 1976; Miller, 1976; Aravena et al., 1999; Garreaud, 1999). La combinación de estos tres factores producen unas condiciones de extrema aridez en el Salar de Atacama. La recarga del salar se debe principalmente al deshielo de los Andes. Los flujos de agua que entran al sistema de la cuenca proviene del margen norte y este como aguas subterráneas y escorrentía superficiales menores (Lowenstein, 2003).

Método de trabajo

Recopilación y revisión bibliográfica

Se realizó una recopilación bibliográfica de antecedentes de la Cuenca del Salar de Atacama y de la zona de estudio en particular. Se recurrió a trabajos de investigación de libros especializados, revistas científicas, memorias, tesis y documentos de entidades gubernamentales, como el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN); la Dirección General de Aguas (DGA); y del Ministerio de obras públicas (MOP). Se recopilaron imágenes satelitales Landsat 8, Sentinel 2, ALOS PALSAR DEM, Bing Maps Satellite y Google Earth de la zona de estudio.

Planificación de terreno

Para esta fase se diseñó una campaña de muestreo en donde se examinó mediante teledetección el cauce del río, rutas de accesibilidad y puntos de interés para la toma de muestras de aguas y sedimentos. Los criterios utilizados para determinar cada punto de muestreo fueron: afluentes del río, contactos litológicos que son atravesados por el río, aporte de aguas y sedimentos (de quebradas afluentes); e interacción del río con zonas antrópicas como regadíos. Los parámetros seleccionados para la medición in situ de las aguas corresponden a pH, conductividad, temperatura y caudal.

Campaña de terreno

Se realizó una campaña de terreno en el Río Vilama y sus afluentes entre los días 09 y 20 de mayo del 2022; para la medición de parámetros físico-químicos, la observación de la geología de las quebradas por la que pasan los ríos, la recolección de muestras de aguas superficiales, sedimentos y rocas. Debido al estado de los caminos y el sendero, se reubicaron los puntos de muestreo de aguas y sedimentos; tomando en cuenta cercanías del río y los accesos vehiculares.

Se recolectaron 30 muestras de agua superficiales, 7 para el río puripica, 6 para el río purifica y 17 para el río Vilama. Mientras que para sedimentos se recolectaron 36 muestras, 11 para el río puripica, 7 para el río Purifica y 18 para el río Vilama.

En la Fig.1 se muestra la ubicación y localidades de la zona estudiada, mientras los puntos de muestreos y la geología se observan en la Fig 2.

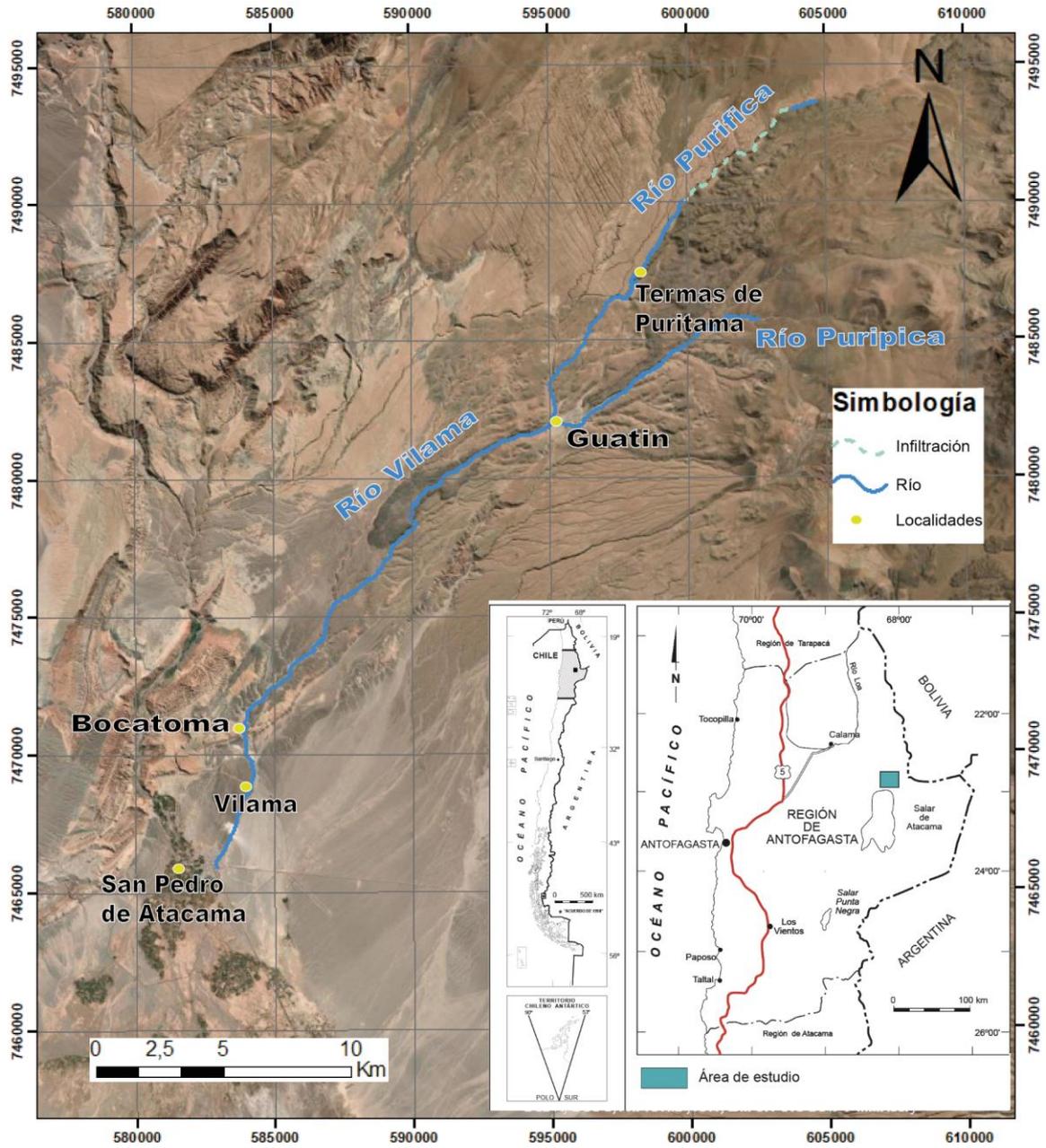


Fig. 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio, los puntos amarillos corresponden a las principales localidades recorridas.

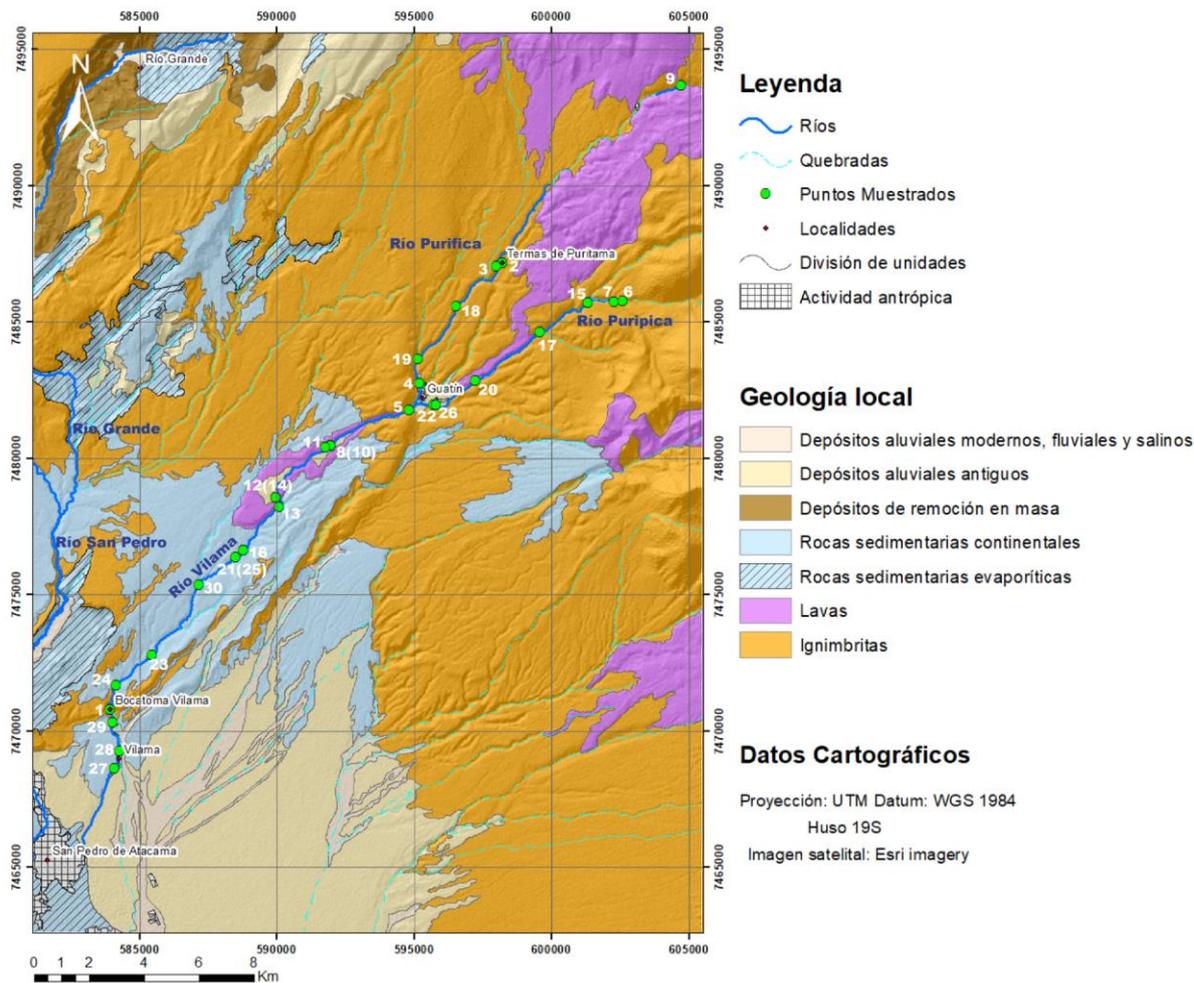


Fig. 2. Mapa geológico simplificado de la zona de estudio junto a los puntos de muestreo, modificado de Henríquez et al. 2014.

Método de muestreo

Para las aguas superficiales se siguió el Manual de normas y procedimientos del Departamento de conservación y protección de recursos hídricos de la DGA. Las condiciones generales que debe cumplir cada punto de muestreo según DGA, 2007 son:

- Deben ser de fácil acceso y perfectamente identificables mediante puntos notables (asignar coordenadas UTM, DATUM oficial y HUSO).
- La sección muestreada debe tener aguas corrientes, homogénea y representar al mayor caudal, evitando sectores de rápidos o saltos y en general cualquier lugar con alta turbulencia. Junto con lo anterior los lugares muy cercanos a las orillas o remansos con aguas detenidas no son lugares apropiados para realizar estas tareas.

Para las aguas superficiales el proceso de muestreo fue del tipo puntual, debido a que los ríos presentan poca profundidad, la técnica fue por vadeo de manera manual con un balde plástico.

Previamente el balde plástico es ambientado 3 veces, siendo enjuagado con la misma agua a ser muestreada, luego la masa de agua obtenida del balde se utiliza para ambientar cada botella junto

con la tapa siendo enjuagada 3 veces. Las botellas con muestras destinadas a análisis de metales disueltos fueron ambientadas con aguas filtradas mediante filtros trompo.

Las muestras de agua fueron analizadas en el laboratorio ALS ubicado en Antofagasta, donde se obtuvo resultados de metales disueltos, aniones y alcalinidad.

Para el Muestreo del sedimento se realizaron dos extracciones: (1) destinado a análisis químico y (2) para un análisis de los parámetros físicos de los sedimentos del río. Para (1) se siguieron las instrucciones de Kyser et al. (2015), en donde, la distribución espacial de las muestras sea lo más representativo para determinar la evolución del río, para ello se escogió lugares que representen un sitio hidromorfológico que cumpla con las siguientes condiciones: que el flujo del caudal sea lo más laminar posible para que los elementos pesados, posibles contaminantes, decanten en el sustrato; que el lugar para extraer el sedimento sea del material más fino posible (Owens et al., 2005); y con una profundidad de extracción no mayor a los 3 cm. Para (2) se extrajo entre 1,5 a 3 kg de sedimento desde un punto único dentro del río, este corresponde a la zona con mayor profundidad del afluente, se recolecta la muestra entre los 0 y 15 cm de profundidad.

Las muestras fueron secadas para su posterior análisis. Para (1) se envía al laboratorio de fluorescencia y difracción de la Universidad Católica del Norte para el análisis de espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) con el equipo SIEMENS modelo SRS-3000. Para (2) las muestras son cuarteadas y tamizadas para un análisis granulométrico con el cual se espera determinar el tamaño de sedimento transportado para cada río.

Caracterización y determinación de la calidad de las aguas superficiales

Se realizaron diagramas de Piper y de stiff con los valores de los aniones y cationes en meq/L para caracterizar el tipo de aguas en función de los iones mayores.

Los valores obtenidos de los análisis químicos fueron comparados con las normas NCh409/1 y NCh1333.0f78 los cuales son considerados como valores referenciales, estas corresponden a normas del agua para el consumo y para riego respectivamente. Los metales disueltos que presentan valores por sobre las normas fueron comparados con los datos químicos disponibles de la estación fluviométrica canal vilama en vilama, con el fin de determinar si sus valores presentan variaciones significativas a lo largo del tiempo.

Se utilizó la clasificación de Johnson et. al (2007), el cual, entrega la calidad de las aguas en base a la electroconductividad y el ratio de absorción del sodio. El primero, se relaciona con la cantidad de metales disueltos en el agua y el segundo con la cantidad de sales disueltas en el agua. Los efectos de las aguas de mala calidad son la acumulación excesiva de sales solubles y/o sodio en los suelos, en donde, dificultará la observación de la humedad hacia las plantas y los cultivos. Mientras que, el exceso de sodio precipitará en los poros del sedimento, en forma de arcilla y humus, reduciendo el movimiento del agua a través del suelo.

Los valores obtenidos de los análisis de sedimentos fueron comparados con valores referenciales de las normas canadiense debido a que no se encuentran normados en Chile, las normas utilizadas fueron los valores guías de la calidad de suelos para la protección ambiental y la salud humana de Canadá (CCREM, 1987). Esto con la intención de determinar si los sedimentos depositados pueden afectar a la salud humana y a la calidad de los suelos de los cultivos para su uso.

Norma chilena		
Elemento	Limite norma agua potable NCh409/1	Límite norma riego NCh1333. Of78 modificada 1987
As	0,01 mg/L	0,1 mg/L
B	-	0,75 mg/L
Ba	-	4 mg/L
Ca	-	-
K	-	-
Li	-	2,5 mg/L
Mg	125 mg/L	-
Mn	0,1 mg/L	0,2 mg/L
Na (%)	-	35%
Si	-	-
Sr	-	-
V	-	0,1 mg/L
Cl-	400 mg/L	200 mg/L
SO4-	500 mg/L	250 mg/L
NO2	3 mg/L	-
NO3	50 mg/L	-
CO3-2	-	-
HCO3-	-	-

Tabla 1. Valores de referencia de elementos químicos de la norma chilena Nch409/1 para agua potable y Nch1333.Of78 para riego.

Niveles de referencia de calidad de suelos para la protección del ambiente y la salud humana					
Elemento	Concentración (mg/kg) para agricultura	Concentración (mg/kg) para parques y zonas residenciales	Concentración (mg/kg) para zona comercial	Concentración (mg/kg) para industria	fecha
Pb	70	140	260	600	1999
As	12	12	12	12	1997
Zn	250	250	410	410	2018
Ba	750	500	2000	2000	2013
Cr	64	64	87	87	1997
Cu	63	63	91	91	1999
V	130	130	130	130	1997
S	500	-	-	-	1991
Cl	-	-	-	-	-
Sr	-	-	-	-	-

Tabla 2. Valores de referencia de calidad de suelos para la protección del ambiente y la salud humana para su uso en agricultura, parques y zonas residenciales, zona comercial e industrial. Extraído de Canadian Council of the Ministers of the Environment (CCME).

Medición y cálculo de caudales

Se escogió una sección perpendicular a la dirección del río que posea un flujo de agua laminar. Las secciones transversales fueron divididas en subsecciones según los distintos niveles de base que presentaba el río de tal forma que se generen formas geométricas “simples”, sin considerar la rugosidad generada por los clastos. La medición del caudal está dado por la siguiente ecuación:

$$Q = \sum U \cdot A \quad Q: \text{Caudal}; U: \text{Velocidad de flujo}; A: \text{Área} \quad \text{Ec. (1)}$$

Se midió la velocidad del flujo utilizando molinetes hidrométricos y contadores, los modelos manejados fueron molinete OTT C2 junto con el contador digital OTT Z400 los cuales en su conjunto

presentan un margen de medición entre 0,025 m/s y 5 m/s con una precisión de $\pm 2\%$; y el molinete de la marca Gurley Precision Instruments modelo 625D junto al contador digital modelo 1100.

Geoestadística

Se realizó una estadística básica a las aguas, tanto a los iones mayores y los elementos trazas para determinar de manera simple el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de cada río de esta cuenca.

Se emplearon las correlaciones de Pearson para determinar los grados de interacción entre un elemento y otro, separando en dos grupos: (1) los elementos mayores y (2) los metales disueltos en el agua. Para resguardar la calidad y la veracidad de los datos obtenidos, se estableció el siguiente criterio de correlación: muy alta ($r > 0,8$); alta ($0,6 < r < 0,8$); moderada ($0,4 < r < 0,6$); y débil ($r < 0,4$). La misma regla se aplica para cualquier valor de r negativa (Anexo 9 y Anexo 11). En la geoestadísticas de los iones mayores, en general, existe altas correlaciones entre ellos, exceptuando el HCO_3^- y NO_3^- debido a sus bajas concentraciones. En cambio, los metales disueltos tiene correlaciones altas a muy altas, exceptuando el Ba y el Mn debido a que solo se encuentran en altas proporciones sólo en secciones específicas del río, en el Río Puripica y desde la bocatoma hacia aguas abajo respectivamente.

Una vez determinada las correlaciones de ambos grupos, se procedió con el Análisis de los Componentes Principales (ACP), este método geoestadístico determinará el comportamiento geoquímico de los ríos, caracterizando los elementos principales en la que cada río tiene afín. Para el caso de las aguas se tomaron todas las muestras debido a sus altas correlaciones entre ellas.

En el caso de los sedimentos se realizó la misma estadística básica que en las aguas. Por otra parte, al realizar la geoestadística con todos los elementos y en conjunto con todos los ríos presentes se observó que las correlaciones de Pearson eran muy débiles por lo que se separó por río y se excluyeron los siguientes elementos: Rb, Ni, Co, Nb, Zr, Y y Sc; debido a que de esta manera las correlaciones aumentaban considerablemente (Anexo 27, Anexo 29 y Anexo 31).

En el caso del ACP, se obtuvo un análisis de cada río. Por lo que cada uno de los ríos tiene un comportamiento independiente del resto en lo que respecta a los sedimentos.

Por último, con cada punto de muestreo se realizó una interpolación de cada elemento por el método B-Spline a través del sistema QGIS debido a que el método de muestreo no contempla una malla regular de extracción de muestra y que es el método con mejores distribuciones en lo que respecta el análisis de las aguas. En el caso de los sedimentos, es recomendable utilizar el método por Kriging pero se necesita una malla regular para obtener una representación de calidad de la distribución de estos elementos, por lo que se utilizó el método B-Spline.

Resultados

Geoestadística de las Aguas

Para el análisis estadístico de las aguas se separó en dos grupos. El primero, con los iones mayoritarios constituidos por Na^+ , K^+ , Ca^+ , Mg^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- y NO_3^- . El segundo, por los elementos trazas disueltos en el agua conformado por As, B, Ba, Li, Mn, Si, Sr y V. Se realizó una estadística básica, respecto al pH, Conductividad Eléctrica (C.E), temperatura, Ratio de Absorción del Sodio (SAR) y los Sólidos Disueltos Totales (TDS), explicados en las tablas 3, 4 y 5.

	Vilama				
	pH	C.E.	Temperatura	SAR	TDS
		mS/cm	°C	meq/L	mg/L
Media	8,581	3,024	12,775	6,694	1459,685
Mediana	8,630	2,948	13,690	6,675	1467,000
Max	8,870	5,198	19,510	6,925	1582,000
Min	8,250	2,452	9,000	6,454	1347,000
DS	0,200	0,793	2,978	0,143	66,763

Tabla 3. Estadística descriptiva de las propiedades fisicoquímicas de las aguas del río Vilama.

