

SQM SALAR S.A.
PROYECTO ACTUALIZACIÓN PLAN DE ALERTA TEMPRANA Y
SEGUIMIENTO AMBIENTAL, SALAR DE ATACAMA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

APÉNDICE 5-E
MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DEL SALAR DE ATACAMA



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL
**PROYECTO ACTUALIZACIÓN PLAN DE ALERTA
TEMPRANA Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL, SALAR
DE ATACAMA**

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL SALAR DE
ATACAMA**



SQM S.A. – Abril 2020



EIA PROYECTO ACTUALIZACIÓN PLAN DE ALERTA TEMPRANA Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL, SALAR DE ATACAMA

MODELO CONCEPTUAL DEL SALAR DE ATACAMA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	18
1.1	Área de estudio	19
1.2	Objetivos del estudio.....	19
1.3	Metodología de trabajo.....	21
2	ZONAS DE INTERÉS AMBIENTAL.....	22
2.1	Sistema Soncor	24
2.2	Sistema Aguas de Quelana.....	25
2.3	Sistema Peine	26
2.4	Sistema Tilopozo.....	27
3	ANTECEDENTES DISPONIBLES	28
3.1	Antecedentes Modelo Hidrogeológico Conceptual	28
3.2	Antecedentes de SQM.....	28
3.3	Antecedentes de organismos oficiales.....	29
3.4	Antecedentes de Terceros.....	30
3.4.1	Geología.....	30
3.4.2	Hidrología	31
3.4.3	Hidrogeología	32
3.4.4	Hidrogeoquímica	34
4	HIDROLOGÍA.....	35
4.1	Cuenca y drenaje superficial	35
4.2	Precipitación.....	39
4.2.1	Distribución de la precipitación en la Cuenca del Salar de Atacama	43
4.3	Caudales superficiales	45
4.3.1	Sistema Soncor	50
4.3.2	Sistema Peine	52
4.4	Temperatura.....	54
4.5	Evaporación.....	56
4.5.1	Evaporación Potencial	56
4.5.2	Evaporación en el suelo.....	61
4.6	Evapotranspiración.....	67
4.6.1	Cálculo de la Evapotranspiración	72
4.7	Evaporación por lámina libre	74

4.7.1	Sistema Soncor	74
4.7.2	Sistema Peine	78
4.7.3	Sistema Tilopozo.....	80
4.7.4	Sistema Aguas de Quelana	82
4.7.5	Cálculo de la evaporación por lámina libre	82
4.8	Metodología de Cálculo de la Recarga por Precipitación.....	83
4.8.1	Descripción y caracterización de la influencia de la topografía, tipos y usos del suelo en la recarga del Salar de Atacama.....	83
4.8.2	Caracterización y análisis de la distribución temporal y espacial de los eventos de precipitación.....	86
5	GEOLOGÍA.....	87
5.1	Geomorfología y morfotectónica de la Cuenca del Salar de Atacama.....	87
5.2	Geología superficial.....	90
5.3	Geología estructural.....	94
5.4	Geología subsuperficial	95
5.4.1	Unidades geológicas en profundidad.....	95
5.5	Geofísica.....	101
5.6	Geología de sistemas locales.....	104
5.6.1	Sistema de Soncor	104
5.6.2	Sistema Aguas de Quelana	106
5.6.3	Sistema Peine - Tilopozo	107
6	HIDROGEOLOGÍA.....	109
6.1	Catastro de pozos.....	109
6.2	Parámetros Hidráulicos	114
6.2.1	Conductividad Hidráulica (K).....	114
6.2.2	Almacenamiento (S).....	122
6.3	Unidades Hidrogeológicas.....	124
6.4	Interfaz Salina.....	133
6.4.1	Reconocimiento de interfaz salina en pozos.....	135
6.4.2	Reconocimiento de interfaz salina mediante geofísica.....	137
6.5	Análisis de niveles de agua subterránea	140
6.5.1	Evolución histórica de niveles en el Sistema de Salmuera	143
6.5.2	Evolución histórica de niveles en el Sistema de Agua Dulce.....	149

6.5.3	Comportamiento de niveles en sistemas locales	152
6.5.4	Piezometría y direcciones de flujo	164
6.6	Hidrogeoquímica	182
6.6.1	Metodología, catastro de puntos y validación de información	182
6.6.2	Sistema de agua y transición a salmuera	195
6.6.3	Sistema de salmuera	205
6.6.4	Modelo hidroquímico conceptual del Salar de Atacama	211
6.6.5	Hidroquímica de Sistemas locales	213
6.7	Balance Hidrogeológico	246
6.7.1	Consideraciones previas al balance	246
6.7.2	Balance de Agua	254
6.7.3	Balance de Salmuera	271
7	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDROGEOLOGICO	280
7.1	Sistema Regional	280
7.1.1	Sistema de agua	281
7.1.2	Sistema de salmuera	283
7.2	Sistemas Locales	285
7.2.1	Sistema Soncor	285
7.2.1	Sistema Borde Este	293
7.2.2	Sistema Peine	297
7.2.3	Sistema Tilopozo	302
8	BIBLIOGRAFÍA	305
9	ANEXOS	320
9.1	ANEXO MC1 - HIDROLOGÍA	320
9.2	ANEXO MC2 - CUANTIFICACIÓN DE LA EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN	320
9.3	ANEXO MC3 - INVENTARIO DE PUNTOS DE MEDICIÓN	320
9.4	ANEXO MC4 - DISEÑO DE INFRAESTRUCTURAS Y GEOLOGÍA	320
9.5	ANEXO MC5 - PARÁMETROS HIDROGEOLOGICOS	320
9.6	ANEXO MC6 - SERIES DE NIVEL Y PIEZOMETRÍA	320
9.7	ANEXO MC7 - HIDROQUÍMICA	320
9.8	ANEXO MC8 - CÁLCULO DE RECARGA Y DESCARGA	320
9.9	ANEXO MC9 - INTERFAZ SALINA	320
9.10	ANEXO MC10 – RESOLUCIÓN 296 DE 2016 DE LA DGA	320

9.11 ANEXO MC11 – BALANCES HÍDRICOS EN SISTEMAS LAGUNARES	320
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Ubicación general del área de estudio. En (A) se muestra un mapa de Chile con sus divisiones regionales, sobre el cual se resalta el área aproximada de la Región de Antofagasta (B). La cuenca del Salar de Atacama (C) se encuentra en el extremo oriental de dicha región. Fuente: Elaboración propia	20
Figura 2-1. Ubicación de zonas de interés ambiental dentro del área de estudio. Fuente: Informe N° 23 del PSAH.	23
Figura 2-2. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia	24
Figura 2-3. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sistema Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia	25
Figura 2-4. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia	26
Figura 2-5. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sector Vegas de Tilopozo. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 4-1. Cuenclas y subcuenclas de la región de Antofagasta. En azul se distingue la Cuenca del Salar de Atacama (código BNA 0205). Las nueve subcuenclas que configuran la cuenca (código BNA del 020500 al 020508) están indicadas en color rojo. Fuente: DGA, 2014.....	36
Figura 4-2. Zonificación morfométrica del Salar de Atacama. Fuente: Modificado de IDAEA-CSIC (2017).	37
Figura 4-3. Mapa de Escorrentía de la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Knight Piesold (2019)	38
Figura 4-4. Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la precipitación.....	41
Figura 4-5 Precipitación Mensual en las estaciones El Tatio (DGA), Socaire (DGA) y KCL (SQM). Fuente: Elaboración propia	42
Figura 4-6. Mapa de isoyetas (mm/año) para el período 1986 – 2018. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 4-7. Localización de las estaciones con datos de aforo y quebradas consideradas para la evaluación de los caudales superficiales. Imagen satelital: 28/05/2018. Fuente: elaboración propia.	46
Figura 4-8. Registro temporal de los datos de caudales superficiales en la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: elaboración propia	47
Figura 4-9. Relación entre caudal medio mensual (barras azules; [l/s]), y la precipitación (curva verde; [mm]) registrada en la estación San Pedro de Atacama -DGA para la estación de aforo a Río San Pedro en Cuchabrachi. Fuente: elaboración propia.	49
Figura 4-10. Caudal medio mensual (L/s) para las diferentes estaciones de aforo objeto de estudio respecto de un año-calendario. Fuente: elaboración propia.....	49
Figura 4-11. Puntos donde se realiza aforo en el sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 4-12. Promedios anuales de aforos en Puente San Luis y Barros Negros. Fuente: Elaboración propia con datos del PSAH.	51
Figura 4-13 Promedios anuales de aforos en los desbordes Barros Negros Cola de Pez y Barros Negros Sur. Fuente: Elaboración propia.....	52

Figura 4-14 Puntos aforo existentes en sistema Peine. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 4-15 Valores de aforos medidos en el Sistema Peine. Las etiquetas de cada punto indican la cantidad de mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia con datos del PSAH.....	54
Figura 4-16. Temperatura Máxima (rojo), promedio (negro) y mínima (azul) de la estación El Tatio	55
Figura 4-17. Temperatura Máxima (rojo), promedio (negro) y mínima (azul) de la estación Paso Jama..	56
Figura 4-18. Localización de las estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación en lámina libre. Fecha imagen satelital: 28/05/2018. Fuente: elaboración propia.	57
Figura 4-19. Serie de evaporación de bandeja promedio mensual obtenida de las estaciones propiedad de SQM para el período agosto 1999 – diciembre de 2018 (Gráfico superior). Evaporación de bandeja mensual promedio de las estaciones Chaxa y KCL con el promedio anual indicado en línea gris (Gráfico inferior). Fuente: elaboración propia.	58
Figura 4-20. Relación evaporación altura para el mes de enero. Fuente: DGA, 2010.	59
Figura 4-21. Relación entre el coeficiente de corrección por densidad y la densidad del agua y salmuera de la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: IDE (1978)	60
Figura 4-22. Subdivisión del área de estudio en zonas de evaporación. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 4-23. Gráfico Evaporación vs Profundidad para la Zona A7. Se indican las curvas de Philip máxima y mínima. Fuente: elaboración propia.	65
Figura 4-24. Mapa de zonas con vegetación perceptible en más de 4 años durante el periodo 1986-2018. Fecha imagen satelital: 17/09/2018. Fuente: elaboración propia.....	69
Figura 4-25. Distribución de la cobertura de vegetación en la cuenca del Salar para mayo de 2018. Fuente: elaboración propia.	70
Figura 4-26. Evolución de las áreas cubiertas por los distintos de vegetación analizados; cultivos, bofedales, tamarugos y vegas. Fuente: elaboración propia.	71
Figura 4-27. Variación de la evapotranspiración resultante. En el gráfico superior se muestra discretizado el aporte de evapotranspiración de cada tipo de vegetación. En el gráfico inferior se muestra la evapotranspiración total, como la suma de todos los tipos de vegetación. Fuente: elaboración propia.	73
Figura 4-28. Arriba: Batimetría de la Laguna Chaxa. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Chaxa e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).....	75
Figura 4-29. Arriba: Batimetría de la Laguna Puilar. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Puilar e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).	76
Figura 4-30. Arriba: Batimetría de la Laguna Barros Negros y zonas de desborde. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Barros Negros y zonas de desborde e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).....	77
Figura 4-31. Arriba: Batimetría de las lagunas del Sistema Peine. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para las lagunas del Sistema Peine e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).	79
Figura 4-32. Arriba: Batimetría de Laguna La Brava. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para Laguna La Brava e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).	81
Figura 5-1. Salar de Atacama, indicando los principales rasgos morfológicos y estructurales. Arriba: Mapa geomorfológico. Abajo: Transecta que destaca los principales rasgos morfoestructurales y sistemas de falla. La traza se indica en el mapa. Fuente: Elaboración propia basado en Xterrae, 2019.....	89

Figura 5-2. Mapa geológico del Salar de Atacama, indicando unidades geológicas simplificadas, estructuras y trazas de secciones detalladas en 5.4 Geología Subsuperficial y 5.6 Geología de Sistemas locales. Fuente: Elaboración propia basada en informes internos, Niemeyer (2013), Ramírez y Gardeweg (1982), Marinovic y Lahsen (1984), Bevacqua (1992).	93
Figura 5-3 . Catastro de pozos cuyos datos fueron utilizados para elaboración de las secciones geológicas. Se distinguen los pozos según la fuente de la cual se obtiene la información. Fuente: Elaboración propia.	98
Figura 5-4. Secciones A-A' y B-B' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Salar de Atacama en dirección sur-norte (a) y suroeste-noreste (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos internos y de Rockwood (2016), Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972).	99
Figura 5-5. Secciones C-C' y D-D' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Salar de Atacama en dirección este-oeste (a) y noroeste-sureste en el norte del salar (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos internos y de Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972).	100
Figura 5-6. Tipo de geofísica lineal realizada en el Salar de Atacama. Fuentes citadas en texto. Se indica el nombre de las secciones sísmica y TEM de la Figura 5-6.	102
Figura 5-7. Ejemplos de secciones geofísicas utilizadas para el modelamiento geológico e hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama, ubicación en Figura 5-5. (a) Sección sísmica 1g022 (ENAP) interpretada por Jordan et al. (2007). (b) Sección TEM levantada por Geodatos (2017) para SQM en Sector de Quelana.	103
Figura 5-8. Secciones E-E' y F-F' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Sistema de Soncor en dirección sur-norte (a) y oeste-este (b), respectivamente, hasta a ca. 100 metros de profundidad desde la superficie de la zona marginal. Fuente: Elaboración propia con datos internos..	105
Figura 5-9. Sección G-G' (Figura 5-2) que conceptualiza la geología subsuperficial del Sistema Aguas de Quelana en dirección oeste-este a 250 metros de profundidad desde la superficie de la zona marginal. Fuente: Elaboración propia con datos internos (Díaz Del Río, 1972; CORFO, 1977; Dalannais, 1979)....	106
Figura 5-10. Secciones H-H' e I-I' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial de los Sistemas de Peine-Tilopozo en dirección NW-SE(a) y NNW-SSE (b), respectivamente, hasta a ca. 250 metros de profundidad desde la superficie de la zona marginal. Fuente: Elaboración propia con datos internos, de Rockwood (2014, 2016), CORFO (1977), MEL (2016) y Díaz Del Río (1972).	108
Figura 6-1. Catastro de pozos utilizados para la definición de unidades hidrogeológicas y análisis de parámetros hidráulicos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la unidad geológica a la cual se asocia la medición. Fuente: Elaboración propia.	110
Figura 6-2. Catastro de pozos utilizados para la confección de mapas piezométricos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la fuente de la cual se obtuvo la información de niveles. En el capítulo 6.5.4, y las figuras allí mencionadas, se detalla respecto del uso de estos datos. Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 6-3. Catastro de pozos utilizados para el análisis de química e isótopos. Se indica el parámetro medido en cada uno de estos puntos. Fuente: Elaboración propia.....	112
Figura 6-4. Distribución de puntos de extracción, puntos de extracción equivalente y de reinyección para SQM, y puntos de extracción de ABL. Fuente: Elaboración propia.....	113

Figura 6-5. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Superiores. Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 6-6. Distribución de permeabilidades en unidad Evaporitas con Materia Orgánica. Fuente: Elaboración propia.	117
Figura 6-7. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Inferiores. Fuente: Elaboración propia.	118
Figura 6-8. Distribución de permeabilidades en unidades Depósitos No Consolidados, Delta del Río San Pedro y Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfato, Sulfato con limos y Carbonato con limos). Fuente: Elaboración propia.	120
Figura 6-9. Box Plot de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades geológicas. Fuente: Elaboración propia.	121
Figura 6-10. Sección esquemática oeste-este que representa la variación de transmisividad desde el núcleo hasta la zona aluvial. Los valores son consistentes con lo observado en la actualidad. Fuente: Hydrotechnica (1988).	122
Figura 6-11. Distribución de coeficiente de almacenamiento.	123
Figura 6-12. Mapa de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.	127
Figura 6-13. Secciones hidrogeológicas regionales A-A' y B-B'. Trazas de las secciones en Figura 6-12. Fuente: Elaboración propia	130
Figura 6-14. Secciones hidrogeológicas regionales C-C' y D-D'. Trazas de las secciones en Figura 6-12. Fuente: Elaboración propia	131
Figura 6-15. Diagrama de Caja y Bigotes de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades hidrogeológicas. Datos obtenidos a partir de mediciones de SQM. Fuente: Elaboración propia.	132
Figura 6-16. Esquema de la zona de interacción salmuera-agua en el Salar de Atacama. Fuente: Modificado de Marazuela et al. (2019).	133
Figura 6-17. Ubicación de puntos con perfilaje de conductividad eléctrica por SQM, (Albemarle, 2019) y (Escondida B. , 2019). Fuente: Elaboración propia.	134
Figura 6-18. Detalle plataforma multipiezómetro y habilitación de los distintos piezómetros que la componen. Fuente: Elaboración propia	136
Figura 6-19. Caracterización de la interfaz salina en base a resultados de CE e isótopo $\delta^{18}\text{O}$ en piezómetros habilitados a distinta profundidad en el sector aluvial de Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia.	137
Figura 6-20. Ubicación de perfiles de estudios Geofísicos (TEM) y pozos de control y monitoreo compilados e integrados en delimitación de interfaz salina. Fuente: Elaboración propia	138
Figura 6-21. Mapa de elevación (cota) de la interfaz salina, indicativo de elevación sobre modelo geoidal (m s.n.m.) y geometría en profundidad del contacto superior del cuerpo de alta salinidad. Fuente: elaboración propia.	139
Figura 6-22. Puntos con información de niveles de salmuera. Fuente: elaboración propia.....	141
Figura 6-23. Puntos con información de niveles localizados en las UH Zona Marginal y Aluvial. Fuente: elaboración propia.	142

Figura 6-24. Series de nivel en los puntos de observación característicos (PObs) (zona norte) del núcleo del salar y series de precipitación de las estaciones de KCL y SOP. Fuente: elaboración propia. 144

Figura 6-25. Series de descenso de los pozos SOPM entre abril de 2000 y diciembre de 2018, contrastadas con la serie de precipitación de las estaciones KCL, Chaxa y Albemarle. Fuente: Elaboración propia. 145

Figura 6-26. Series de descenso compilada de los piezómetros 2018, S-4, SOPM-11 y SOPM-12C, entre agosto de 1986 y diciembre de 2018, contrastadas con la serie de precipitación de las estaciones KCL, Chaxa y Albemarle. Ver ubicación en Figura 6-24 y Figura 6-25. Fuente: Elaboración propia. 146

Figura 6-27. Ejemplo de pozos con comportamiento de nivel tipo zona marginal. Fuente: elaboración propia. 150

Figura 6-28. Ejemplo de pozos con comportamiento de nivel tipo zona aluvial. Fuente: elaboración propia. 151

Figura 6-29. Puntos de observación de niveles, sector de Soncor. Fuente: elaboración propia. 153

Figura 6-30. Comportamiento de niveles sector de Soncor y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Chaxa. Fuente: elaboración propia..... 154

Figura 6-31. Niveles representativos del tipo marginal en el sector de Soncor. Fuente: elaboración propia. 155

Figura 6-32. Registro de niveles de los puntos de observación situados en la zona aluvial. Fuente: elaboración propia. 155

Figura 6-33. Puntos de observación de nivel, sector de Aguas de Quelana. Fuente: elaboración propia. 157

Figura 6-34. Registro de los niveles representativos de las distintas zonas (núcleo, marginal y aluvial) en el sector de Quelana. Fuente: elaboración propia..... 158

Figura 6-35. Registro de los niveles representativos del núcleo y zona marginal en el sector de Quelana y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Camar. Fuente: elaboración propia. 158

Figura 6-36. Puntos de observación de niveles, sector de Peine. Elaboración propia..... 160

Figura 6-37. Registro de los niveles representativos del sector de Peine. Fuente: elaboración propia. . 161

Figura 6-38. Niveles representativos del tipo núcleo y de la zona marginal en el sector de Peine. Para una mejor interpretación del comportamiento de los datos observados, se han cruzado con los datos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Peine. Fuente: elaboración propia..... 161

Figura 6-39. Puntos de observación sector de Tilopozo. En la imagen se han diferenciado algunos de los puntos representativos de los diferentes tipos de comportamientos (núcleo, marginal, aluvial). Elaboración propia. 163

Figura 6-40. Registro de niveles representativos en el sector de Tilopozo. Fuente: elaboración propia. 164

Figura 6-41. Mapa piezométrico e isopiezas del núcleo, al año 1986. Fuente: elaboración propia..... 169

Figura 6-42. Mapa piezométrico e isopiezas del núcleo, a diciembre 2007. Fuente: elaboración propia. 170

Figura 6-43. Mapa piezométrico e isopiezas del núcleo, a diciembre, 2018. Fuente: elaboración propia. 171

Figura 6-44. Mapa piezométrico e isopiezas del margen, al año 1986. Fuente: elaboración propia 173

Figura 6-45. Mapa piezométrico e isopiezas del margen, a diciembre 2007. Fuente: elaboración propia	174
Figura 6-46. Mapa piezométrico e isopiezas del margen, a diciembre, 2018. Fuente: elaboración propia	175
Figura 6-47. Interpolación (IDW) a partir de la diferencia de cota de nivel entre diciembre de 2007 y diciembre de 2018. Valores negativos representan descensos de nivel. Fuente: elaboración propia....	176
Figura 6-48. Explicación ecuación 12 de Post et al. (2007) para realizar la corrección por densidad. Fuente: elaboración propia.	179
Figura 6-49. Interpolación de la piezometría a julio-2018 utilizando niveles corregidos por densidad. Fuente: elaboración propia.	180
Figura 6-50. Sección esquemática en la que se compara la piezometría medida con la corregida por densidad (corrección a agua dulce).....	181
Figura 6-51. Distribución espacial de puntos con medición trimestral desde 2007 (PSAH) y 1996 (CONAF). Las etiquetas corresponden a los análisis que se realizan en cada punto, según el grupo que se distingue en la Tabla 6-10.	183
Figura 6-52. Puntos con muestreo semestral de SQM para el sistema lagunar Soncor. Fuente: Elaboración propia.	186
Figura 6-53. Puntos con muestreo semestral de SQM para el sistema Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia.	187
Figura 6-54. Puntos con muestreo semestral de SQM para el sistema lagunar Peine. Fuente: Elaboración propia.	188
Figura 6-55 Puntos con muestreo trimestral en el sistema Soncor y multipiezómetros (Soncor y Aguas de Quelana). Fuente: Elaboración propia.	189
Figura 6-56 Distribución muestras de salmuera analizadas en el núcleo. Fuente: Elaboración propia...	190
Figura 6-57 Distribución de muestras para isótopos estables de H ₂ O y SO ₄ en el núcleo. Fuente: Elaboración propia	192
Figura 6-58. Antecedentes revisados considerados para el presente trabajo. En color azul informes internos (SQM), en naranja informes de otros actores de la cuenca, en verde artículos científicos y en gris tesis de máster. Fuente: Elaboración propia	193
Figura 6-59. Balance iónico para las campañas de muestreo realizadas desde junio de 2017 (Incluye muestras de agua dulce, salobre y salmuera). Fuente: Elaboración propia.	194
Figura 6-60. Resultados de balance iónico en las muestras del núcleo. Fuente: Elaboración propia.	195
Figura 6-61. Ubicación de puntos de muestreo representados en el diagrama de Piper. Fuente: Elaboración propia	196
Figura 6-62. Diagrama de Piper para las muestras colectadas desde 2017. Los metales representados corresponden a metales disueltos. Fuente: Elaboración propia.....	197
Figura 6-63. Evolución temporal de Conductividad [mS/cm] en quebradas y puntos subterráneos del aluvial. Fuente: Elaboración propia con datos de terceros (SGA, 2015) y propios.	198
Figura 6-64. Puntos de muestreo para caracterizar el agua de recarga a la cuenca. Fuente: Elaboración propia	199
Figura 6-65. Relación $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para muestras de precipitación, quebradas y zona aluvial. Fuente: Elaboración propia con datos propios y de terceros (SGA, 2015) (CRICYT, 2017b).	200

Figura 6-66. Ubicación de puntos escogidos entre la zona marginal y núcleo de salmuera para mostrar la evolución hidroquímica E-W en el margen E del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.....	201
Figura 6-67. Evolución temporal de conductividad eléctrica de terreno [mS/cm] para los puntos L4-6, L4-8, L4-9, L4-10 y Socaire-5B. Fuente: Elaboración propia con datos del PSAH.	202
Figura 6-68. Relación $\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ vs $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ en muestras de agua de lluvia, nieve y muestras de puntos superficiales y subterráneos en Salar de Atacama (Aluvial, zona marginal y sector oriental del Bloque Este) desde 2017. Fuente: Elaboración propia con datos propios y de CRICYT, 2018.	203
Figura 6-69. Relación cloruros [meq/L] vs $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ VSMOW] en muestras de puntos superficiales y subterráneos en los muestreos semestrales realizados por SQM desde 2017 en Salar de Atacama (Muestras de Aluvial, Zona marginal y sector Oriental del Bloque Este, Núcleo). Fuente: Elaboración propia.	204
Figura 6-70. Ubicación de los puntos muestreados en el núcleo. Fuente: Elaboración propia.....	206
Figura 6-71. Diagrama de Piper modificado para los puntos muestreados en el núcleo del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia con datos de terceros (Huerta , 2012) y propios.....	207
Figura 6-72. Ubicación de puntos del núcleo con isótopos estables de agua. Fuente: Elaboración propia	208
Figura 6-73. Relación $\delta^2\text{H}(\text{H}_2\text{O})$ vs $\delta^{18}\text{O}(\text{H}_2\text{O})$ para las muestras colectadas en el núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos de (Huerta , 2012)	209
Figura 6-74. Distribución del isótopo $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ en el núcleo. Fuente: Elaboración propia.....	210
Figura 6-75. Relación isótopo $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4$ vs $\delta^{18}\text{O}-\text{SO}_4$ para las muestras colectadas en el núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos de (Huerta, 2012)	211
Figura 6-76. Esquema conceptual hidroquímico e isotópico, características de las aguas y procesos que la afectan durante su tránsito desde la zona de recarga hasta el núcleo del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.	212
Figura 6-77 Puntos de muestreo para comprender origen y funcionamiento de la alimentación de las lagunas Chaxa y Barros Negros. Fuente: Elaboración propia.....	215
Figura 6-78 Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ y Cl para las muestras de los ramales Este y Oeste para verano de 2016 (a) e invierno de 2017 (b). Fuente: Elaboración propia.	216
Figura 6-79 Evolución temporal de Cloruros y $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ desde puente San Luis al Sur. Fuente: Elaboración propia	217
Figura 6-80 Localización perfil W-E y puntos muestreados en verano de 2016, invierno de 2017 y verano e invierno de 2018(a). Perfil W-E de CE [ms/cm] y $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰VSMOW] (b). Fuente: Elaboración propia.	218
Figura 6-81 Localización perfil W-E y puntos muestreados en verano de 2016, invierno de 2017 y verano e invierno de 2018 (a). Perfil W-E de CE [ms/cm] y $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰VSMOW] de las muestras tomadas en el aluvial y en el entorno de la laguna Puilar para verano de 2016, invierno de 2017 y verano de 2018 (b). Fuente: Elaboración propia.	220
Figura 6-82. Ubicación puntos de muestreo. (a) y evolución temporal de $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ en aguas superficiales a lo largo del Sistema Soncor (b). Fuente: Elaboración propia con datos de terceros en el periodo entre 2013 y 2015. (SGA, 2015)	222
Figura 6-83 Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ VSMOW] y cloruro [meq/L] para las aguas colectadas en las distintas campañas en el sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia.....	223