	Puripica				
	pH	C.E.	Temperatura	SAR	TDS
		mS/cm	°C	meq/L	mg/L
Media	8,229	1,793	16,311	5,286	1018,917
Mediana	8,290	2,096	16,800	4,970	1175,000
Max	8,708	2,580	21,700	7,701	1513,000
Min	7,119	1,117	12,200	4,036	669,000
DS	0,540	0,686	3,409	1,571	354,213

Tabla 4. Estadística descriptiva de las propiedades fisicoquímicas de las aguas del río Puripica.

	Purifica				
	pH	C.E.	Temperatura	SAR	TDS
		mS/cm	°C	meq/L	mg/L
Media	8,161	2,840	23,409	5,851	1032,444
Mediana	8,379	2,725	23,950	6,698	1440,500
Max	8,928	3,510	32,900	6,789	1588,000
Min	7,160	2,710	12,850	2,961	179,000
DS	0,677	0,322	7,159	1,530	536,644

Tabla 5. Estadística descriptiva de las propiedades fisicoquímicas de las aguas del río Purifica.

Respecto al ACP (Análisis de Componentes Principales) de los iones mayores, el modelo explica un 83% de los datos, lo que es un muy buen indicador para los modelos predictivos de estos iones. De la combinación de la Fig. 3 y Fig. 4 se desprende: pérdida progresiva de contenido en NO_3^- , aumentando a su vez, las concentraciones en HCO_3^- , Cl^- , Ca^{+2} y K^+ . El Río Purifica tiene altos niveles en contenido de SO_4^{-2} , Mg^{+2} , Na^+ ; los altos niveles de SO_4^{-2} coinciden con el contexto geológico en el que se encuentra. El Río Vilama presenta un alto contenido en SO_4^{-2} , Cl^- , Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} .

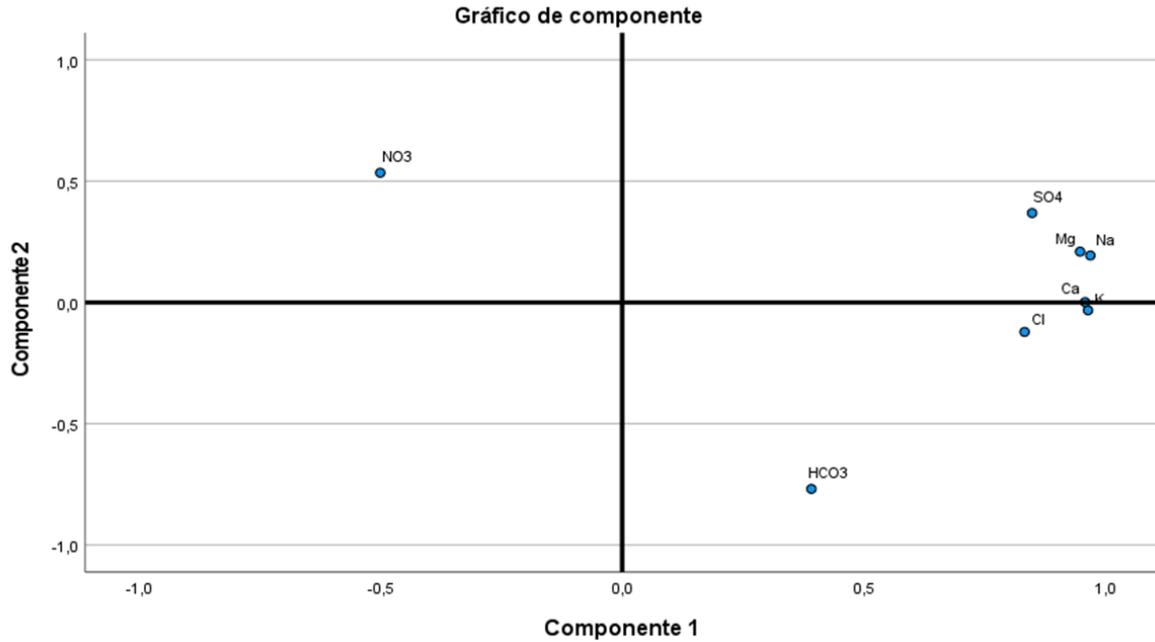


Fig. 3.. Análisis de los componentes principales de los iones mayoritarios.

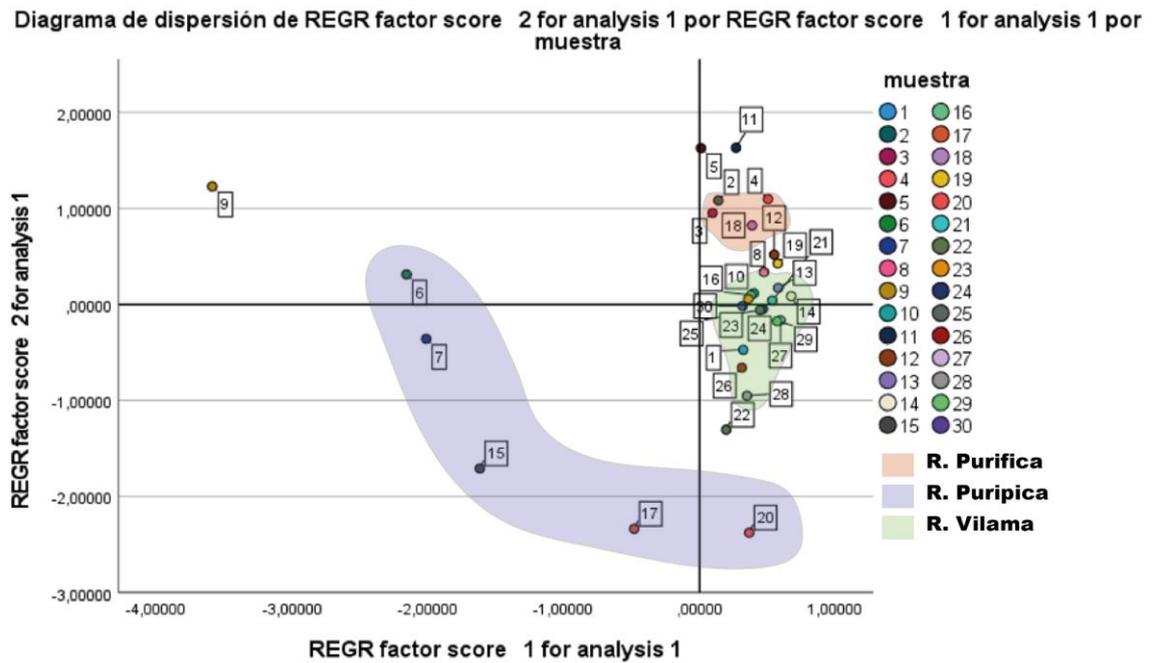


Fig. 4. Análisis de los componentes principales por puntos de los iones mayores.

En el caso del ACP de los elementos trazas del agua, en este modelo de los componentes explica un 82% de los datos, es decir, un buen indicador. Al analizar las Fig.5 y Fig. 6 en su conjunto, se desprende lo siguiente: (1) el río Puripica presenta una clara evolución química, se enriquece en Ba y Sr; y en menor medida en B y Li. (2) en el río Purifica se observa que las aguas se encuentran influenciadas por aportes de origen hidrotermal debido al contexto geológico en que se desarrollan los cauces con elementos como el Si, As, V, B y Li. Por otra parte, no es posible determinar una evolución clara, de los elementos trazas, aguas arriba de las termas hasta el punto 9. (3) el Río Vilama tiene altas concentraciones de B y Li. Mientras que los altos niveles de Si, As y V que tiene el río son influenciados

por el aporte de aguas de las Termas de Puritama. (4) En el canal Vilama y en la bocatoma de Vilama, se observa un enriquecimiento de Mn.

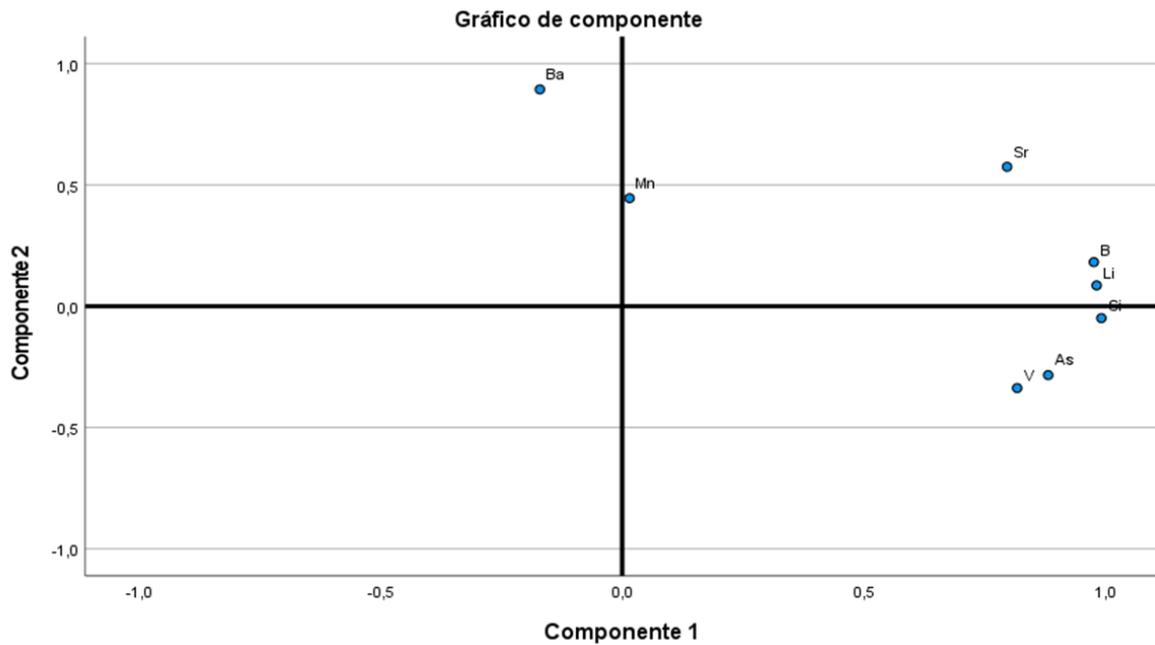


Fig. 5. Análisis de los componentes principales de los elementos traza.

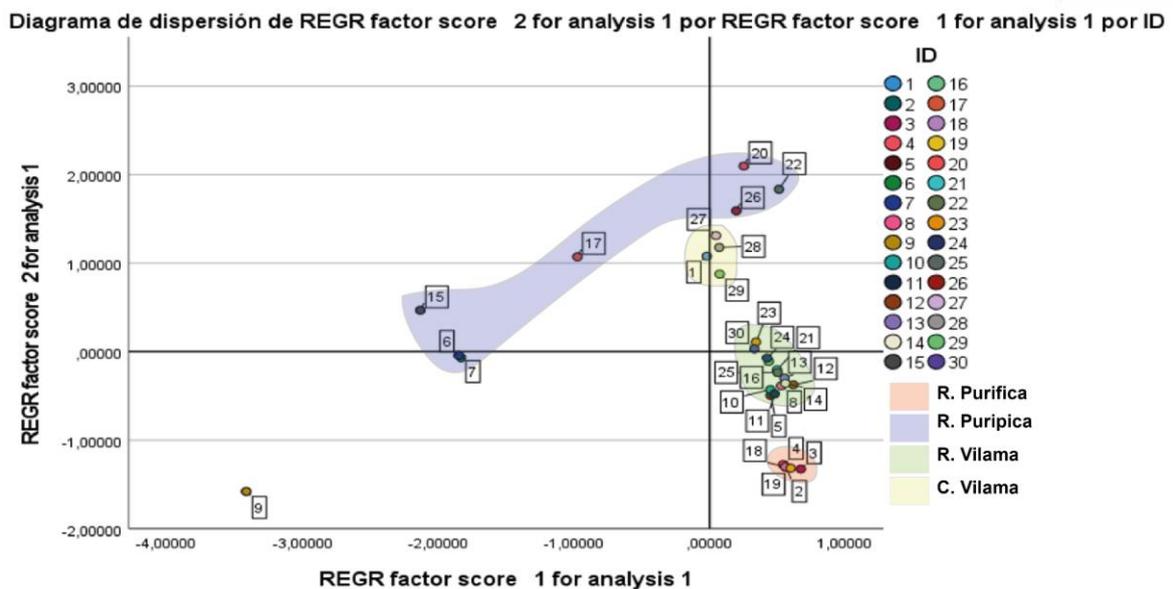


Fig. 6. Análisis de los componentes principales por puntos de los elementos traza.

Geoquímica de las aguas

Según el diagrama de Piper (Fig.7), las aguas de estos ríos corresponden a aguas sulfatadas sódicas, excepto las muestras 15, 17 y 20, del Río Puripica, los cuales son aguas cloruradas sódicas y la muestra 1 y 28, del Río Vilama, los cuales también son aguas cloruradas sódicas. Esto se relaciona con el contexto geológico que se mencionará más adelante.

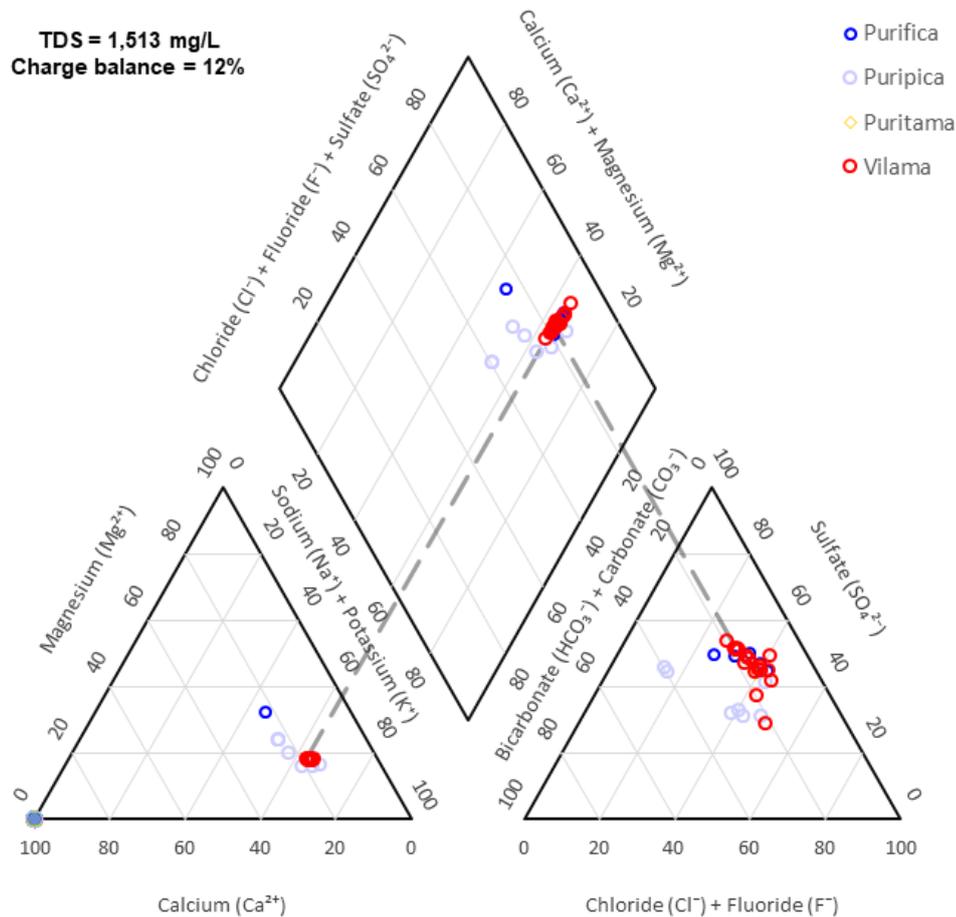


Fig. 7. Diagrama de Piper, del Río Vilama y sus afluentes.

Según los diagramas de Stiff (Anexo 16 y Anexo 17), existe una clara evolución de las aguas, desde las nacientes (vertiente) hasta la canalización, el Río Puripica muestra un aumento progresivo de cationes y aniones, hasta alcanzar concentraciones similares al Río Vilama. El Río Purifica, junto a las Termas de Puritama, tiene niveles similares en sus concentraciones con los finales del Río Puripica. En el Río Vilama, el contenido de los cationes se mantiene constante, mientras que los aniones tienen variaciones de Cl^- según el sector que atraviesa, lo cual evidencia una movilidad de este elemento que puede estar relacionada a las unidades litológicas con las que el agua interactúa (composición, permeabilidad y grado de exposición a radiación UV).

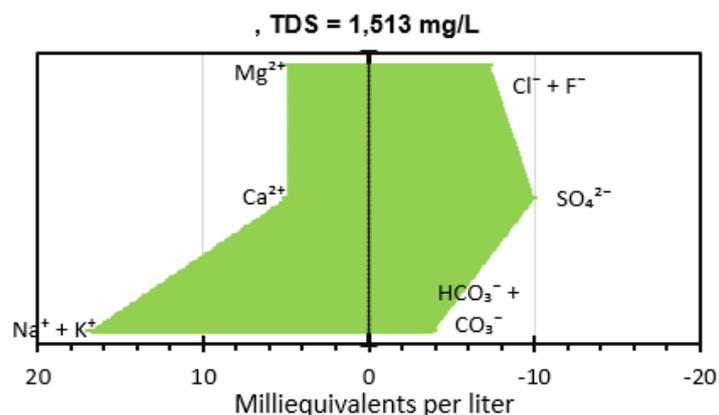


Fig. 8. Diagrama de Stiff generalizado para toda la cuenca del Río Vilama.

Distribución de los elementos del agua

Respecto a los iones principales en las aguas (Anexo 13 y Anexo 14) se observa que las nacientes del Río Purifica y el Río Puripica tienen bajas concentraciones de estos iones. Mientras que los flujos de actividad hidrotermal provenientes de las Termas de Puritama influyen directamente en las concentraciones Na^+ , Mg^{+2} , Cl^- y SO_4^{-2} . El Río Puripica aporta con contenidos de K^+ y HCO_3^- , sin embargo, estos iones no tienen concentraciones elevadas en el Río Vilama, lo que indica que el comportamiento de este río, en los iones mayores, está directamente influenciado, de manera natural, por las Termas de Puritama.

Las variaciones del Cl^- en el río Vilama son explicadas por la alta movilidad de este anión (Scanlon et al, 2009). Esto se debe a que dicha área corresponde a la Formación Vilama, el cual consta de calizas y areniscas calcáreas, lo que permite una permeabilidad mayor que otros sectores. Además, la vegetación es más alta y dispersa en comparación a otros sectores del río por lo que la evapotranspiración juega un rol importante en esta área. Es una zona abierta por lo que el río presenta mayor exposición a radiación ultravioleta (UV) puesto que en su mayoría, aguas arriba de este sector, se encuentran en quebradas muy profundas y, por lo tanto, los periodos de contacto con el sol se encuentran limitados a unas pocas horas al día.

El HCO_3^- es un anión cuyo aporte principal, por medio de su caudal, es el Río Puripica. Sin embargo, este río no presenta el caudal suficiente para que aporte significativamente en su concentración hacia el Río Vilama.

El alto contenido de Na^+ en los ríos se debe al clima árido y al contexto geológico en el que se encuentran. Es producto del volcanismo de la Cordillera de los Andes, la presencia de las distintas unidades de Ignimbritas y la precipitación de costras salinas alrededor del lecho del río y en el suelo.

El origen del SO_4^{-2} es explicado principalmente por las termas de Puritama, el cual se debe a la mezcla entre aguas meteóricas y aguas termales, cuando estas últimas suben a la superficie; o el paso de aguas termales en secuencias ricas en SO_4^{-2} o litologías que contienen azufre nativo, proceso facilitado por las fracturas de las ignimbritas que se encuentran en las termas de Puritama, en casi toda la extensión del Río Puripica y en sectores localizados del Río Vilama.

Los elementos traza presentes son As, B, Li, Ba, V, Sr, Si y Mn de los cuales los valores de As, B, Li (Fig. 9, Fig. 11 y Fig. 13, respectivamente) se encuentran sobre los límites máximos permitidos según la Norma Chilena de Aguas para Consumo y Riego (NCh 1333). Siendo las Termas de Puritama el punto de mayor aporte de estos componentes.

Arsénico (As)

Según los datos de la DGA, el contenido de arsénico en la Estación Fluviométrica Canal Vilama en Vilama varía entre 0,4 y 0,76 mg/L (Fig. 10), luego la concentración medida se encuentra dentro de las tendencias para el Río Vilama.

Se asocian 2 posibles orígenes para el As: El primero, mediante fuentes termales, debido a que las aguas termales cargadas con arsénico están relacionadas a cantidades importantes de Li y Si, en aguas con un pH que tiende a neutro (6,3 a 8,3) y alta salinidad con iones de Na^+ , Cl^- y HCO_3^- como predominantes (Muñoz et al. 2015). Dichas cualidades son parecidas a las condiciones presentes en las aguas termales en Puritama. Mientras que el segundo se debería a la disolución de evaporitas, que subyacen a depósitos ignimbriticos del Grupo San Bartolo pertenecientes a la Formación San Pedro;

la concentración de arsénico en yeso puede llegar a 99.999 ppm (Dogan y Dogan, 2007) y su disolución libera este elemento al medio.

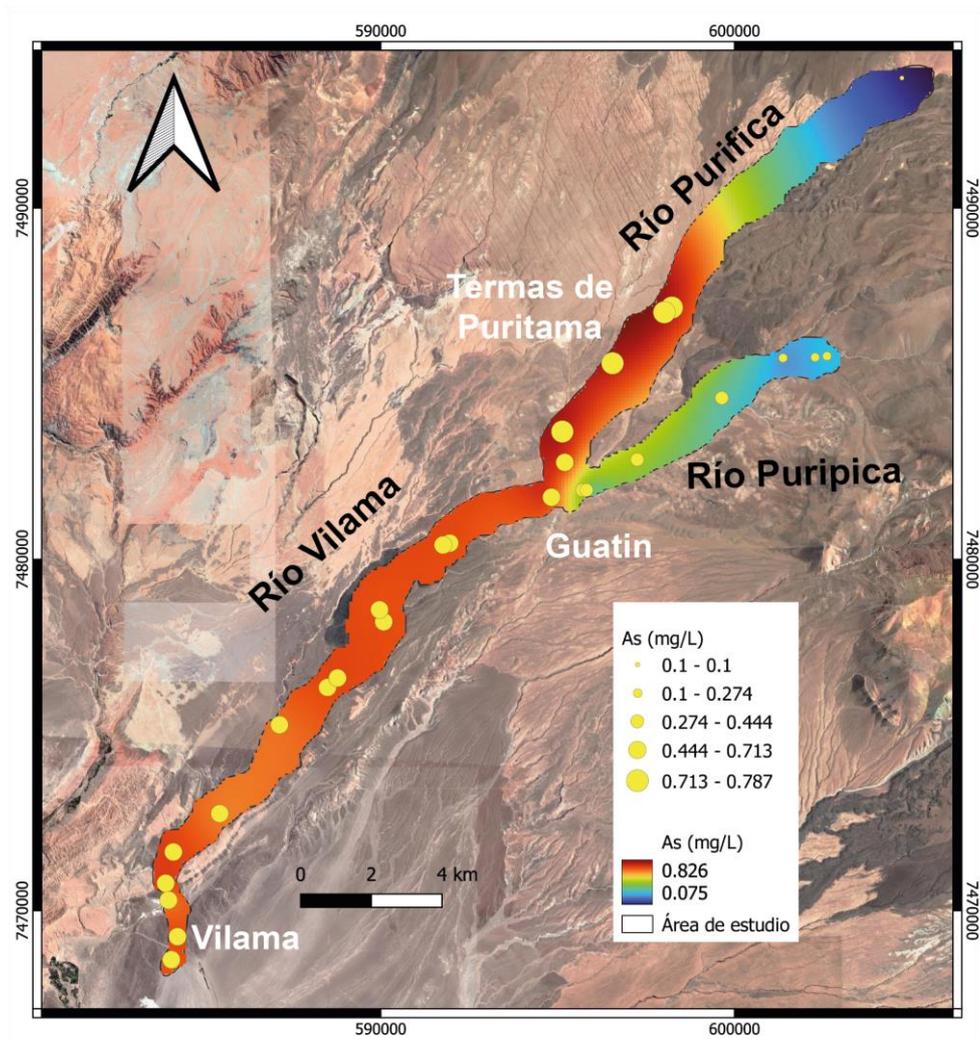


Fig. 9. Distribución espacial de As disuelto, los puntos amarillos corresponden a las muestras obtenidas.

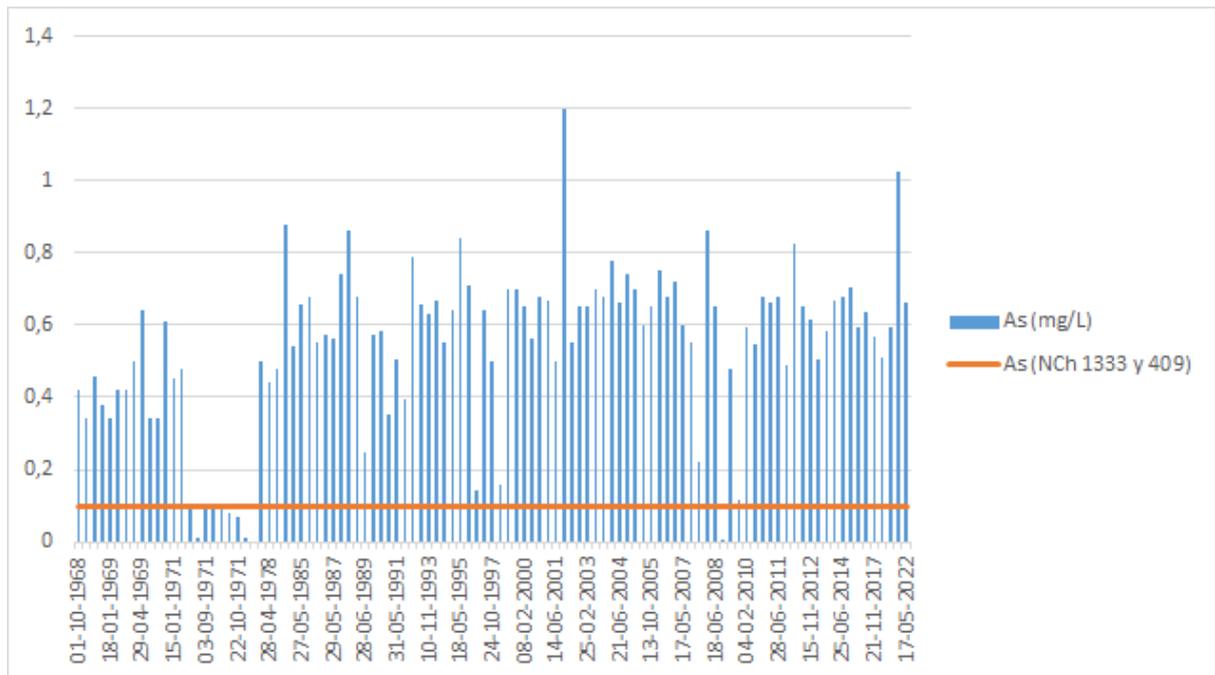


Fig. 10 . Concentraciones de As en la Estación Canal Vilama en Vilama.

Boro (B)

Con los datos de la DGA, se concluye que las concentraciones de B se mantienen dentro de sus rangos normales (Fig. 12). Se recomienda monitorear este elemento debido a sus efectos en la agricultura.

Los posibles orígenes del boro se pueden asociar a un origen geotermal ligado al volcanismo de los Andes que libera este elemento hacia las aguas hidrotermales y que, posteriormente se mezclan con las aguas meteóricas, durante el ascenso facilitado por fracturas de las ignimbritas. Otro proceso es la lixiviación producto de la interacción de las aguas meteóricas con los depósitos ignimbríticos.

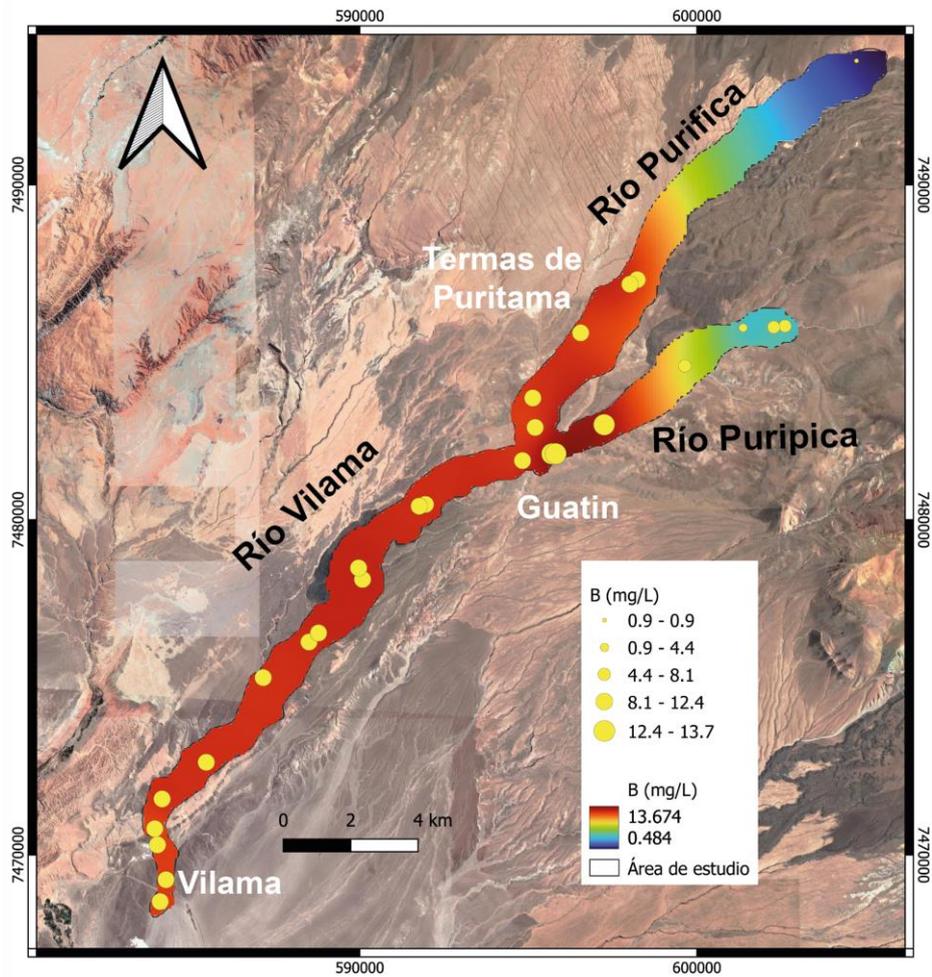


Fig. 11. Distribución espacial de B disuelto, los puntos amarillos corresponden a las muestras obtenidas

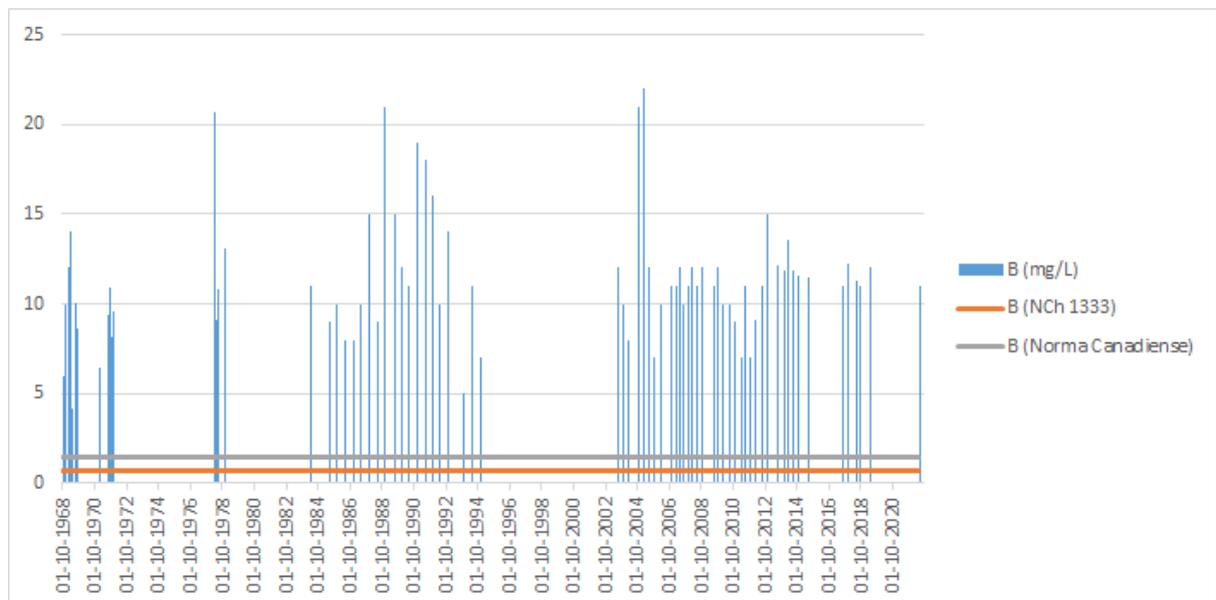


Fig. 12. Concentraciones de B en la Estación Vilama en el Canal Vilama.

Bario (Ba)

Miras, (1991) menciona que los contenidos de Ba están asociados a la disolución de Baritina (BaSO_4) contenida en secuencias evaporíticas sulfatadas (Puchelt, 1967), además se pueden relacionar a la meteorización de minerales primarios como feldspatos y filosilicatos (Carron & Laganche, 1980). Así, el aporte de bario en la quebrada Puripica es explicado por una interacción del río con secuencias evaporíticas, evidenciado por la presencia de SO_4^{2-} disuelto en el río, sin estar relacionado a las aguas de las Termas de Puritama.

Litio (Li)

Los altos contenidos de Li en el Río Vilama aportan con más de 19 T/año (Risacher y Alonso, 1996), lo que equivale a un 7% del total del Li en el Salar de Atacama., considerando 2,54 mg/L de Li para el Río Vilama; los niveles registrados en este trabajo corresponden a 3,65 mg/L, lo que representa un aumento de un 44% de Li en la concentración del Río Vilama; este es un registro que debe ser verificado.

El litio es considerado un elemento del grupo de especies conservativas o solubles, estos elementos están incorporados en minerales secundarios y de alteración en el caso del Li en cuarzo autigénico y clorita (Aguilera 2008, Gougel ,1983). El Li se puede asociar a un origen principalmente volcánico, ya sea por fluidos hidrotermales o por alteración de rocas volcánicas (Risacher & Alonso, 1996, Lahsen, 1976)

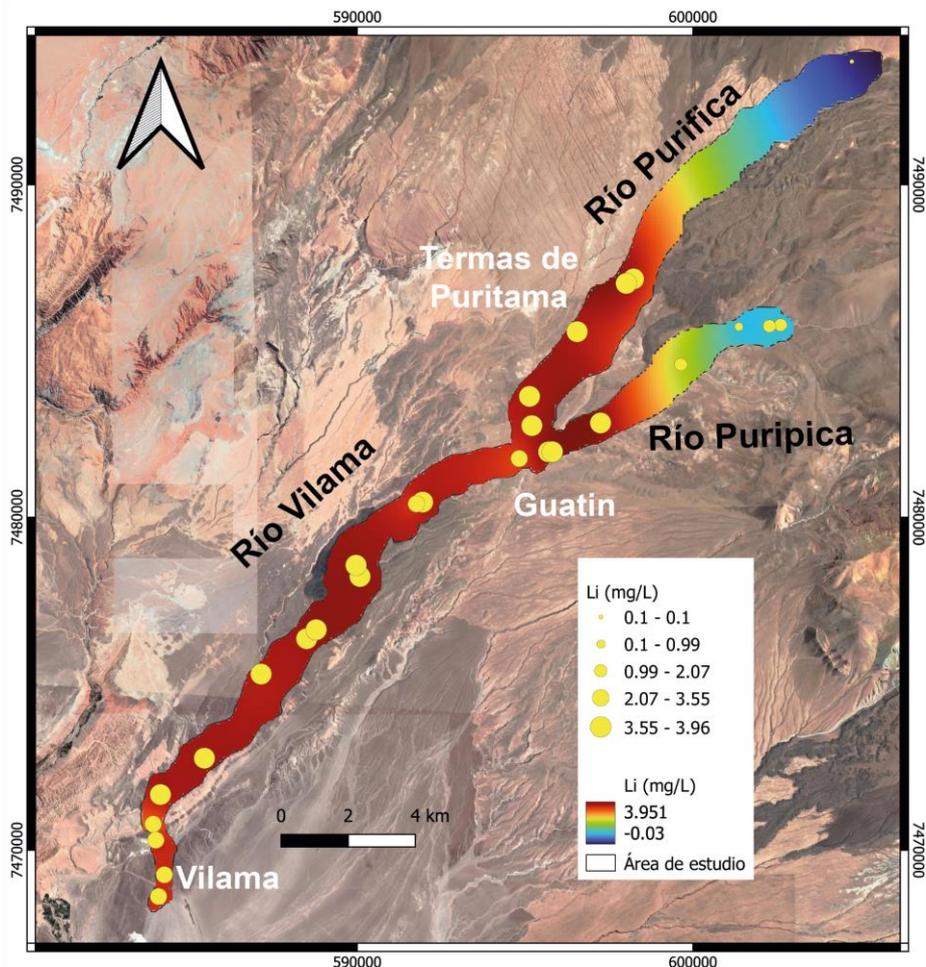


Fig. 13. Distribución espacial de Li disuelto, los puntos amarillos corresponden a las muestras obtenidas.

Sílice (Si)

Las normas chilenas e internacionales (Canadiense y de USA) de la calidad de agua para consumo humano y de riego no contemplan valores máximos permisibles de Si disuelto.

El origen de la sílice puede estar asociado a aguas cloruradas y sulfatadas provenientes de las Termas de Puritama, además de la interacción agua-roca con las formaciones volcánicas ignimbríticas a través de sus fracturas. Sin embargo, las concentraciones de Sílice (SiO₂) están controladas por la solubilidad de las distintas especies minerales de sílice (cuarzo, calcedonia, cristobalita, ópalo o sílice amorfo, en orden de menos a más soluble), las cuales dependen de la temperatura, presión, salinidad y el volumen específico del solvente. (Aguilera, 2008 y Henley et al., 1984)

Estroncio (Sr)

Las normas chilenas e internacionales de la calidad de agua para consumo humano y de riego no contemplan valores máximos permisibles de Sr disuelto.

El estroncio es un elemento que tiene la capacidad de sustituir al calcio en la estructura cristalina de minerales carbonatados (Revuelta & González, 1986), además de estar asociado al calcio presente en rocas graníticas (Turekian & Kulp, 1956). Es posible relacionar los niveles de Sr en el Río Puripica a los valores del anión HCO₃⁻ disuelto y de las concentraciones de Ca⁺² en los ríos.

Vanadio (V)

El Vanadio es un oligoelemento ampliamente distribuido en la naturaleza. El V sustituye en minerales ricos en hierro, como anfíboles, biotita, magnetita y piroxeno (Fischer, 1973). El vanadio está presente en grandes cantidades en rocas ígneas máficas (aproximadamente 250 ppm); se puede asociar sus niveles a la lixiviación de minerales máficos presentes en las secuencias volcánicas, que son atravesadas por los ríos.

Manganeso (Mn)

Caro (2004) explica que la aparición del manganeso se debe a tres fenómenos independientes: la lixiviación de las rocas volcánicas de la alta cordillera, las actividades mineras desarrolladas en la cuenca (extracción de sales) y el afloramiento de napas subterráneas en distintas secciones de la cuenca, en las cuales los acuíferos asociados a las secciones, recargan los cursos superficiales. Sin embargo, debido a que las concentraciones de Mn antes de la bocatoma están bajo los límites de detección (0,005 mg/L), no es posible atribuir la presencia del Mn debido a la lixiviación de las rocas volcánicas.

Además, según los datos obtenidos de análisis de aguas de la Estación Fluviométrica Canal Vilama en Vilama de la DGA, los primeros registros de Mn ocurren a partir del año 1997 (Fig. 14), lo cual podría asociar la presencia de Mn a actividades antrópicas, como la edificación de la bocatoma o la remoción de sedimentos. Siendo éste el único elemento disuelto relacionado a la actividad antrópica.