Figura 6-84 Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ para las aguas del sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia	225
Figura 6-85. Puntos muestreados en las distintas campañas. Fuente Elaboración propia.....	226
Figura 6-86. Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰] vs cloruros [meq/L] para las distintas campañas de muestreos (diferenciadas por forma) para las aguas superficiales y subterráneas (diferenciadas por color) en el sistema Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia.....	227
Figura 6-87. Relación isótopos $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}-\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ para las distintas campañas de muestreo realizadas por SQM. Nótese la alineación característica descrita por otros estudios para Salar de Atacama (Salas et al., 2010; Ortiz et al., 2014, Aravena 2018). Fuente: elaboración propia.	228
Figura 6-88. Puntos de muestreo en el sector Este de Peine. Fuente: Elaboración propia	230
Figura 6-89. Resultados de cloruro [mg/L] y $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰] para las aguas del Sector Este del sistema Peine. Fuente: Elaboración propia	231
Figura 6-90. Ubicación de perfil 1 con las muestras que se emplean para analizar la evolución de las aguas del acuífero aluvial, la descarga al sistema de agua superficial y su evolución hacia el núcleo. Fuente: Elaboración propia	232
Figura 6-91. Evolución temporal de CE (mS/cm) y los valores de $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ -VSMOW] en perfil 1. Fuente: Modificado de (Aravena, Auría, Henríquez, & Tore, 2019).	234
Figura 6-92. Ubicación de perfil 2 con las muestras que se emplean para analizar la evolución de las aguas del acuífero aluvial, la descarga a la UH zona marginal y su evolución hacia el núcleo. Fuente: Elaboración propia	235
Figura 6-93. Evolución temporal de conductividad, [mS/cm] y enriquecimiento isotópico en $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ -VSMOW] en perfil 2 de la Figura 6-92. Fuente: Modificado de (Aravena, Auría, Henríquez, & Tore, 2019).....	236
Figura 6-94. Ubicación de puntos de muestreo en la zona marginal y núcleo. Fuente: elaboración propia.	237
Figura 6-95. Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰- VSMOW] y cloruros [meq/L] para las distintas campañas de muestreos (diferenciadas por forma) realizadas en el Peine. Por colores se han diferenciado los distintos tipos de agua del sector. Fuente: Elaboración propia.....	238
Figura 6-96. Ubicación de los puntos de SGA 2015 y BA-5 (SQM). Fuente: Elaboración propia.	239
Figura 6-97. Evolución temporal niveles piezométricos en las BA-21 y MPS-AA. Fuente: SGA, 2015.....	240
Figura 6-98. Relación isótopos $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}-\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ para las distintas campañas de muestreo realizadas por SQM. Nótese la alineación característica descrita por otros estudios para Salar de Atacama. Fuente: Salas et al., 2010; Ortiz et al., 2011; Aravena, 2018.....	241
Figura 6-99. Ubicación y características de los puntos de muestreo en el sector de Tilopozo. Fuente: Elaboración propia	243
Figura 6-100. Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰- VSMOW] y cloruros [meq/L] para las distintas campañas de muestreos (diferenciadas por forma) realizadas en el sector Tilopozo. Por colores se han diferenciado los distintos tipos de agua del sector. Fuente: Elaboración propia.....	244
Figura 6-101. Relación isótopos $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}-\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ para las distintas campañas de muestreo realizadas por SQM	245
Figura 6-102. Esquema de subdivisión de cuencas utilizados para el balance. Fuente: Elaboración propia	247

Figura 6-103. Subdivisión de cuencas utilizadas para el balance. Fuente: Elaboración propia.	249
Figura 6-104. Subdivisión del área del Salar de Atacama en sectores de recarga. Se incluyen, además, las áreas de evaporación presentadas en la Figura 4-22. Los sectores Sureste Tilopozo y Sureste Peine se consideran dentro de un única Sector Sur. El área del Llano de la Paciencia considerado para el cálculo de la evaporación desde el suelo se destaca en rojo. Fuente: Elaboración propia.	250
Figura 6-105. Diseño esquemático de captaciones de salmuera de SQM en el Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia	251
Figura 6-106. Extracción de salmuera por SQM y Albemarle. Caudal en L/s equivalente mensual y L/s equivalente anual Fuente: Elaboración propia a partir de datos reportados por SQM y Albemarle	252
Figura 6-107. Caudal equivalente anualizado por año ambiental (13 de agosto a 12 de agosto del año siguiente). Fuente: Elaboración propia	253
Figura 6-108. Extracción de agua industrial por parte de SQM en a UH Aluvial. Fuente: Elaboración propia	254
Figura 6-109. Trazas de secciones de paso norte, sur y este. Fuente: elaboración propia.....	258
Figura 6-110. Sección construida en Zona Norte para el cálculo de caudal pasante	259
Figura 6-111. Secciones construidas en Zona Este para el cálculo de caudal pasante	261
Figura 6-112. Sección construida en Zona Sur para el cálculo de caudal pasante	262
Figura 6-113. Resumen del balance de salmuera pre-operacional considerando los distintos escenarios extremos en que se combinen valores mínimos y máximos de Recarga y Descarga.	274
Figura 6-114. Descenso normalizado de piezómetros en el núcleo desde febrero 1989 hasta julio de 1994. Fuente: Elaboración propia.	276
Figura 6-115. Resumen del balance de salmuera operacional considerando los distintos escenarios extremos en que se combinen valores mínimos y máximos de Recarga y Descarga	278
Figura 7-1. Conceptualización hidrogeológica sistema Soncor. Fuente: (IDAEA-CSIC, 2018).	288
Figura 7-2 Esquema conceptual hidroquímico y de procesos para el sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia	289
Figura 7-3. Sección hidrogeológica local S-N, Laguna Barros Negros. Fuente: Elaboración propia.....	290
Figura 7-4. Sección hidrogeológica local W-E, Laguna Barros Negros. Fuente: Elaboración propia.....	291
Figura 7-5. Esquema del balance hídrico del Sistema Soncor y sus relaciones río acuífero. Fuente: Elaboración propia.	293
Figura 7-6. Sección hidrogeológica local W-E, Sistema Borde Este (Aguas de Quelana). Fuente: Elaboración propia.	294
Figura 7-7. Modelo conceptual hidroquímico y principales procesos para el sistema Borde Este. Fuente: Elaboración propia	295
Figura 7-8. Configuración Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia.....	297
Figura 7-9. Sección hidrogeológica local NW-SE, Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia.....	298
Figura 7-10. Modelo conceptual de funcionamiento para el Sistema Peine. Fuente: Modificado de (Aravena, Auría, Henríquez, & Tore, 2019).	299
Figura 7-11. Esquema de funcionamiento hidrogeológico, Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia.	301
Figura 7-12. Sección hidrogeológica local NNW-SSE, Sistema Tilopozo. Fuente: Elaboración propia.....	303
Figura 7-13. Modelo conceptual hidroquímico y de procesos para el sistema Tilopozo. Fuente: Elaboración propia	304

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Estaciones Meteorológicas con registros de precipitación en la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia	40
Tabla 4-2. Precipitación media anual por estación, para el período 1986-2018. Fuente: elaboración propia	43
Tabla 4-3. Coordenadas de las estaciones fluviométricas y aforos utilizadas para el análisis de caudales superficiales. Fuente: elaboración propia.....	45
Tabla 4-4. Promedios mensuales y anual de caudal (L/s) para cada una de las estaciones consideradas en el análisis de caudal superficial, considerando los registros desde 1990. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 4-5. Estaciones meteorológicas utilizadas para la caracterización de la temperatura	55
Tabla 4-6. Estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación en lámina libre.	57
Tabla 4-7. Parámetros de la relación evaporación de bandeja vs. altura por mes. Fuente: Modificado de DGA (2010).....	59
Tabla 4-8. Parámetros de ajuste de las curvas de evaporación en cada zona considerada. Fuente: elaboración propia	64
Tabla 4-9. Detalle del valor de evaporación calculado por zona. Fuente: elaboración propia.....	66
Tabla 4-10 Evaporación desde el Suelo en la Cuenca del Salar de Atacama y el Llano de la Paciencia. Fuente: Elaboración propia.	67
Tabla 4-11. Evaporación desde el suelo mínima, máxima y media para la agrupación de zonas del Salar de Atacama en sectores Norte, Sur, Este, Oeste y Núcleo. Fuente: elaboración propia	67
Tabla 4-12. Evapotranspiración promedio para el periodo 1986-2018 según el tipo de vegetación. Fuente: Elaboración propia	72
Tabla 4-13. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 al presente. Fuente: Elaboración propia	74
Tabla 4-14. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 al presente. Fuente: Elaboración propia	78
Tabla 4-15. Superficies lacustres promedio anual generadas en el PSA de Albemarle desde el 2007 al presente. Fuente: Elaboración propia.....	80
Tabla 4-16. Cálculos de Evaporación de Lámina Libre. Fuente: Elaboración propia.....	82
Tabla 4-17. Criterio para la definición de condiciones húmedas, secas y estándar. Fuente: (Singh, 1992)	86
Tabla 5-1. Resumen de información geofísica lineal revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial.....	101
Tabla 5-2. Resumen de información geofísica de pozos revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial.	101
Tabla 6-1. Resumen del tipo y cantidad de puntos de extracción y reinyección considerados. Fuente: elaboración propia	109
Tabla 6-2. Información hidráulica disponible por unidad geológica. Fuente: Elaboración propia	114
Tabla 6-3. Parámetros hidráulicos por unidad geológica. Fuente: Elaboración propia.	115

Tabla 6-4. Parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica. Se incluyen datos de SQM y antecedentes de terceros. Fuente: Elaboración propia.....	132
Tabla 6-5. Propietarios y características de los puntos con perfil de conductividad. Fuente: Elaboración propia.	135
Tabla 6-6. Fuente de información para modelo de resistividad base para interpretación de interfaz salina en borde este del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.....	138
Tabla 6-7 Eventos de precipitación que generan un marcado ascenso en los niveles. Fuente Elaboración propia.	147
Tabla 6-8 Cambio en el volumen almacenado para los 15 eventos de precipitación registrados.....	148
Tabla 6-9. Resumen de los antecedentes considerados para la interpolación de nivel y consecuente generación de mapas piezométricos.....	168
Tabla 6-10 Análisis realizados para los puntos de muestreo de la Figura 6-51 agrupados según los análisis de laboratorio que se realizan en cada punto. Fuente: Elaboración propia.....	184
Tabla 6-11 Total de muestras tomadas en campañas internas desde junio de 2017. Fuente: Elaboración propia	184
Tabla 6-12 Parámetros químicos y físico químicos analizados en las distintas campañas para el núcleo.	191
Tabla 6-13 Relación entre pozos de extracción de salmuera reales con los pozos de extracción equivalentes. Fuente: Elaboración propia.	251
Tabla 6-14. Recarga directa por zonas en la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.	256
Tabla 6-15 Rango estimado de caudal pasante por la zona norte del Salar. Fuente: Elaboración propia.	260
Tabla 6-16 Rango estimado de caudal pasante por la zona este del Salar. Fuente: Elaboración propia.	260
Tabla 6-17 Rango estimado de caudal pasante por la zona sur del Salar. Fuente: Elaboración propia. .	263
Tabla 6-18. Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de agua preoperacional. Fuente: elaboración propia.	264
Tabla 6-19. Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de agua preoperacional. Valores en L/s. Fuente: elaboración propia.	265
Tabla 6-20 Caudales de agua extraídos. Fuente: (1) Amphos 21 (2018b), (2) SQM.	267
Tabla 6-21 . Resumen del caudal total extraído, proporción de extracción que afecta únicamente el almacenamiento y caudal neto real que incide en el balance.	268
Tabla 6-22 Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de Agua operacional. Fuente: elaboración propia.	268
Tabla 6-23. Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de agua operacional. Valores en L/s. Fuente: elaboración propia.	270
Tabla 6-24. Estimación de la recarga a partir (1) del dato de precipitación directa y (2) de la respuesta de los niveles en el núcleo a los eventos de precipitación. Fuente: Elaboración propia.....	271
Tabla 6-25. Resumen de los cálculos y valores utilizados para el balance de salmuera pre-operacional. Fuente: elaboración propia.	273
Tabla 6-26 Tasa de Descenso del núcleo en período preoperacional. Fuente: Elaboración propia.	275

Tabla 6-27 Rango de caudal de pérdida de almacenamiento de salmuera, expresado en L/s. Fuente: elaboración propia.	276
Tabla 6-28. Tabla resumen del Balance de Salmuera Operacional (L/s). Fuente: elaboración propia.	277
Tabla 6-29 Rango de caudal de pérdida de almacenamiento de salmuera, expresado en L/s. Fuente: elaboración propia.	279

1 INTRODUCCIÓN

SQM Salar S.A. es una empresa minera líder en la producción de sales de litio y potasio, entre otros productos, que se obtienen a partir de la explotación de salmueras que se encuentran almacenadas en el Salar de Atacama. El estudio y explotación de estas salmueras, ha permitido generar una gran cantidad de información hidrogeológica tanto del Salar de Atacama, como de la cuenca en la que éste se localiza.

El levantamiento de la información hidrogeológica del Salar se ha plasmado en distintos documentos y estudios a lo largo de la historia, inclusive desde antes de la llegada de SQM al Salar de Atacama. Por lo tanto, el entendimiento del funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del Salar de Atacama se encuentra en constante evolución, a la par de la obtención de nueva información en el tiempo.

Actualmente, desde el punto de vista ambiental, la operación de SQM en el Salar de Atacama se ajusta a lo establecido en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 226 del año 2006, a través de la cual se aprobó el proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”. Este proyecto incluye un Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) y Plan de Alerta Temprana (PAT) destinados a resguardar los objetos de protección definidos en el mismo. En dicho estudio quedó plasmado un modelo conceptual y numérico hidrogeológico que resumía la información levantada hasta el año 2005. La información disponible a esta fecha ha permitido validar y confirmar esta comprensión hidrogeológica, además de profundizar y precisar con mayor detalle algunos aspectos relevantes.

En el presente informe se expone el modelo conceptual hidrogeológico que se tiene para la cuenca del Salar de Atacama, con información analizada hasta el mes de diciembre de 2018. La información se presenta a escala regional; sin embargo, se han analizado con mayor detalle cuatro zonas específicas, llamados sistemas locales, en los cuales se han definido objetos de protección ambiental. Estos cuatro sistemas locales corresponden a: Sistema Soncor, Sistema Aguas de Quelana, Sistema Peine y Sistema Tilopozo.

Los análisis realizados a escala regional y local incluyen: una revisión de la geología superficial, subsuperficial, y estructural; revisión de los parámetros hidráulicos de las unidades geológicas identificadas; definición de unidades hidrogeológicas; análisis de niveles piezométricos y construcción de piezometrías históricas; análisis hidroquímico e isotópico; y un análisis hidrológico y construcción de balances hídricos de la cuenca en estados permanente y transitorio.

Finalmente, este modelo hidrogeológico conceptual será utilizado para elaborar uno o más modelos numéricos dentro de la cuenca del Salar de Atacama, los que permitirán evaluar la respuesta del sistema hidrogeológico bajo distintos escenarios productivos y climáticos, verificando anticipadamente los posibles efectos futuros que las extracciones de salmuera y de agua industrial tendrán sobre dicho sistema.

1.1 Área de estudio

El Salar de Atacama se localiza en la Región de Antofagasta, a 55 km al sur de San Pedro de Atacama y 316 km al noreste de Antofagasta (capital regional). Se encuentra a una altura aproximada de 2.300 msnm, tiene unos 100 km de largo y 80 km de ancho aproximadamente, abarcando un área aproximada de 3.100 km². El núcleo del Salar, donde se ubican las faenas extractivas de salmuera, posee una superficie aproximada de 1.100 km², y está rodeado por una zona marginal de unos 2.000 km² de extensión aproximadamente, donde se localizan los objetos de protección ambiental.

El área de estudio se ha determinado de modo de abarcar de forma íntegra la dinámica hidrogeológica de la cuenca del Salar de Atacama (Figura 1-1). En términos prácticos, para el análisis hidrológico se ha considerado la totalidad de la cuenca, mientras que para el resto de las componentes hidrogeológicas (geología subsuperficial, niveles piezométricos, hidroquímica, entre otros), el análisis se ha centrado en su mayoría en el núcleo, zona marginal, y aluviales que los rodean.

1.2 Objetivos del estudio

El presente informe tiene como objetivo principal presentar el modelo hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama a partir de la integración y análisis de la información pública y privada disponible, los datos de monitoreo de los Planes de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH) y de Alerta Temprana (PAT) propios y de terceros, así como de trabajos específicos para la presentación de este informe.

La descripción del modelo hidrogeológico conceptual se ha realizado tanto a escala regional (de cuenca), como a escala local, en las zonas definidas como sistemas locales de protección ambiental.

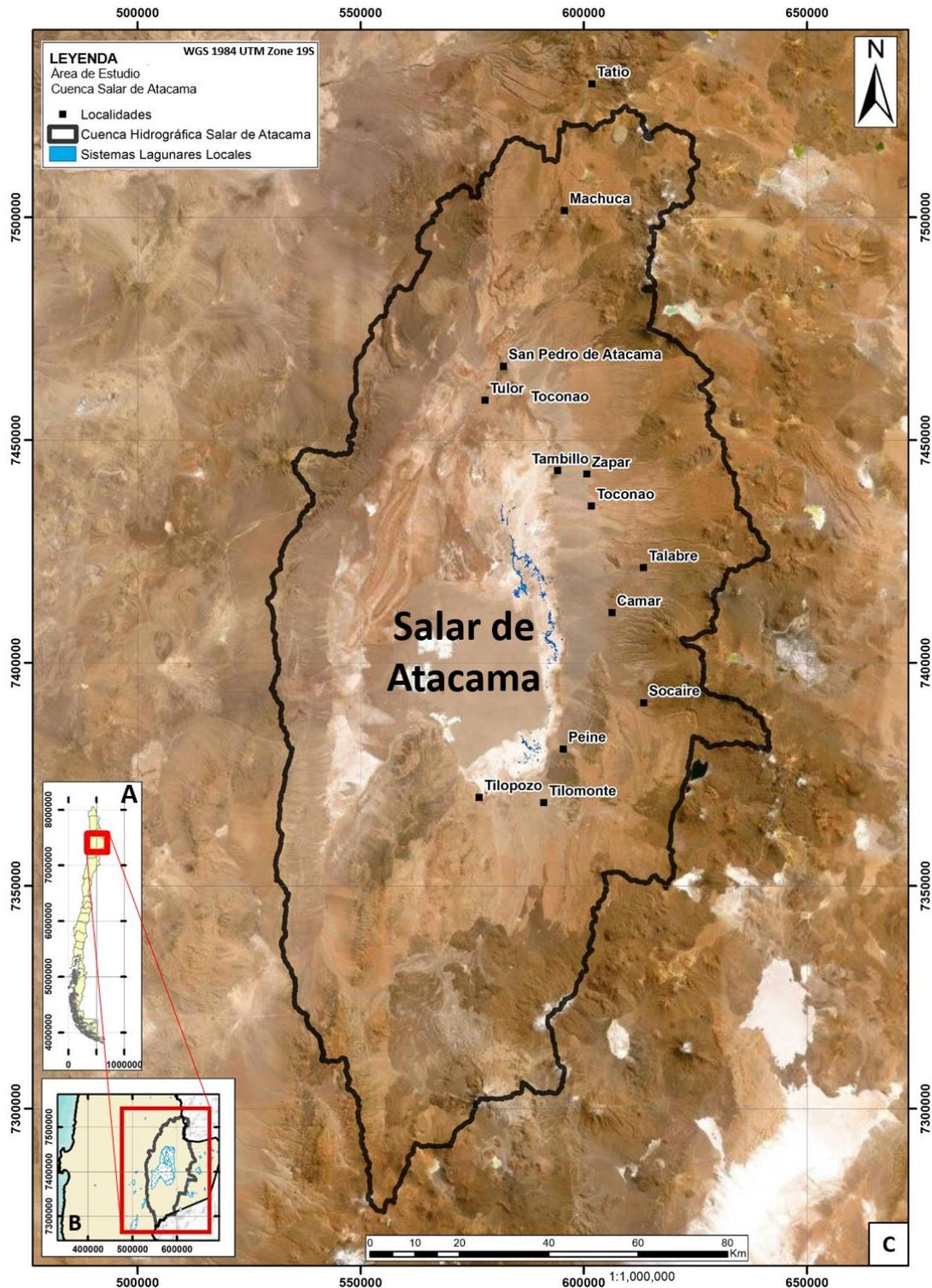


Figura 1-1. Ubicación general del área de estudio. En (A) se muestra un mapa de Chile con sus divisiones regionales, sobre el cual se resalta el área aproximada de la Región de Antofagasta (B). La cuenca del Salar de Atacama (C) se encuentra en el extremo oriental de dicha región. Fuente: Elaboración propia

1.3 Metodología de trabajo

Para la consecución de los objetivos comentados previamente, se han planteado y desarrollado una serie de actividades y trabajos que se detallan a continuación:

Revisión y evaluación de información existente y trabajos previos realizados:

Además de los informes del PSAH que se reportan periódicamente a la autoridad desde el año 2007, se dispone de un gran volumen de información relativa al funcionamiento hidrogeológico (cualitativo y cuantitativo) del Salar de Atacama y su entorno. Es así como existen numerosos documentos e informes, propios y de terceros, sobre geología, geofísica, ensayos hidráulicos, información de precipitaciones y cálculo de la recarga, evaluación de la evaporación, datos de las redes de control ambiental y datos de niveles. En general, aunque existen datos previos, sobre todo relacionados con aspectos hidrológicos y meteorológicos, a partir del año 1986 se han realizado estudios sistemáticos en el Salar de Atacama, fecha a partir de la cual se cuenta con registros continuos de niveles, tanto de agua como de salmuera, y varios registros de pruebas de bombeo y mediciones de química.

Análisis, interpretación e integración de la información:

Inicialmente, se dispone de los siguientes datos:

- Imágenes satelitales.
- Datos geológicos: estratigrafía y estructura (fallas u otros elementos singulares).
- Datos de campañas geofísicas.
- Datos meteorológicos.
- Datos de evaporación (lisímetros y domos).
- Datos hidroquímicos.
- Datos isotópicos.
- Datos de niveles y densidad de fluidos.
- Datos de conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (a partir de ensayos hidráulicos).
- Datos de bombeos y reinyecciones.

El PSAH implementado a partir del EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” aprobado ambientalmente a través de la RCA 226/2006, constituye la fuente de información más importante, ya que permite apreciar la respuesta del sistema a la ejecución del proyecto de SQM (además de terceros) durante los últimos 12 años. Luego existen estudios realizados por terceros, a diversas escalas espaciales y temporales, con lo cual se conforma una robusta base de datos de información que permite sustentar este modelo conceptual hidrogeológico.

2 ZONAS DE INTERÉS AMBIENTAL

En la zona marginal del Salar de Atacama se han identificado cuatro sectores con valor ambiental, donde se encuentran los objetos de protección ambiental según lo estipulado tanto en la RCA N°226 del año 2006 como en estudios de terceros en la zona de estudio. Las zonas de interés ambiental corresponden a sectores con un valor ambiental y ecológico en el área de estudio. Dichos sectores corresponden, de norte a sur, a: Sistema Soncor, Sistema Aguas de Quelana, Sistema Peine y Sector Vegas de Tilopozo, todos los cuales se ubican principalmente en la zona marginal del Salar de Atacama (Figura 2-1).

El valor ambiental de estos sectores está vinculado a la diversidad biológica, así como a la presencia y abundancia de especies silvestres en estado de conservación. Estos hábitats dependen de la ocurrencia de un nivel freático somero y la presencia cuerpos lagunares, algunos estables y otros estacionales, en la zona de afloramiento de la interfaz salina.



Figura 2-1. Ubicación de zonas de interés ambiental dentro del área de estudio. Fuente: Informe N° 23 del PSAH.

2.1 Sistema Soncor

El Sistema Soncor (Figura 2-2) se ubica al noreste del Núcleo del Salar. En este sistema se encuentran las lagunas principales: Puilar, Chaxa y Barros Negros. Las dos últimas, Chaxa y Barros Negros, se encuentran conectadas superficialmente a través del Canal de Burro Muerto. La laguna Puilar es de menor tamaño y se ubica al noreste de las dos anteriores, sin conexión superficial con las demás.

El canal Burro Muerto recibe aportes de agua superficial y subterránea a lo largo de su trayecto de norte a sur, y es fundamental para el abastecimiento y mantención de las lagunas Chaxa y Barros Negros. Barros Negros es la Laguna terminal del sistema, y los excedentes que recibe son vertidos en zonas de desbordes colindantes a la laguna a través de 2 puntos principales: uno ubicado al oeste de la laguna (conocido como Cola de Pez) y el otro al extremo sur de la misma (conocido como Desborde sur).

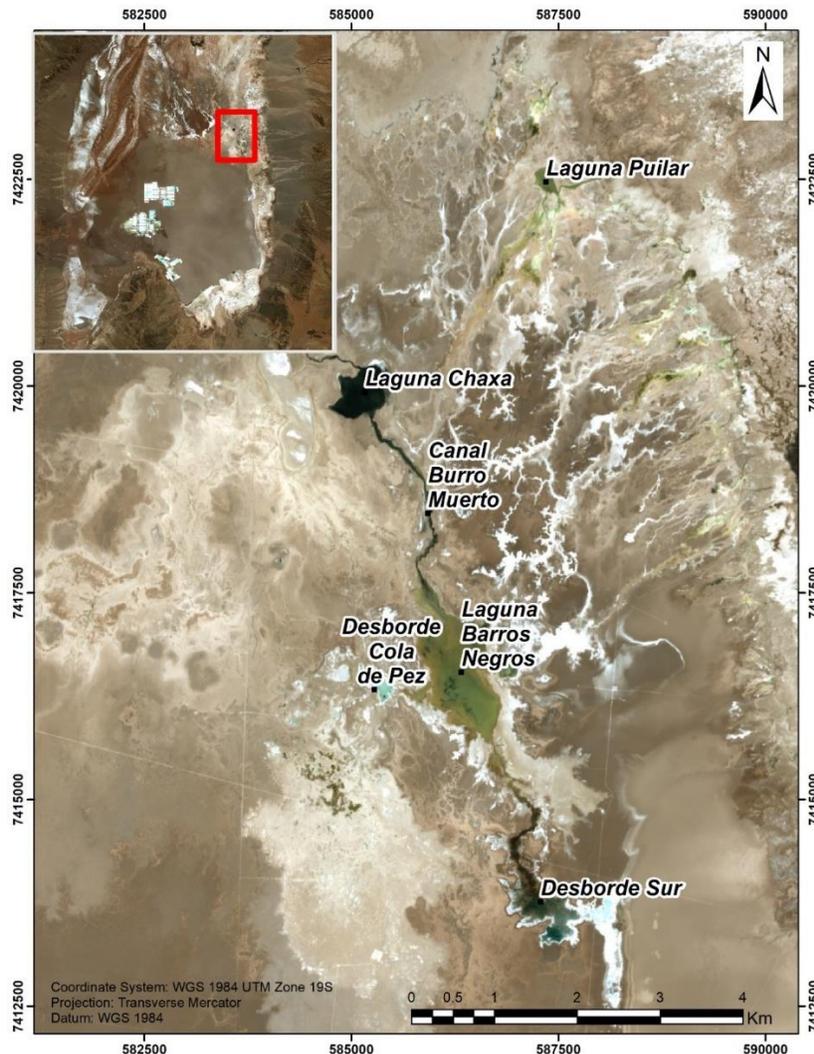


Figura 2-2. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia

2.2 Sistema Aguas de Quelana

El Sistema Aguas de Quelana (Figura 2-3) está compuesto por un conjunto de cuerpos lagunares alineados en una disposición aproximada N-S. Estos cuerpos presentan un comportamiento errático, tanto en ubicación como en dimensión y continuidad espacial, denotando una gran variabilidad temporal y espacial. Los cuerpos más estables se reconocen exclusivamente sobre la zona marginal, mientras que, durante períodos de eventos de precipitación intensa, éstos pueden temporalmente canalizarse y escurrir superficialmente hacia el oeste, alcanzando incluso el límite con el núcleo del Salar.

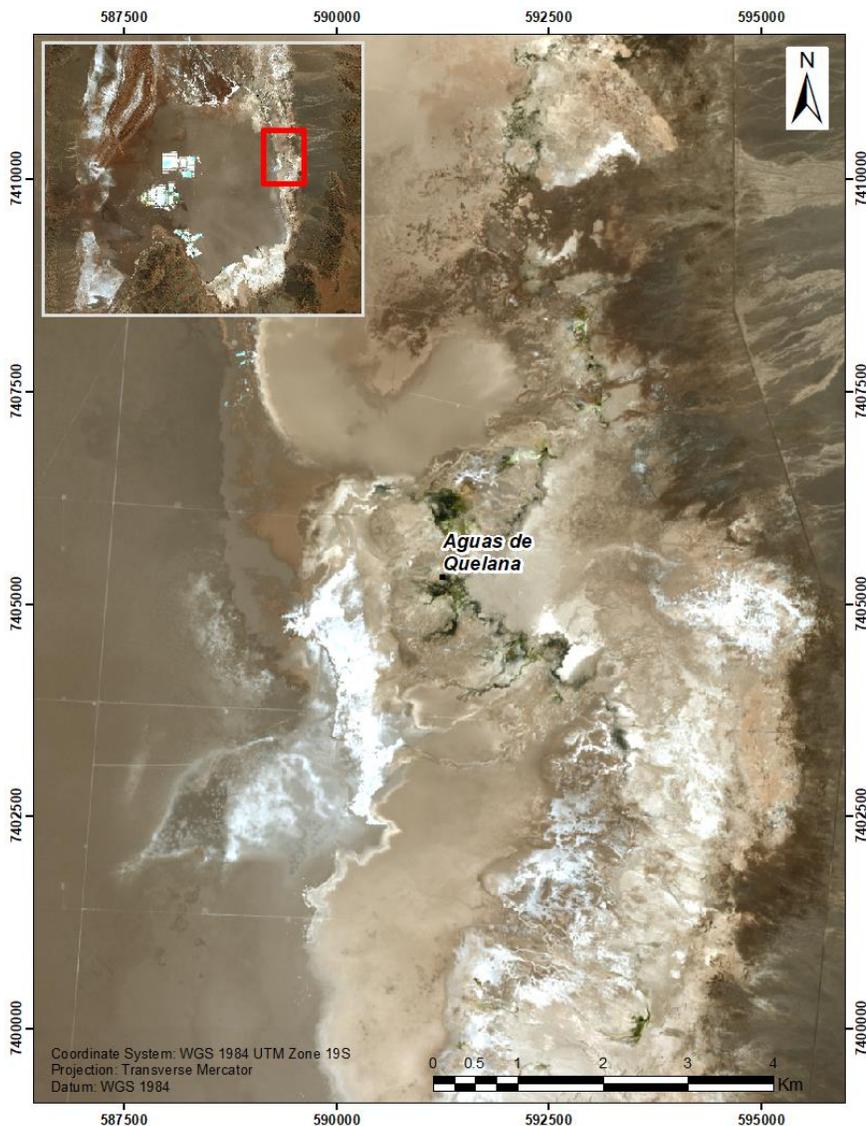


Figura 2-3. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sistema Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia

2.3 Sistema Peine

El Sistema Peine (Figura 2-4) está ubicado al sureste del núcleo del Salar de Atacama. En este sistema se encuentran las lagunas Salada, Saladita e Interna, alineadas en una dirección aproximada SE-NW. Las lagunas Salada y Saladita tienen una extensión relativamente estable, por lo que son consideradas las lagunas principales. En épocas de abundancia hídrica, se producen desbordes desde la laguna Saladita, formando la laguna Interna, cuya extensión es variable y errática.

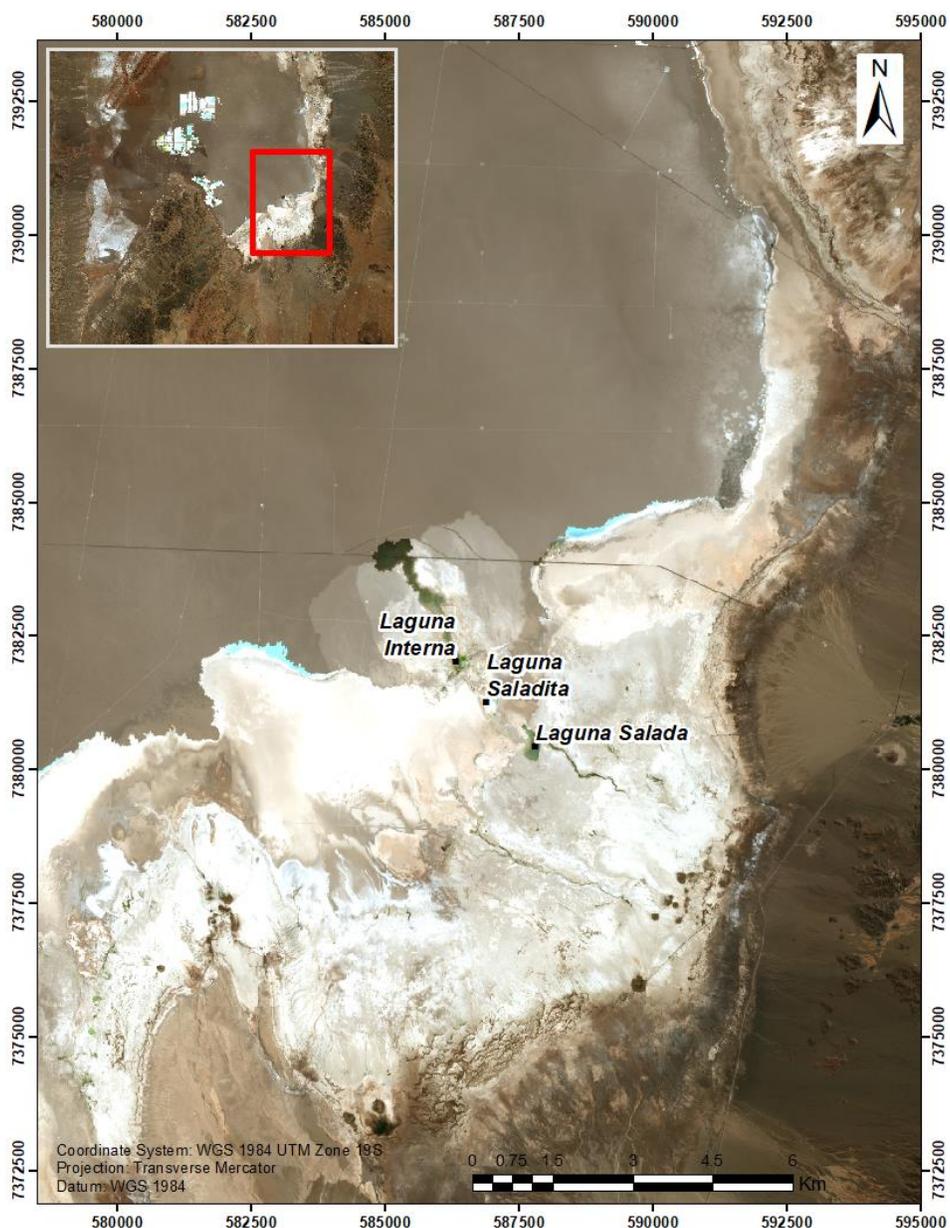


Figura 2-4. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia

2.4 Sistema Tilopozo

El Sistema Tilopozo (Figura 2-5) se encuentra al sur del núcleo del Salar de Atacama, abarcando una amplia superficie de la zona marginal, en una dirección preferencial S – N. En este sistema el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie, lo que favorece la presencia de un ecosistema tipo vegas, donde destaca la Vega de Tilopozo. Destaca también la presencia de un sistema de lagunas identificado como La Punta y La Brava, que por su extensión y relativa estabilidad destacan por sobre el resto.

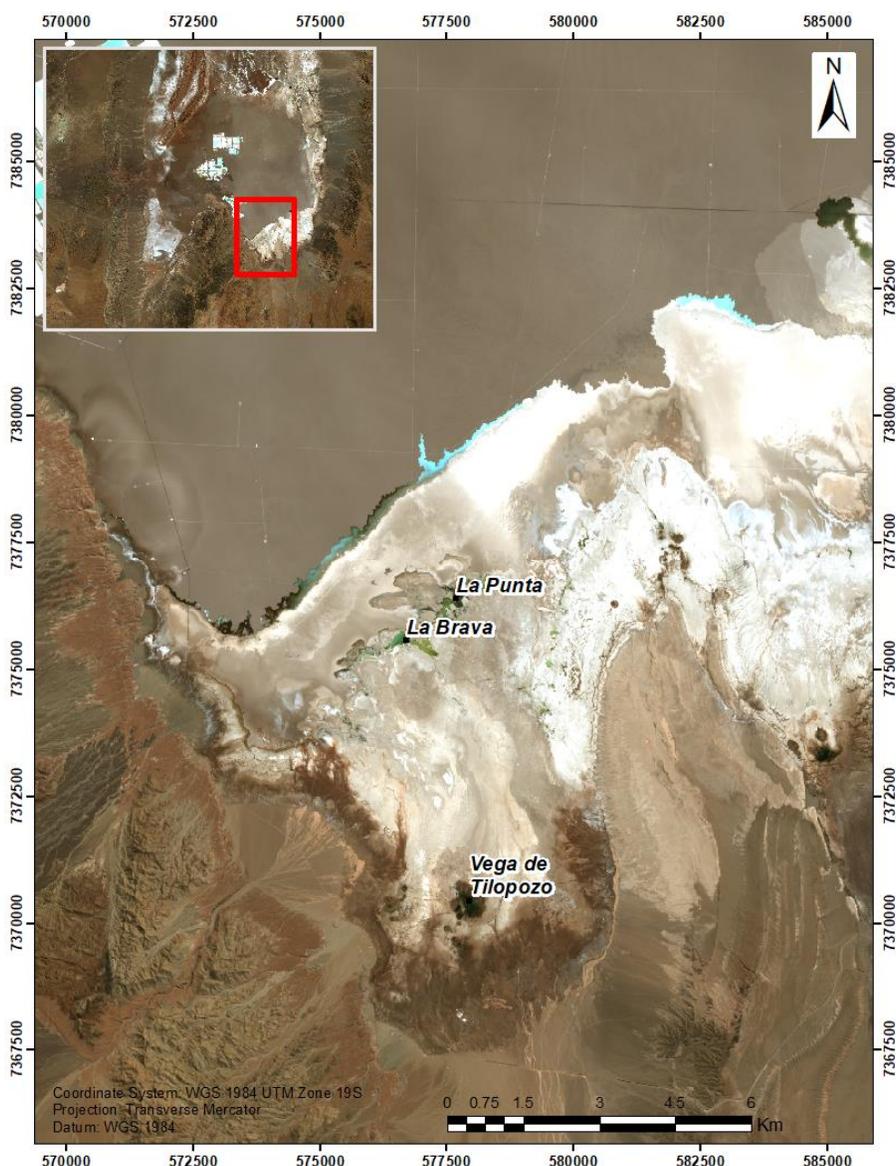


Figura 2-5. Detalle de la ubicación y principales componentes del Sector Vegas de Tilopozo. Fuente: Elaboración propia

3 ANTECEDENTES DISPONIBLES

3.1 Antecedentes Modelo Hidrogeológico Conceptual

Las fuentes de información varían desde estudios desarrollados directamente por SQM como empresa interesada, hasta de organismos oficiales y empresas privadas con algún interés productivo y/o extractivo en el Salar. En el caso de la información de organismos oficiales, esta se recopiló gracias a las plataformas públicas de acceso web destinadas para ello, o bien por Ley de Transparencia.

En el caso de la información de terceros, proveniente de empresas privadas, la información disponible se ha recopilado principalmente por los informes de seguimiento que derivan de los estudios ambientales vigentes, o bien por los informes y estudios que han sido generados durante la tramitación de Estudios de Impacto Ambiental (EIA).

El presente capítulo lleva a cabo un análisis de la información hidrogeológica considerada más relevante para la comprensión del modelo conceptual que describe el comportamiento hidrogeológico del Salar de Atacama.

3.2 Antecedentes de SQM

La principal fuente de información hidrogeológica desarrollada por SQM corresponde a los datos del Plan de Seguimiento Ambiental (PSAH), comprometido en la RCA 226 de 2006 e integrados hasta el informe n°23. Probablemente esta fuente de información es la más robusta y completa, implementada y operativa, que sirve para observar el comportamiento de los sistemas de interés y el efecto de las extracciones que se realizan; por tanto, constituye una referencia importante de antecedentes no solo para SQM, sino también para terceros.

También comprende estudios específicos realizados previo a la evaluación ambiental del proyecto hasta la fecha (31 de diciembre 2018). Entre los antecedentes de interés, cabe destacar los siguientes:

- Datos de nivel de agua subterránea y salmuera
- Datos de extracción de salmuera y agua industrial
- Datos de parámetros hidráulicos obtenidos a partir de pruebas hidráulicas realizados por SQM, y la reinterpretación de ensayos realizados por terceros
- Datos meteorológicos (pluviometría) y evaporación de bandeja
- Datos de evaporación desde la napa (lisímetros y domos)
- Datos de aforos
- Datos de campañas hidroquímicas, monitoreo de calidad y caracterización isotópica de aguas subterráneas y superficiales
- Datos e información geológica proveniente de campañas geofísicas y de perforación.

- Imágenes satelitales
- Datos de monitoreo de las superficies lacustres

3.3 Antecedentes de organismos oficiales

La información de los organismos oficiales corresponde principalmente a la generada por la Dirección General de Aguas (DGA), como organismo del Estado que se encarga de promover la gestión y administración del recurso hídrico a nivel nacional. Esta información corresponde a los datos provenientes de la red hidrometeorológica, así como de documentos e informes técnicos especializados relacionados con el balance hídrico y disponibilidad del recurso para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas en la cuenca del Salar de Atacama. Los estudios e informes técnicos más relevantes considerados han sido:

- **DGA (1986)**. Informe hidrogeológico: evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca Salar de Atacama, II región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- **DGA (1987)**. Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- **Orphanopoulos (1988)**. Informe Hidrogeológico: Evaluación de la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas. Cuenca Salar de Atacama, II Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago.
- **Risacher y otros. (1999)** Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile.
- **DICTUC (2000)**. Estimación de Aportes Superficiales y Subterráneas del Salar de Atacama, Mediante el Modelo Estacional SEAMOD. (DGA, 1999). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II Región: Minuta Técnica N° 60. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- **DGA (2008)**. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Informe Final Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano de Chile. (S.I.T N° 157). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- **DICTUC (2009)**. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Parte IX. Sistema Hidrogeoquímica e isotopía regional del Altiplano de Chile. Santiago, Chile.
- **DGA (2010)**. Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. (S.I.T. 210., pp 277). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- **DGA (2012)**. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama: informe técnico / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Informe series SDT n°324.
- **DGA (2013)**. Informe Técnico Análisis de la Oferta Hídrica del Salar de Atacama (SDT N°339). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

- **DGA (2014).** Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final S.I.T N° 357. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- **DGA (2014).** Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en los sectores acuíferos del Salar de Atacama. Informe Técnico DARH N° 234.

3.4 Antecedentes de Terceros

A continuación, se presentan los antecedentes elaborados por terceros que han sido considerados como fuente importante para la elaboración de este informe, según temática:

3.4.1 Geología

Ramirez, C. & Gardeweg, M. (1982). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Toconao. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Carta geológica elaborada por SERNAGEOMIN donde se presenta la geología en escala regional, geología estructural y estratigrafía. Se presenta, además, perfiles geológicos para caracterizar la geología subsuperficial.

Marinovic, N y Lahsen, A. (1984). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Calama. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Mapa geológico de la zona norte de la cuenca del salar de Atacama. Presenta geología, estratigrafía y geología estructural de la zona de estudio. Se presenta, además, perfiles geológicos para caracterizar la geología subsuperficial.

Hydrotechnica. (1987). Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama.

En este estudio, la geología fue abordada mediante el análisis de imágenes multiespectrales, la perforación de 38 sondajes, análisis de difracción de rayos X y análisis petrográfico con microscopía óptica, geofísica de pozos y superficial.

Jordan, Mpodozis, C., Muñoz, N., Blanco, N., Panamont, P., Gardew, M. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of The Salar de Atacama Basin, northern Chile. Journal of South America Earth Sciences 23, 122-146.

Se presenta columna estratigráfica de pozo exploración "Toconao 1", perforado por ENAP. Presenta información estratigráfica hasta una profundidad de 5.425 m.

Golder Associates. (2017a). Anexo IV. 1. Modelo hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

Este estudio realiza un análisis de la geología del área Monturaqui-Negrilla-Tilopozo (MNT), donde se presenta un mapa con 5 perfiles geológico del área de estudio. Este estudio está orientado a identificar

las unidades geológicas y los controles estructurales presentes en el sector de MNT, dentro del contexto geomorfológico y estructural de la cuenca.

SGA. Solución en Gestión Ambiental. (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Se presenta un mapa geológico elaborado a partir de Hoja Toconao (Ramirez & Gardweg, 1982). Se presenta un análisis detallado de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, marco estratigráfico, geomorfología y geología estructural. El apéndice C de dicho estudio, presenta descripción estratigráfica detallada de 59 sondajes con los que se complementa la información estratigráfica.

MINSAL Ltda. (1988). Summary Report Clay Area, Salar de Atacama.

Se presenta una compilación de pozos realizados por MINSAL, donde se describen cinco unidades estratigráficas en la zona del Delta del Río San Pedro. Se realiza un análisis detallado de la geología de esta zona

3.4.2 Hidrología

Mardones, L. (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. En G. Lagos, El litio, un nuevo recurso para Chile (págs. 181-216).

En este estudio se presenta un análisis de la evaporación en el cual se genera una zonificación del Salar de Atacama. Este estudio ha servido como base para diferentes modelos conceptuales elaborados posteriormente. Se destaca, además, que la principal fuente de evaporación en el Salar corresponde al originado en la zona marginal y no en el núcleo. Presenta una amplia gama de variables hidrológicas, entre las que destaca la temperatura, humedad, velocidad del viento y aforos superficiales.

Amphos 21. (2008). Hidrología del sector oriental del Salar de Atacama.

Este informe presenta toda la información generada en el margen durante el 2009, mostrando un modelo conceptual de los sistemas lagunares de Soncor, Aguas de Quelana y Peine. Respecto a la hidrología, se presenta un análisis de estaciones meteorológicas, fluviométricas y evaporación.

SGA. Solución en Gestión Ambiental. (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

SGA recopila información histórica de precipitaciones de la cuenca del Salar de Atacama con las que genera un plano de isoyetas de precipitación promedio anual, obteniendo de igual manera, promedio de precipitaciones mensuales y anuales.

Para determinar la evaporación, SGA ha tenido en cuenta las áreas de evaporación definidas por Mardones, así como la información de 8 estaciones meteorológicas que miden la evaporación de lamina libre, complementandola con evaporación de tanque de salmuera de la estación planta SCL y domos para el cálculo de evapotranspiración.

Golder Associates. (2017a). Anexo IV. 1. Modelo hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

En esta sección, se realiza una caracterización del entorno hidrológico del área de estudio. Se divide en dos componentes principales: caracterización del régimen de precipitaciones y recarga de largo plazo y la caracterización de la evaporación en la zona de descarga. Para determinar la evaporación, se cuenta con mediciones de 6 lisímetros y 9 campañas de domos o cúpulas acrílicas instalados en el sector de Tilopozo.

Amphos 21 (2018). Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Etapa III, informe final. Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama.

Se presenta una caracterización hidrológica del área de estudio basado en el análisis de las variables precipitación, escorrentía y evaporación de las estaciones ubicados tanto dentro del área de estudio como en sus cercanías.

Se presenta un análisis estadístico de precipitaciones basado en una recopilación y posterior análisis de la información disponible. Además, se presentan los estadígrafos principales en cada estación y las series de tiempo representativas. Finalmente, se presenta una relación entre la precipitación media y la ubicación de las estaciones.

Para el análisis de la escorrentía se realizó una recopilación de la estadística fluviométrica generada por la DGA. Además, se muestran las curvas de variación estacional de caudales en las estaciones representativas de la cuenca. En el análisis de la escorrentía, Amphos 21 optó por no rellenar la estadística de caudales, argumentando que la extensión del registro permite estimar adecuadamente los parámetros medios en las estaciones principales.

Se recopiló una curva regional de evaporación media anual en función de la elevación presentada por DGA-DIHA PUC (2009). Se construyó esta curva a partir de información meteorológica disponible en las regiones XV, I, II y III. Se concluye que la evaporación va disminuyendo con la altura a partir de los 3000 m s.n.m., identificando, además, una variabilidad importante entre los 3000 y 3500 m s.n.m.

3.4.3 Hidrogeología

Pramar. (2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en el Salar de Atacama.

Estudio que presenta información de trabajos realizados por Hydrotechnica y Minsal. Explica el funcionamiento hidrogeológico de los Sistemas Lacustres Soncor, Aguas de Quelana y Peine.

Se establece que no existe relación entre el comportamiento hidráulico de las lagunas del borde este con el comportamiento hidráulico del núcleo del Salar de Atacama. Además, el estudio hidrogeológico demuestra la existencia de una zona de baja permeabilidad que separa el acuífero de agua del acuífero de salmuera.

SGA. Solución en Gestión Ambiental. (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Se presenta un modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Salar de Atacama. Los modelos se han elaborado a partir de antecedentes y aportan nueva información obtenida de campañas de terreno.

Este informe presenta mediciones mensuales de niveles estáticos en los acuíferos del núcleo y del margen. Esto se complementa con medición de aforos de aguas superficiales, isótopos, química de aguas y perfiles de conductividad eléctrica y temperatura. De forma adicional, se realizaron slug test y pruebas de bombeo para determinar parámetros hidráulicos en la zona sureste del núcleo del salar y en los sistemas lagunares de La Punta – La Brava y Peine.

CPH Consultores y asociados S.A. (2017) Adenda III Anexo 5. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Proyecto SLM NX Uno de Peine Rev 0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio. Realizado para Minera SLM NX Uno de Peine.

En el informe conceptual preparado como línea base para su EIA, SLM NX Uno de Peine, presenta información proveniente principalmente de Rockwood Lithium y SQM. En este estudio se proponen tres unidades hidrogeológicas: basamento impermeable, núcleo del salar y borde del salar de atacama.

Se realiza una compilación de antecedentes de parámetros hidráulicos y se complementa con información nueva de sondajes de la zona NW del Salar de Atacama.

Golder Associates. (2017a). Anexo IV. 1. Modelo hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

El presente informe resume las principales variables hidrogeológicas a partir de los datos obtenidos en su catastro de pozos, análisis de niveles, pruebas hidráulicas y los derechos de aprovechamiento del sector. Para esto, se utilizó la información de 260 pozos, diferenciando entre los pozos de bombeo y observación, y seleccionando en cada caso pozos representativos para cada zona estudiada.

A partir del análisis e interpretación de los antecedentes y nueva información producida en el margen de este estudio, se subdivide el sistema Monturaqui-Negrillar-Tilopozo en 9 unidades hidrogeológicas. Se entregan rangos de parámetros hidráulicos para cada una de estas unidades.

Amphos 21 (2018). Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Etapa III, informe final. Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama.

En el capítulo de hidrogeológica, Amphos 21 detalla las características hidrogeológicas de la cuenca a partir de los parámetros hidráulicos recopilados en antecedentes, presenta una descripción de las unidades hidrogeológicas e identificación de acuíferos, integrando toda esta información en un mapa hidrogeológico final.

La definición de unidades hidrogeológicas se basa en la guía de elaboración de mapas hidrogeológicos de Struckmeier & Margat (1995). De esta forma, la clasificación de las unidades se efectuó en función de las características litológicas, espesores y extensión de las unidades geológicas, así como también el potencial hidrogeológico que presentan a partir de los parámetros hidráulicos. Se define un total de 6 unidades hidrogeológicas.

La geometría de los acuíferos es presentada en un modelo 3D de Leapfrog.

3.4.4 Hidrogeoquímica

Pramar. (2006). Estudio de impacto ambiental cambios y mejoras en la operación minera en el Salar de Atacama.

Análisis realizado en función de los antecedentes presentados por Hydrotechnica. Se presentan mapas de distribución de diferentes iones (arsénico, cloruro y sulfato) en el borde este del salar.

Amphos 21. (2008). Hidrología del sector oriental del Salar de Atacama.

El análisis realizado en este informe muestra la caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de Soncor, Barros Negros y Aguas de Quelana. Los objetivos de este estudio buscan interpretar el origen de las aguas, identificar los procesos geoquímicos que tienen lugar en el sistema hidrogeológico y complementar e integrar la información hidrodinámica del sistema acuífero.

SGA. Solución en Gestión Ambiental. (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Se entregan los resultados de monitoreo químico e isotópico efectuados entre febrero 2013 y diciembre 2014. Adicionalmente, se recopilan las tablas de resultados y certificados de laboratorio de cada punto muestreado en el marco del estudio. El análisis hidrogeoquímico acá presentado fue complementado con antecedentes públicos y privados.

Golder Associates. (2017a). Anexo IV. 1. Modelo hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

El análisis hidrogeoquímico presentado este informe se divide en dos partes principales que permiten complementar la conceptualización del sistema de flujo subterráneo. La primera parte analiza la evolución de la calidad de aguas en distintos sectores del área de estudio; la segunda, realiza un análisis de los datos de calidad asociados a la interfase salina, con la cual se define el modo de descarga del sector de Tilopozo.

Amphos 21 (2018). Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Etapa III, informe final. Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama.

4 HIDROLOGÍA

4.1 Cuenca y drenaje superficial

La escorrentía superficial se encuentra condicionada por la morfología de la cuenca. La delimitación más actualizada de la cuenca del Salar de Atacama corresponde a la presentada en el SDT N° 356 “Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional” (DGA, 2014b) (Anexo MC1), el cual actualizó el Banco Nacional de Aguas (BNA) a nivel nacional a partir de la redefinición de las cuencas y subcuencas de mayor orden. De esta manera, el Salar de Atacama quedó subdividido en nueve subcuencas de acuerdo con lo que se indica en la Figura 4-1.

Sin embargo, esta delimitación actual no refleja todas las subcuencas que son posibles de distinguir a través de la red hidrográfica del Instituto Geográfico Militar. Por lo tanto, es necesario realizar una delimitación de la cuenca (estudio morfométrico) con el objetivo de definir la máxima subdivisión de zonas en la cuenca bajo criterios hidrológicos y de relieve. El proceso y el análisis aplicado del estudio morfométrico propuesto se indica en detalle en el Anexo MC1.

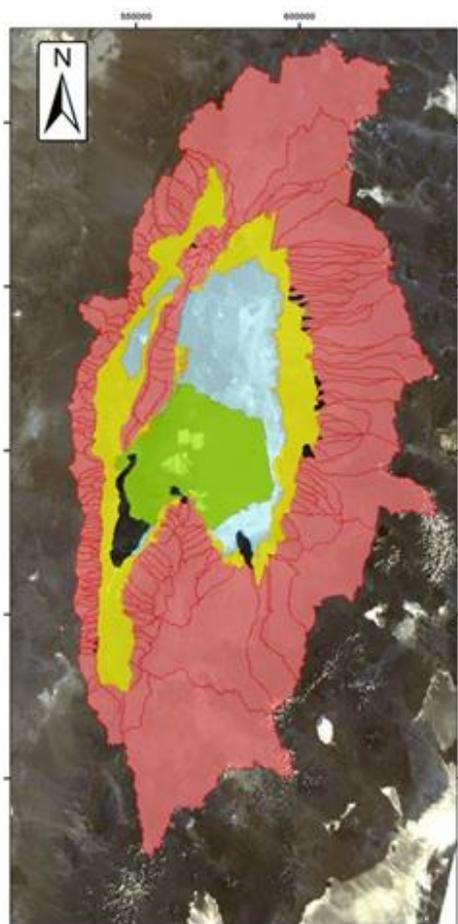
Con base en lo anterior, se pudo apreciar que la delimitación de la cuenca obtenida del análisis morfométrico presenta una diferencia de 0,15% en superficie con la delimitación del BNA, la cual se debe a un pequeño tramo localizado al suroeste de la cuenca (ver Anexo MC1). Dado estos resultados, se ha decidido utilizar la delimitación de la cuenca del BNA pero modificando este pequeño tramo, quedando a su vez subdividida en 257 subcuencas o unidades hidrológicas agrupadas en cinco zonas, de acuerdo a lo indicado en la Figura 4-2. De esta manera, la superficie de la cuenca del Salar de Atacama sería de 17.044,3 km². Con base en esta delimitación, y considerando la hidrografía del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50.000, en la Figura 4-3 se muestra la red hidrográfica principal de la cuenca del Salar de Atacama.

Los principales ríos de la cuenca son el Río San Pedro y Río Vilama, los cuales presentan escorrentía permanente, en general, durante todo el año. El sector oriental de la cuenca está caracterizado por presentar varias quebradas de tipo intermitente, cuyas aguas se infiltran en la zona aluvial o antes de llegar a ella. No obstante, es posible que los flujos de estas quebradas puedan llegar al Salar (zona marginal) cuando ocurren eventos hidrometeorológicos extremos estivales. Finalmente, en el sector oeste de la cuenca se aprecian quebradas que se activan únicamente durante los eventos de precipitación importante en estas zonas.

De esta manera, la cuenca del Salar de Atacama se define como una cuenca endorreica, en donde la escorrentía superficial originada en las partes altas de la cuenca escurre en forma de quebradas, ríos o vertientes que se infiltran al llegar a la zona aluvial, escurriendo subsuperficial y subterráneamente en dirección hacia el Salar. La evaporación de las aguas ocurrirá en el área del Salar, predominantemente en la Zona Marginal (Figura 4-2), sector donde se encuentran los principales cuerpos lagunares.



Figura 4-1. Cuencas y subcuencas de la región de Antofagasta. En azul se distingue la Cuenca del Salar de Atacama (código BNA 0205). Las nueve subcuencas que configuran la cuenca (código BNA del 020500 al 020508) están indicadas en color rojo.
Fuente: DGA, 2014.