*Los mapas geoquímicos de los demás elementos contenidos en el agua se encuentran en el apartado de anexo para mayores detalles en su distribución en las figuras (Anexo 13, Anexo 14 y Anexo 15).

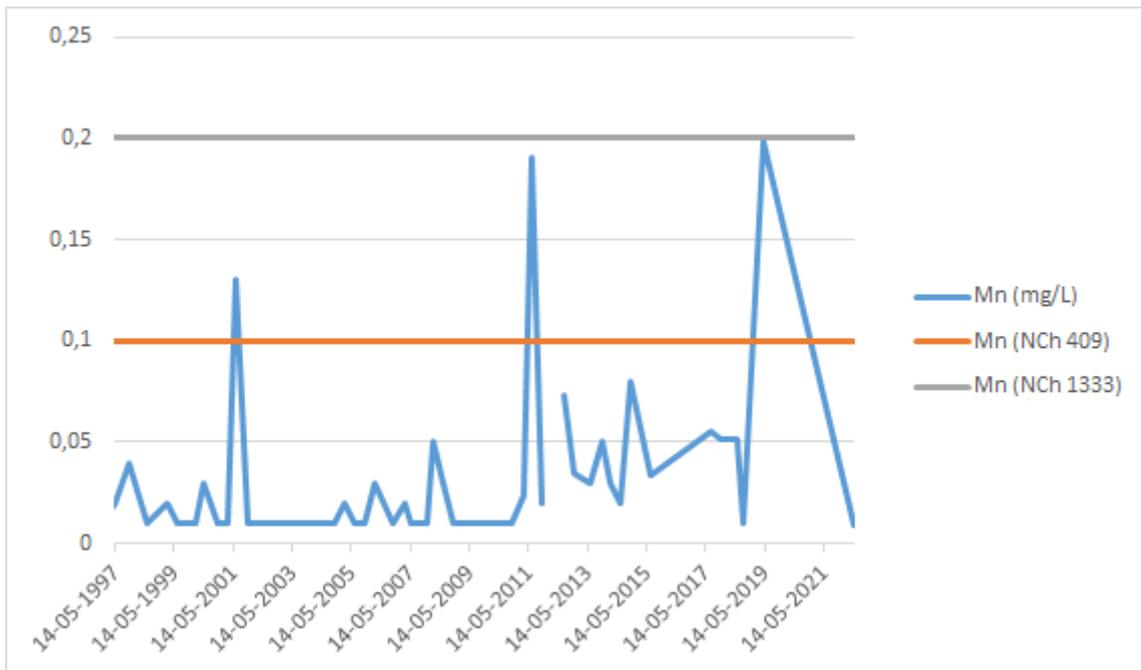


Fig. 14 . Concentraciones de B en la Estación Vilama en el Canal Vilama.

Calidad de las aguas

Según Johnson et. al (2007) es posible catalogar la calidad de las aguas a través de su conductividad y la ratio de absorción del Na (SAR), demostrado en el siguiente gráfico (Fig. 15).

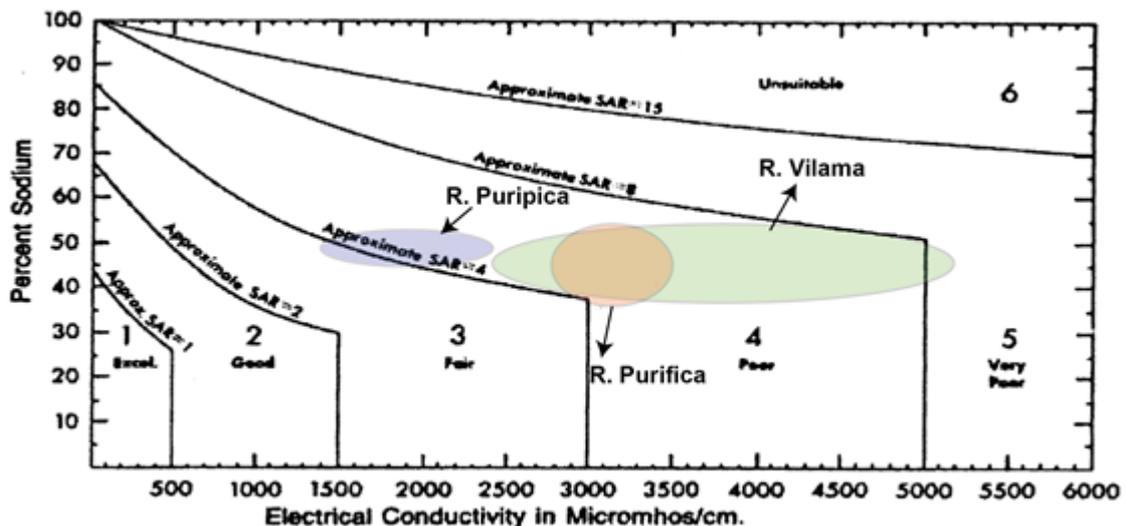


Fig. 15. Diagrama para la clasificación de aguas de regadíos para el Río Vilama (Verde), Río Puripica (azul) y Río Purifica (rosado).

Del gráfico se desprende que la calidad del agua para el Río Vilama y sus afluentes es pobre, lo que significa que el uso de estas aguas está restringido a suelos muy permeables para la producción de cultivos con una alta tolerancia a la salinidad. Las prácticas de riego deben ser cautelosas para mitigar la acumulación de sales. Se puede agregar aguas de mejor calidad para provocar la lixiviación de las sales cuando las lluvias son escasas. Se debe tener buenas prácticas en el manejo del suelo para mantener su calidad, por lo que deben ser fertilizadas continuamente para mantener niveles

adecuados en los nutrientes del suelo para el cultivo. Usar estas aguas en suelos de selección moderada con una baja permeabilidad puede causar problemas de salinidad si las buenas prácticas no son respetadas. No es recomendable utilizar estas aguas en suelos con textura fina (Johnson & Zhang (2007).

A pesar de que las aguas del Río Vilama sea de categoría 4, existen ciertos factores que permiten amortiguar las falencias que presenta el agua como: (1) el contenido de yeso disuelto, dadas por las altas concentraciones de SO_4^{2-} y Ca, permite la disminución del SAR y de esta manera reducir los efectos de las sales y otros elementos (As, B) en los cultivos, el mismo efecto es producido si se agrega yeso al suelo. (2) Los suelos arenosos no es común que acumulen sales u otros elementos nocivos para el cultivo, por lo que disminuye el riesgo de la mala calidad de las aguas. Esta característica es propia del suelo del Río Vilama y de la comunidad de San Pedro. (3) Idealmente, el nivel freático debe encontrarse al menos a 5 metros de profundidad para que la lixiviación del suelo sea más eficiente. No es posible afirmar o negar lo anterior debido a la falta de información en esta materia. (4) El riesgo de las aguas de mala calidad disminuye considerablemente con la presencia de las lluvias debido a que la conductividad eléctrica y el SAR disminuye. Este efecto sólo es posible en ciertos periodos del año debido a las condiciones climáticas del lugar. (5) el tipo de cultivo que sea más resistente a las sales. En este ítem, se recomienda seguir usando los cultivos típicos del altiplano debido a que estos tienen una resistencia natural al contenido de B presente en las aguas que restringe significativamente al tipo de cultivo sembrado.

Sedimentos y Caudales

Durante la campaña de terreno se midió el caudal en las secciones del río ubicadas en los puntos de muestreo, se sistematizaron los datos para obtener los siguientes resultados: (1) El Río Puripica presenta un caudal medio de 33,7 L/s. (2) El Río Purifica tiene un caudal medio de 75,7 L/s. (3) El Río Vilama tiene un caudal medio de 107 L/s. Lo anterior sugiere que la razón de aporte entre el Río Purifica y el Río Puripica es aproximadamente de 2:1 respectivamente; esto refleja que el sistema principal del Río Vilama proviene del Río Purifica y, este último, es aportado principalmente por las Termas de Puritama. Los datos de los aforos medidos se observan en el Anexo 19 y Anexo 20.

Se analizó los datos históricos de la Dirección General de Aguas (DGA) que se encuentra en la Estación Fluviométrica Canal Vilama en Vilama junto a los datos registrados en terreno, el cual corresponde al punto 29 (Fig. 16). Se observa, que al momento de la campaña de terreno, existe un aumento del caudal en el mes de mayo en comparación a los últimos 6 años. En general, se evidencia ciclos de crecidas y de sequía para el Canal Vilama, sin embargo, no es posible afirmar que actualmente se encuentra en una crecida o en una sequía debido a la carencia de información en los años 2018, 2020 y 2021. Por otra parte, es necesario evaluar el río semanalmente para obtener un resultado más representativo del caudal ya que el dato obtenido corresponde al 17 de mayo del 2022.

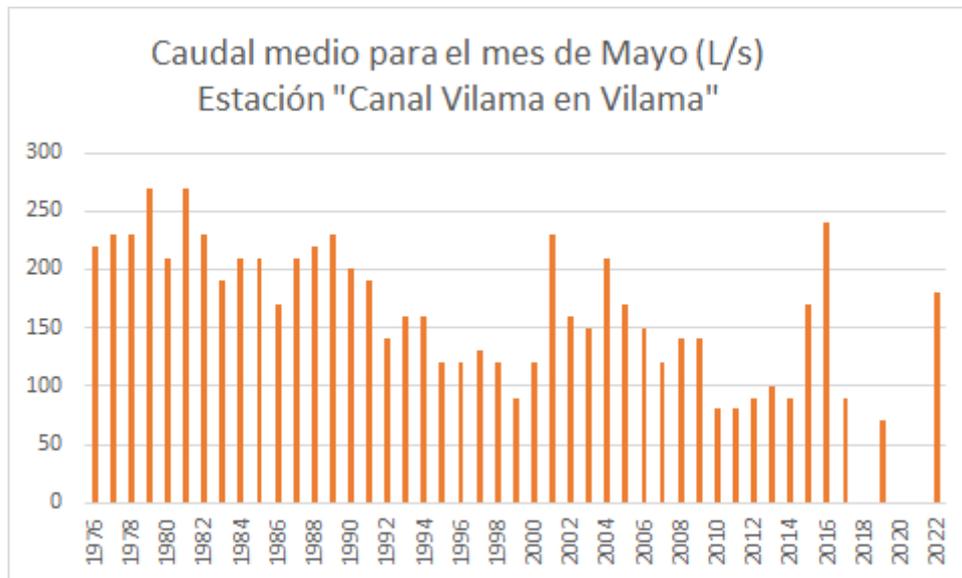


Fig. 16. Caudal medio para el mes de mayo en L/s de la Estación Fluviométrica Canal Vilama en Vilama.

Respecto a los sedimentos, en el Río Puripica el sedimento del río corresponde a gravas con arenas gruesas. Presenta selección moderada, los clastos presentes corresponden a fragmentos líticos de lavas andesíticas junto a fragmentos de las Ignimbritas Chaxas; debido al tamaño de los clastos en este sector la infiltración es mayor que en las quebradas de los ríos Vilama y Purifica.

En el Río Purifica el sedimento corresponde a una arena gravosa, posee mala selección, respecto a los clastos lo componen las arenas y arcillas de las termas y fragmentos de ignimbritas Chaxas y Puripicar; la capacidad de infiltración es menor respecto a la quebrada del Río Puripica.

En el Río Vilama el sedimento corresponde a arenas gravosas, presenta mala selección, los clastos difieren enormemente según el sector que atraviesa el río y estos están asociados a las formaciones con las que interactúa; la capacidad de infiltración es nula cuando las aguas atraviesan las coladas de lavas, mientras que cuando la base del lecho es la ignimbrita el Pelón su infiltración es menor a cuando atraviesa la Formación Vilama donde en ésta última es más alta.

Geoestadística de los sedimentos

Para el análisis estadístico del sedimento sólo se utilizaron los elementos trazas debido a que tienen mayor variación en sus concentraciones. Se trabajaron los resultados obtenidos en el laboratorio y se omitieron los elementos como el Rb, Ni, Co, Nb, Zr, Y y Sc debido a sus bajas concentraciones, lo que provocaba bajas correlaciones entre los elementos e induce error al trabajar con todos los elementos.

Para el Río Vilama, el ACP demuestra un modelo que explica un 66%, lo que es un buen indicador. Existen dos grupos para inferir el comportamiento de los sedimentos: (1) El Río Vilama, dependiendo del sector, tendrá cambios significativos en su composición; las coladas de lavas en el extremo norte tienen altas concentraciones de Cr, Zn y V; siendo el primer elemento el que se debe tomar con precaución debido a sus bajas correlaciones; en el límite sur presenta bajas concentraciones en estos elementos. (2) Corresponde a la bocatoma Vilama y el canal Vilama con altas concentraciones de Ba, sin embargo, esta aseveración no es respaldada por las correlaciones entre los elementos por lo que debe ser tomado con precaución. Por otro lado, el punto 34 de la Fig. 18 representa sedimentos con

grietas de desecación, que se caracterizan por su alto contenido de material fino, es por esto que las fracciones finas del sedimento tenderán a un alto contenido de Cu, S y Pb.

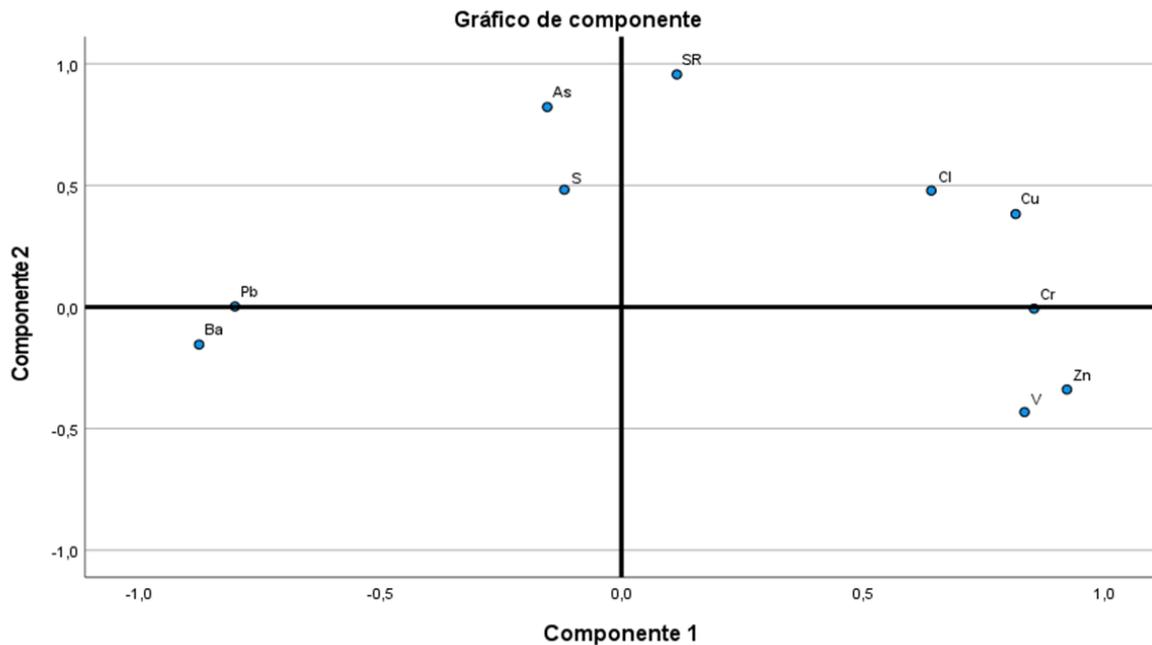


Fig. 17. Análisis de los componentes principales de los elementos trazas del Río Vilama.

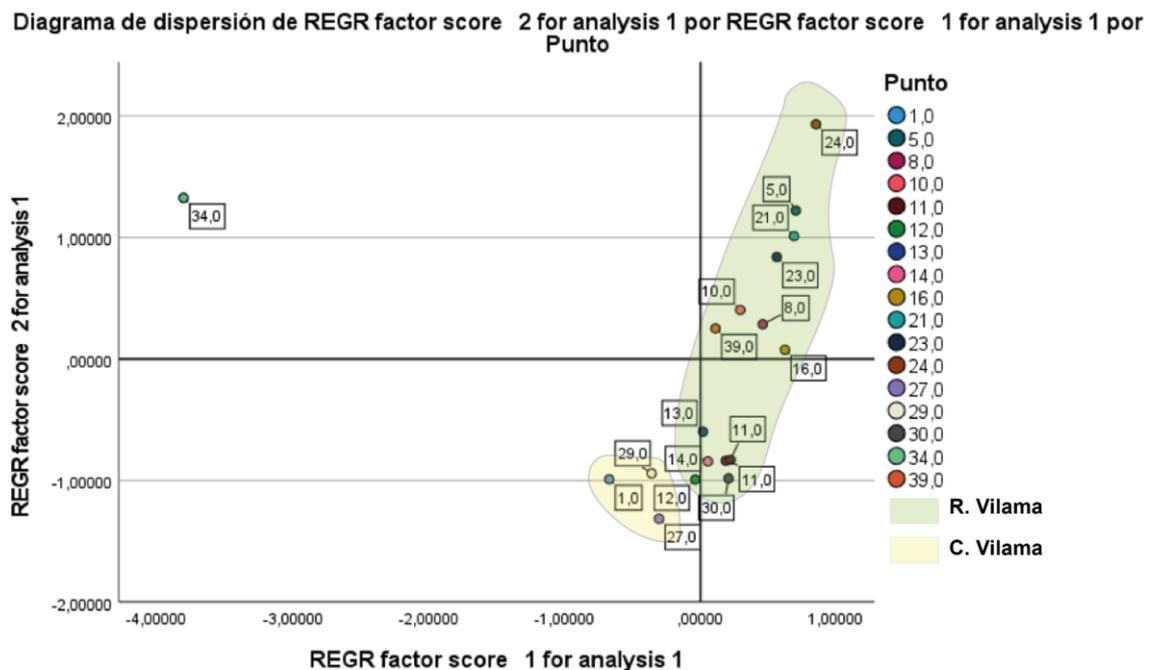


Fig. 18. Análisis de los componentes principales por puntos de los elementos trazas del Río Vilama.

Para el Río Puripica, el ACP demuestra un modelo responde a un 73% de los datos, lo que es indicativo de un buen modelamiento de los datos. Para este río se puede establecer la siguiente relación: en las nacientes (vertiente) (punto 6, Fig. 20) el sedimento tendrá altas concentraciones en Sr y a medida que avanza, aguas abajo, el río, punto 7 (Fig. 20), los niveles de Sr disminuirán y aumentarán en el S y As. Posteriormente, aguas abajo antes de llegar a la comunidad de Guatín se enriquece en Ba y Pb. Para la comunidad de Guatín no es posible determinar una concentración clara de algún elemento debido a la dispersión de los puntos en este análisis.

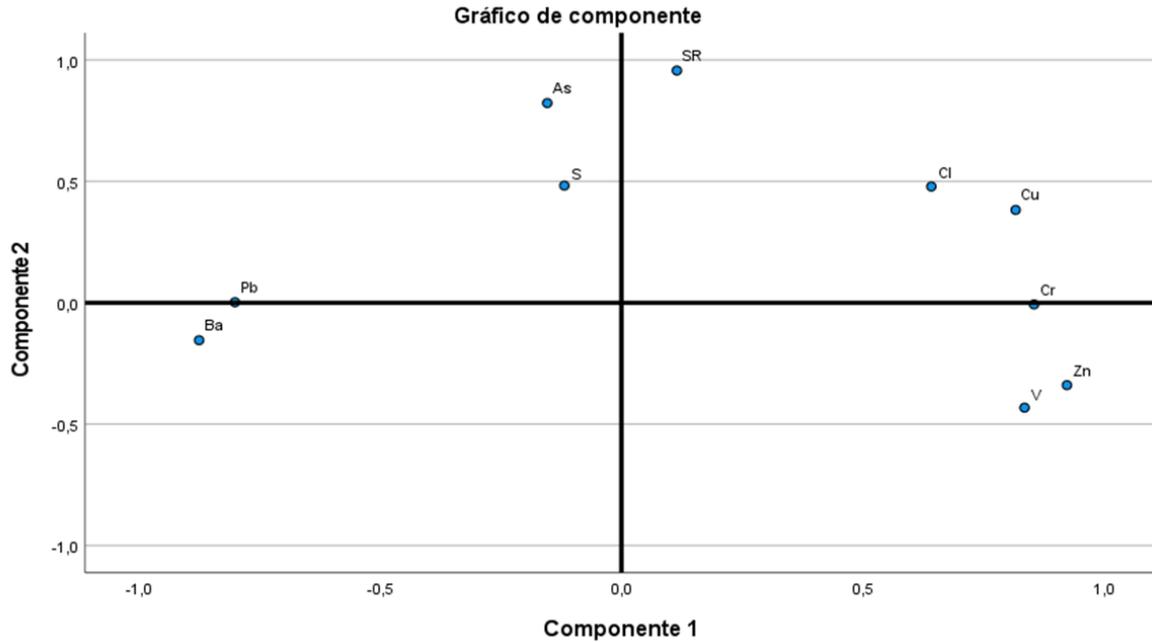


Fig. 19. Análisis de los componentes principales de los elementos trazas del Río Puripica.