ZONA NÚCLEO
Superficie: 1450 km ² Nº Unidades: 1
Se caracteriza por presentar poca variación altitudinal, siendo prácticamente una superficie totalmente plana sin escorrentía superficial durante todo el año. La litología de esta zona es prácticamente costra salina de Cloruro de Sodio. Se considera que esta superficie representa la cota más baja de la cuenca.
ZONA MARGINAL
Superficie: 1648 km ² Nº Unidades: 4
Se caracteriza por presentar gradientes topográficos muy bajos sin escorrentía superficial durante todo el año, salvo por el Canal de Burro Muerto originado por la surgencia de agua subterránea. La litología de esta zona es fundamentalmente de tipo carbonatada, sulfatada, clorurada y detrítica tipo arena fina, limo y arcilla más materia orgánica, con contenidos de humedad perceptibles en una imagen satelital producto de niveles someros de agua subterránea, lo que en algunos sectores puede justificar la presencia de cuerpos lagunares debido a la dinámica con la interfaz agua-salmuera
ZONA ALUVIAL
Superficie: 2219,4 km ² Nº Unidades: 14
Se caracteriza por presentar gradientes topográficos bajos a medios sin escorrentía superficial durante mayor parte del año, salvo durante eventos de crecidas. La litología de esta zona es de tipo detrítico aluvial y en pequeñas proporciones de tipo eólico. En esta zona la escorrentía proveniente de las subcuencas se infiltra recargando los acuíferos asociados.
ZONA DE SUBCUENCAS
Superficie: 11596,5 km ² Nº Unidades: 222
Presenta dos dominios divididos por un eje norte sur: la subzona Andina (Este) se caracteriza por presentar gradientes topográficos medios a altos, con escorrentía superficial permanente o intermitente durante el año. En estas subzona la red de drenaje está condicionada por las litologías volcánicas que caracterizan este lugar. En esta subzona se encuentran las quebradas y ríos que recargan el Salar, cuyo recurso proviene de las precipitaciones en las zonas altas y medias de la cuenca. La subzona Domeyko (Oeste) los gradientes son generalmente altos sin escorrentía permanente durante todo el año, salvo en eventos de precipitación considerables.
ZONA ARRÉICA
Superficie: 252,3 km ² Nº Unidades: 16
Se caracteriza por presentar características topográficas y litológicas combinadas que impiden ser agrupadas en la clasificación anterior y a su vez, no permiten la generación de algún tipo de escorrentía durante todo el año.

Figura 4-2. Zonificación morfométrica del Salar de Atacama. Fuente: Modificado de IDAEA-CSIC (2017).

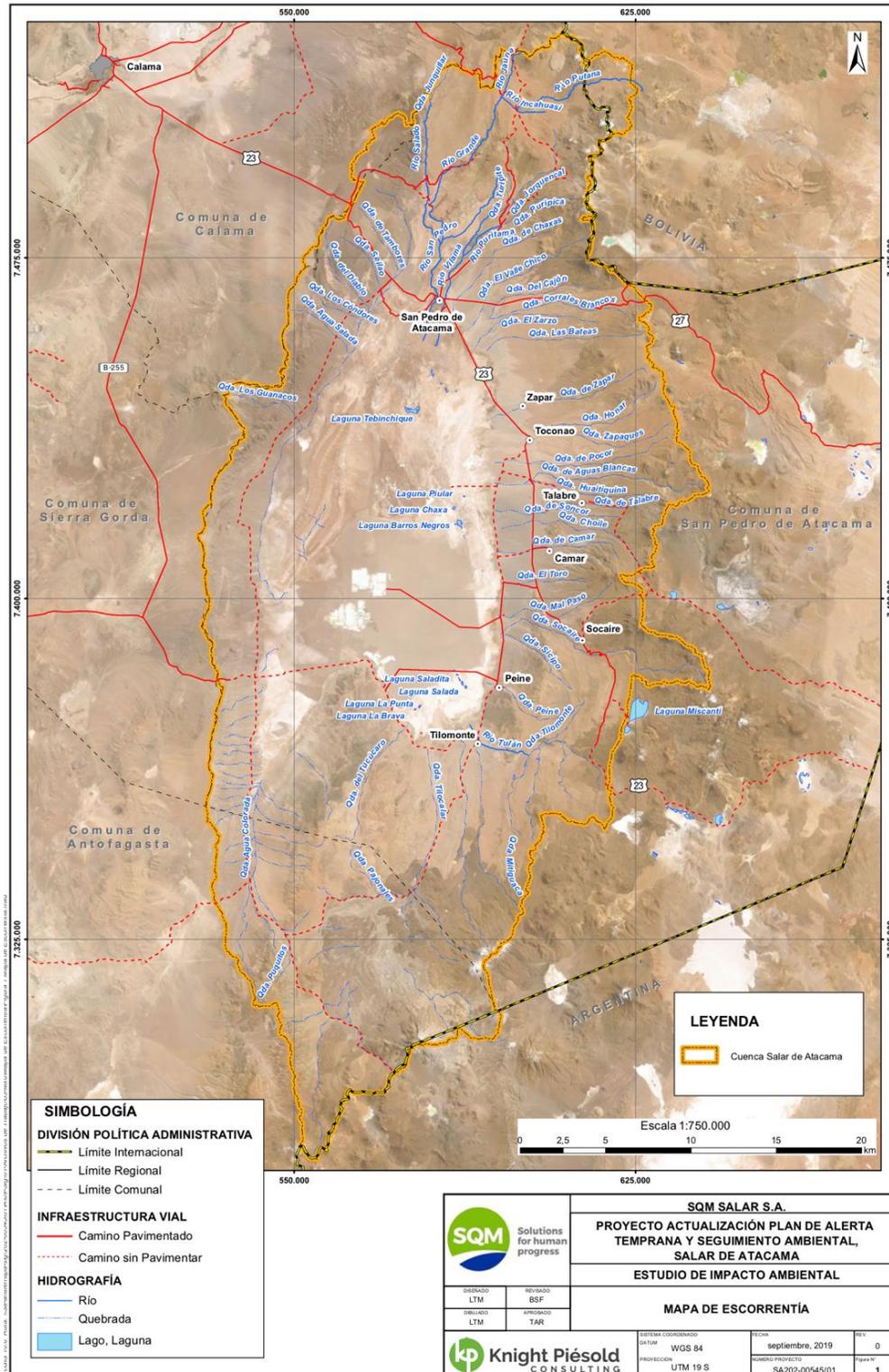


Figura 4-3. Mapa de Escorrentía de la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Knight Piésold (2019)

4.2 Precipitación

La precipitación en la cuenca del Salar de Atacama es principalmente producto de las masas de aire húmedo provenientes del noreste (Amazonas), que ocasionan precipitaciones en los meses de verano (fenómeno conocido como invierno altiplánico o boliviano). No obstante, durante los meses de invierno es posible identificar algunos eventos de precipitación, de menor magnitud que los ocurridos durante los meses estivales, cuyo origen está asociado a las masas de aire provenientes del Pacífico.

Para la caracterización de la precipitación se ha realizado un inventario de las estaciones meteorológicas con registros de precipitación existentes en la cuenca del Salar de Atacama (Tabla 4-1 y Figura 4-4). Estas estaciones pluviométricas son propiedad de la DGA, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Albemarle y SQM. Éstas han sido consideradas dado el carácter público que tienen, por ser de prioridad de SQM, o bien por la posibilidad de consultar los registros en los informes de seguimiento ambiental, como es el caso de la estación Rockwood¹ de Albemarle.

En el caso de las estaciones Imilac, El Tatio, Paso Jama y Paso Sico, definidas como parte del monitoreo meteorológico de la DGA para la cuenca del Salar de Atacama según se indica en el SDT N° 392 de 2016 (DGA, 2016), y que se encuentran fuera de la cuenca del Salar de Atacama, han sido consideradas dentro de la recopilación inicial, dado que son de utilidad para proyectar las precipitaciones en los márgenes de la cuenca.

¹ Hasta finales del año 2016 esta estación se conocía como SCL. Posteriormente y hasta la fecha, esta estación se conoce como "Rockwood". No obstante, los registros corresponden a la misma estación meteorológica.

Tabla 4-1. Estaciones Meteorológicas con registros de precipitación en la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

ESTACION	COORDENADAS WGS84			FUENTE	PERIODO DE REGISTRO
	ESTE (m)	NORTE (m)	ALTURA (m s.n.m.)		
Camar	606.057	7.410.866	2.721	DGA	1979-2018
Imilac	521.881	7.327.295	3.000	DGA	1974-1977
El Tatio	601.295	7.527.990	4.329	DGA	1977-2018
Monturaqui	557.103	7.307.450	3.430	DGA	1974-1979
Peine	595.137	7.380.682	2.390	DGA	1974-2018
Rio Grande	585.548	7.494.766	3.217	DGA	1977-2018
San Pedro De Atacama	581.987	7.466.178	2.445	DGA	1959-2018
Socaire	613.092	7.390.963	3.248	DGA	1974-2017
Talabre	613.530	7.421.080	3.255	DGA	1995-2018
Toconao Experimental	602.388	7.434.809	2.500	DGA	1975-2007
Toconao Retén	601.191	7.434.294	2.460	DGA	1975-1991
Paso Jama	632.989	7.464.136	4.825	DGA	2016-2018
Paso Sico	658.720	7.364.239	4.323	DGA	2016-2018
Toconao Pueblo	601.777	7.435.573	2.492	DGA	2016-2018
Toconao Quebrada 1	621.564	7.431.858	3.990	DGA	2016-2018
Toconao Quebrada 4	612.592	7.438.698	3.437	DGA	2016-2018
Toconao DGAC	601.775	7.435.530	2.495	DGAC	2013-2018
Camar	605.881	7.411.033	2.694	INIA	2017-2018
San Pedro de Atacama	580.648	7.463.770	2.416	INIA	2010-2018
Socaire	613.252	7.390.661	3.357	INIA	2010-2018
Toconao	601.607	7.435.045	2.478	INIA	2010-2018
Chaxa	583.530	7.424.240	2.307	SQM	1999-2018
KCL	561.376	7.396.240	2.300	SQM	2005-2018
SOP	562.717	7.403.324	2.300	SQM	2011-2018
LZA10-1	578.689	7.373.409	2.304	SQM	2015-2018
LZA7-1	591.697	7.394.060	2.301	SQM	2015-2018
LZA7-2	593.889	7.388.689	2.302	SQM	2015-2018
LZA3-1	590.919	7.403.563	2.300	SQM	2015-2018
LZA3-2	590.646	7.408.473	2.301	SQM	2015-2018
LZA12-2	593.220	7.394.904	2.306	SQM	2015-2018
LZA12-3	589.174	7.451.500	2.351	SQM	2015-2018
LZA12-1	592.021	7.417.657	2.309	SQM	2015-2018
LZA3-3	590.638	7.416.254	2.302	SQM	2015-2018
LZA9-1	584.312	7.380.450	2.301	SQM	2015-2018
Rockwood	568.771	7.385.238	2.300	Albemarle	1997-2018

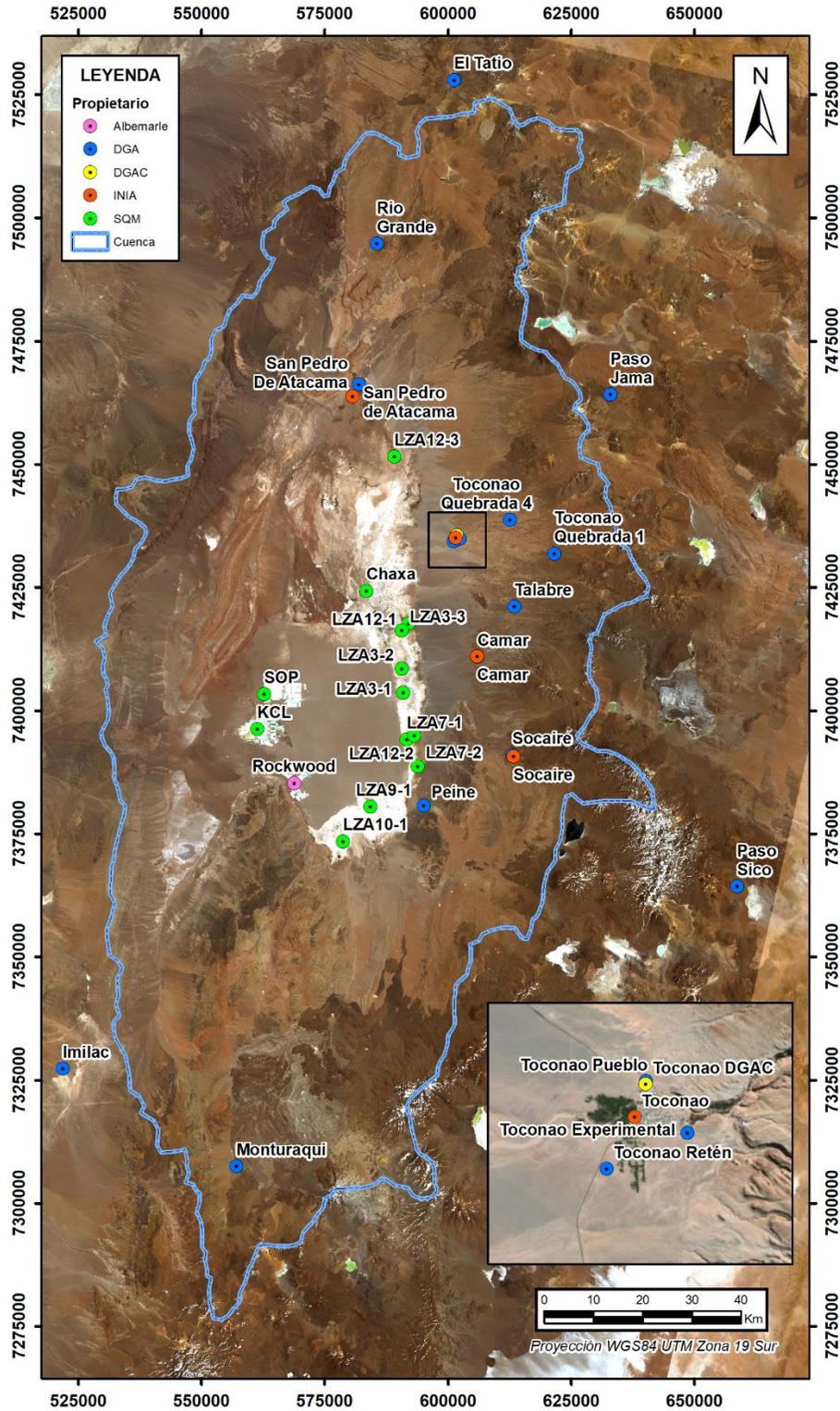


Figura 4-4. Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la precipitación. Fecha Imagen satelital: 28/05/2018. Fuente: Elaboración propia.

En general, las precipitaciones aumentan con la altura, como se observa al comparar los datos de precipitación mensual de tres estaciones de la cuenca: la estación KCL (SQM) ubicada a 2300 m s.n.m., Socaire (DGA) ubicada a 3248 m s.n.m., y El Tatio (DGA) ubicada a 4329 m s.n.m (Figura 4-5). Además, se aprecia que los eventos de mayor precipitación están asociados a las épocas estivales, y se distribuyen temporalmente de forma casi aleatoria y sin un patrón regular que permita definir la recurrencia de éstas dentro del período de registro. Esto se evidencia, por ejemplo, con las grandes precipitaciones simultáneas durante la primera mitad de la década de los 80, principios del año 2000 o a partir del año 2010, las cuales vienen sucedidas por eventos de menor o nula magnitud durante varios años.

Por otro lado, la ausencia de información en los registros justo durante la ocurrencia de grandes eventos dificulta la interpretación de las lluvias en la cuenca durante un evento en específico. Esto, por ejemplo, ocurre con el evento mayor registrado a comienzos del 2014 en las estaciones Socaire y KCL, el cual no se registra en la estación El Tatio. En efecto, en esta última no se tienen registros entre el 2013 y 2016, periodo en el cual, además del evento mayor descrito anteriormente, se reconocen al menos dos eventos menores en la estación KCL.

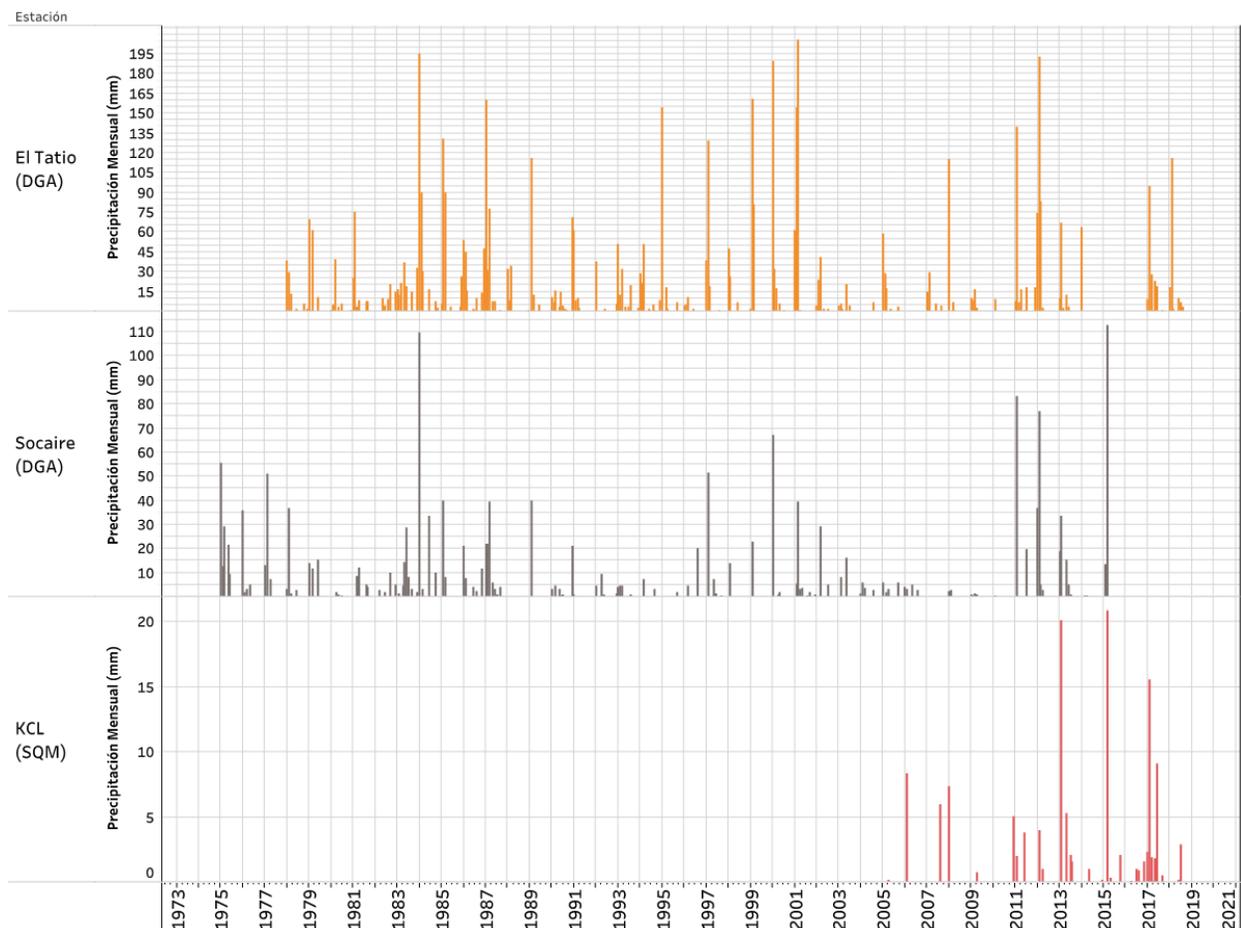


Figura 4-5 Precipitación Mensual en las estaciones El Tatio (DGA), Socaire (DGA) y KCL (SQM). Fuente: Elaboración propia

Debido a esta particularidad en la calidad de los registros de precipitación, es necesario realizar un análisis que permita completar los registros faltantes y, a su vez, generar un análisis robusto que contemple la coincidencia temporal de todos ellos. Este análisis se presenta en detalle en el Anexo MC1.

4.2.1 Distribución de la precipitación en la Cuenca del Salar de Atacama

Una vez realizado el relleno de los registros de precipitación en la cuenca, se procede con la caracterización de la precipitación en la cuenca del Salar de Atacama. A pesar de que el proceso de relleno se ha realizado para el periodo 1974-2018, la caracterización de la precipitación se realiza para el periodo 1986-2018, considerando los periodos definidos para la modelación hidrogeológica conceptual y numérica (ver apartado 1.3). En la Tabla 4-2 se presentan los promedios anuales de precipitación obtenidos para cada una de las estaciones analizadas durante el periodo enero de 1986 – diciembre de 2018. A partir de estos valores promedio se definen las isoyetas para toda la cuenca, las cuales fueron obtenidas mediante una interpolación Spline de los datos (Figura 4-6), usando el software ArcMap 10.6.

Tabla 4-2. Precipitación media anual por estación, para el período 1986-2018. Fuente: elaboración propia.

ESTACIÓN	1986-2018 <i>mm/año</i>
Camar (DGA)	33,94
Chaxa (SQM)	26,00
El Tatio (DGA)	128,01
KCL (SQM)	8,44
Monturaqui (DGA)	41,75
Peine (DGA)	19,23
San Pedro de Atacama (DGA)	34,32
Socaire (DGA)	38,15
Rockwood (Albemarle)	14,65
Rio Grande (DGA)	70,90
Talabre (DGA)	58,25
Toconao Experimental (DGA)	28,87

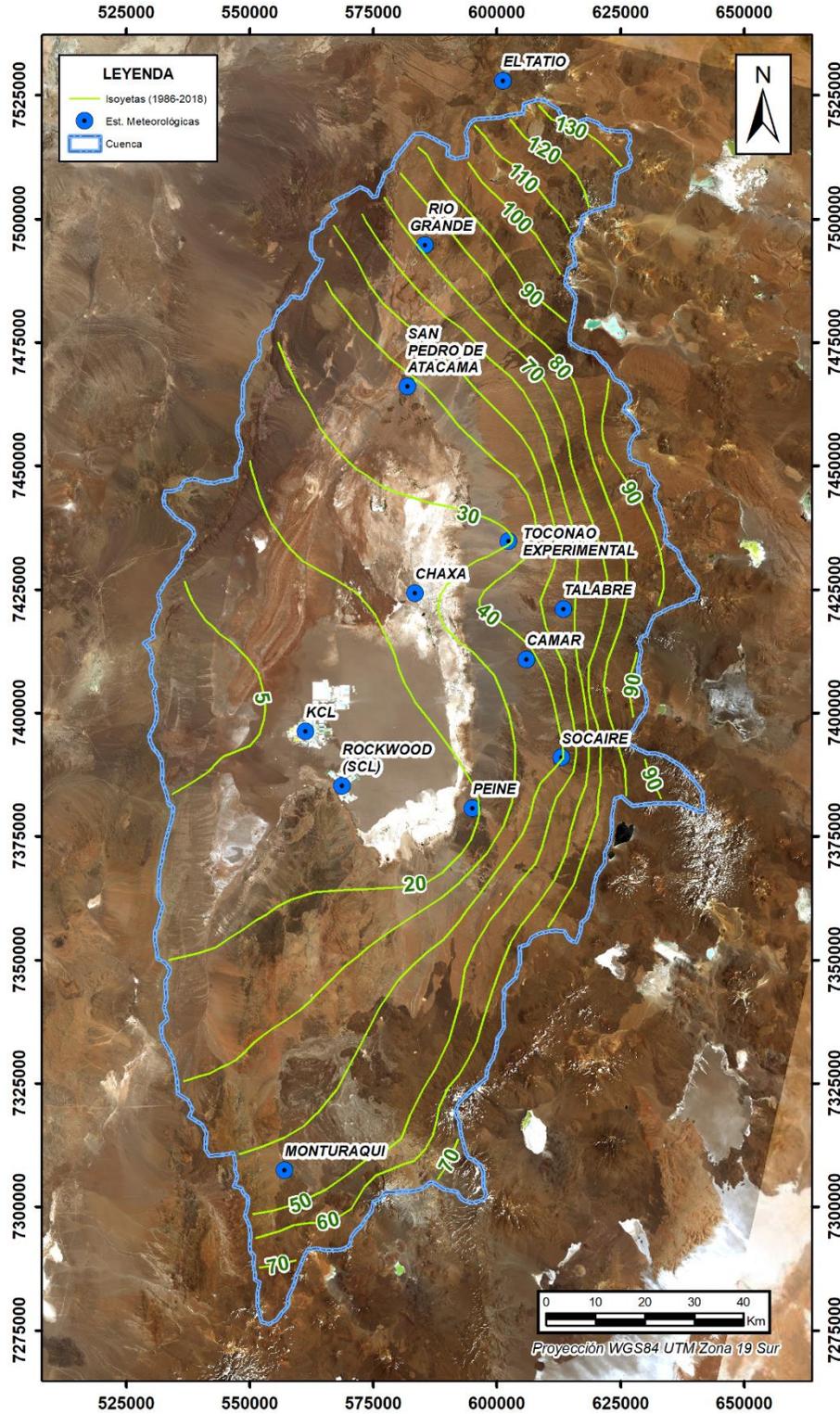


Figura 4-6. Mapa de isoyetas (mm/año) para el período 1986 – 2018. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Caudales superficiales

En la cuenca del Salar de Atacama la escorrentía superficial constituye la fuente de abastecimiento de bofedales en las quebradas y, además, se utiliza para el riego en agricultura tradicional y como abastecimiento para la ganadería. La escorrentía ocurre principalmente en las zonas altas de la cuenca, pero puede alcanzar las zonas más bajas cuando los eventos de precipitación son importantes. En general, el caudal sobrante se infiltra a través de los abanicos aluviales del río San Pedro y Vilama, por el sector norte, y a través de los depósitos aluviales que rodean la zona marginal, por el sector este y sur.

Para el registro y cuantificación de esta escorrentía existen estaciones y secciones de aforo con registros históricos, además de mediciones puntuales que permiten analizar y cuantificar su comportamiento. Esta información es generada principalmente por la DGA (Figura 4-7 y Tabla 4-3; Anexo MC1).

Tabla 4-3. Coordenadas de las estaciones fluviométricas y aforos utilizadas para el análisis de caudales superficiales. Fuente: elaboración propia.

ESTACIÓN	COORDENADAS WGS84		TIPO	PERIODO DE REGISTRO
	ESTE (m)	NORTE (m)		
Río San Pedro en Cuchabrachi	582.083	7.475.499	Fluviométrica	1947-2015
Río Vilama en Vilama	583.595	7.470.601	Fluviométrica	1971-1972
Canal Aguas Blancas	600.733	7.425.563	Fluviométrica	1977-1982/1992-2001
Canal Cuno en Socaire	617.452	7.387.854	Fluviométrica	1989-2018
Canal Tulan en Tilomonte	590.688	7.368.361	Fluviométrica	1977-1978/1990-2000
Canal Tilomonte antes Represa	591.985	7.367.584	Fluviométrica	1997-2018
Canal Vilama en Vilama	584.021	7.470.260	Fluviométrica	1976-2016
Quebrada de Jerez	602.845	7.435.114	Aforo	1995-2016
Quebrada de Camar – Vertiente 1	606.283	7.411.161	Aforo	1997-2007/2011-2012
Quebrada de Camar – Vertiente 2	606.511	7.411.282	Aforo	1997-2016
Quebrada de Talabre en Tumbre	623.250	7.420.102	Aforo	1995-2013
Vertiente Peine en Peine	596.005	7.380.506	Aforo	1995-2016

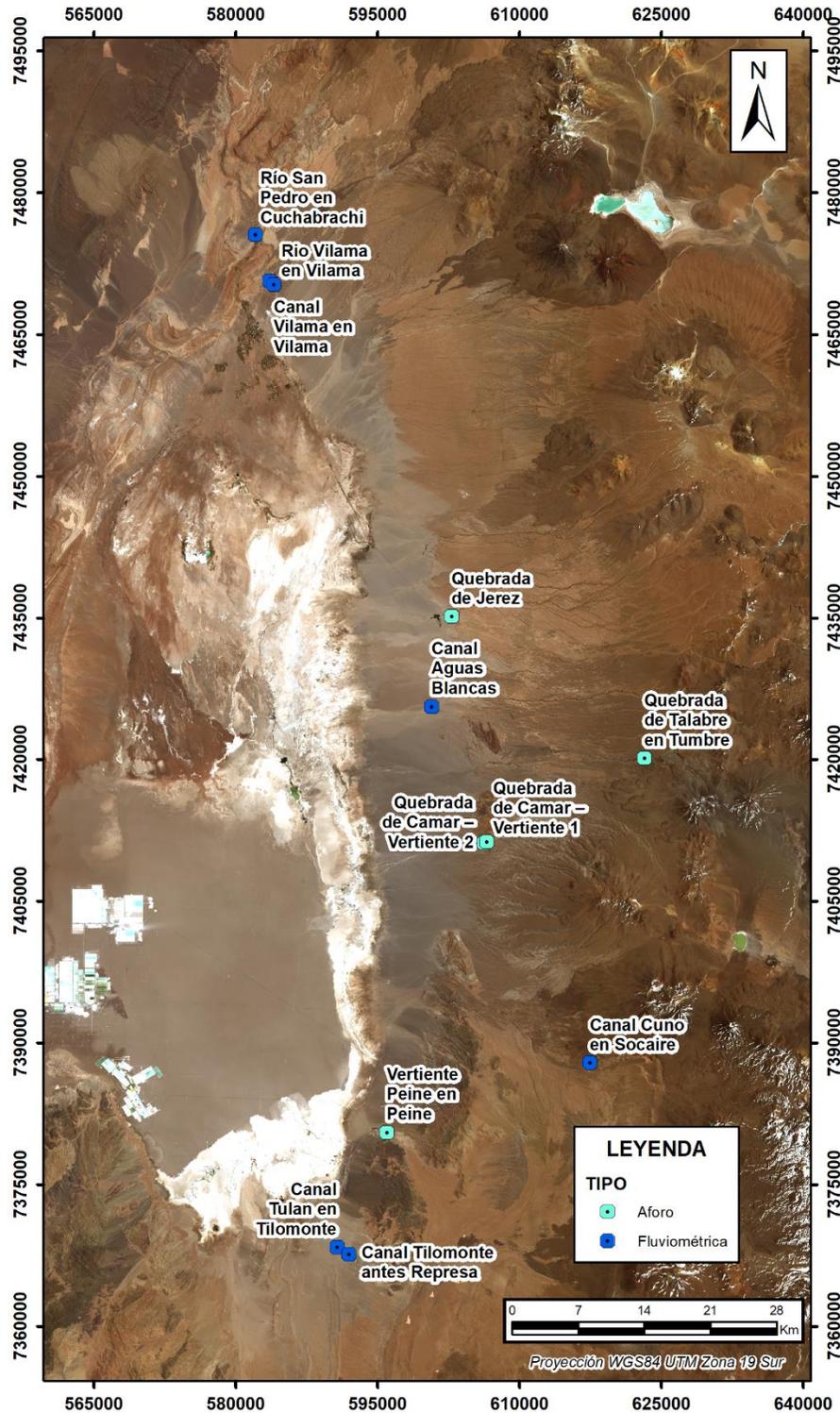


Figura 4-7. Localización de las estaciones con datos de aforo y quebradas consideradas para la evaluación de los caudales superficiales. Imagen satelital: 28/05/2018. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4-8 se puede apreciar la continuidad temporal de los registros, en donde se pueden distinguir periodos extensos de ausencia datos. A partir de la segunda mitad de la década de los 90, probablemente relacionado con la puesta en marcha de nuevos proyectos productivos en la cuenca, el monitoreo aumenta incorporando mediciones puntuales tipo aforo, en algunas de las quebradas más importantes de la cuenca (después del Río San Pedro y el Vilama), con un régimen de escorrentía muy estable y homogéneo durante todo el año.

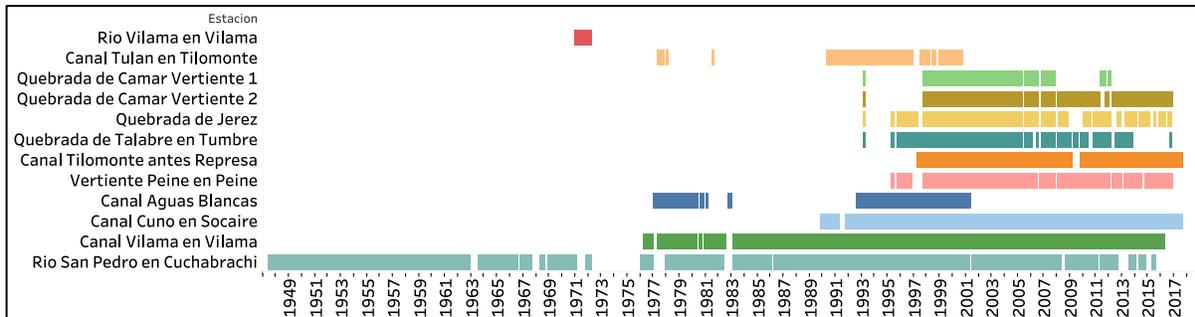


Figura 4-8. Registro temporal de los datos de caudales superficiales en la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: elaboración propia

Cabe destacar la variedad en la tipología de puntos de monitoreo existentes en la cuenca, es decir, el monitoreo tanto de ríos, canales, quebradas y vertientes. En la Tabla 4-4 se indican los promedios de los caudales medios mensuales y el caudal medio anual para el periodo de registro disponible para cada estación a partir de 1990 (Figura 4-8). Bajo este criterio, no se consideran los registros de la estación Río Vilama en Vilama, ya que el registro disponible de dicha estación considera únicamente el periodo 1972-1973. Se aprecia que los caudales más altos se dan en el sector norte de la cuenca (estaciones Río San Pedro en Cuchabrachi y Canal Vilama en Vilama; ver Tabla 4-4).

Tabla 4-4. Promedios mensuales y anual de caudal (L/s) para cada una de las estaciones consideradas en el análisis de caudal superficial, considerando los registros desde 1990. Fuente: Elaboración propia.

		Canal Aguas Blancas	Canal Cuno en Socaire	Canal Tulan en Tilomonte	Canal Tilomonte antes represa	Canal Vilama en Vilama	Río San Pedro en Cuchabrachi	Quebrada de Camar – Vertiente 1	Quebrada de Camar – Vertiente 2	Quebrada de Jerez	Quebrada de Talabre en Tumbre	Vertiente Peine en Peine
Promedio Mensual Caudal (l/s)	ene	93	135	34	28	128	676	7	13	54	14	7
	feb	89	144	33	29	121	796	5	10	62	10	7
	mar	84	150	30	30	124	677	6	12	67	13	8
	abr	83	157	35	29	136	622	5	13	58	13	8
	may	73	164	37	32	142	732	7	11	63	13	7
	jun	89	171	41	33	136	824	4	12	67	10	7
	jul	97	175	44	34	140	917	7	12	66	15	8
	ago	94	180	41	34	128	844	7	13	54	11	8
	sep	103	186	32	32	109	627	6	12	62	16	7
	oct	105	169	32	29	116	569	5	12	65	12	7
	nov	93	126	30	29	121	567	5	12	60	14	8
	dic	89	129	31	28	129	555	7	11	61	10	8
	<i>Promedio anual</i>	91	157	35	31	128	701	6	12	62	13	7

En la Figura 4-9 se representan los caudales medios mensuales correspondientes al registro de Río San Pedro en Cuchabrachi. En el gráfico se observan dos periodos máximos (enero – marzo; mayo - julio); el primero se asocia al periodo de máximas precipitaciones, mientras que el segundo no se correlaciona directamente con eventos de precipitación (Figura 4-9). El origen del alto caudal durante estos meses se considera que estaría asociado principalmente a los aportes de flujo subterráneo.

Los caudales medios mensuales para las estaciones de aforo restantes muestran, en general, respuestas de crecidas de caudal correspondientes a los meses de invierno (Figura 4-10). Por otro lado, las variaciones de caudal más destacables se registran en las estaciones ubicadas en los canales, mientras que, en las estaciones ubicadas en las quebradas, la variación de caudal es más atenuada.

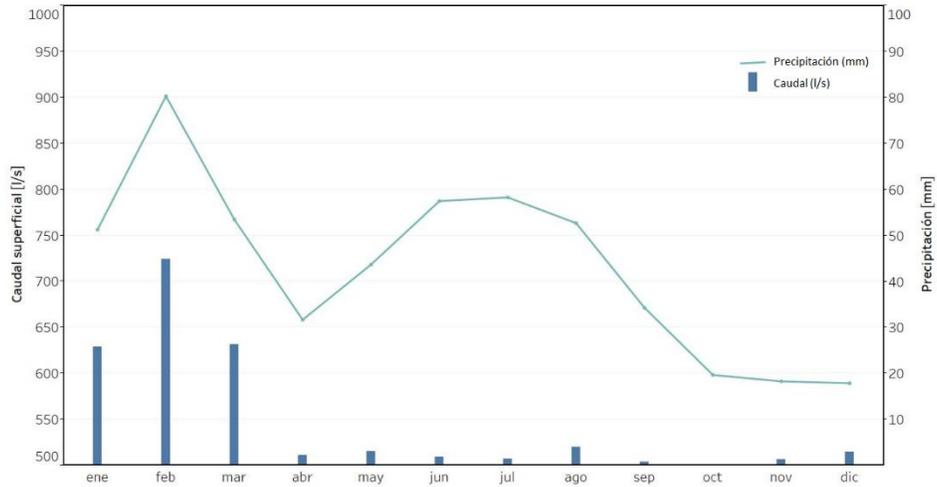


Figura 4-9. Relación entre caudal medio mensual (barras azules; [L/s]), y la precipitación (curva verde; [mm]) registrada en la estación San Pedro de Atacama -DGA para la estación de aforo a Río San Pedro en Cuchabrachi. Fuente: elaboración propia.

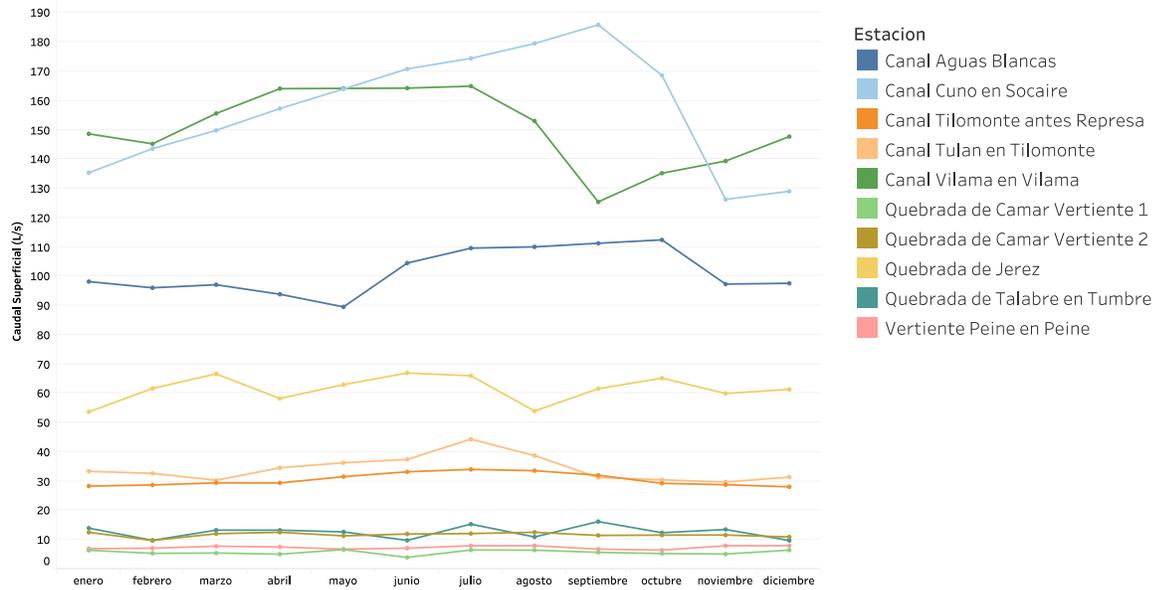


Figura 4-10. Caudal medio mensual (L/s) para las diferentes estaciones de aforo objeto de estudio respecto de un año-calendario. Fuente: elaboración propia

4.3.1 Sistema Soncor

En el sistema Soncor, las lagunas Chaxa y Barros Negros se alimentan principalmente por el agua superficial que transporta el Canal del Burro Muerto (Figura 4-11). Aguas arriba de laguna Chaxa se ubica el punto de aforo llamado Puente San Luis, que corresponde al punto de aforo con mayor tiempo de registro: desde el año 2007 en adelante. En la Figura 4-12 se muestra el promedio de los datos de aforo en Puente San Luis y Barros Negros para la serie existente. Se ha añadido como etiqueta el número de mediciones realizadas en el año. Se observa que en Puente San Luis las mediciones son diarias, mientras que en Barros Negros mensuales.

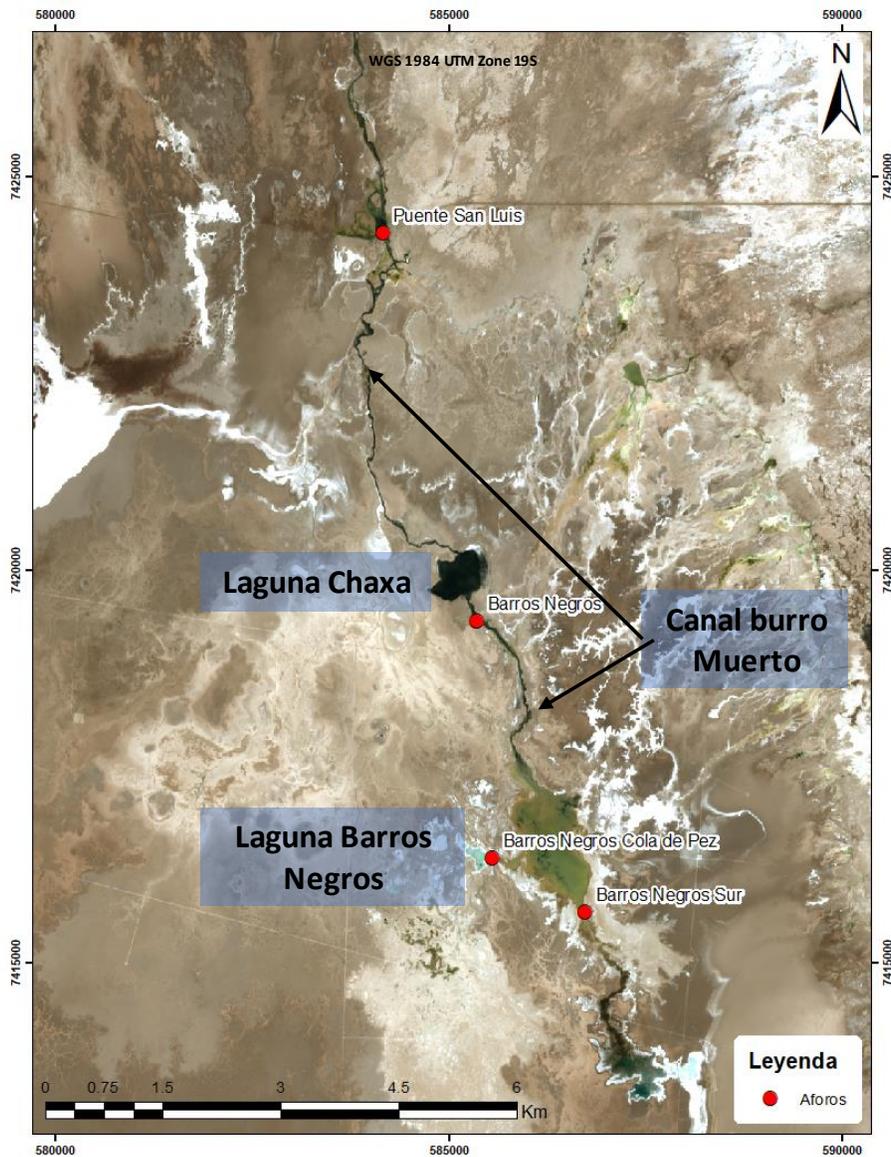


Figura 4-11. Puntos donde se realiza aforo en el sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia.

Los aforos en Barros Negros son por lo general de mayor magnitud a los registrados en Puente San Luis. En promedio, se tienen unos 57 l/s más en el primero respecto del segundo (Figura 4-12).

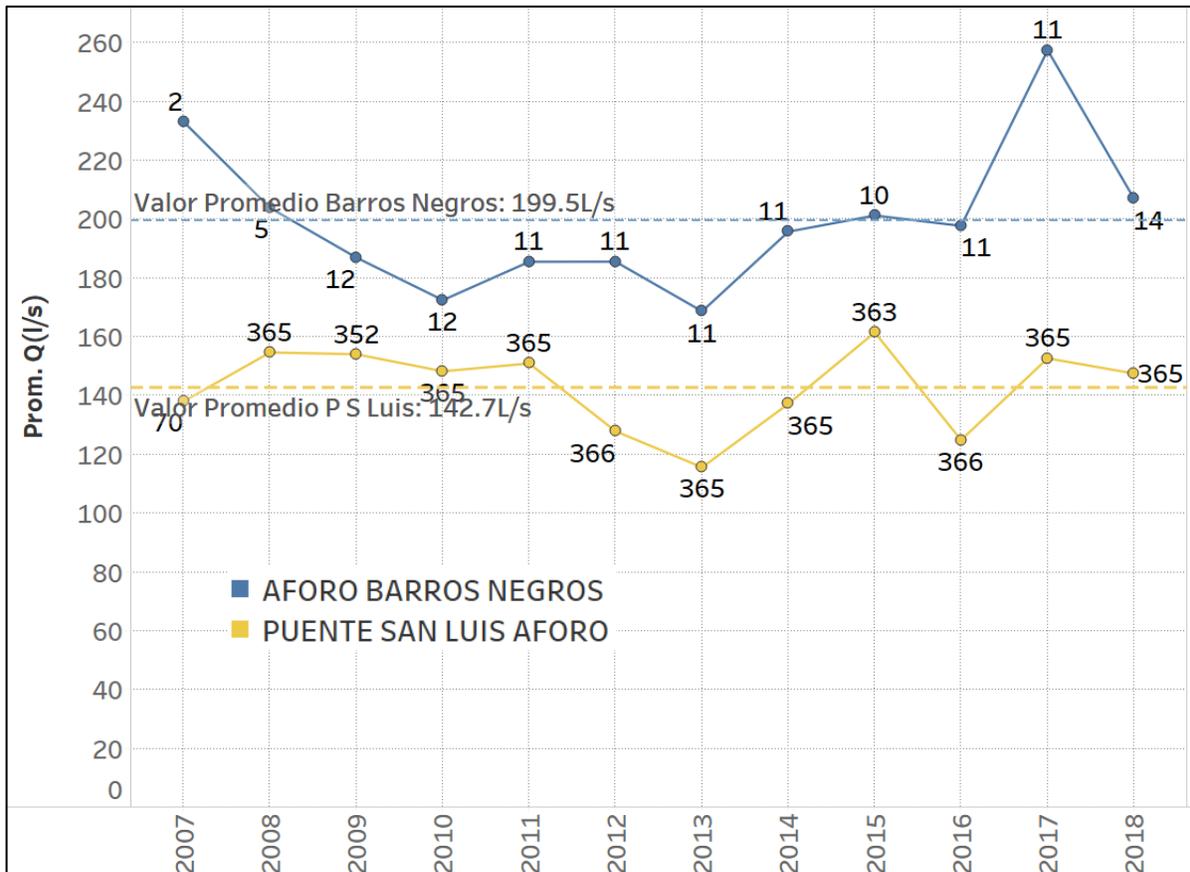


Figura 4-12. Promedios anuales de aforos en Puente San Luis y Barros Negros. Fuente: Elaboración propia con datos del PSAH.

La Figura 4-13 muestra los valores promedios anuales para los aforos en los desbordes de este sistema: Cola de Pez y Desborde Sur. Estos datos de aforo nunca han podido ser medidos todos los meses del año, por lo que presentan cierto sesgo al alza ya que los meses con mayores problemas de acceso corresponden, por lo general, a los meses de verano (diciembre – enero). En estos meses se registran los menores caudales, frecuentemente siendo igual a cero. Hay que considerar también que las secciones de aforo en estos puntos son naturales, relativamente anchas y con velocidades bajas en su sección, por lo que no tienen la misma precisión que los otros puntos de aforo.

Por lo anterior, resulta imprescindible complementar el análisis con otros antecedentes que permitan desarrollar un modelo conceptual integrado. En específico, más detalles respecto de cómo lo anterior compatibiliza con el modelo conceptual hidroquímico se presenta en el capítulo 6.6.4 del presente trabajo.

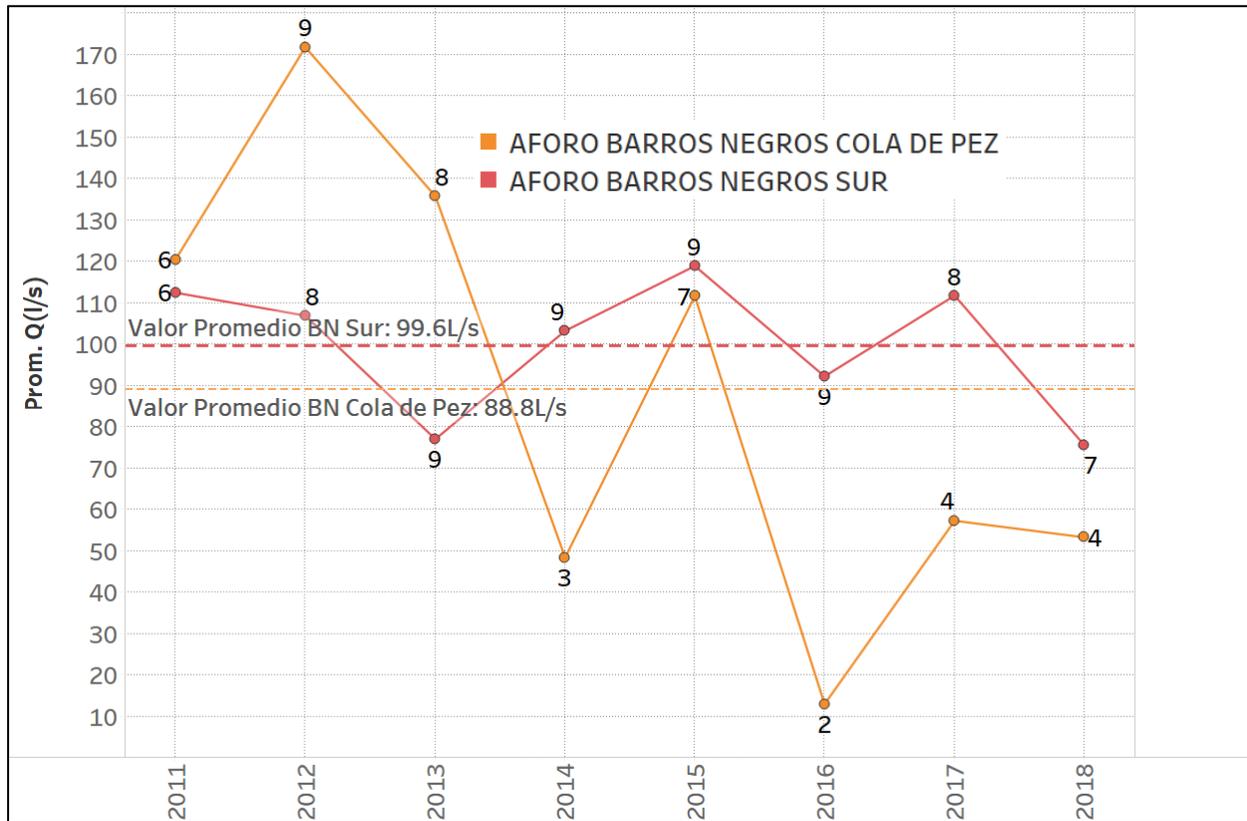


Figura 4-13 Promedios anuales de aforos en los desbordes Barros Negros Cola de Pez y Barros Negros Sur. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Sistema Peine

En la Figura 4-14 se muestran los puntos con medición de aforo en el sistema Peine. Por su parte, en la Figura 4-15 muestra los promedios anuales para los aforos existentes en el Sistema Peine. En general, los caudales en Saladita son menores que en Salada, como consecuencia de la evaporación en el tránsito del agua desde el este. Puede verse, además, que desde 2017 se cuenta con únicamente 5 mediciones por año, por lo que los promedios obtenidos para dichos años pueden considerarse poco representativos.

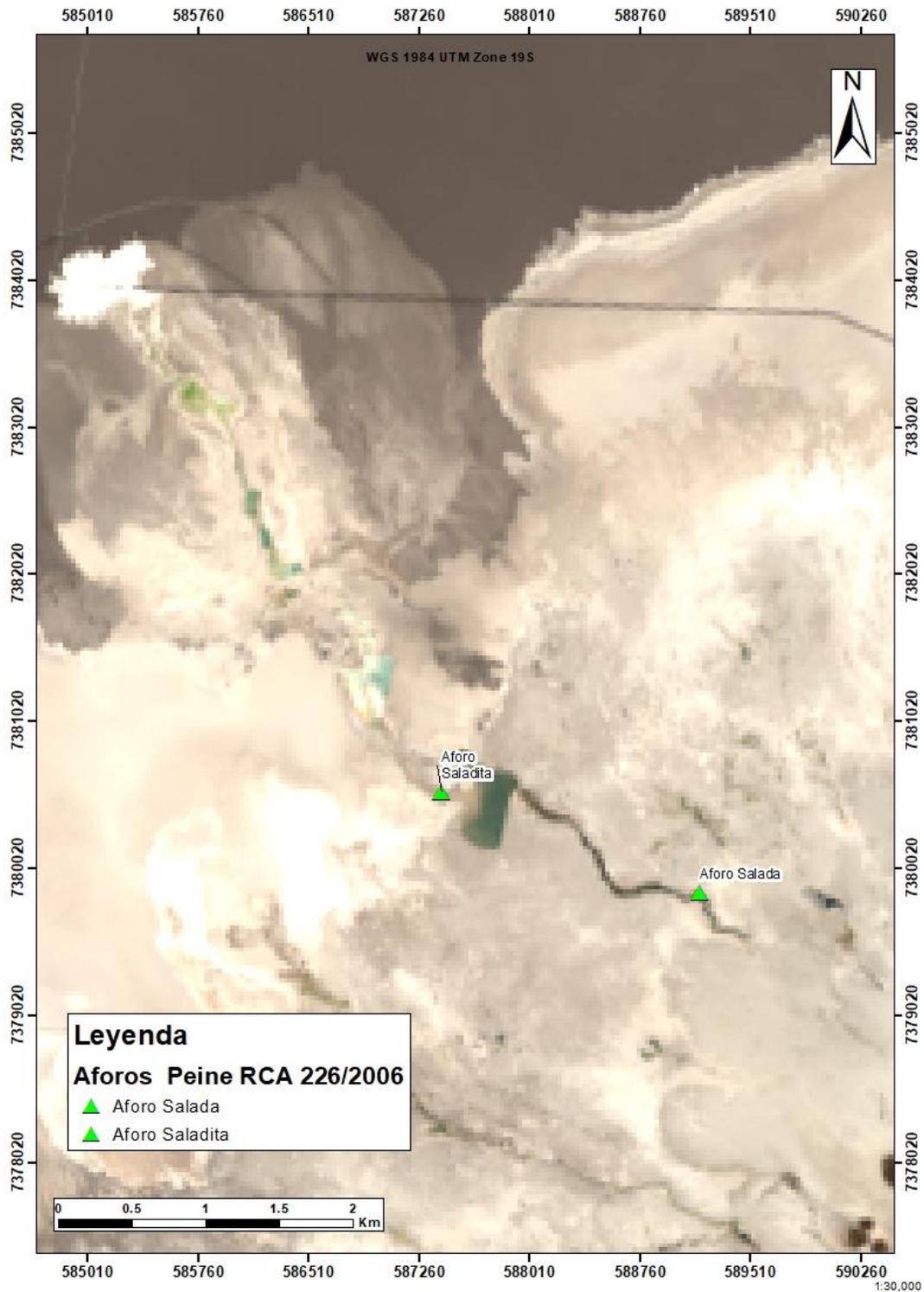


Figura 4-14 Puntos aforo existentes en sistema Peine. Fuente: Elaboración propia

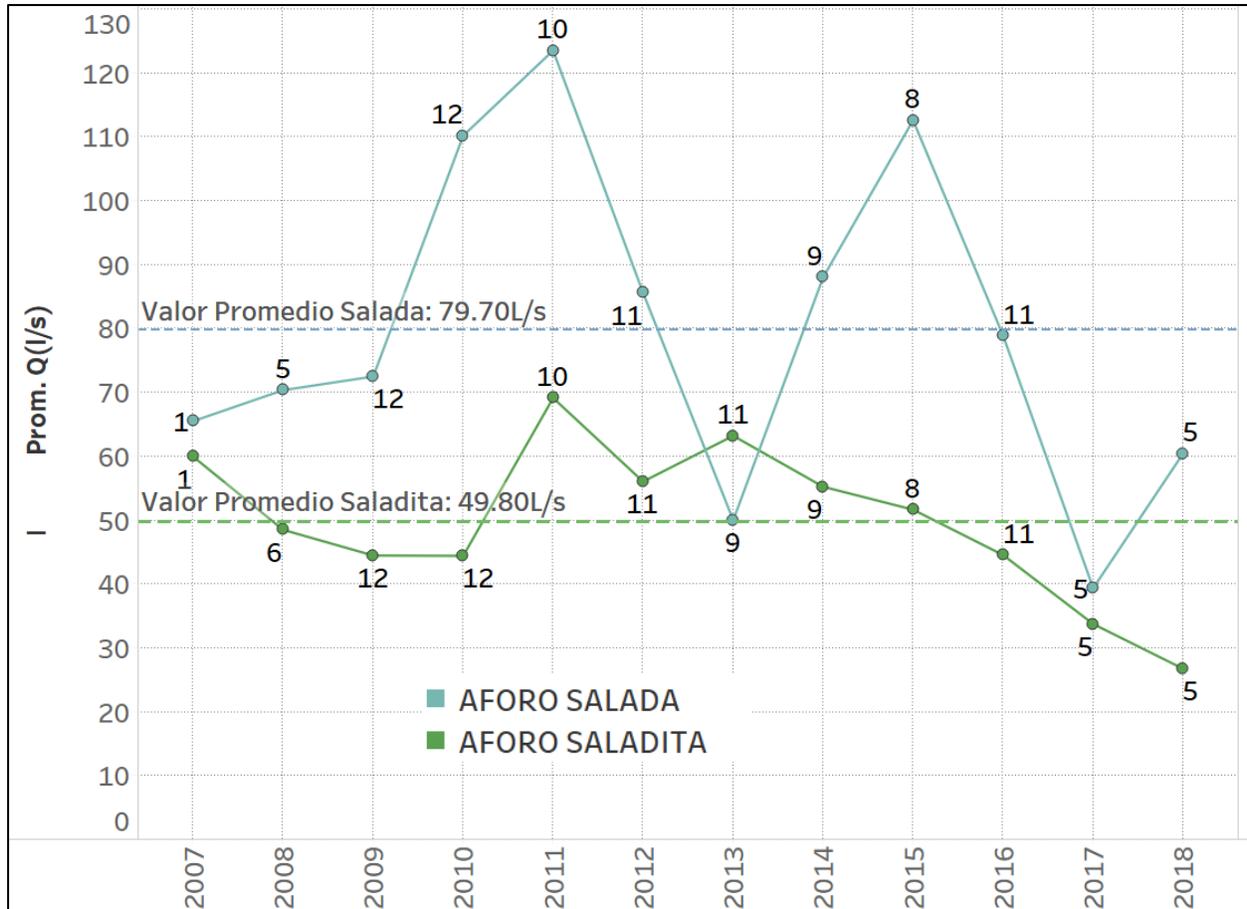


Figura 4-15 Valores de aforos medidos en el Sistema Peine. Las etiquetas de cada punto indican la cantidad de mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia con datos del PSAH.