Diagrama de dispersión de REGR factor score 2 for analysis 1 por REGR factor score 1 for analysis 1 por Punto

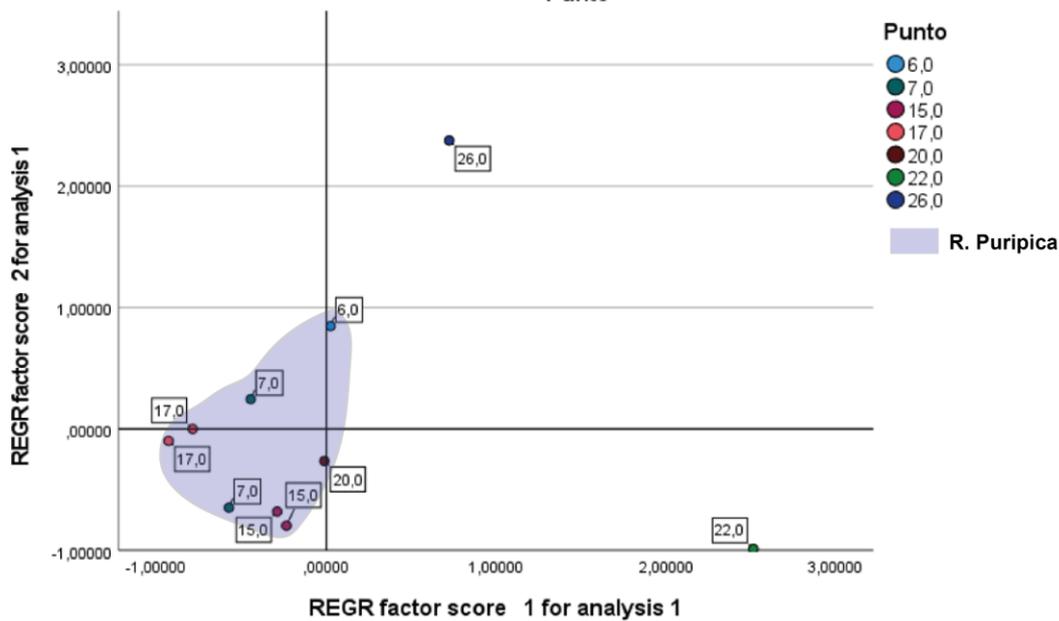


Fig. 20. Análisis de los componentes principales por puntos de los elementos trazas del Río Puripica.

Para el Río Puripica, en el caso del ACP, explica un 72%, por lo que es un buen indicador dentro de los datos analizados. En este río, las concentraciones varían enormemente según el sector: en las Termas de Puritama presenta altas concentraciones de S, Sr y Cr y en la combinación de aguas con el río Puripica, el sedimento incrementa las concentraciones de Pb, Zn, Ba y Cl, esto último se verifica con las altas correlaciones descritas en la Tabla A.22. Aguas abajo de este punto, el sedimento se enriquece en As y V para que posteriormente en la Comunidad de Guatín, incremente las concentraciones de S, Sr y Cr, en desmedro del Pb, Zn, Ba y Cl.

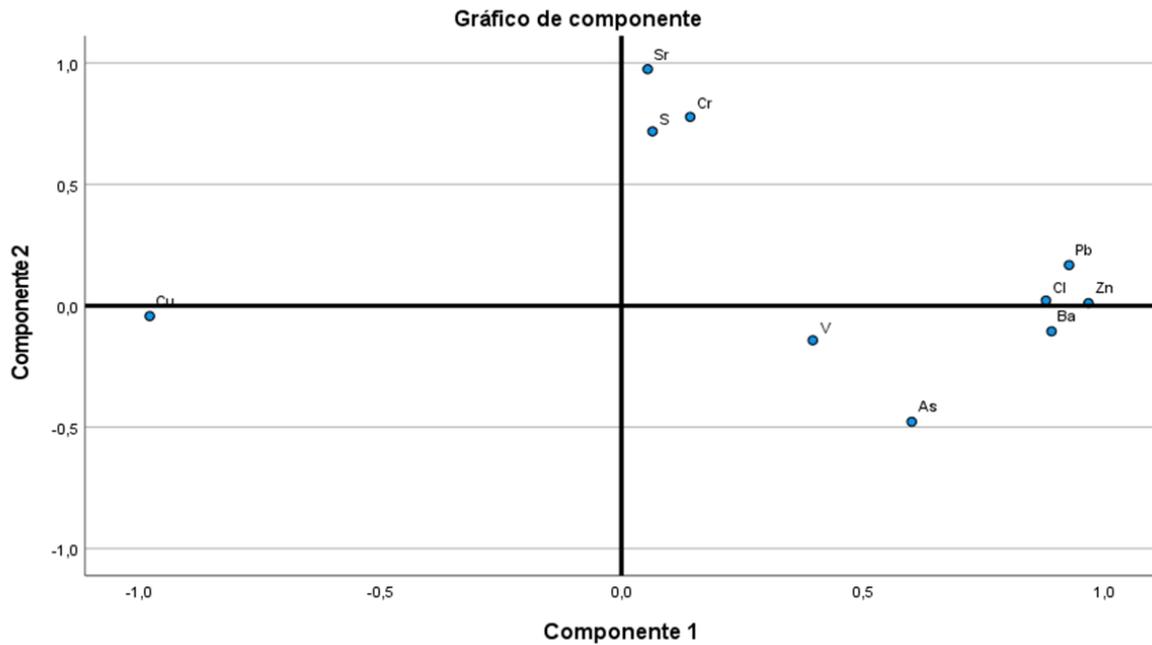


Fig. 21. Fig.A.16. Análisis de los componentes principales de los elementos trazas del Río Purifica.

Diagrama de dispersión de REGR factor score 2 for analysis 1 por REGR factor score 1 for analysis 1 por Punto

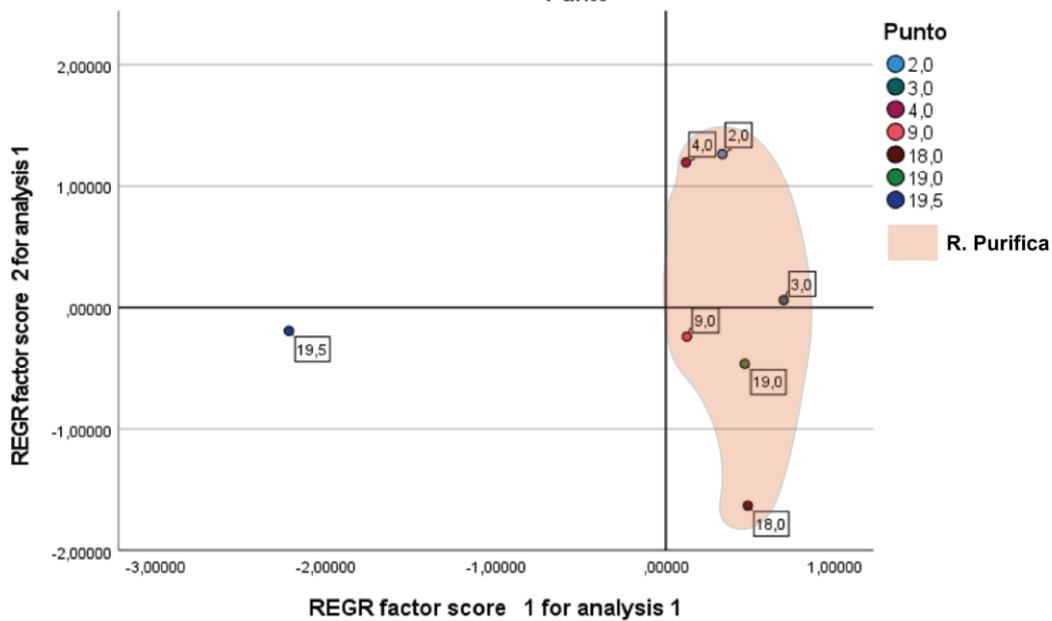


Fig. 22. Fig. A.17. Análisis de los componentes principales por puntos de los elementos trazas del Río Purifica.

Distribución elementos del Sedimento

Se observó la distribución de elementos trazas presentes en los sedimentos (Anexo 33, Anexo 34 y Anexo 35) estos son: Pb, As, Zn, Ba, Cr, Cu, V, S, Cl y Sr, de los cuales el Pb, As y V se encuentran sobre los límites máximos permitidos en suelos de normas internacionales (Canadiense), mientras que los niveles de Cl y Sr no están normados.

La fuente de Pb corresponde a la meteorización de las ignimbritas del sector, esto se ve reflejado en la distribución del Pb con altas concentraciones en el Río Puripica con las ignimbritas Chaxas y en el Río Vilama con las ignimbritas El Pelón. A su vez, la anomalía registrada en la bocatoma se puede asociar a actividades antropogénicas como las remociones de suelo, puesto que la acumulación de este elemento se encontraría en el Horizonte A de los suelos, capa cercana a la superficie.

El As supera los valores de las normas internacionales descritas anteriormente (menores a 10 mg/Kg para la estadounidense y menores a 12 mg/Kg para la canadiense), sin embargo, existen varias muestras que no fueron detectadas por los análisis de laboratorio por FRX, por lo que su dispersión en la zona es muy alta. Este elemento tiende a concentrarse dentro de la matriz fina de los sedimentos, como es el caso de las Termas de Puritama.

El V tiene concentraciones moderadas en las quebradas Purifica y Puripica; y una gran acumulación en la bocatoma de Vilama. En general, el V tiende a acumularse en el horizonte A de los suelos (Adriano, 2001) por lo que la anomalía en la bocatoma está asociado a actividades antropogénicas como la remoción de suelos. Su origen es explicado en el modelamiento de las aguas, no obstante, se concluye que este elemento tiene una preferencia por la fase sólida que por la líquida.

El resto de los elementos están asociados a la meteorización y erosión de las rocas por las que circulan las aguas como el caso del Ba, Zn, Cr y Sr; otros, se vinculan a la acumulación en sedimentos finos de aguas termales como el Cu y otros a la precipitación en evaporitas a las orillas de los ríos como el S y el Cl.

Conclusiones

Las aguas del Río Vilama y sus afluentes son, en general, sulfatadas sódicas, presentan un pH alcalino a neutro con alto contenido de sales y metales disueltos, los cuales están dados por los altos valores de E.C. y los TDS de cada río. Los altos niveles del Cl y Na se encuentran muy relacionados con el clima árido y la escasez de lluvias en el sector. Mientras que el SO_4^{2-} , está controlada por el volcanismo adyacente a la Cuenca del Salar de Atacama, el cual es facilitado por las Termas de Puritama. Lo anterior, explica el origen natural de estas concentraciones y no es debido a agentes antrópicos, ya que estos últimos no fueron detectados durante la campaña de terreno.

Las aguas presentan altos contenidos de B, Li y As, los cuales están asociados a un origen natural por la interacción de las aguas con las unidades geológicas presentes en el sector y principalmente con aportes hidrotermales, asociados a un sistema geotermal de baja entalpía.

La composición de los sedimentos transportados por el río no afecta, de manera significativa, la composición de las aguas debido a la baja correlación que existe entre los elementos disueltos en las aguas y la concentración de estos, en los sedimentos de un mismo punto de muestreo. Su relación está dada principalmente por agentes externos como la meteorización, la lixiviación y las actividades antropogénicas, por lo que sus interacciones están dadas por una escala de tiempo distintas una de otra.

El sedimento transportado en el Río Vilama y Purifica corresponde a arenas gravosas, por su parte, el río Puripica transporta gravas arenosas, por lo que la capacidad de infiltración en los sedimentos es mayor en el Río Puripica respecto a los ríos Vilama y Purifica.

El Río Purifica aporta mayor flujo de agua superficial que el Río Puripica al Río Vilama, con una relación de 2:1. El Río Puripica se caracteriza por el aporte de Sr y Ba y el río Purifica As, V y Li .

El alto grado de fracturamiento de las ignimbritas favorece la infiltración de las aguas meteóricas. Estas facturas se encuentran principalmente en casi toda la extensión del Río Puripica y en toda la extensión de las ignimbritas El Pelón en el Río Vilama. Si bien el aporte de las aguas de las vertientes ubicadas a lo largo del cauce de los ríos no es significativo, es un aporte permanente y se podría acentuar en los periodos de lluvia, generando cambios en la composición de las aguas de los ríos como en la dilución de estas.

Las influencias antrópicas se asocian a la dirección del flujo de las aguas superficiales producto de la canalización para su aprovechamiento tanto en Guatin como en Vilama. Además, las remociones de suelos permiten la liberación de elementos como el Mn hacia las aguas y el Pb, V y Cr en los sedimentos.

Sugerencias

En base a los resultados obtenidos se sugieren 3 puntos para el monitoreo de las aguas superficiales de los Ríos, (1) Las Termas de Puritama, ya que estas aportan la mayor cantidad de As, Li y B los cuales son elementos que más afectan a las aguas para su aprovechamiento. (2) La confluencia de los ríos Purifica y Puripica, toda vez que en este punto ocurre la mezcla de estas aguas y se puede estudiar de mejor manera la relación de aportes de ambos ríos. (3) La Estación Fluviométrica Canal Vilama en Vilama, lo que permite monitorear tanto el caudal como la calidad de las aguas para su uso.

Se sugiere contar con una red de monitoreo hidroquímico en los tres cursos de agua, que sean puntos permanentes en el tiempo y de frecuencia trimestral.

Se sugiere un estudio hidrogeológico mediante técnicas que permitan conocer la hidrodinámica de las aguas subterráneas y así, poder generar un balance hídrico que permita una correcta gestión del uso de las aguas.

Además, se sugiere para el estudio de la geoquímica de los sedimentos una malla de muestreo regular con el fin de obtener resultados más concretos.

Referencias

Adriano, D. C. (2001). Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals (Vol. 860). New York: Springer.

Aguilera, F. A. (2008). Origen Y Naturaleza De Los Fluidos En Los Sistemas Volcánicos, Geotermales Y Termales De Baja Entalpía De La Zona Volcánica Central (Zvc) Entre Los 17°43'S Y 25°10'S [Tesis doctoral, Universidad Católica del Norte]. Repositorio ANID. http://repositorio.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/180153/AGUILERA_FELIPE_1125D.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Aravena, H., Suzuki, O., Pena, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H., Grilli, A., (1999). Isotopic composition and origin of the precipitation in northern Chile. *App. Geochem.* 14, 411-422.

Bobst, A.L., Lowenstein, T.K., Jordan, T.E., Godfrey, L.V., KU, T.-L., y Luo, S., (2001), A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 173, p. 21–42

Caro, R. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Informe final, año 2004.

Carron, J. P., & Lagache, M. (1980). Étude expérimentale du fractionnement des éléments Rb, Cs, Sr et Ba entre feldspaths alcalins, solutions hydrothermales et liquides silicatés dans le système Q. *Ab. Or. H₂O à 2 kbar entre 700 et 800° C. Bulletin de Minéralogie*, 103(6), 571-578.

CCREM (Canadian Council of Resource and Environment Ministers). (1987). Canadian water quality guidelines. The Task Force on Water Quality Guidelines of the Canadian Council of Resource and Environment Ministers.

DGA, 2007. Manual de Normas y Procedimientos del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Departamento de Conservación y Protección de recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas, Chile

Dogan, M., & Dogan, A. U. (2007). Arsenic mineralization, source, distribution, and abundance in the Kutahya region of the western Anatolia, Turkey. *Environmental Geochemistry and Health*, 29(2), 119-129.

Fischer, R. P. (1975). VANADIUM RESOURCES IN TITANIFEROUS MAGNETITE DEPOSITS.

Garreaud, R.D., (1999). Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. *Mon. Weather Rev.* 127, 901-921.

Goguel, R. 1983. The rare alkalis in hydrothermal alteration at Wairakai and Broadlands geothermal fields, NZ. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 47, 429 – 437

Han, F. X. (2007). *Biogeochemistry of trace elements in arid environments* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.

Henley, R., Truesdell, A., Barton, P., Whitney, J. (1984). Fluid-mineral Equilibria in Hydrothermal Systems. *Reviews in Economic Geology*, Vol. 1, 267 p.

Henríquez, S.; Becerra, J.; Arriagada, C.. 2014. Geología del Área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 171. 1 mapa escala 1:100.000. Santiago

INN. (1987). Norma Chilena (NCh) 1333 Of. 78 Modificada 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

Johnson, A.M., (1976). The climate of Peru, Bolivia, and Ecuador. In: Schwerdtfeger, W. (Ed), *Climates of Central and South America, World Survey of Climatology*, vol. 12. Elsevier, Amsterdam, pp. 147 - 218.

Johnson, G., & Zhang, H. (2007). Classification of irrigation water quality. Oklahoma Cooperative Extension Service.

Lahsen, A. (1976). La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile. 1 Congreso Geológico Chileno, Actas, 81 05 - 81 27. Antofagasta.

Lowenstein, T. K., Hein, M. C., Bobst, A. L., Jordan, T. E., Ku, T. L., & Luo, S. (2003). An assessment of stratigraphic completeness in climate-sensitive closed-basin lake sediments: Salar de Atacama, Chile. *Journal of Sedimentary Research*, 73(1), 91-104.

Miller, A., (1976). The climate of Chile. In: Schwerdtfeger, W. (Ed), *Climates of Central and South America, World Survey of Climatology*, vol. 12. Elsevier, Amsterdam, pp. 113 - 145.

Miras Ruiz, A. (1991). Geoquímica y mineralogénesis de los depósitos de barita de Badajoz y Sevilla:(zona central de Ossa-Morena).

Muñoz, M. O., Bhattacharya, P., Sracek, O., Ramos, O. R., Aguirre, J. Q., Bundschuh, J., & Maity, J. P. (2015). Arsenic and other trace elements in thermal springs and in cold waters from drinking water wells on the Bolivian Altiplano. *Journal of South American Earth Sciences*, 60, 10-20.

NCh, N. C. O. N. (1984). 409/1. Agua potable—parte 1: Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, INN. Santiago.

Owens, P., Batalla, R. J., Collins, A. J., Gomez, B., Hicks, D. M., Horowitz, A. J., ... & Trustrum, N. A. (2005). Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. *River research and applications*, 21(7), 693-717. <https://doi.org/10.1002/rra.878>

Puchelt, H. (1967). Zur Geochemie des Bariums im exogenen Zyklus (Vol. 1964). Springer.

Revuelta, M. B., & González, R. F. (1986). Evolución geoquímica del estroncio en los procesos de dolomitización: Aplicación a las dolomías del Cretácico Inferior de la zona oeste de Cantabria. *Boletín geológico y minero*, 97(5), 122-131.

Risacher, F., & Alonso, H. (1996). Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de las aguas. *Andean Geology*, 23(2), 123-134

Scanlon, B. R., Stonestrom, D. A., Reedy, R. C., Leaney, F. W., Gates, J., & Cresswell, R. G. (2009). Inventories and mobilization of unsaturated zone sulfate, fluoride, and chloride related to land use change in semiarid regions, southwestern United States and Australia. *Water Resources Research*, 45(7).

Turekian, K. K., & Kulp, J. L. (1956). The geochemistry of strontium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 10(5-6), 245-296.