4.4 Temperatura

A partir del análisis de los datos de temperatura obtenidos de las estaciones de la Tabla 4-5 (Figura 4-16 y Figura 4-17), se aprecia una oscilación estacional de los valores de temperatura máxima, mínima y promedio en la cuenca del Salar de Atacama: valores máximos por encima de los 20°C durante los meses de verano en las estaciones más bajas (sobre los 2300 m s.n.m.), mínimas de -20°C durante los meses de invierno en las estaciones más altas (sobre los 4000 m s.n.m.; Figura 4-16), y promedios entre los -5° en las partes más altas (Figura 4-17) y 20°C a la altura del Salar de Atacama (2.300 m s.n.m.).

Tabla 4-5. Estaciones meteorológicas utilizadas para la caracterización de la temperatura

ESTACION	COORDENADAS WGS84			PROPIETARIO
	ESTE <i>m</i>	NORTE <i>m</i>	ALTURA <i>msnm</i>	
SQM Campamento Andino	596.215	7.396.752	2.330	SQM
KCI	561.376	7.396.240	2.300	SQM
Paso Jama	633.173	7.464.499	4.680	DGA
El Tatio	601.295	7.527.990	4.370	DGA

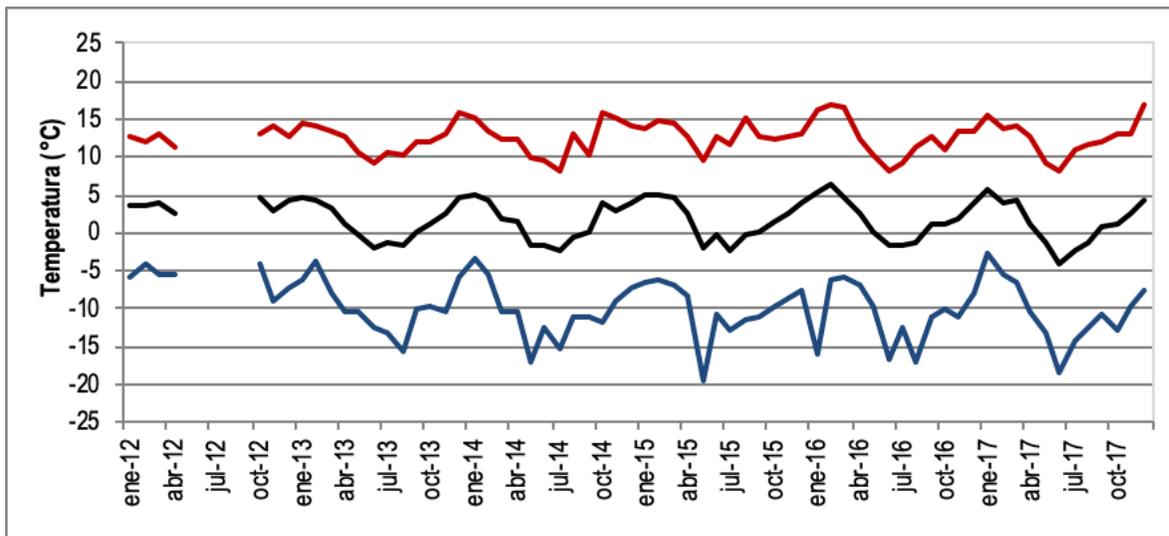


Figura 4-16. Temperatura Máxima (rojo), promedio (negro) y mínima (azul) de la estación El Tatio

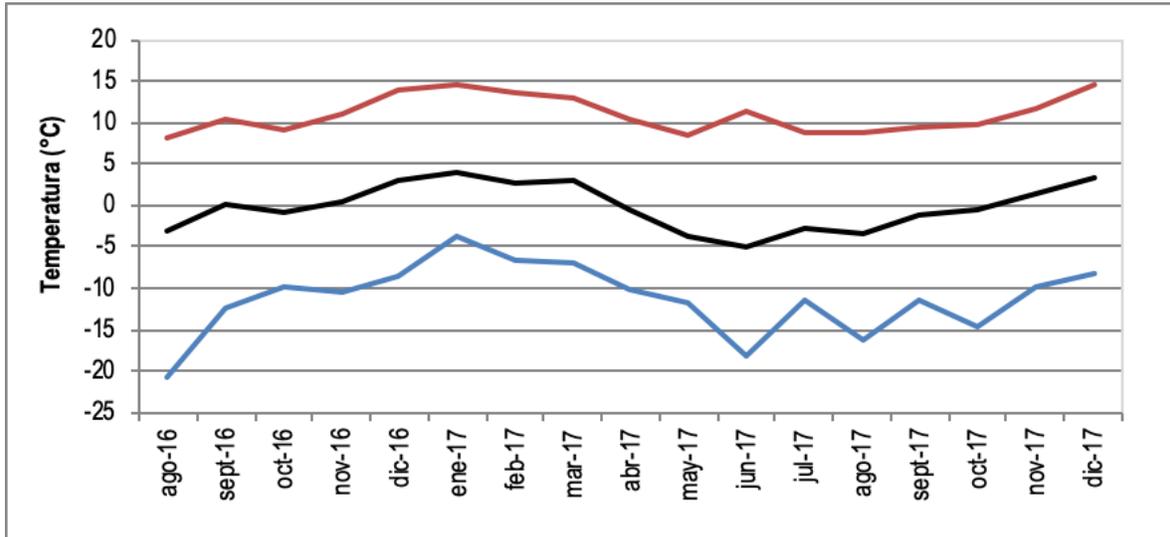


Figura 4-17. Temperatura Máxima (rojo), promedio (negro) y mínima (azul) de la estación Paso Jama

4.5 Evaporación

4.5.1 Evaporación Potencial

Para estimar la evaporación potencial en la cuenca del Salar de Atacama, se considera la evaporación de bandeja medida en las estaciones meteorológicas y un factor de corrección, según se describe a continuación:

$$E_0 = E_{pan} * K_{pan}$$

Donde E_0 es la evaporación potencial (mm/d); E_{pan} es la evaporación medida en la bandeja de evaporación estándar (mm/d) y K_{pan} es el coeficiente de bandeja (FAO, 2006). Para este estudio se adoptó un K_{pan} igual a 0,75, al igual que los estudios de la DGA y Rockwood (DGA, 2010; SGA, 2015).

Los datos de evaporación de bandeja considerados en el presente trabajo corresponden a las mediciones diarias observadas en las estaciones meteorológicas de SQM en el Salar de Atacama, las que se identifican en la Tabla 4-6. y Figura 4-18 En el Anexo MC1 se muestran las series de evaporación de bandeja utilizadas. Del conjunto señalado, las estaciones Chaxa y KCL presentan el registro más extenso de datos de evaporación con mediciones iniciadas en 1999 hasta la fecha, mientras que los registros del SOP presentan registros desde el 2011.

Tabla 4-6. Estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación en lámina libre.
Fuente: elaboración propia.

ESTACION	COORDENADAS WGS84		
	ESTE <i>m</i>	NORTE <i>m</i>	ALTURA <i>msnm</i>
Chaxa	583.530	7.424.240	2.307
KCL	561.376	7.396.240	2.300
SOP	562.717	7.403.324	2.300

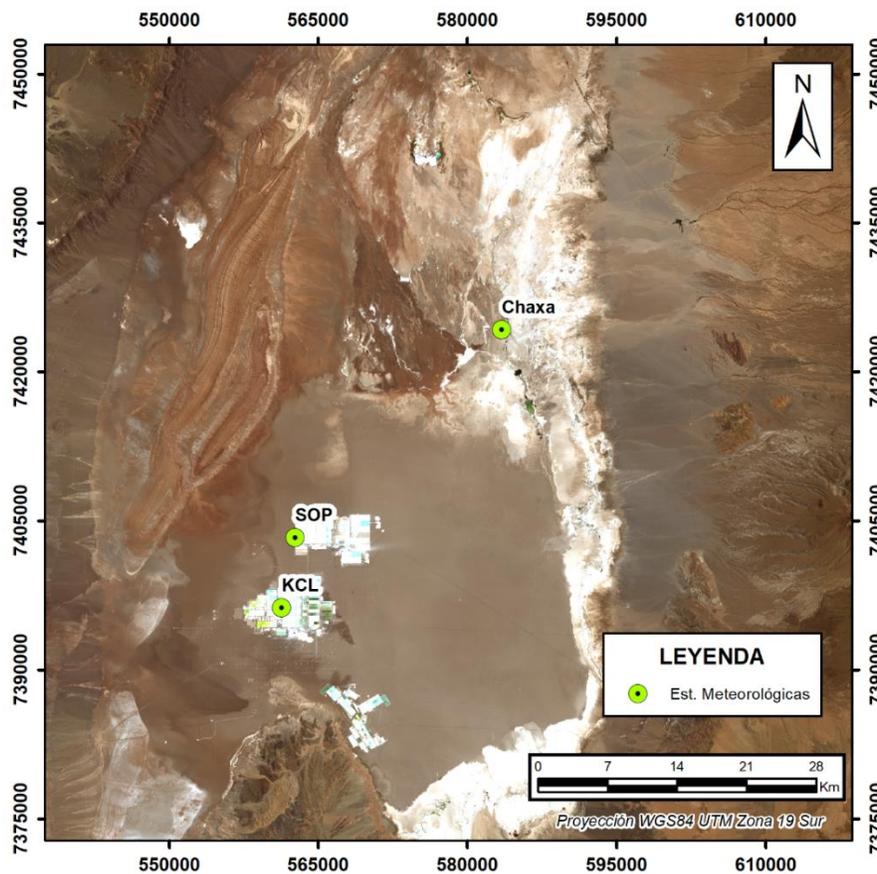


Figura 4-18. Localización de las estaciones meteorológicas consideradas para la evaluación de la evaporación en lámina libre.
Fecha imagen satelital: 28/05/2018. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4-19, se muestra la serie histórica de los promedios mensuales de evaporación de bandeja de las estaciones Chaxa, SOP y KCL, y los valores promedios mensuales entre las estaciones KCL y Chaxa. En ella se observa una clara oscilación estacional, con tasas máximas en los meses de diciembre y enero (meses cálidos), y las tasas mínimas en el mes de junio. Considerando los registros de las estaciones Chaxa y KCL (los más extensos del conjunto de estaciones analizadas), el valor máximo promedio de evaporación de bandeja de las dos estaciones es de 12,25 mm/d, el mínimo promedio de 3,67 mm/d y un promedio anual de 8,21 mm/d.

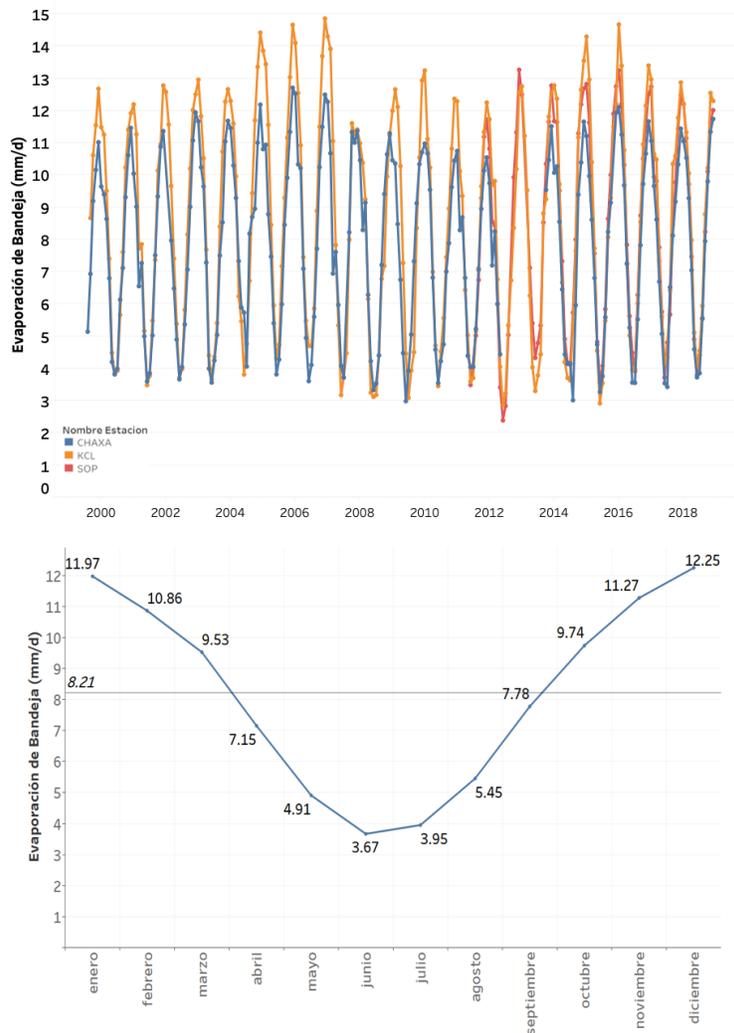


Figura 4-19. Serie de evaporación de bandeja promedio mensual obtenida de las estaciones propiedad de SQM para el período agosto 1999 – diciembre de 2018 (Gráfico superior). Evaporación de bandeja mensual promedio de las estaciones Chaxa y KCL con el promedio anual indicado en línea gris (Gráfico inferior). Fuente: elaboración propia.

Las estaciones KCL y SOP representan la situación en la zona central del núcleo del Salar de Atacama, mientras que la estación Chaxa representa la situación en la zona marginal norte del Salar; donde los valores de evaporación máximos son menores que en las anteriores. Se observa que la evaporación se mantiene estable, sin tendencia a lo largo del tiempo.

Por su parte, la DGA, en su informe del año 2010 (DGA, 2010) estableció relaciones mensuales entre la evaporación en función de la altitud, con el objetivo de asignar valores de evaporación en las cotas superiores de la cuenca. La relación evaporación-altura es relevante para el posterior cálculo de evapotranspiración ya que, por defecto, la evaporación del suelo en el Salar se calcula para una misma cota, no obstante, existen bofedales en altura que requieren que se realice el ajuste.

En la Figura 4-20 se muestra un ejemplo de las funciones calculadas (del tipo $y=mx+b$), en este caso para el mes de enero. Las funciones utilizadas para cada altura según el mes se presentan en la Tabla 4-7. (datos tomados de DGA, 2010). Los R^2 de estas funciones varían entre 0,75 y 0,98. Esta relación se realizó a partir de datos históricos de evaporación de la red de la DGA durante la década de los 70, 80 y 90.

En todos los casos se aprecia que la evaporación disminuye con la altura ($m < 0$), lo cual ocurre a una razón de 0,11 mm cada 100 m (en los meses de invierno) y a 0,28 mm cada 100 m (durante los meses de verano).

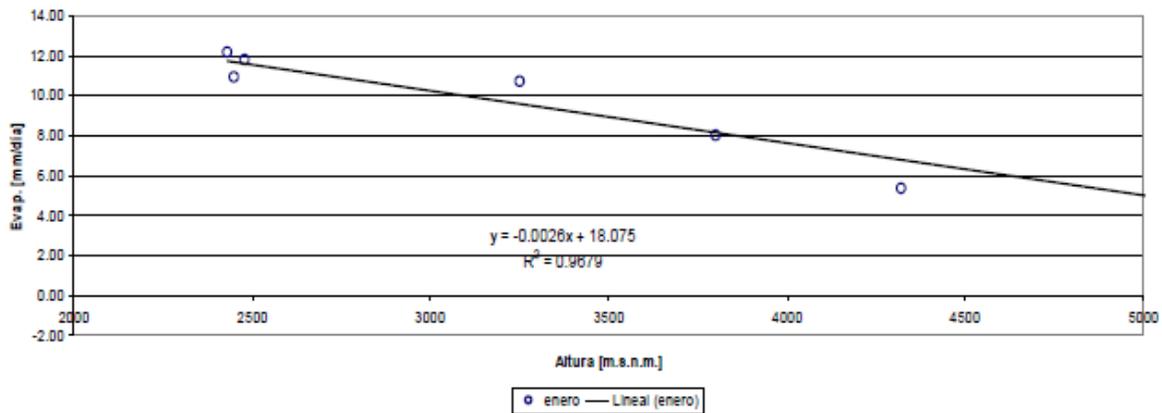


Figura 4-20. Relación evaporación altura para el mes de enero. Fuente: DGA, 2010.

Tabla 4-7. Parámetros de la relación evaporación de bandeja vs. altura por mes. Fuente: Modificado de DGA (2010).

Mes	Y=mx+b		R ²
	m	b	
Enero	-0,0026	18,075	0,9679
Febrero	-0,0025	17,452	0,9503
Marzo	-0,0022	15,758	0,9539
Abril	-0,0018	13,248	0,8991
Mayo	-0,0014	10,334	0,8183
Junio	-0,0011	8,3662	0,7496
Julio	-0,0011	8,4812	0,766
Agosto	-0,0014	10,388	0,8851
Septiembre	-0,002	13,65	0,9514
Octubre	-0,0023	16,164	0,9788
Noviembre	-0,0026	18,174	0,9822
Diciembre	-0,0028	19,236	0,9696

Adicionalmente, para el cálculo de la evaporación se deben considerar las características del agua de la cuenca y corregir la evaporación potencial considerando el tipo de agua evaporante. Para ello, se utiliza la siguiente relación:

$$E = E_0 * K_s$$

Donde:

E : Evaporación Corregida (mm/d)

E_0 : Evaporación Potencial (mm/d)

K_s : Coeficiente de corrección por densidad que refleja el efecto en la evaporación de la concentración de sales en el agua.

De acuerdo con los antecedentes analizados, IDE (1978) establece un valor de K_s de 0,95 para el Salar de Atacama considerando una densidad promedio del agua de aproximadamente 1,05 g/cm³ (Figura 4-21). En el Salar de Atacama, aguas con esta densidad son observadas fundamentalmente en la zona marginal y aluvial, distintas de la salmuera localizada en el núcleo, cuya densidad es mayor a 1,20 g/cm³.

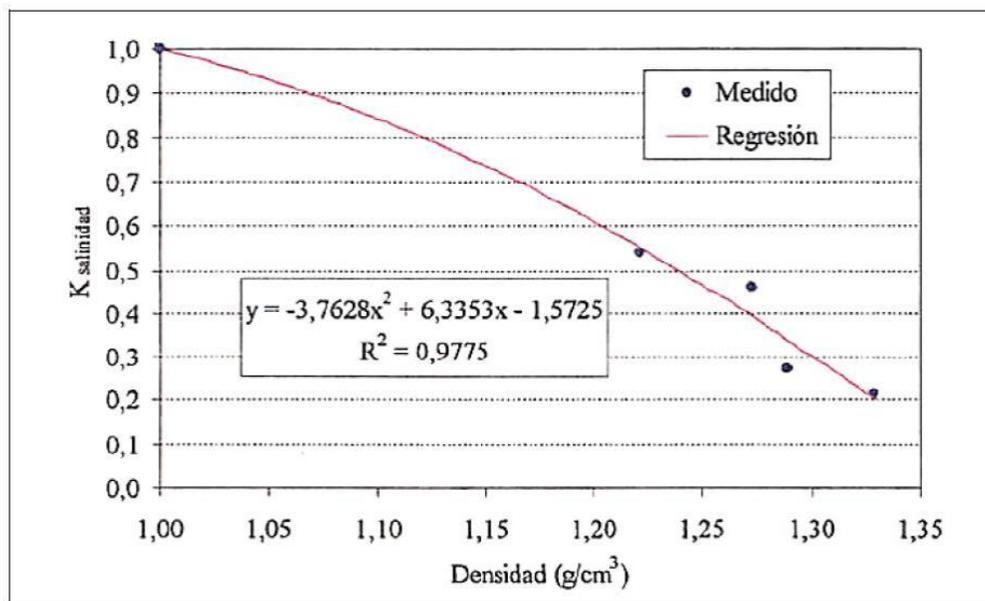


Figura 4-21. Relación entre el coeficiente de corrección por densidad y la densidad del agua y salmuera de la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: IDE (1978)

El cálculo de la Evaporación Corregida, por tanto, se aplica únicamente para las aguas pertenecientes a las dos zonas indicadas inicialmente (aluvial y marginal). Considerando una evaporación de bandeja promedio de 8,21 mm/d, un coeficiente de bandeja de 0,75 y un coeficiente por corrección de salinidad de 0,95 (IDE, 1978; para agua con densidad igual a 1,05 g/cm³), el valor de la evaporación potencial promedio para la zona marginal y aluvial del Salar de Atacama, a cota del Salar (~2300 m s.n.m.), es de 5,84 mm/d.

Por su parte, para el caso de la salmuera se considera el resultado obtenido por Grilli y Vidal (1986), quien estima un valor de evaporación potencial promedio en el núcleo, para una salmuera de referencia, igual a 4,27 mm/d.

4.5.2 Evaporación en el suelo

La tasa de evaporación desde el suelo, en la cuenca del Salar de Atacama, se ha obtenido por distintos métodos, ya sea lisímetros, evaporímetros o domo de evaporación, tanto por terceros como SQM. El compilado de los datos de SQM se presenta en el Anexo MC1. Las fuentes de todos los datos disponibles son las siguientes:

- SQM/Minsal:
 - Hidroterra (1988). Evaluación de la evaporación de salares. Salar de Atacama. Informe para Minsal LTDA.
 - Minsal (1988). Evaluación de la evaporación del Salar de Atacama. Informe de cierre que resume la información capturada por Hidroterra (1988).
 - SQM. Red de control de 10 lisímetros ubicados en distintos sectores del Salar de Atacama. Periodo de agosto de 2015 al 31 de diciembre de 2018.

- Albemarle:
 - SGA (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium.
 - Albemarle (2017). Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual Nº 1. Período septiembre – diciembre 2016.
 - Albemarle (2018). Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual Nº 2. Período enero – diciembre 2017.
 - Albemarle (2019). Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual Nº 3. Período enero – diciembre 2018.

- Minera Escondida Limitada:
 - Golder Associates (2017a). Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui.

- Otros:
 - Mardones (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. En: El litio, un nuevo recurso para Chile. 1986.

- Muñoz-Pardo, Mardones-Perez, & Vidts-Sabelle (2004). Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. En Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIX, núm. 3, pp. 69-81, julio-septiembre de 2004.

4.5.2.1 Variación de la evaporación con la profundidad

Para relacionar cómo la tasa de evaporación disminuye con la profundidad, se utilizó el método de Philip (1957), el cual propone que la tasa de evaporación disminuye exponencialmente con la profundidad de acuerdo con la relación:

$$E_z = E \cdot e^{(\alpha \cdot z)}$$

Donde:

E_z = Evaporación como función de la profundidad del nivel de agua subterránea (mm/d)

E = Evaporación potencial (mm/d)

α = Parámetro de ajuste de la curva

z = Profundidad del nivel freático (m)

Para cada una de las zonas definidas por Mardones (1986, luego modificadas por SQM. Ver Figura 4-22), se definieron curvas representativas con base en la información compilada de distintos autores, cuyo resumen y fuente se presentan en la Figura 4-22. El análisis detallado y los gráficos de Evaporación vs Profundidad se presentan en el Anexo MC2.

El valor de evaporación potencial corresponde al promedio calculado en la sección 4.5.1: 5,84 mm/día para la zona marginal y aluvial, y 4,27 mm/día para el núcleo, en consideración de la densidad de la salmuera (1,200 a 1,225 g/cm³) distinta a la del agua fuera del núcleo (1,005 g/cm³).

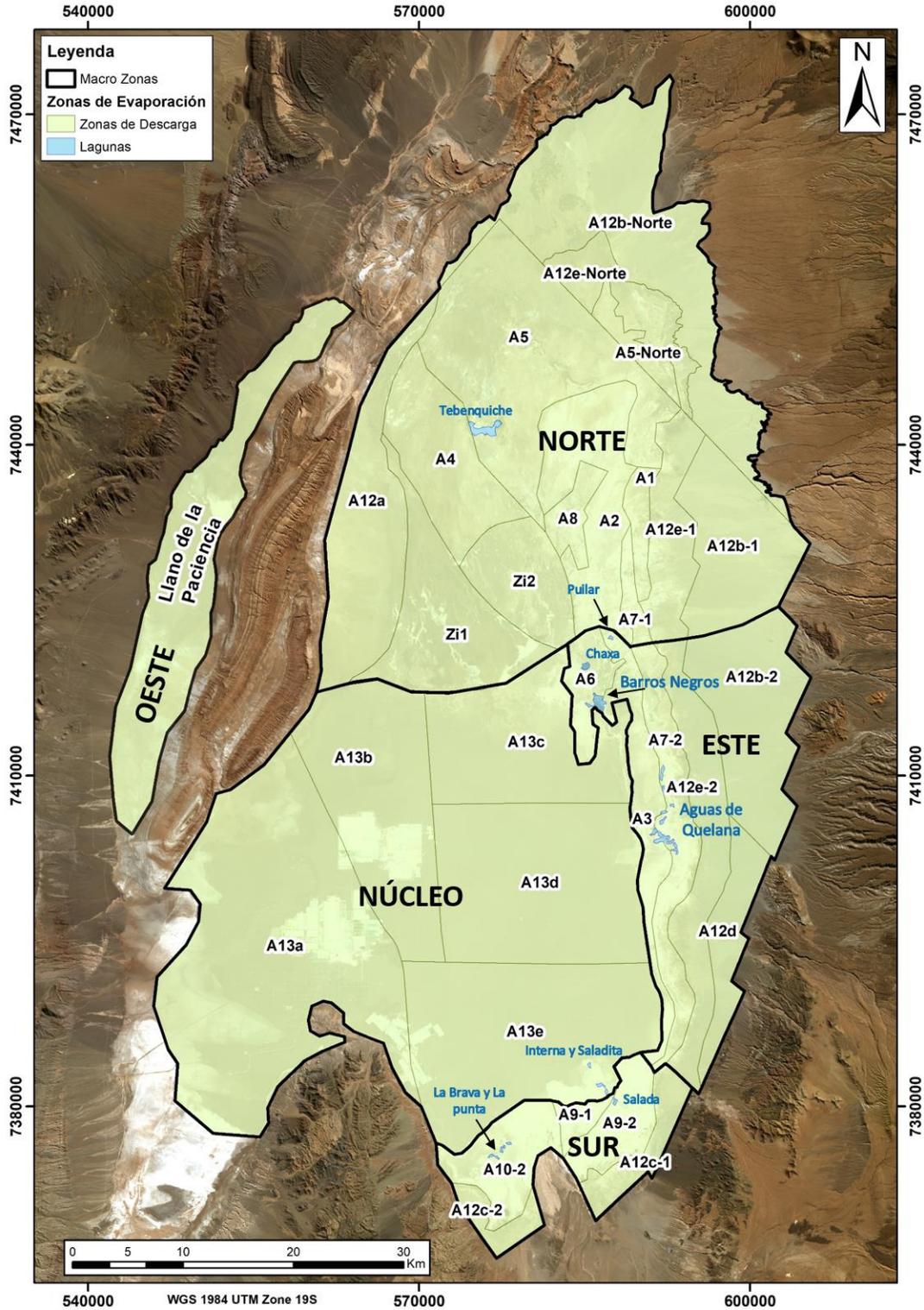


Figura 4-22. Subdivisión del área de estudio en zonas de evaporación. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-8. Parámetros de ajuste de las curvas de evaporación en cada zona considerada. Fuente: elaboración propia

Curva	E	α_{max}	Zona	Información Utilizada
Curva A1	5,84	-4,9	A1	Mardones (1986)
Curva A2	5,84	-7,6	A2	Minsal (1988), Albemarle
Curva A3	5,84	-8	A3	SQM (2018), Albemarle (2015,2019)
Curva A4	5,84	-3,8	A4	Albemarle (2015,2019), Mardones (1986)
Curva A5	5,84	-2,2	A5, A5-Norte	Muñoz et al., (2004), Albemarle (2015,2019), Mardones (1986)
Curva A6	5,84	-5	A6	Mardones (1986)
Curva A7	5,84	-4,5	A7-1, A7-2	SQM (2018), Albemarle (2015,2019)
Curva A8	5,84	-4	A8	Muñoz et al., (2004), Mardones (1986)
Curva A9-1	5,84	-4	A9-1	SQM (2018), Albemarle (2015,2019)
Curva A9-2	5,84	-4	A9-2	Albemarle (2015,2019)
Curva A10-2	5,84	-2,8	A10-2	SQM (2018), EIA MEL (2018), Albemarle (2015,2019)
Curva A12	5,84	-3,4	A12a, A12b-1, A12b-2, A12c-1, A12c-2, A12d, A12e-1, A12e-2, A12e-Norte, A12b-Norte	SQM (2018)
Curva A13	4,27	-8	A13a, A13b, A13c, A13d, A13e	Minsal (1988), Muñoz et al., (2004), Albemarle (2015,2019), Mardones (1986), Grilli y Vidal (1986)
Curva Zi	5,84	-10	Zi1, Zi2	Minsal (1988)

4.5.2.2 Cálculo de la evaporación desde el suelo

Para estimar la evaporación desde el suelo se utilizaron las curvas de Philip definidas en el apartado anterior, junto con la construcción de mapas de profundidad del agua/salmuera para las condiciones previas al inicio de la explotación (año 1986). La metodología utilizada se detalla en el Anexo MC2. A continuación se resumen los principales pasos de la metodología:

1. Para cada zona de Mardones (1986) se definió una curva de Philip máxima y una curva de Philip mínima, con base en los datos disponibles para cada sector (ver apartado 4.5.2.1). En la Figura 4-23 se presenta un ejemplo de la definición de estas curvas en las que, de acuerdo con lo indicado en el apartado 4.5.2.1, la evaporación potencial en superficie es fija para la zona aluvial y marginal (5,84 mm/día).
2. Se realiza una compilación de los datos de niveles históricos en el núcleo del Salar de Atacama, obteniéndose la profundidad del agua/salmuera en distintos puntos.

3. Se realiza una interpolación de los puntos con profundidad del agua/salmuera con el método de *Natural Neighbor*, generando un archivo raster de profundidad con un tamaño de píxel de 250 x 250 metros.
4. Una vez realizado el mapa de profundidades del periodo estacionario de 1986, se ha calculado la evaporación para cada uno de los píxeles del mapa, donde cada píxel se evalúa con la curva de Philip definida para su zona, calculándose la evaporación en función de la profundidad del agua/salmuera.
5. Finalmente se calcula el volumen acumulado por cada zona de evaporación, para el caso mínimo y máximo. El resultado, además, se promedia para obtener un valor medio de referencia por cada zona y un valor medio global. Los valores medios se utilizan en los apartados siguientes para calcular la tasa de evaporación media, tanto por zona como global.

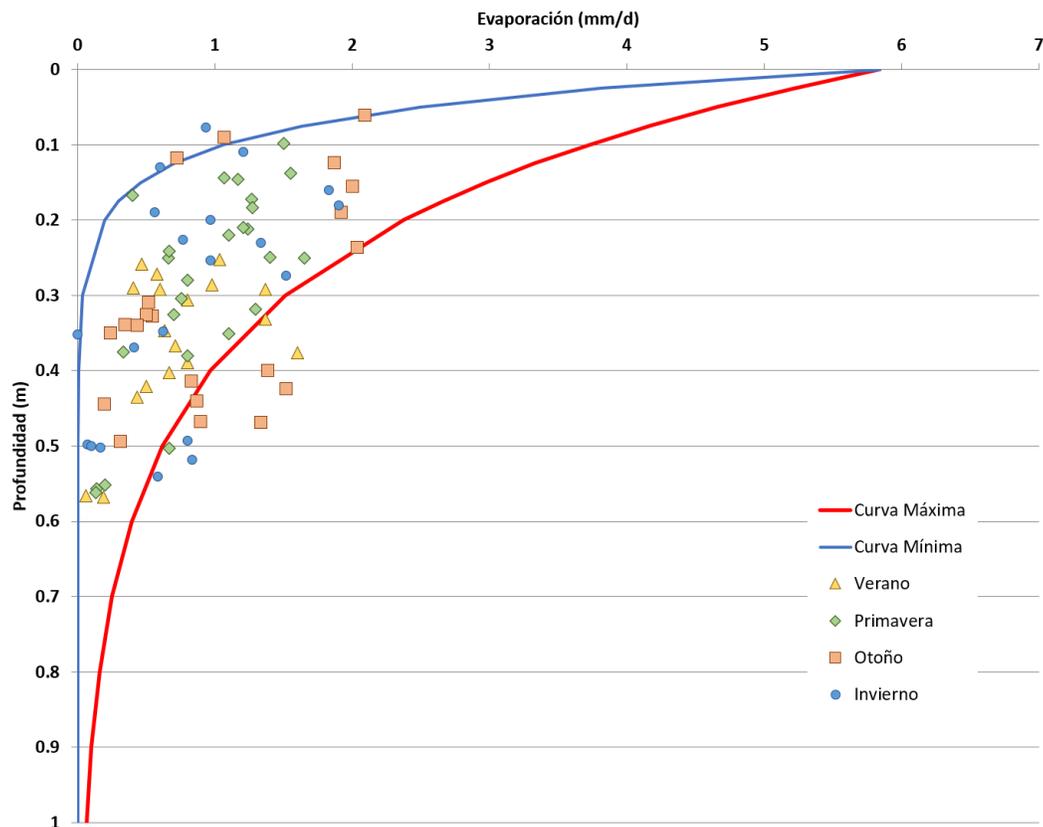


Figura 4-23. Gráfico Evaporación vs Profundidad para la Zona A7. Se indican las curvas de Philip máxima y mínima. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 4-9 muestra los resultados obtenidos con la metodología descrita, por zona, para el año 1986. El valor total de la evaporación promedio calculada es de 3.065 L/s.

Tabla 4-9. Detalle del valor de evaporación calculado por zona. Fuente: elaboración propia.

ZONA	Área Zona Descarga* (km²)	Evaporación Min. (L/s)	Evaporación Max. (L/s)	Evaporación Media (L/s)	Tasa Media (mm/d)
A1	20	0,4	0,4	0,4	0,002
A2	123	23,7	340,6	182,1	0,128
A3	70	26,1	211,5	118,8	0,147
A4	114	20,3	67,9	44,1	0,034
A5	282	32,8	932,9	482,9	0,148
A6	34	139,7	139,7	139,7	0,354
A7	97	235,2	635,2	435,2	0,387
A8	25	45,9	235,4	140,6	0,493
A9-1	13	36,4	144,8	90,6	0,583
A9-2	48	1,0	325,3	163,1	0,296
A10	66	161,2	1416,8	789,0	1,039
A12	1.059	2,1	37,1	19,6	0,002
A13	1.450	82,8	939,0	510,9	0,030
Zi1	141	0,0	4,6	2,3	0,001
Zi2	78	0,0	7,2	3,6	0,004
Total	3.619	808	5.439	3.123	0,075

* Área contempla descuento por zonas de evaporación de lámina libre y evapotranspiración

Adicionalmente se calculó la evaporación en el sector del Llano de la Paciencia, que corresponde a un sector fuera de las áreas definidas por Mardones (1986). De acuerdo con lo señalado en la carta geológica 1: 100.000 del Salar de Atacama (Becerra, Henríquez, & Arriagada, 2014), esta zona está compuesta por limos salinos y evaporitas, cuya composición del suelo es similar a la Zona A2, A4 y A5 de Mardones (1986). En este sector se identificó un área con potencial para evaporar de aproximadamente 282 km², a los cuales se les asignó una tasa de evaporación entre 0,20 y 0,25 mm/día (Tabla 4-10), similares a las calculadas para las zonas A2, A4 y A5.

Tabla 4-10 Evaporación desde el Suelo en la Cuenca del Salar de Atacama y el Llano de la Paciencia. Fuente: Elaboración propia.

ZONA	Área Zona Descarga (km ²)	Evaporación (L/s)	Tasa (mm/d)
Salar	3.619	3.123	0,075
Llano	282	793	0,243
Total	3.901	3.916	0,087

Considerando lo anterior, la evaporación total por sectores del Salar de Atacama es la que se presenta en la Tabla 4-11. Se considera en esta agrupación la división sectorial de la Figura 4-22. Para efectos del valor de la evaporación desde el suelo, el Sector Oeste está compuesto por el Llano de la Paciencia.

Tabla 4-11. Evaporación desde el suelo mínima, máxima y media para la agrupación de zonas del Salar de Atacama en sectores Norte, Sur, Este, Oeste y Núcleo. Fuente: elaboración propia.

SECTOR	Evaporación Max. (L/s)	Evaporación Min. (L/s)	Evaporación Media (L/s)
NORTE	1.648	124	886
ESTE	958	403	680
SUR	1.893	199	1.046
OESTE	-	-	793
NUCLEO	939	83	511

4.6 Evapotranspiración

Debido a la existencia de importantes zonas de vegas y humedales fundamentalmente en la zona marginal del Salar de Atacama y a la presencia de zonas de cultivo, resulta relevante analizar y caracterizar la evapotranspiración como una componente del balance hídrico de la cuenca. Sobre esta variable existen varios estudios realizados (Anexo MC1), de los cuales destacan los estudios realizados por la DGA (DGA, 2010), Rockwood (actualmente Albemarle) (SGA, 2015), y el preparado para el Comité de Minería no Metálica de CORFO (Amphos 21, 2018a). Con base en estos antecedentes disponibles, se ha realizado una caracterización de esta variable a partir del uso de imágenes satelitales cuatrimestrales desde enero de 1986 a diciembre de 2018, cuya metodología se detalla en el Anexo MC1. Esta caracterización ha considerado la delimitación de los cuerpos de vegetación según la tipología identificable en el Salar de Atacama: vegas, bofedales, tamarugos y cultivos, así como su distribución en función de la altura, para lo cual se han dividido los resultados obtenidos en bandas altimétricas cada 100 m discretizadas a partir de la cota 2.250 m s.n.m. Como la cota más baja del área de estudio es 2.300 m s.n.m., el primer intervalo es desde 2.300 a 2.350 m s.n.m., luego 2.350 a 2.450, y así sucesivamente.

Con esta metodología se obtuvo un mapa de vegetación trimestral desde enero de 1986 a diciembre de 2018. Para ilustrar en un solo mapa los resultados obtenidos, se ha confeccionado el mapa de vegetación tipo indicado en la Figura 4-24, el cual representa las zonas con vegetación perceptible en más de 4 años, equivalente a aproximadamente el 10% de los años considerados durante el periodo 1986-2018.

En la Figura 4-25 se exponen los resultados obtenidos en función de las bandas altimétricas obtenidas para el mes de mayo de 2018 a modo de ejemplo. Se observa que la vegetación de vegas representa la mayor parte de toda la vegetación presente en la cuenca (57% del área con cobertura vegetal de la cuenca), especialmente en la zona marginal para la banda altimétrica comprendida entre los 2.300 y 2.450 m s.n.m.

El siguiente tipo de vegetación dominante son los cultivos (30% del área con cobertura vegetal de la cuenca), los cuales se localizan principalmente en las inmediaciones del núcleo poblacional de San Pedro de Atacama y en el área aluvial para la banda altimétrica 2.350 y 2.550 m s.n.m, con pequeñas superficies hasta los 3.600 msnm. Las bofedales se distribuyen a lo largo de las distintas quebradas, encontrándose entre las cotas 2.400 y 4.800 m s.n.m. Aunque este tipo de vegetación conforma sólo el 11% del área con cobertura vegetal, es claramente la vegetación predominante en las cotas más elevadas. Finalmente, los tamarugos resultan tener la menor presencia en la cuenca (3% del área con cobertura vegetal), y se encuentran de forma muy localizada al sur de San Pedro de Atacama y al noroeste de Toconao.

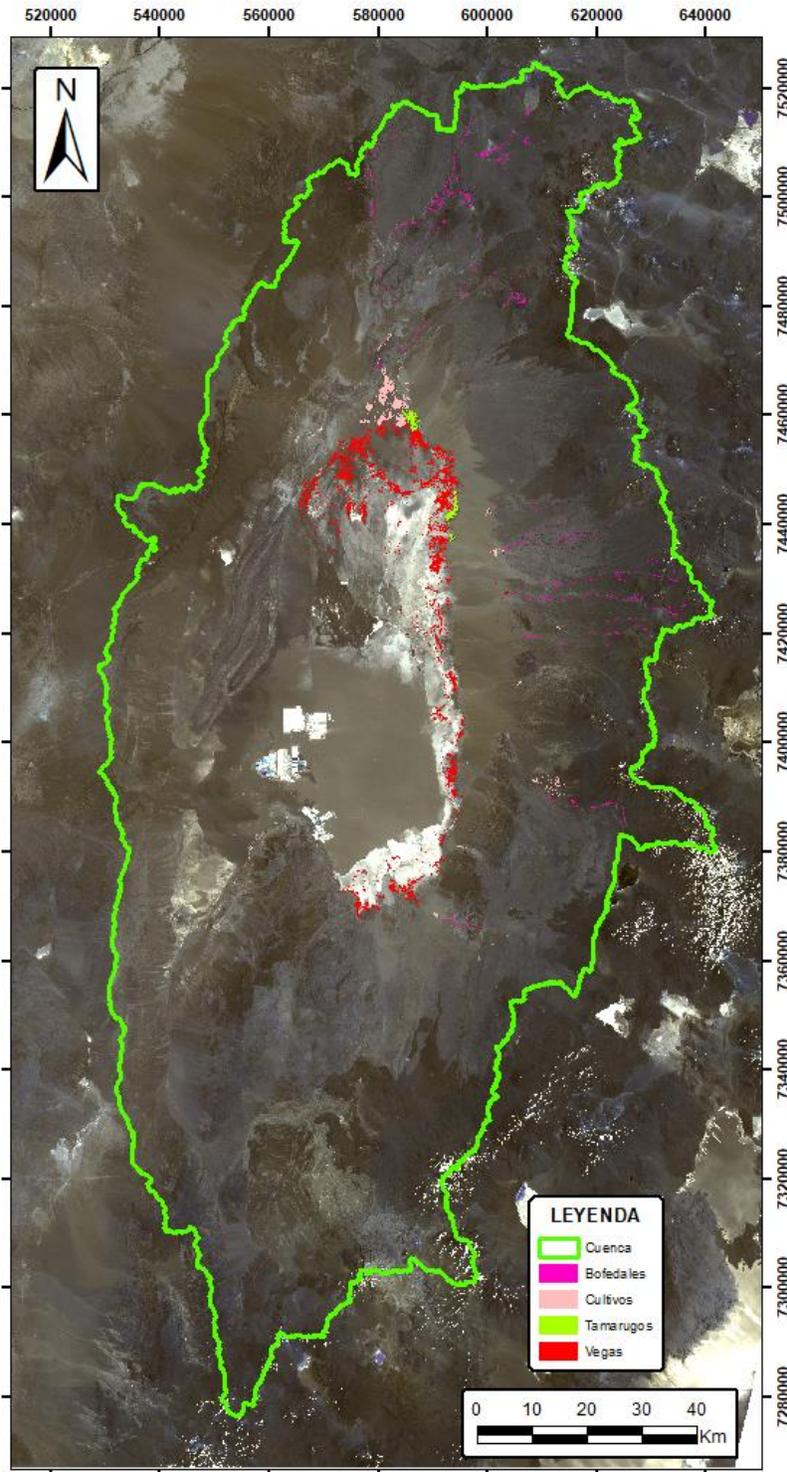


Figura 4-24. Mapa de zonas con vegetación perceptible en más de 4 años durante el periodo 1986-2018. Fecha imagen satelital: 17/09/2018. Fuente: elaboración propia

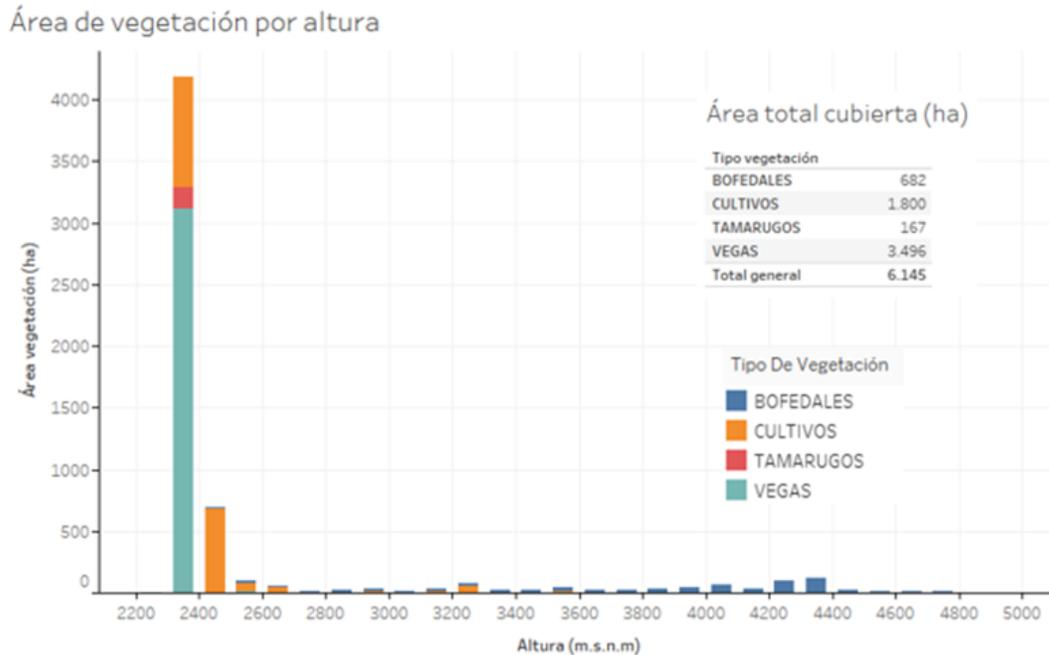


Figura 4-25. Distribución de la cobertura de vegetación en la cuenca del Salar para mayo de 2018. Fuente: elaboración propia.

Respecto de la variación de las áreas de vegetación en el tiempo, en la Figura 4-26 se muestra el resultado obtenido para todas las imágenes satelitales analizadas. Se aprecia como las vegas han sido siempre dominantes en toda la cuenca del Salar de Atacama. De igual forma, es importante destacar la clara oscilación estacional en todos los casos: las áreas mínimas de vegetación se han obtenido entre los meses de agosto y noviembre de todos los años analizados, coincidiendo con las épocas del año más frías. Mientras que las mayores áreas en general se dan entre los meses de enero y mayo.

El tipo de vegetación que presenta las mayores oscilaciones estacionales son las vegas: alrededor de 2.000 Ha de cobertura de diferencia entre los meses de mayor y menor área, comparado con los bofedales que presentan una oscilación temporal alrededor de 800 Ha de diferencia. De igual forma, se puede comprobar visualmente que las áreas de vegas, bofedales y cultivos se han mantenido relativamente estables hasta fines de 2012 (para vegas y bofedales) y mayo 2013 (para cultivos), momentos en el cual se observa un cambio en la tendencia a un continuo incremento de las áreas cubiertas, con respecto a los años anteriores. Para el caso de los tamarugos se observa una clara tendencia al aumento, intensificándose a partir de febrero de 2013.

Área cubierta según tipo de vegetación

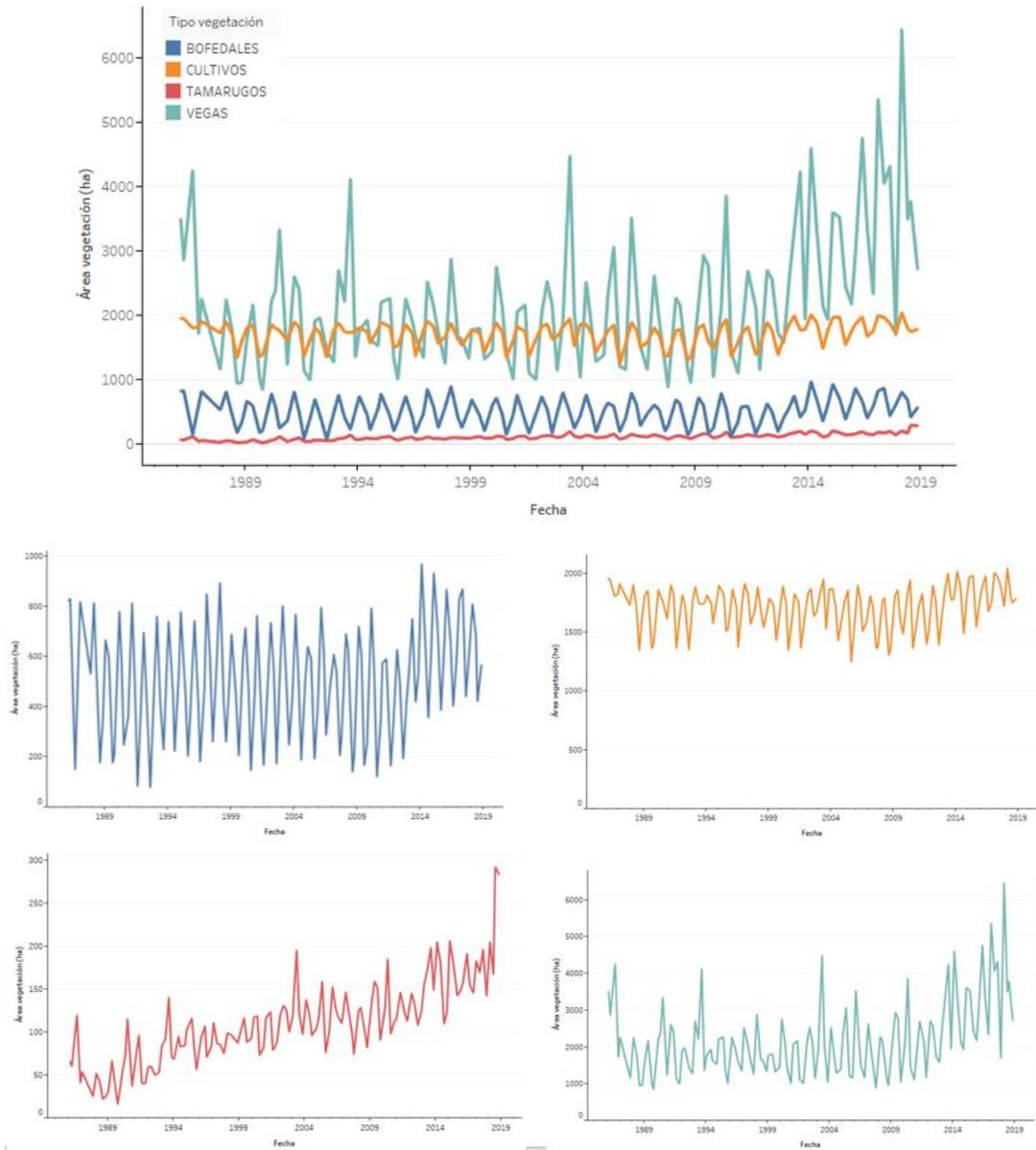


Figura 4-26. Evolución de las áreas cubiertas por los distintos de vegetación analizados; cultivos, bofedales, tamarugos y vegas. Fuente: elaboración propia.

4.6.1 Cálculo de la Evapotranspiración

Para calcular la evapotranspiración (ETR) en la cuenca se utilizó la siguiente ecuación (Shuttleworth, 1993):

$$ETR = \sum_k^s E_0 * K_{cp} * A_{cp}$$

Donde E_0 corresponde a la evaporación potencial, K_{cp} corresponde al coeficiente de cultivo de cierta vegetación p y A_{cp} es la superficie de ese tipo de vegetación p , mientras que el número total de las áreas cubiertas con vegetación corresponde a s . El valor de E_0 se obtiene de acuerdo con lo indicado en el apartado 4.5.1. El detalle del cálculo realizado se presenta en el Anexo MC1.

En la Figura 4-27 se muestra la serie de evapotranspiración obtenida según sea el tipo de vegetación considerada. Se observa que la evapotranspiración presenta una oscilación estacional producto de los cambios de las superficies con vegetación y las tasas de evaporación durante el año. De esta manera, el promedio de evapotranspiración es de 2301,77 L/s para el periodo 1986-2018, constituido de acuerdo con los montos por vegetación indicados en la Tabla 4-12..

Tabla 4-12. Evapotranspiración promedio para el periodo 1986-2018 según el tipo de vegetación. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Vegetación	Superficie (ha)	Evapotranspiración promedio (L/s)
Vegas	2.192,24	873,72
Bofedales	501,34	276,43
Cultivos	1.711,96	1.147,73
Tamarugos	110,48	3,89
TOTAL	4.516,02	2.301,77

Se observa un aumento en los máximos de la ETR a partir de 2014 (valor promedio de 4.910 L/s), comparado con el periodo previo (valor promedio de 3.330 L/s). El valor máximo para el periodo de estudio se presenta en febrero de 2018 con una evapotranspiración aproximada de 6.147 L/s.

Respecto del aporte a la evapotranspiración de cada tipo de vegetación, se observa que previo a febrero de 2012 cultivos y vegas presentan una ETR similar durante todo el periodo, aportando de forma conjunta alrededor del 86% al total de la ETR de la cuenca. La vegetación de bofedales aporta un 14% al total y los tamarugos lo que resta. A partir de febrero 2014 se observa como la ETR de las vegas aumenta en los meses de verano: si se toma febrero 1996 como una fecha representativa del periodo anterior a febrero 2014, la evapotranspiración es de aproximadamente 3.460 L/s (representando el 39% de la evapotranspiración total para esa fecha), mientras que, en febrero 2018, la evapotranspiración es de aproximadamente 6.147 L/s (representando el 62% para esa fecha). Se concluye, por tanto, que el aumento de la evapotranspiración total de la cuenca observado a partir de febrero de 2014 es producto del aumento de la cobertura de vegas.

Evapotranspiración (L/s)

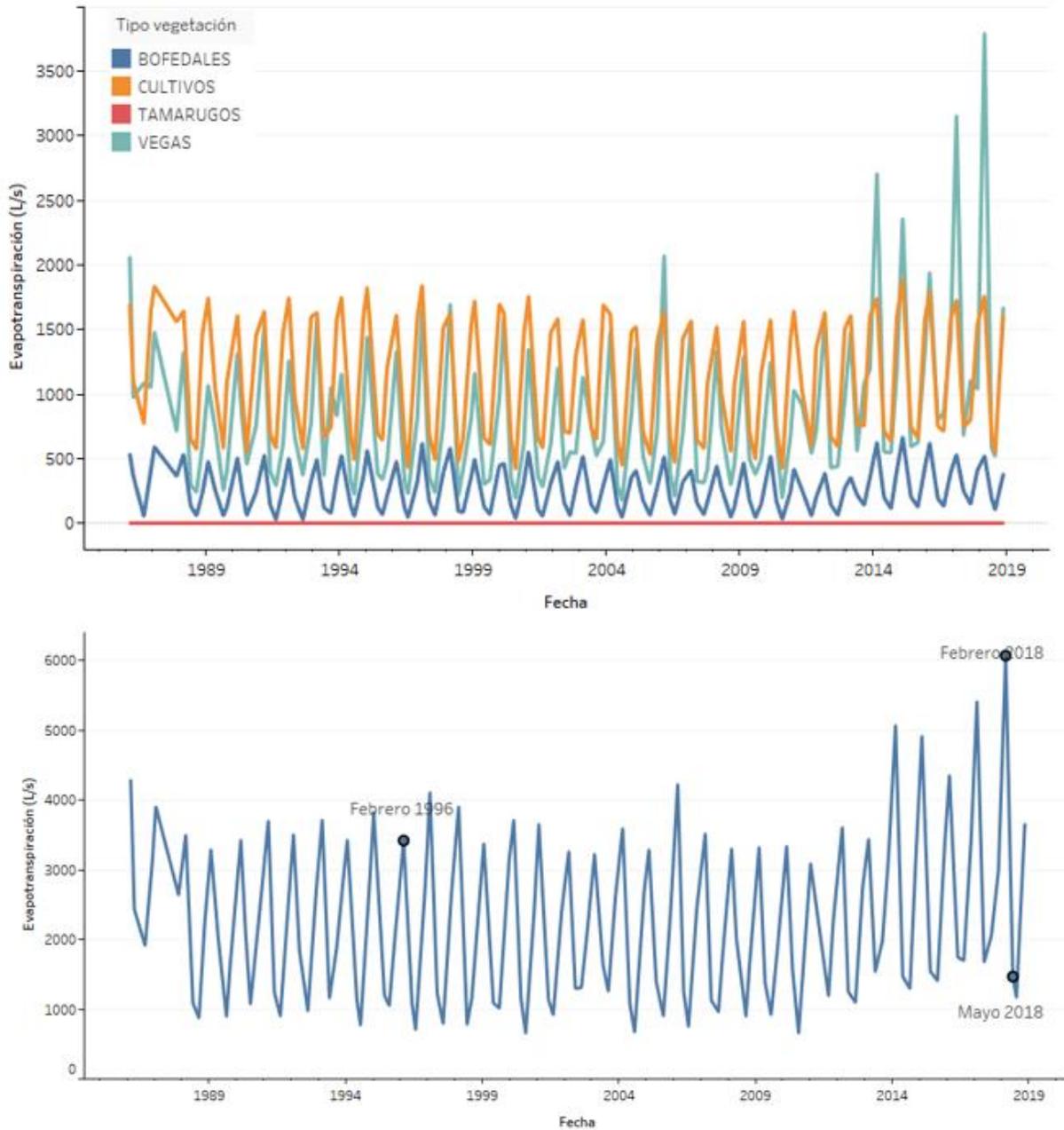


Figura 4-27. Variación de la evapotranspiración resultante. En el gráfico superior se muestra discretizado el aporte de evapotranspiración de cada tipo de vegetación. En el gráfico inferior se muestra la evapotranspiración total, como la suma de todos los tipos de vegetación. Fuente: elaboración propia.