ANEXO

Resultados del Laboratorio

Se presenta las concentraciones de los iones mayores y los metales disueltos para las aguas por punto, en orden de aguas arriba hacia aguas abajo para cada río

Muestra	Ca ²⁺ meq/L	Mg ²⁺ meq/L	Na ⁺ meq/L	K ⁺ meq/L	HCO ₃ ⁻ meq/L	Cl ⁻ meq/L	SO ₄ ²⁻ meq/L	NO ₃ ⁻ meq/L	SAR	TDS mg/L	pH	C.E. mu*cm	T °C	
Río Puripica	6	2,570	2,616	5,233	0,491	3,443	1,250	3,997	0,034	4,036	671	7,119	1,117	21,70
	7	2,583	2,651	5,324	0,499	3,410	1,368	3,852	0,021	4,069	669	8,216	1,153	20,10
	15	2,533	2,606	5,207	0,486	3,541	4,798	3,935	0,001	4,053	796	8,190	1,327	14,35
	17	3,900	3,451	9,134	0,722	4,689	7,100	5,809	0,001	4,970	1175	8,290	2,096	14,00
	20	5,005	3,841	14,032	1,044	4,967	8,092	5,955	0,001	6,345	1386	8,508	2,570	12,20
	26	3,603	3,746	14,150	1,068	3,541	9,940	9,577	0,001	7,701	1513	8,708	2,510	17,10
Río Purifica	22	4,321	3,866	14,606	1,126	3,770	8,208	5,434	0,001	7,137	1295	8,686	2,580	16,80
	9	0,670	0,956	1,203	0,122	0,623	0,643	1,249	0,016	2,961	179	7,600	3,510	12,85
	2	4,573	4,777	15,716	0,933	3,066	7,325	8,120	0,021	6,723	1386	7,160	2,730	32,90
	3	4,633	4,860	16,111	0,953	3,148	5,083	8,037	0,018	6,789	1319	8,239	2,720	30,90
	18	4,620	4,809	15,594	0,937	3,131	7,156	10,472	0,011	6,615	1495	8,519	2,710	25,00
	19	4,631	4,826	15,777	0,949	3,131	8,747	10,535	0,005	6,673	1559	8,665	2,730	22,00
Río Vilama	4	4,599	4,808	15,816	0,947	3,000	9,824	10,493	0,016	6,725	1588	8,928	2,720	22,90
	5	4,576	4,567	15,607	0,936	3,148	5,765	9,431	0,029	6,827	1394	8,870	5,121	19,51
	8	4,555	4,665	15,694	0,983	3,000	8,180	9,681	0,003	6,808	1485	8,776	2,690	14,60
	10	4,495	4,591	15,407	0,965	3,279	7,184	9,869	0,003	6,783	1467	8,776	2,690	14,60
	11	4,615	4,580	15,759	0,943	1,902	7,923	9,681	0,008	6,855	1410	8,710	2,452	14,26
	12	4,561	4,728	15,820	1,002	2,787	9,145	9,744	0,003	6,813	1514	8,750	2,957	10,07
	13	4,570	4,729	15,746	0,986	3,197	8,972	9,994	0,003	6,773	1543	8,735	2,730	10,00
	14	4,557	4,716	15,846	1,000	3,098	10,450	9,785	0,002	6,835	1582	8,750	2,957	10,07
	16	4,707	4,794	15,750	0,958	3,393	5,565	9,556	0,003	6,632	1416	8,517	2,740	9,00
	21	4,702	4,811	15,724	0,972	3,377	7,071	10,181	0,002	6,612	1498	8,540	2,948	9,80
Río Vilama	25	4,690	4,797	15,703	0,968	3,443	5,850	9,827	0,001	6,621	1441	8,540	2,948	9,80
	30	4,635	4,687	15,442	0,960	3,443	4,798	9,702	0,002	6,625	1389	8,570	2,670	13,40
	23	4,603	4,708	15,537	0,963	3,262	5,709	9,556	0,001	6,675	1405	8,642	2,710	14,30
	24	4,284	4,720	15,590	0,982	3,246	8,236	9,473	0,001	6,925	1485	8,630	2,804	16,12
	1	4,819	4,668	15,659	0,895	3,689	8,149	7,058	0,006	6,602	1402	8,260	5,198	16,53
	29	4,843	4,822	15,690	0,993	3,738	7,212	9,869	0,005	6,493	1513	8,300	3,090	15,05
	28	4,838	4,808	15,642	0,947	3,836	8,803	5,184	0,005	6,486	1347	8,300	2,964	13,69
	27	4,852	4,810	15,590	0,943	3,656	8,547	9,806	0,005	6,454	1548	8,250	2,959	11,75

Anexo 1. Tabla con los iones mayores, SAR, TDS, pH, C.E. y temperatura de los ríos. Se encuentra ordenados de aguas arriba hacia aguas abajo.

	Muestra	As	B	Ba	Li	Mn	Si	Sr	V
		mg/L							
Río Puripica	6	0,274	5	0,024	1,041	0	40,25	0,657	0,065
	7	0,258	5	0,024	1,048	0	40,4	0,652	0,064
	15	0,233	4	0,031	0,992	0	38,58	0,638	0,055
	17	0,338	8	0,032	2,074	0	44,03	1,043	0,061
	20	0,443	13,06	0,04	3,845	0	46,34	1,459	0,071
	26	0,38	13,27	0,034	3,805	0	46,65	1,325	0,075
	22	0,444	13,7	0,038	3,962	0	48,1	1,438	0,08
Río Purifica	9	0,1	0,907	0	0,102	0	34,16	0,09	0,032
	2	0,765	11,81	0	3,71	0	49,13	0,954	0,085
	3	0,787	12,02	0	3,778	0	49,94	0,963	0,086
	18	0,77	11,82	0	3,691	0	48,9	0,96	0,085
	19	0,767	11,93	0	3,723	0	49,26	0,957	0,086
	4	0,713	11,89	0	3,713	0	48,98	0,959	0,087
Río Vilama	5	0,698	12,16	0,012	3,385	0	48,46	1,044	0,085
	8	0,706	12,19	0,014	3,784	0	48,22	1,047	0,086
	10	0,692	12,07	0,013	3,718	0	47,67	1,035	0,085
	11	0,693	12,17	0,013	3,407	0	48,04	1,057	0,089
	12	0,71	12,44	0,014	3,837	0	48,92	1,063	0,087
	13	0,695	12,43	0,015	3,833	0	48,67	1,048	0,085
	14	0,672	12,41	0,014	3,837	0	48,69	1,049	0,087
	16	0,697	12,18	0,016	3,747	0	48,71	1,066	0,077
	21	0,693	12,36	0,015	3,873	0	48,33	1,065	0,081
	25	0,712	12,37	0,015	3,829	0	48,3	1,058	0,081
	30	0,656	12,03	0,018	3,675	0	48,3	1,059	0,076
	23	0,644	12,1	0,019	3,765	0	48,33	1,064	0,076
	24	0,71	12,12	0,018	3,721	0	48,57	1,044	0,078
	1	0,712	11,5	0,018	3,143	0,014	46,48	1,078	0,06
29	0,66	11,74	0,018	3,547	0,009	47,28	1,097	0,06	
28	0,696	11,73	0,018	3,53	0,014	47,08	1,096	0,058	
27	0,686	11,74	0,018	3,501	0,016	47,16	1,089	0,057	

Anexo 2. Tabla con los elementos menores de las aguas. Se encuentra ordenados de aguas arribas hacia aguas abajo.

Estadística Básica para las Aguas

Se presenta la estadística descriptiva de los iones mayores (Na^+ , Ca^{+2} , K^+ , Mg^{+2} , SO_4^- , Cl^- , HCO_3^- y NO_3^-) y elementos traza (As, B, Ba, Li, Mn, Si, Sr, V) disueltos, obtenidos de los ensayos de laboratorio de las aguas del Río Vilama y los ríos afluentes.

	Río Vilama							
	Na+	Ca+2	K+	Mg+2	SO4-	Cl-	HCO3-	NO3
	mg/L							
Media	359,990	92,969	37,700	57,340	442,399	260,447	196,992	0,247
Mediana	360,700	92,490	37,740	57,380	466,000	280,900	200,000	0,200
Min	354,200	85,850	35,000	55,520	249,000	170,100	116,000	0,000
Max	364,300	97,230	39,170	58,620	489,000	370,500	234,000	1,800
DS	2,778	2,954	1,050	1,018	60,592	54,871	27,187	0,414

Anexo 3. Tabla estadística descriptiva de los iones mayores de las aguas del río Vilama.

	Río Puripica							
	Na+	Ca+2	K+	Mg+2	SO4-	Cl-	HCO3-	NO3
	mg/L							
Media	200,539	67,868	28,450	38,954	251,876	160,187	235,871	1,652
Mediana	210,000	72,210	28,230	41,950	261,000	251,700	216,000	0,000
Min	119,700	50,760	18,990	31,680	185,000	44,300	208,000	0,000
Max	335,800	100,300	44,040	46,990	460,000	352,400	303,000	2,100
DS	103,773	19,620	11,566	7,343	96,766	122,156	39,251	0,861

Anexo 4. Tabla estadística descriptiva de los iones mayores de las aguas del río Puripica.

	Río Purifica							
	Na+	Ca+2	K+	Mg+2	SO4-	Cl-	HCO3-	NO3
	mg/L							
Media	236,506	66,997	82,927	44,714	324,085	175,518	144,513	0,818
Mediana	362,000	92,375	37,070	58,455	446,500	256,700	189,000	1,000
Min	27,660	13,420	36,480	11,620	60,000	22,800	38,000	0,300
Max	370,400	92,850	4756,000	59,080	506,000	348,300	192,000	1,300
DS	137,081	32,251	1926,565	19,160	172,118	115,985	61,656	0,352

Anexo 5. Tabla estadística descriptiva de los iones mayores de las aguas del río Purifica.

	Río Vilama							
	As	B	Ba	Li	Mn	Si	Sr	V
	mg/L							
Media	0,690	12,099	0,016	3,649	0,013	48,066	1,062	0,076
Mediana	0,695	12,160	0,015	3,721	0,000	48,300	1,059	0,081
Min	0,644	11,500	0,012	3,143	0,000	46,480	1,035	0,057
Max	0,712	12,440	0,019	3,873	0,016	48,920	1,097	0,089
DS	0,021	0,279	0,002	0,205	0,006	0,692	0,018	0,011

Anexo 6. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas de las aguas del río Vilama.

Río Puripica								
	As	B	Ba	Li	Mn	Si	Sr	V
mg/L								
Media	0,329	7,813	0,031	2,005	0,000	43,340	0,967	0,067
Mediana	0,338	8,122	0,032	2,074	0,000	44,030	1,043	0,065
Min	0,233	4,411	0,024	0,992	0,000	38,580	0,638	0,055
Max	0,444	13,700	0,040	3,962	0,000	48,100	1,459	0,080
DS	0,087	4,428	0,006	1,430	0,000	3,737	0,382	0,009

Anexo 7. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas de las aguas del río Puripica.

Río Purifica								
	As	B	Ba	Li	Mn	Si	Sr	V
mg/L								
Media	0,542	7,745	0,000	2,044	0,000	46,329	0,646	0,073
Mediana	0,766	11,855	0,000	3,712	0,000	49,055	0,958	0,086
Min	0,100	0,907	0,000	0,102	0,000	34,160	0,090	0,032
Max	0,787	12,020	0,000	3,778	0,000	49,940	0,963	0,087
DS	0,271	4,486	0,000	1,479	0,000	6,168	0,355	0,022

Anexo 8. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas de las aguas del río Purifica.

Estadística Aplicada para las Aguas

Resultados del análisis estadístico de correlaciones de Pearson, varianzas del modelo y de componentes principales de los iones mayores y elementos traza disueltos, organizados de forma general en las aguas y para cada río observado (Vilama , Purifica y Puripica).

Matriz de correlaciones^a

	K	Mg	Ca	NO3	HCO3-	SO4-	Cl-	Na
K	1,000							
Mg	0,882	1,000						
Ca	0,920	0,953	1,000					
NO3	-0,451	-0,307	-0,364	1,000				
HCO3-	0,418	0,271	0,461	-0,296	1,000			
SO4-	0,774	0,864	0,764	-0,309	0,053	1,000		
Cl-	0,794	0,689	0,713	-0,540	0,289	0,629	1,000	
Na	0,947	0,968	0,948	-0,363	0,235	0,851	0,755	1,000

a. Determinante = 2,360E-6

Anexo 9. Tabla de correlación de Pearson de los iones mayores en las aguas.

Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	5,503	68,784	68,784	5,503	68,784	68,784
2	1,109	13,865	82,649	1,109	13,865	82,649
3	0,789	9,861	92,511			
4	0,312	3,904	96,415			
5	0,171	2,137	98,552			
6	0,092	1,146	99,697			
7	0,019	0,236	99,934			
8	0,005	0,066	100,000			

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Anexo 10. Tabla de análisis de los componentes principales de los iones mayores.

Matriz de correlaciones^a

	Si	B	Li	As	Sr	V	Ba	Mn
Si	1,000							
B	0,953	1,000						
Li	0,964	0,989	1,000					
As	0,905	0,800	0,839	1,000				
Sr	0,756	0,882	0,825	0,479	1,000			
V	0,810	0,716	0,733	0,688	0,516	1,000		
Ba	-0,224	-0,018	-0,113	-0,515	0,426	-0,267	1,000	
Mn	0,027	0,094	0,063	0,187	0,132	-0,463	0,057	1,000

a. Determinante = 3,024E-8

Anexo 11. Tabla de correlación de Pearson de los elementos trazas en las aguas.

Varianza total explicada

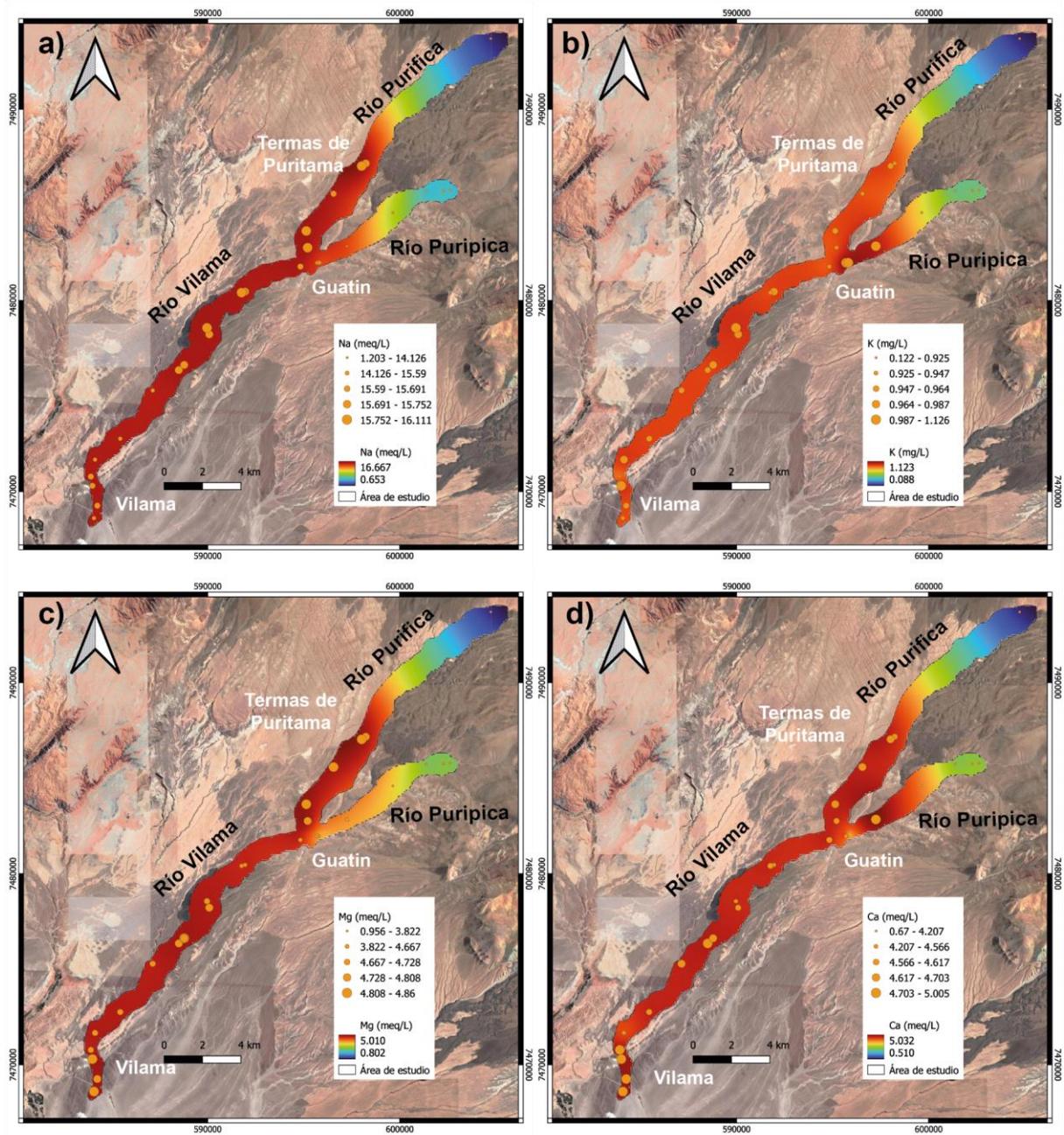
Compon ente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	5,011	62,635	62,635	5,011	62,635	62,635
2	1,565	19,559	82,194	1,565	19,559	82,194
3	1,237	15,466	97,661			
4	0,110	1,379	99,039			
5	0,043	0,543	99,582			
6	0,021	0,257	99,840			
7	0,010	0,119	99,958			
8	0,003	0,042	100,000			

Método de extracción: análisis de componentes principales.

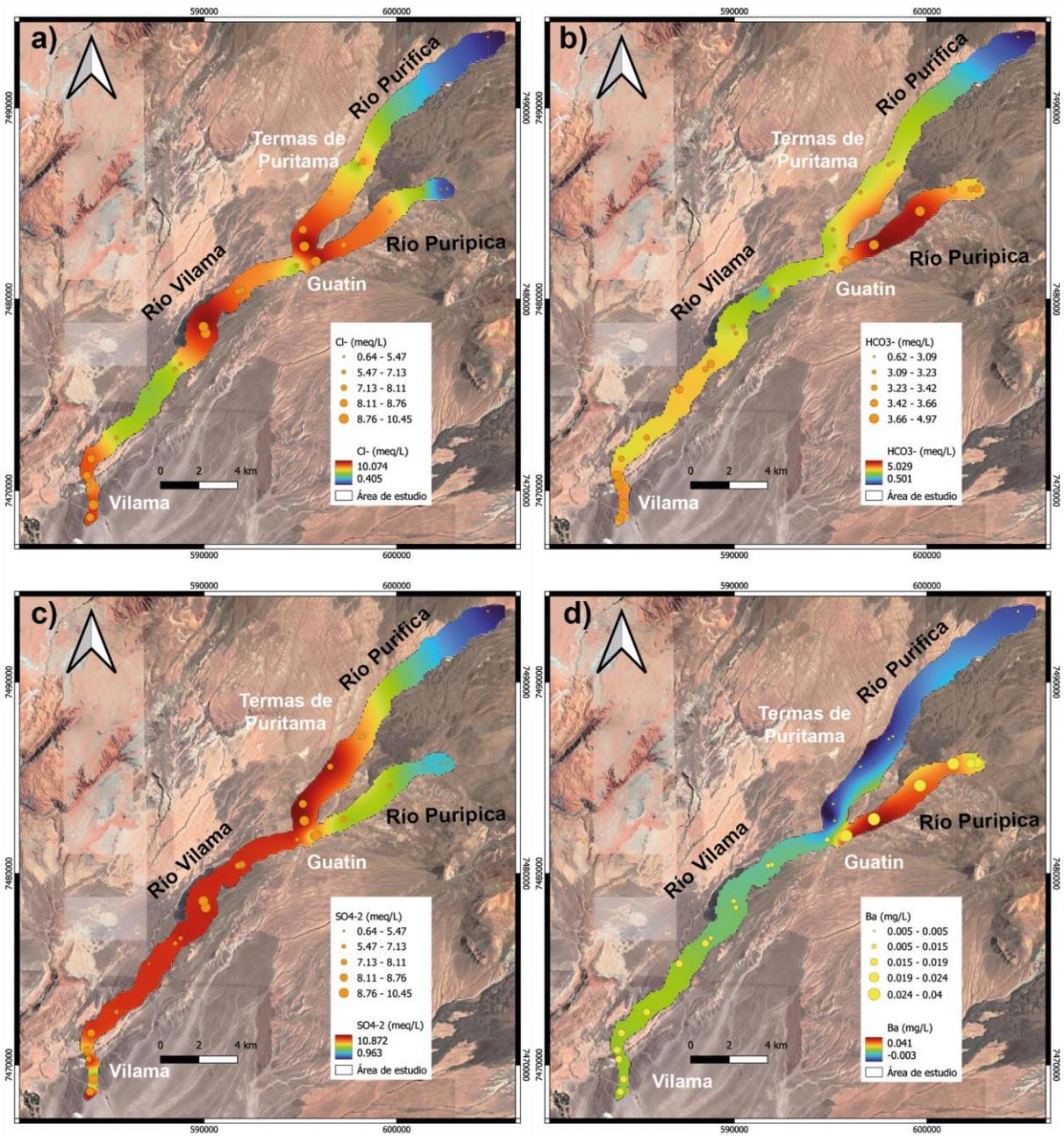
Anexo 12. Tabla de análisis de los componentes principales de los elementos trazas.

Modelamiento de los Elementos en las Aguas

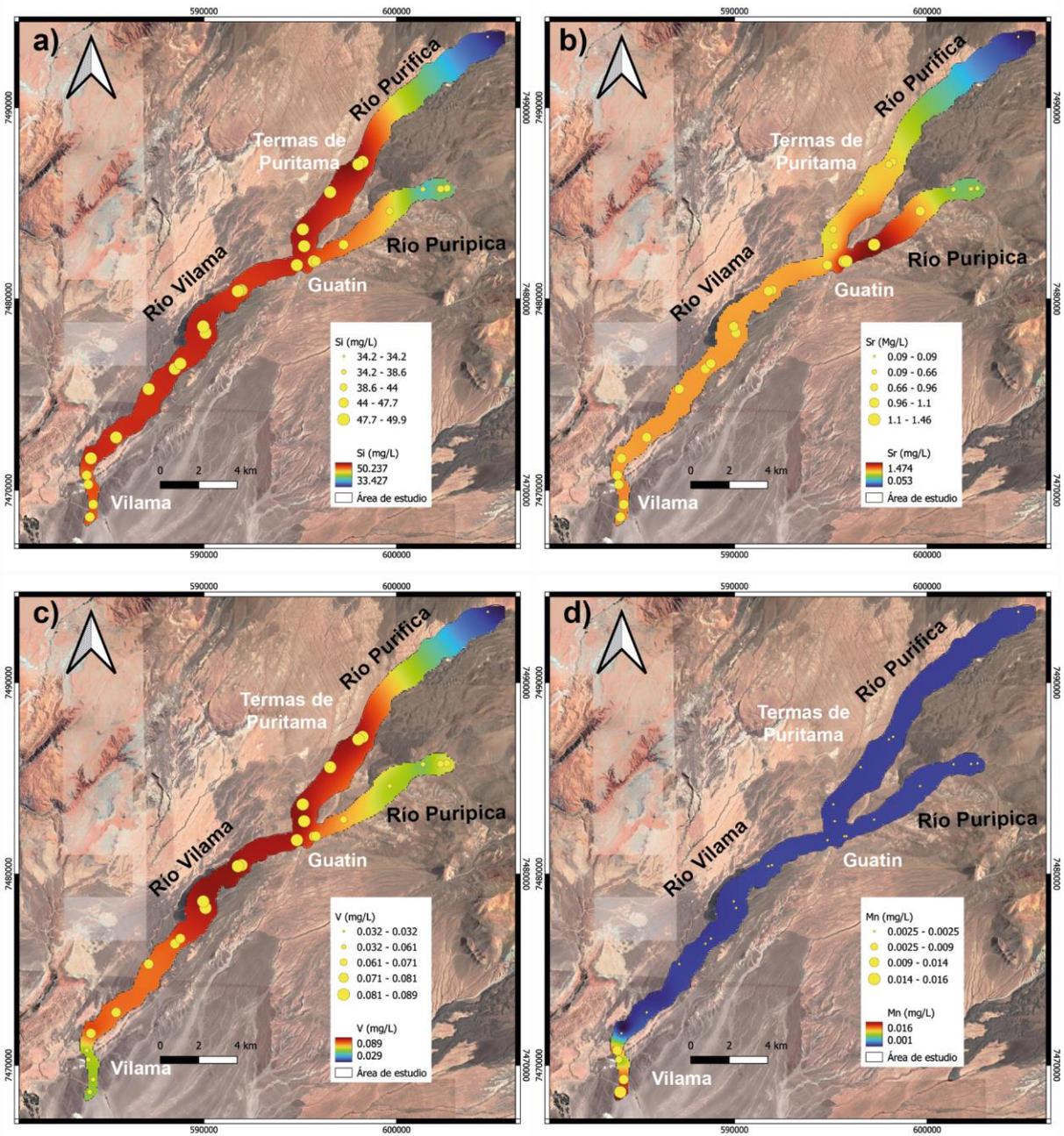
Modelos de distribución de elementos disueltos en las aguas del río vilama y sus afluentes en mg/L obtenidos a partir de los valores de ensayos de laboratorio



Anexo 13. Distribución espacial de los elementos en meq/L de (A) Na⁺, (B) K⁺, (C) Mg⁺² y (D) Ca⁺².



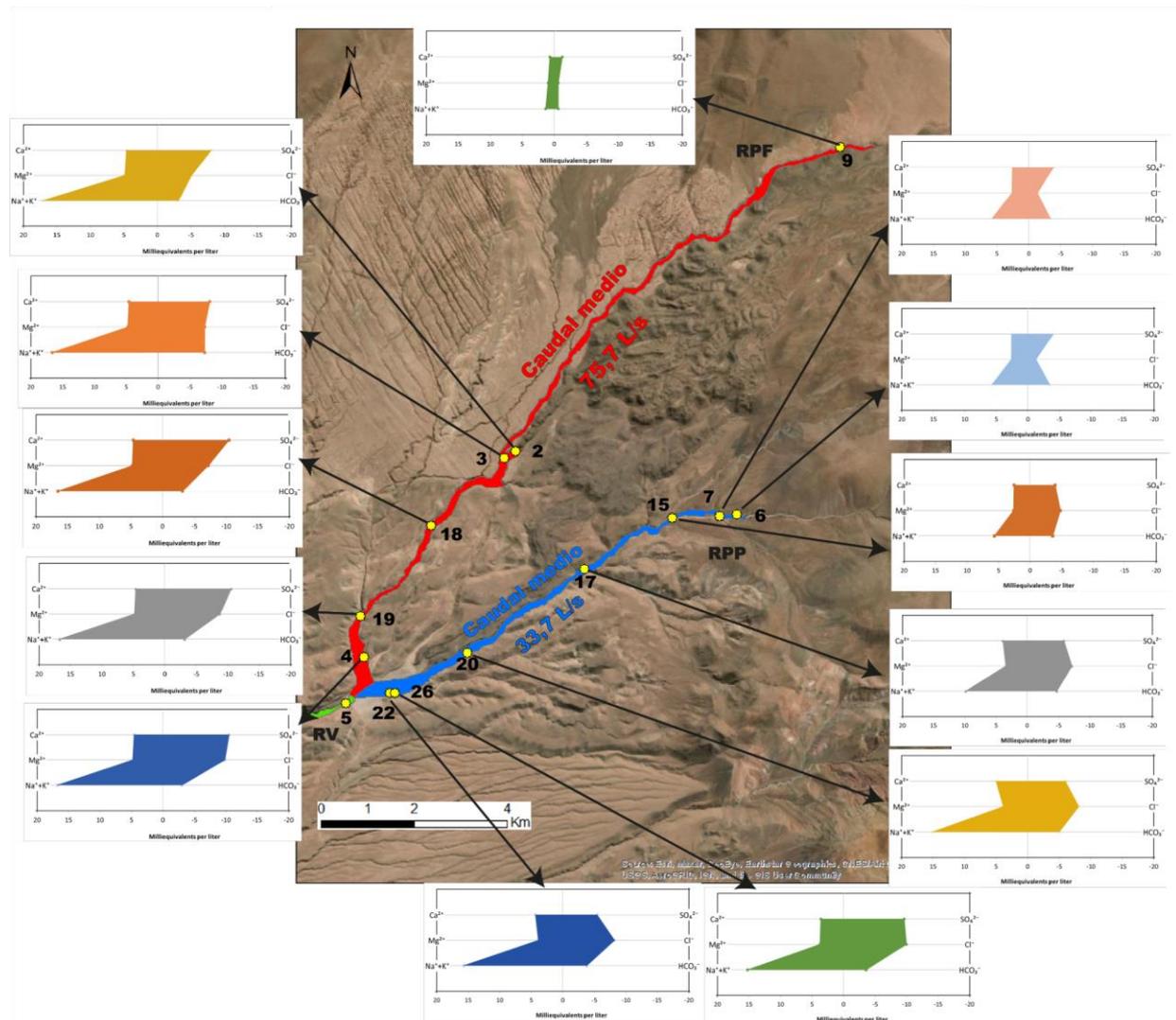
Anexo 14. Distribución espacial de los elementos en meq/L de (A) Cl⁻, (B) HCO₃⁻, (C) SO₄⁻², (D) Ba.



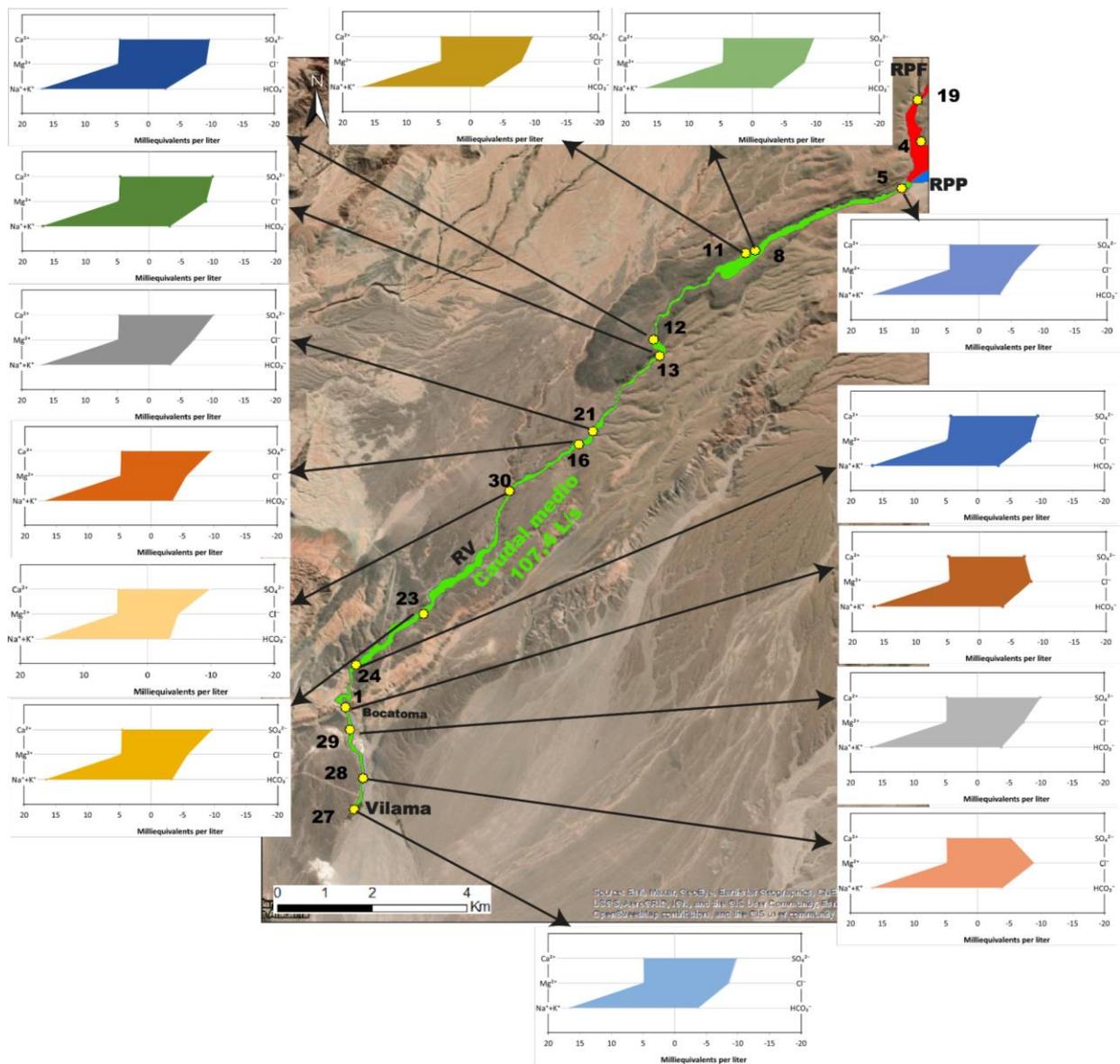
Anexo 15. Distribución espacial de los elementos en mg/L de (A) Si, (B) Sr, (C) V, (D) Mg.

Diagramas de Stiff

Mapas de evolución de Diagramas de Stiff en las aguas del Río Vilama y sus afluentes.



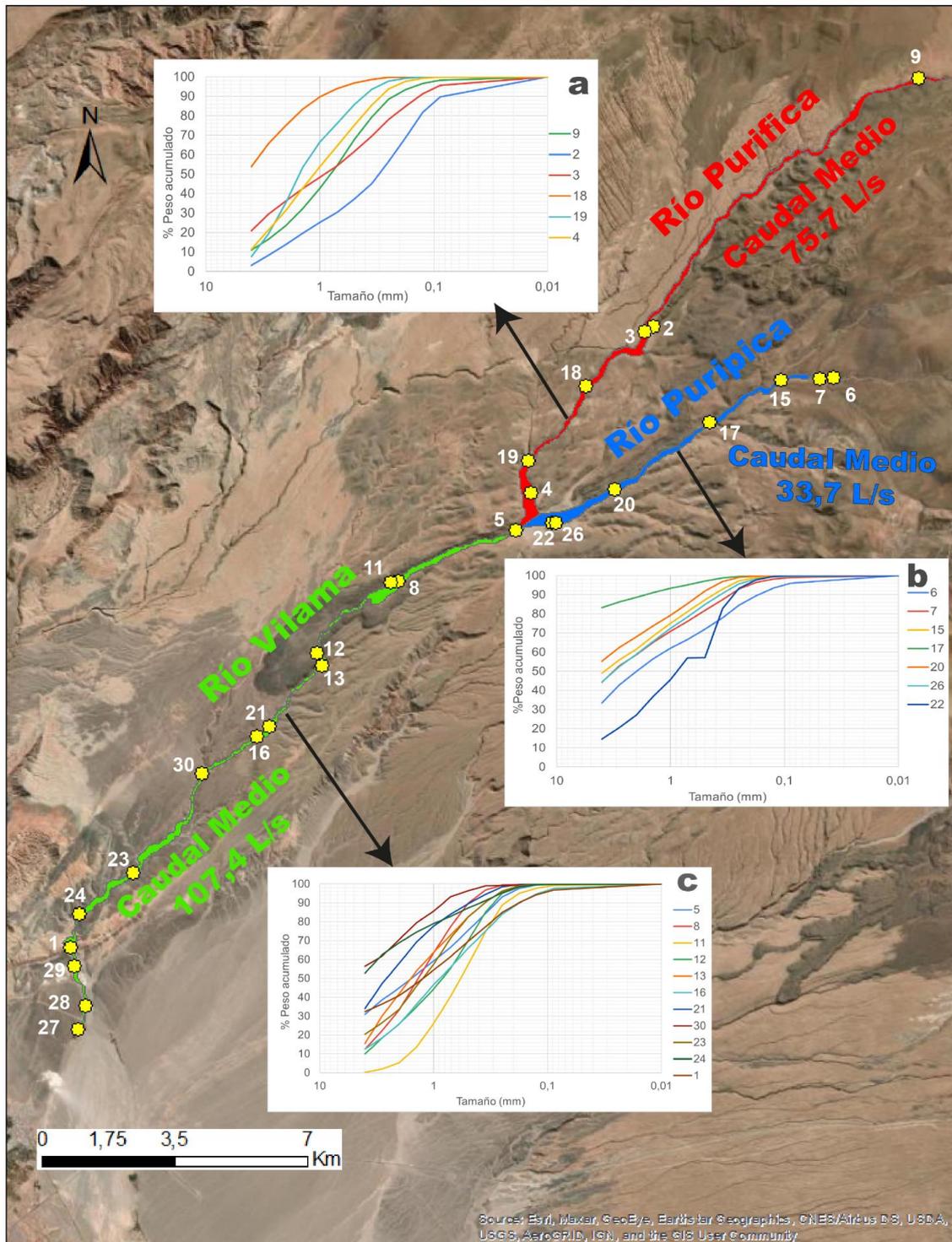
Anexo 16. Diagrama de Stiff por puntos del río Purifica y río Puripica, ambos con una evolución normal en sus iones, junto al caudal medio respectivamente (RV: Río Vilama, RPF: Río Purifica, RPP: Río Puripica).



Anexo 17. Diagrama de Stiff por puntos del río Vilama junto al caudal medio (RV: Río Vilama, RPF: Río Purifica, RPP: Río Puripica). Existen variaciones significativas en el SO_4^{2-} y HCO_3^- , según la unidad geológica que atraviesa el río.

Distribución del Peso Acumulado

Resultados de la distribución del peso acumulado del sedimento de los ríos para cada punto muestreado.



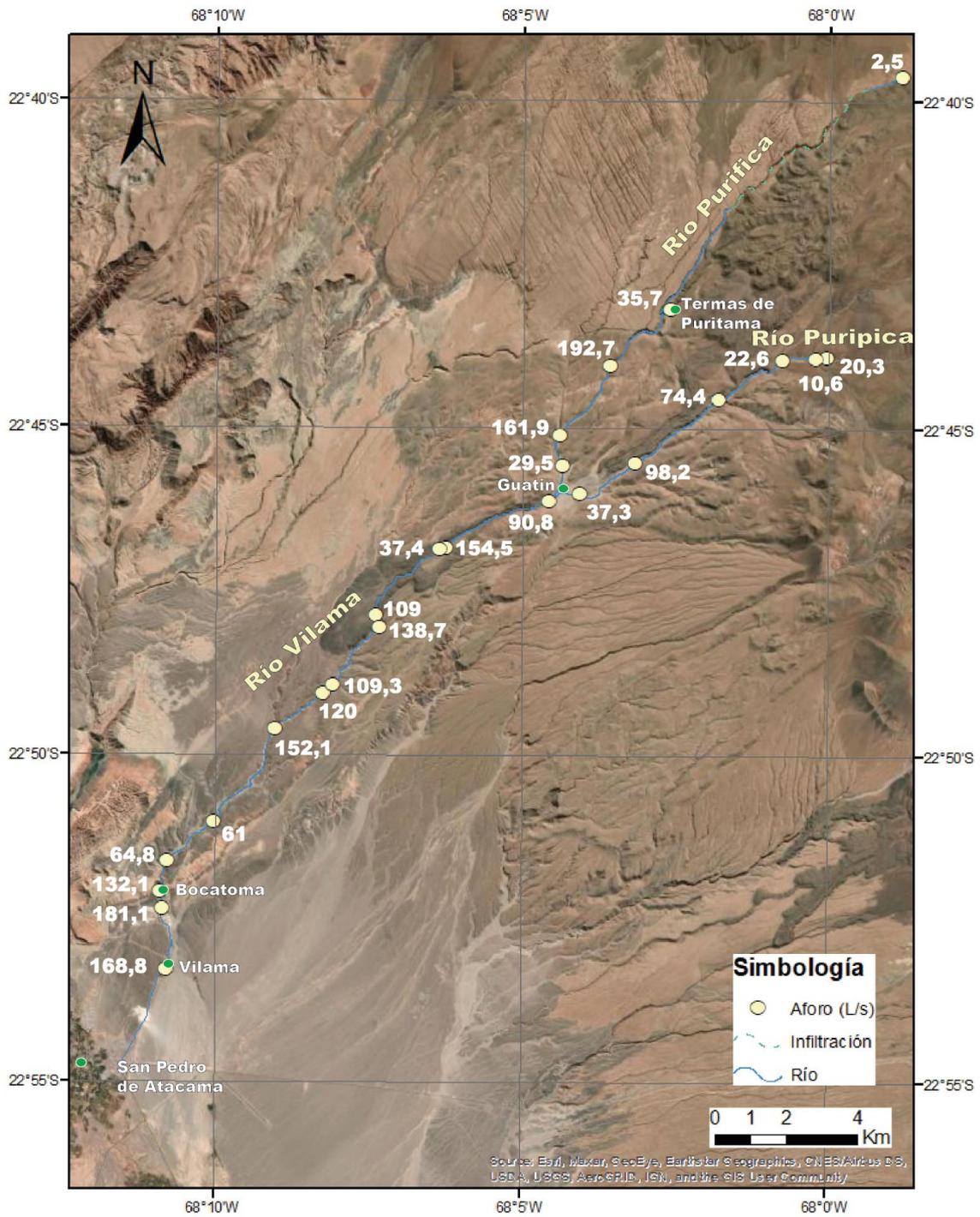
Anexo 18. Peso acumulado de los sedimentos analizados por punto y caudal medio por sector del río.

Aforo de los Caudales.

Caudales medidos para cada punto de trabajo durante la campaña de terreno.

Punto de muestreo	Fecha de medición	Grupo	Caudal (L/s)
1	11-05-2022	Río Vilama	132,1
2	12-05-2022	Río Puritama	35,7
4	12-05-2022	Río Purifica	29,5
5	12-05-2022	Naciente Río Vilama / Confluencia Ríos Purifica y Puripica	90,7
6	13-05-2022	Naciente Río Puripica	20,3
7	13-05-2022	Río Puripica	10,6
8	14-05-2022	Río Vilama	154,5
9	13-05-2022	Naciente Río Purifica	2,5
11	14-05-2022	Río Vilama	37,4
12	14-05-2022	Río Vilama	109,0
13	14-05-2022	Río Vilama	138,7
15	15-05-2022	Río Puripica	22,6
16	16-05-2022	Río Vilama	120,1
17	15-05-2022	Río Puripica	74,4
18	15-05-2022	Río Purifica	192,7
19	15-05-2022	Río Purifica	161,9
20	15-05-2022	Río Puripica	98,2
21	16-05-2022	Río Vilama	109,3
22	16-05-2022	Río Puripica	37,3
23	16-05-2022	Río Vilama	61,0
24	16-05-2022	Río Vilama	64,8
27	17-05-2022	Canal vilama	168,8
29	17-05-2022	Canal vilama	181,1
30	17-05-2022	Río Vilama	152,1

Anexo 19. Tabla de caudales medidos en los puntos de muestreo en L/s.



Anexo 20. Mapa de caudales medidos en L/s.

Estadística Básica para los Sedimentos

A continuación, se presenta la estadística descriptiva de los elementos trazas (S, Sr, Ba, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Pb, Y, Cl y As) obtenidos de los análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX) de los sedimentos transportados en el Río Vilama y los ríos afluentes.

Río Vilama						
mg/Kg						
	S	Sr	Ba	Cr	V	Ni
Media	117,745	461,043	381,356	56,869	149,981	10,913
Mediana	121	471	470	53	140	11
Min	67	384	165	34	120	10
Max	152	536	528	97	227	13
DS	24,311	40,020	129,044	15,616	31,773	0,827

Anexo 21. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas del sedimento del Río Vilama.

Río Vilama						
mg/Kg						
	Cu	Zn	Pb	Y	Cl	As
Media	20,549	89,591	74,497	27,925	467,887	15,392
Mediana	21	89	71	27	490	0
Min	17	78	63	24	351	0
Max	25	114	159	40	603	30
DS	2,060	9,124	22,193	3,638	71,216	8,648

Anexo 22. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas del sedimento del Río Vilama (Cont.)

Río Puripica						
mg/Kg						
	S	Sr	Ba	Cr	V	Ni
Media	130,877	479,021	506,238	52,462	200,100	11,567
Mediana	152	462,5	510,5	52	193	11
Min	56	441	424	43	165	11
Max	296	591	551	78	371	14
DS	70,483	47,801	39,612	10,031	59,330	0,966

Anexo 23. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas del sedimento del Río Puripica.

Río Puripica						
mg/Kg						
	Cu	Zn	Pb	Y	Cl	As
Media	20,421	105,395	85,099	27,362	347,951	31,338
Mediana	20,5	104	83	28	347,5	21
Min	16	93	55	23	224	0
Max	25	147	118	31	539	65
DS	2,875	14,987	19,428	2,877	92,000	21,355

Anexo 24. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas del sedimento del Río Puripica (Cont.)

Río Purifica						
mg/Kg						
	S	Sr	Ba	Cr	V	Ni
Media	114,598	466,365	428,226	67,121	160,616	11,983
Mediana	149	466	484	70	163	12
Min	31	420	160	47	133	0
Max	325	518	605	94	203	14
DS	95,707	31,769	141,241	16,018	24,348	4,756

Anexo 25. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas del sedimento del Río Purifica.

Río Purifica						
mg/Kg						
	Cu	Zn	Pb	Y	Cl	As
Media	31,408	98,790	45,442	30,650	469,373	20,070
Mediana	24	101	70	31	442	12
Min	21	0	4	28	0	0
Max	134	107	83	34	652	26
DS	41,372	38,432	27,793	2,138	204,860	12,166

Anexo 26. Tabla estadística descriptiva de los elementos trazas del sedimento del Río Purifica (Cont.)

Estadística Aplicada para los Sedimentos

Resultados del análisis estadístico de correlaciones de Pearson, varianzas de elementos trazas y los componentes principales en sedimentos transportados para cada río estudiado (Río Vilama, Puripica y Purifica).

Matriz de correlaciones^a

	S	Sr	Ba	Cr	V	Cu	Zn	Pb	Cl	As
S	1,000									
Sr	-0,544	1,000								
Ba	0,002	-0,011	1,000							
Cr	-0,463	0,279	-0,277	1,000						
V	-0,009	0,202	-0,449	0,518	1,000					
Cu	0,961	-0,408	-0,028	-0,484	0,101	1,000				
Zn	-0,419	0,475	-0,246	0,484	0,821	-0,242	1,000			
Pb	0,862	-0,681	0,035	-0,526	-0,089	0,848	-0,392	1,000		
Cl	-0,841	0,502	-0,161	0,486	0,126	-0,768	0,453	-0,614	1,000	
As	-0,129	0,363	-0,094	0,129	0,036	-0,101	0,078	-0,153	0,149	1,000

a. Determinante = 9,251E-6

Anexo 27. Tabla de correlación de Pearson de los elementos trazas en los sedimentos del Río Vilama.

Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,819	48,187	48,187	4,819	48,187	48,187
2	2,524	25,241	73,428	2,524	25,241	73,428
3	1,118	11,180	84,607			
4	0,756	7,559	92,166			
5	0,452	4,520	96,687			
6	0,199	1,989	98,676			
7	0,108	1,081	99,757			
8	0,024	0,242	99,998			
9	0,000	0,002	100,000			
10	1,802E-16	1,802E-15	100,000			

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Anexo 28. Tabla de análisis de los componentes principales de los elementos trazas del Río Vilama.

Matriz de correlaciones^a

	S	Sr	Ba	Cr	V	Cu	Zn	Pb	Cl	As
S	1,000									
Sr	0,504	1,000								
Ba	0,076	-0,200	1,000							
Cr	0,028	0,029	-0,673	1,000						
V	-0,080	-0,345	-0,664	0,815	1,000					
Cu	0,100	0,527	-0,634	0,627	0,499	1,000				
Zn	-0,233	-0,231	-0,730	0,801	0,954	0,660	1,000			
Pb	0,135	-0,220	0,586	-0,576	-0,561	-0,734	-0,697	1,000		
Cl	-0,188	0,457	-0,803	0,445	0,214	0,596	0,387	-0,399	1,000	
As	0,248	0,653	0,009	0,020	-0,433	0,113	-0,382	0,278	0,315	1,000

a. Determinante = ,000

Anexo 29. Tabla de correlación de Pearson de los elementos trazas en los sedimentos del Río Puripica.

Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	5,422	49,289	49,289	5,422	49,289	49,289
2	2,644	24,039	73,327	2,644	24,039	73,327
3	1,120	10,181	83,508			
4	0,813	7,391	90,899			
5	0,460	4,181	95,080			
6	0,341	3,096	98,176			
7	0,111	1,009	99,185			
8	0,068	0,616	99,801			
9	0,022	0,199	100,000			
10	1,514E-16	1,377E-15	100,000			
11	-4,734E-17	-4,304E-16	100,000			

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Anexo 30. Tabla de análisis de los componentes principales de los elementos trazas del Río Puripica.

Matriz de correlaciones^a

	S	Sr	Ba	Cr	V	Cu	Zn	Pb	Cl	As
S	1,000									
Sr	0,756	1,000								
Ba	-0,171	0,003	1,000							
Cr	0,259	0,683	0,015	1,000						
V	0,038	-0,042	0,334	0,088	1,000					
Cu	0,014	-0,089	-0,927	-0,189	-0,257	1,000				
Zn	-0,017	0,098	0,959	0,164	0,459	-0,968	1,000			
Pb	0,336	0,185	0,690	0,183	0,232	-0,886	0,821	1,000		
Cl	-0,011	-0,011	0,724	0,179	-0,027	-0,905	0,780	0,897	1,000	
As	0,061	-0,440	0,352	-0,368	0,560	-0,442	0,472	0,620	0,453	1,000

a. Determinante = ,000

Anexo 31. Tabla de correlación de Pearson de los elementos trazas en los sedimentos del Río Purifica.

Varianza total explicada

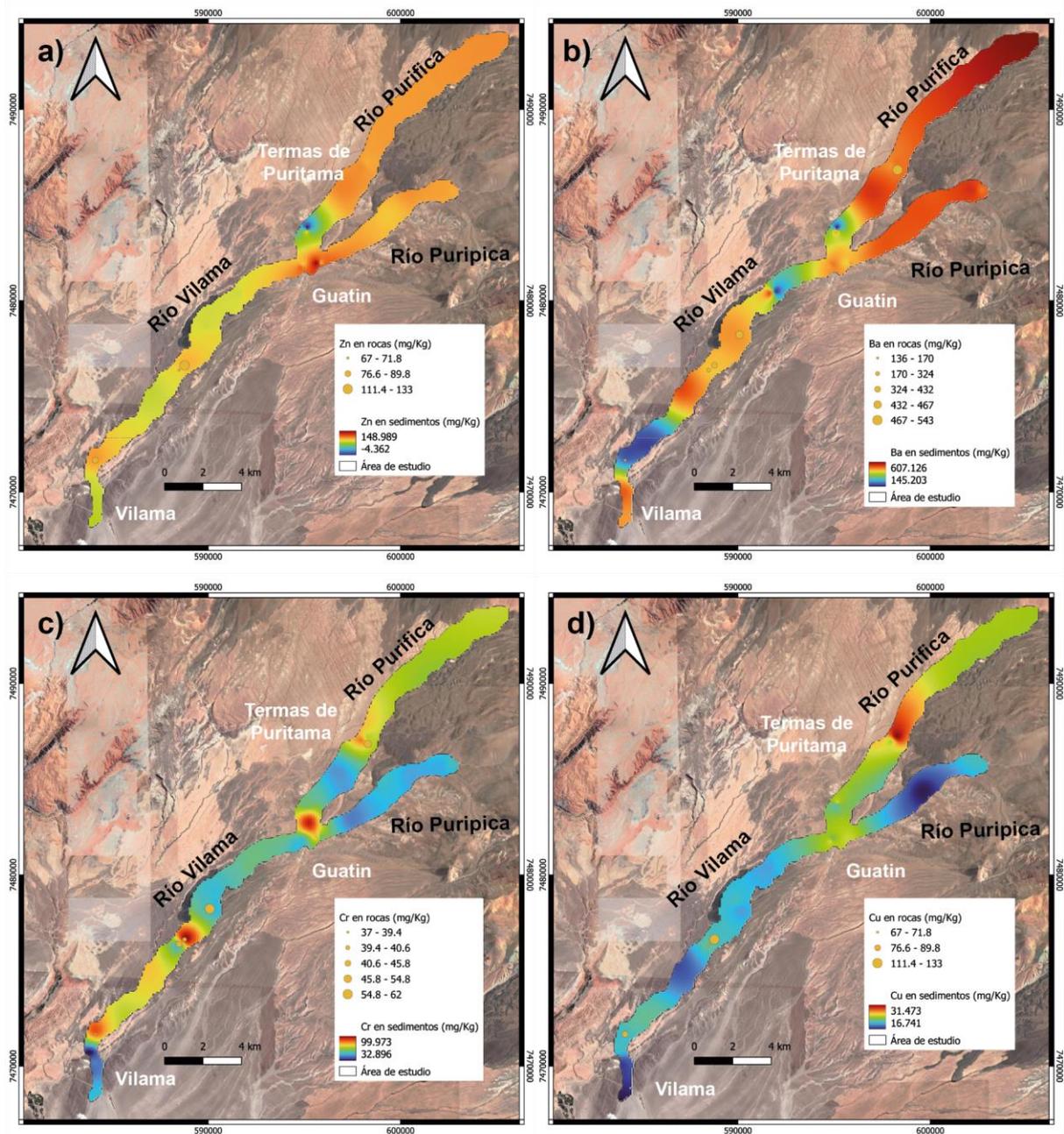
Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,867	48,673	48,673	4,867	48,673	48,673
2	2,360	23,597	72,270	2,360	23,597	72,270
3	1,292	12,923	85,193			
4	0,981	9,810	95,003			
5	0,492	4,917	99,920			
6	0,008	0,080	100,000			
7	1,126E-16	1,126E-15	100,000			
8	-2,951E-17	-2,951E-16	100,000			
9	-4,404E-16	-4,404E-15	100,000			
10	-1,012E-15	-1,012E-14	100,000			

Método de extracción: análisis de componentes principales.

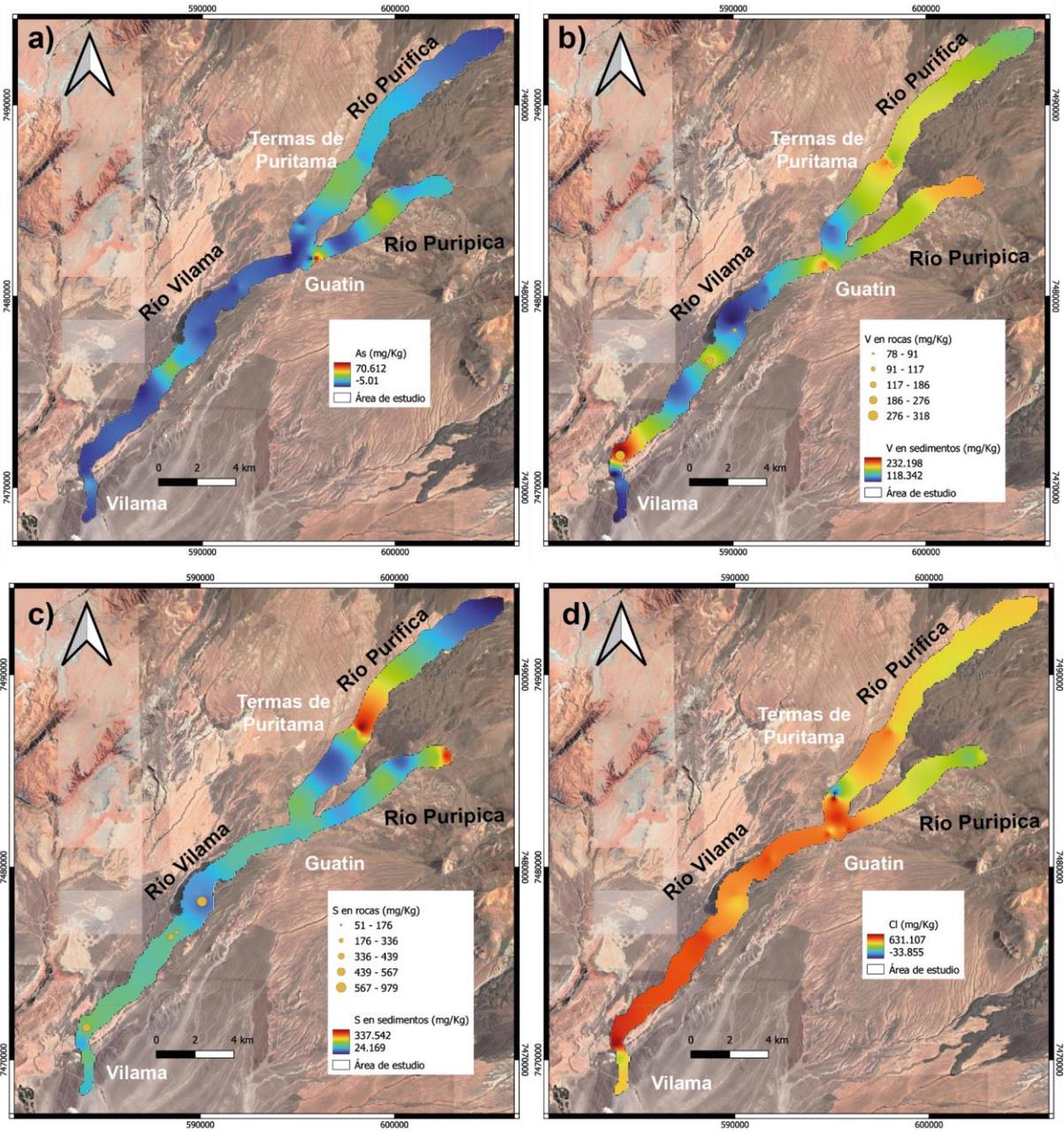
Anexo 32. Tabla de análisis de los componentes principales de los elementos trazas del Río Purifica.

Distribución de Elementos en Sedimentos

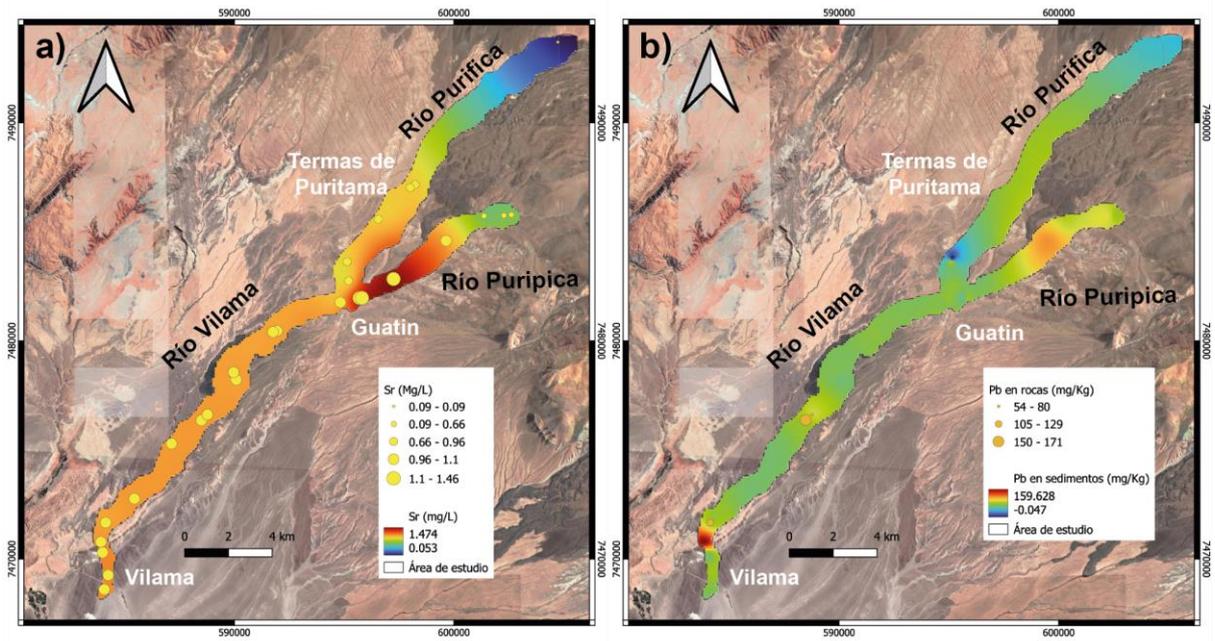
Se presentan modelos de distribución de concentración de elementos trazas registradas en mg/Kg de los sedimentos transportados muestreados en terreno.



Anexo 33. Mapa de distribución de concentraciones mg/Kg de (A) Zn, (B) Ba, (C) Cr y (D) Cu en el cauce del Río Vilama, Río Puripica y Río Purifica. Las circunferencias amarillas corresponden a los puntos de roca muestreados.



Anexo 34. Mapa de distribución de concentraciones mg/Kg de (A) As, (B) V, (C) S y (D) Cl en el cauce del Río Vilama, Río Puripica y Río Puritama. Las circunferencias amarillas corresponden a los puntos de roca muestreados.



Anexo 35. Mapa de distribución de concentraciones mg/Kg de (A) Sr y (B) Pb en el cauce del Río Vilama, Río Puripica y Río Puritama. Las circunferencias amarillas corresponden a los puntos de roca muestreados.