4.7 Evaporación por lámina libre

En los bordes noreste, este y sureste del Salar de Atacama se desarrollan cuerpos lagunares, algunos permanentes y otros semipermanentes, en las cuatro zonas de interés ambiental: sistemas Soncor, Peine, Tilopozo y Aguas de Quelana (ver Figura 2-1 a 2-5, y Figura 4-22). De éstos, en los tres primeros se ha realizado un levantamiento de la batimetría lacustre, logrando definir y cuantificar el volumen de agua de los cuerpos lagunares permanentes, los que se presentan a continuación. Por otro lado, el sistema Borde Este tiene la particularidad de presentar cuerpos superficiales de pequeña dimensión y poca profundidad, distribuidos heterogéneamente y en forma aleatoria.

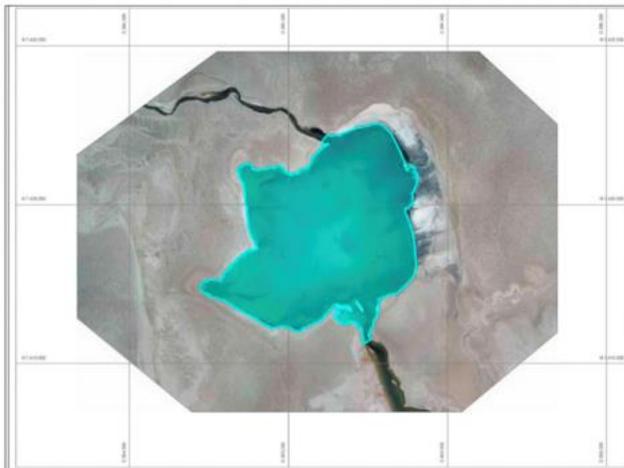
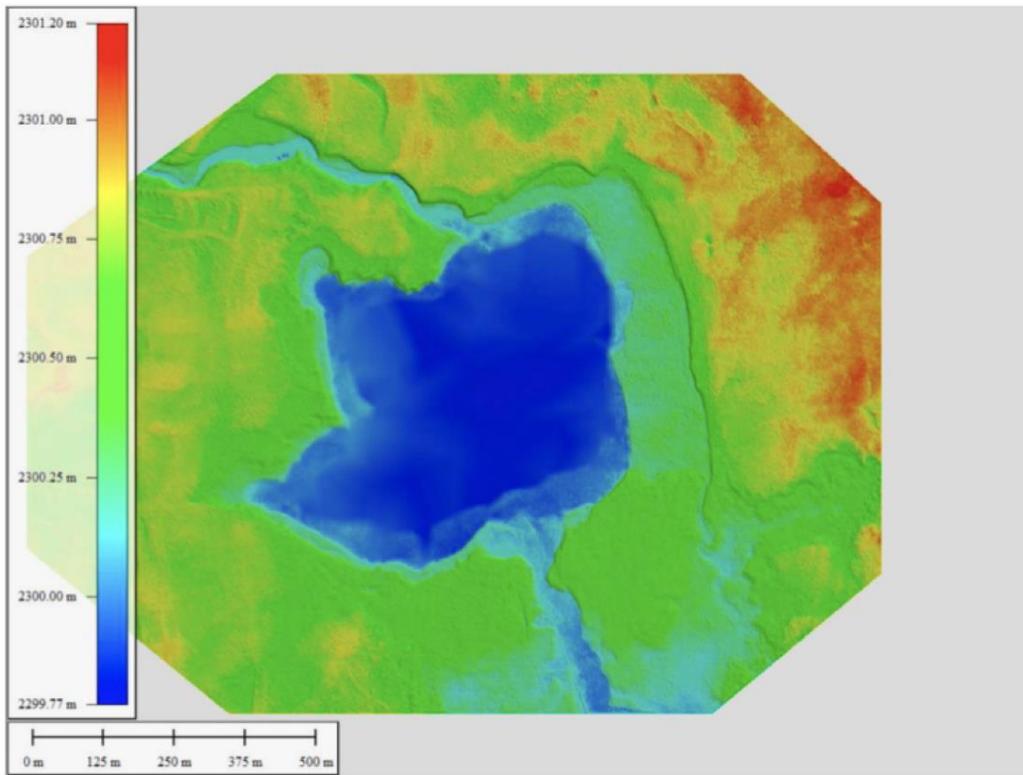
4.7.1 Sistema Soncor

Durante el mes de mayo de 2018 se realizó un trabajo batimétrico con el fin de caracterizar la morfología de los cuerpos lagunares y de desborde (Anexo MC1). A partir de estos resultados, se pudo comprobar que las geometrías de las lagunas Chaxa (Figura 4-28), Puilar (Figura 4-29), y Barros Negros (Figura 4-30) corresponden a extensas cubetas con profundidades máximas de alrededor de 50 cm, con fondos uniformes sin cambios morfológicos significativos.

Además, SQM realiza mediciones periódicas de la superficie lacustre de las lagunas Barros Negros, Chaxa y Puilar. Esto se realiza mediante imágenes satelitales anuales (en el mes de abril) de alta resolución con verificación de puntos de amarre en terreno. En la Tabla 4-13 se indican los valores obtenidos desde el año 2007 al 2018. En ella se aprecia como la laguna Barros Negros es la de mayor superficie, seguida por las lagunas Chaxa y Puilar. Estas lagunas tienen la característica de un comportamiento estable de sus niveles.

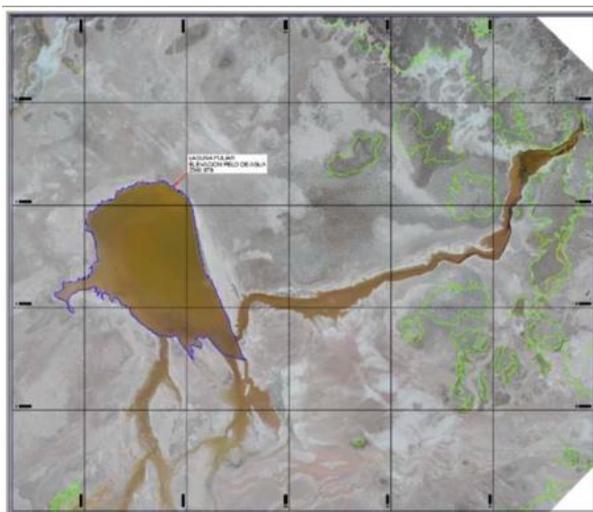
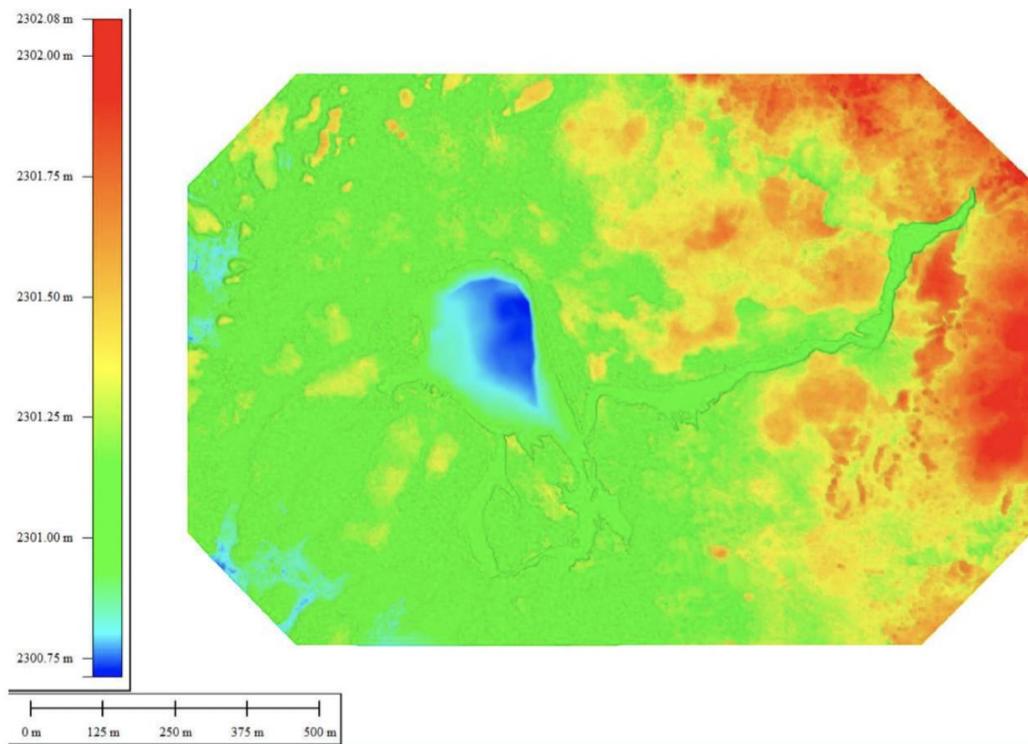
Tabla 4-13. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 al presente. Fuente: Elaboración propia

AÑO	SUPERFICIE (m ²)		
	Barros Negros	Chaxa	Puilar
2007	1.233.000	311.623	69.728
2008	1.093.625	315.363	69.823
2009	1.324.016	316.764	70.360
2010	1.203.661	308.357	69.267
2011	1.325.448	305.433	70.003
2012	1.327.333	300.248	68.280
2013	1.255.968	295.786	68.264
2014	1.258.615	296.162	68.419
2015	1.380.250	297.955	68.940
2016	1.182.706	291.397	67.151
2017	1.289.157	293.310	69.434
2018	1.162.773	291.001	66.828
PROMEDIO	1.253.046,05	301.949,916	68.874,75



Parámetro	Laguna Chaxa
Cota de Pelo de Agua (nmm)	2.300,174
Superficie Laguna (ha)	28,91
Volumen Laguna (m ³)	75.787,1

Figura 4-28. Arriba: Batimetría de la Laguna Chaxa. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Chaxa e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).



Parámetro	Laguna Puilar
Cota de Pelo de Agua (nmm)	2.300,979
Superficie Laguna (ha)	6,2
Volumen Laguna (m ³)	8.166

Figura 4-29. Arriba: Batimetría de la Laguna Puilar. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Puilar e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).

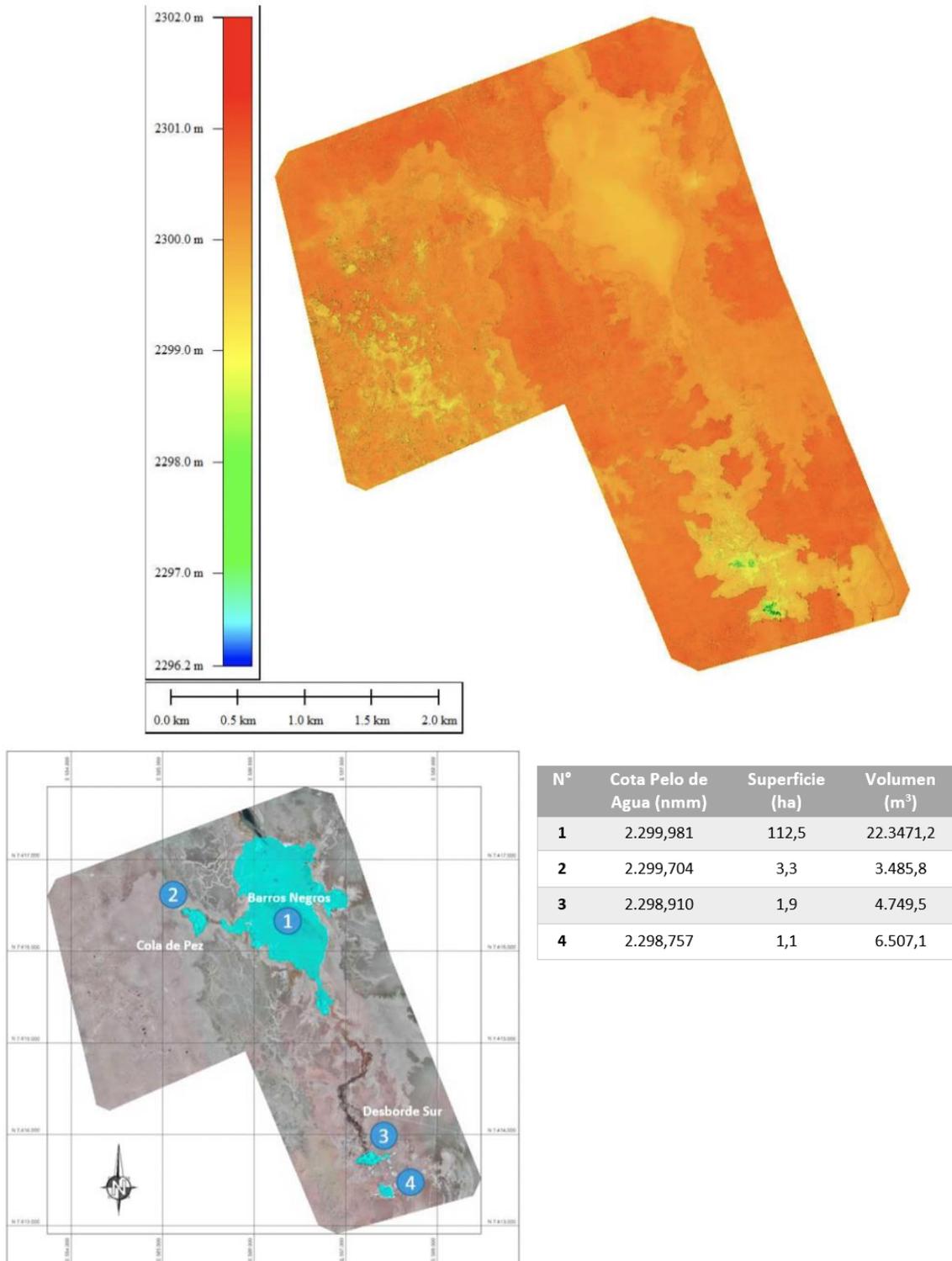


Figura 4-30. Arriba: Batimetría de la Laguna Barros Negros y zonas de desborde. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Barros Negros y zonas de desborde e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).

4.7.2 Sistema Peine

En el mes de septiembre de 2018 se realizó un levantamiento batimétrico del sistema lagunar, con el fin de caracterizar la morfometría de las lagunas que lo componen (Figura 4-31). De esta manera, se puede apreciar que las lagunas del Sistema Peine presentan las mismas características del Sistema Barros Negros, es decir, son extensas cubetas con profundidades muy bajas entorno a los 50 cm de profundidad máxima y fondos uniformes sin presencia de resaltos topográficos evidentes.

Al igual que en el Sistema Soncor, en este sistema se monitorean anualmente las superficies lacustres (durante el mes de abril), mediante imágenes satelitales de alta resolución. En la Tabla 4-14 se recogen los registros de monitoreo desde el 2007 al presente.

Tabla 4-14. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 al presente. Fuente: Elaboración propia

AÑO	SUPERFICIE (m ²)		
	Salada	Saladita	Interna
2007	171.100		
2008	170.447	113.240	175.958
2009	170.421	109.968	191.671
2010	169.635	108.022	198.838
2011	170.524	110.394	182.616
2012	168.371	116.315	246.828
2013	169.255	110.227	331.075
2014	169.355	105.522	261.763
2015	168.940	103.638	472.172
2016	170.105	96.262	134.054
2017	170.772	99.410	405.302
2018	171.514	95.010	112.523
PROMEDIO	170.036,58	106.182,54	246.618,18

Por lo general, las lagunas Salada y Saladita presentan agua durante todo el año, manteniendo además una superficie con poca variación durante el año. No obstante, la Laguna Interna, dado que corresponde a un derrame de Saladita, presenta un comportamiento más errático, lo cual se debe a su característica terminal dentro del sistema, respondiendo principalmente a los aportes relictos de las dos lagunas localizadas aguas arriba. Por esta razón, es posible visualizar en los datos de monitoreo amplia variabilidad en los datos de superficie.

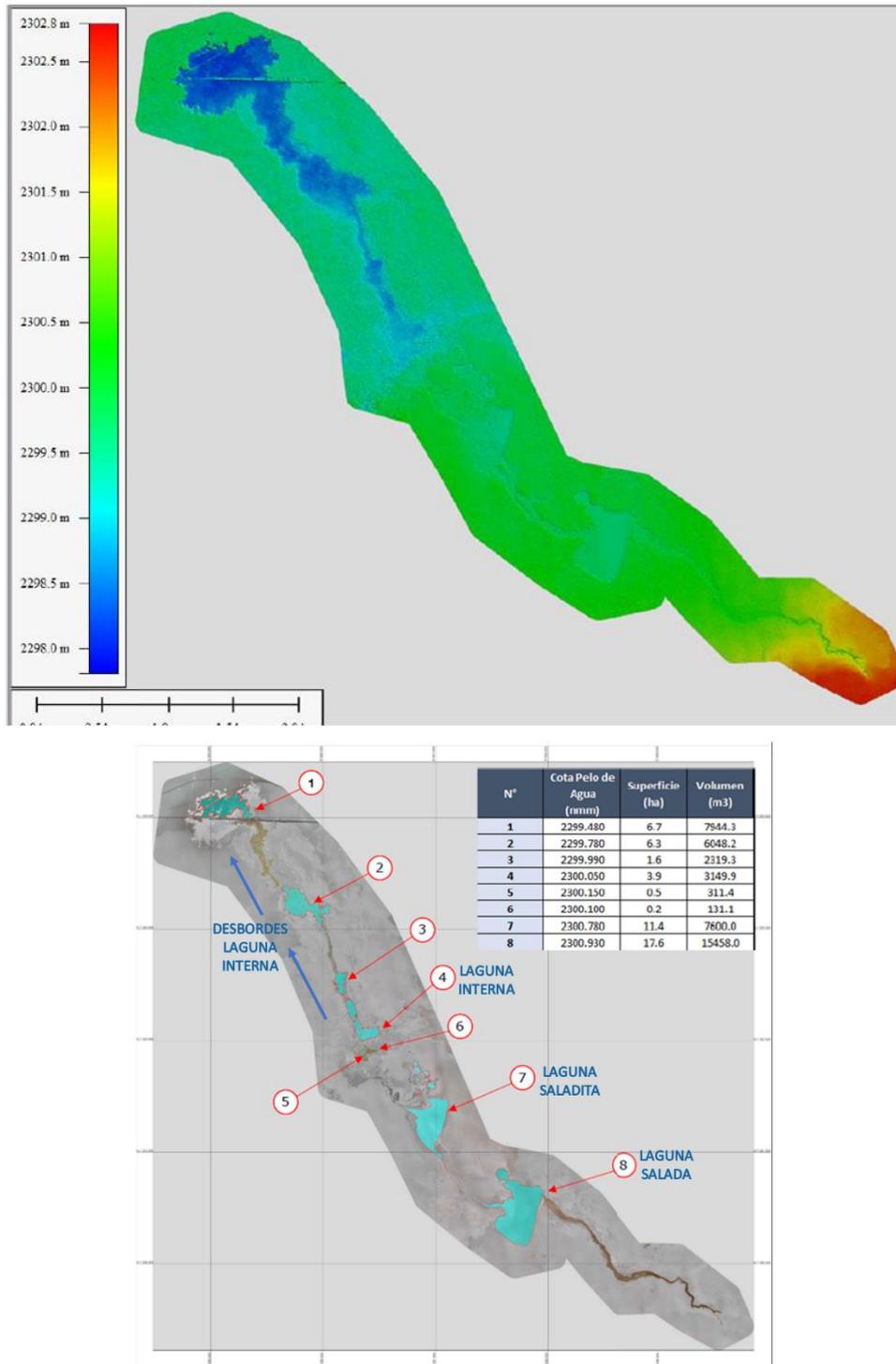


Figura 4-31. Arriba: Batimetría de las lagunas del Sistema Peine. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para las lagunas del Sistema Peine e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).

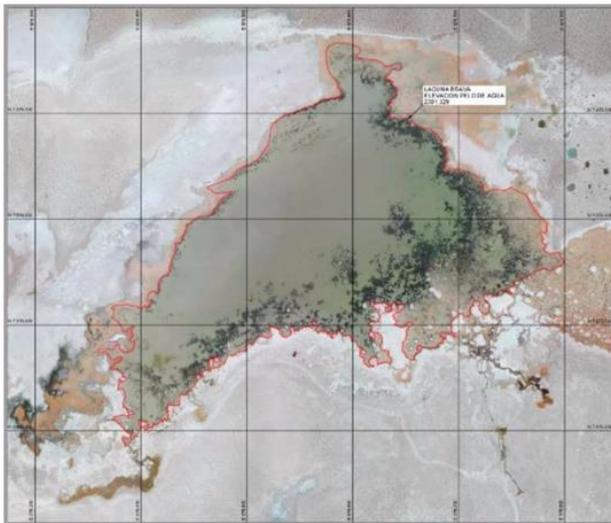
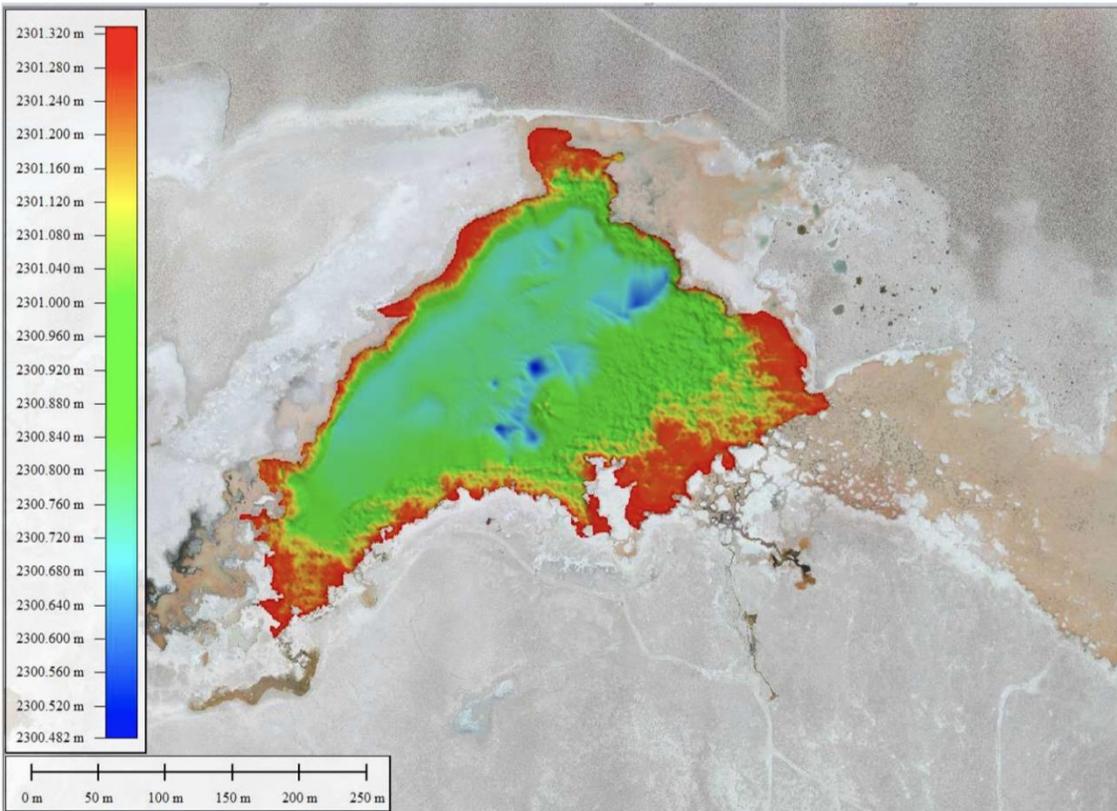
4.7.3 Sistema Tilopozo

Este sistema está compuesto por dos cuerpos lagunares, La Punta y La Brava (Figura 2-5). La Punta se caracteriza por presentar numerosos islotes en todo el cuerpo lagunar, teniendo por ende una morfología mucho más irregular que La Brava. Debido a esto, en el mes de diciembre de 2017 se realizó un levantamiento batimétrico para caracterizar la morfometría del cuerpo lagunar de La Brava (Figura 4-32, Anexo MC1). Al igual que el resto de los sistemas, se aprecia que la laguna representa una cubeta de tamaño más reducido que en los otros sistemas, presentando un fondo plano y uniforme ubicado a una profundidad máxima promedio de 50 cm.

SQM no realiza monitoreo de las superficies lacustres; no obstante, Albemarle, en su PSA aprobado mediante la RCA N°23 de 2015, realiza mediciones semestrales en las lagunas La Punta y La Brava. En la Tabla 4-15 se indican los promedios anuales de las superficies lacustres generadas desde el 2015 a la fecha. Estas lagunas tienen la característica de presentar agua durante todo el año.

Tabla 4-15. Superficies lacustres promedio anual generadas en el PSA de Albemarle desde el 2007 al presente. Fuente: Elaboración propia

AÑO	SUPERFICIE (m²) La Punta y La Brava
2015	338.200
2016	442.000
2017	483.500
2018	489.025
PROMEDIO	438181,25



Parámetro	Laguna La Brava
Cota de Pelo de agua (nmm)	2301.329
Superficie laguna (ha)	6.84
Volumen Laguna (m ³)	25489.6

Figura 4-32. Arriba: Batimetría de Laguna La Brava. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para Laguna La Brava e información del levantamiento realizado. Fuente: Topoland (2018).

4.7.4 Sistema Aguas de Quelana

Para este sector, al no reconocerse un cuerpo lagunar único y de gran extensión, se ha optado por una cuantificación del área de todos los cuerpos lagunares semipermanentes observados en imágenes satelitales. En este caso particular, se ha calculado el área total considerando una fotografía aérea del Instituto Geográfico Militar del año 1981 (ver Anexo MC2); se ha elegido esta fecha debido a la ausencia total de extracciones tanto de salmuera como de agua en la zona de estudio, y por tanto se considera representativa de un estado estacionario. El área total de cuerpos lagunares en Aguas de Quelana para esta fecha se ha cuantificado en 2.943,7 m².

4.7.5 Cálculo de la evaporación por lámina libre

El cálculo de la evaporación por lámina libre se efectúa para los cuerpos lagunares permanentes o, en su defecto, aquellos que se pueden distinguir la mayor parte del tiempo en un año con una superficie notable de agua, fácilmente distinguible en una imagen satelital.

En consecuencia, se consideran para este cálculo las lagunas de Tebenquiche, Chaxa, Puilar, Barros Negros, Salada, Saladita, Interna, La Punta y La Brava. Las superficies de estas lagunas fueron obtenidas de los informes del Plan de Seguimiento Ambiental de SQM, Albemarle y Escondida (ver Anexo MC2). En el caso de Aguas de Quelana, la superficie lacustre fue definida a partir de la fotografía aérea del Instituto Geográfico Militar de 1981 (ver Anexo MC2). Finalmente, para la laguna de Tebenquiche la superficie se obtiene de SGA (2015).

Considerando el valor de evaporación potencial de 5,84 mm (capítulo 4.5.1), la evaporación por lámina libre total corresponde a 530 L/s, divididas como se muestra en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16. Cálculos de Evaporación de Lámina Libre. Fuente: Elaboración propia

Laguna	Superficie (m²)	E. Potencial (mm/d)	E. Lámina_Libre (L/s)
Barros Negros	1.253.046,05	5,84	84,7
Chaxa	301.949,916	5,84	20,6
Puilar	68.874,75	5,84	4,71
Salada	170.036,58	5,84	11,51
Saladita	106.182,54	5,84	7,1
Interna	246.618,18	5,84	15,98
Aguas de Quelana	2.943.717	5,84	198,97
La Punta y La Brava	438.181,25	5,84	29,62
Tebenquiche	2.320.000	5,84	156,81
TOTAL	7.848.606,266	5,84	529,99

4.8 Metodología de Cálculo de la Recarga por Precipitación

La cuenca del Salar de Atacama es del tipo endorreico, en donde la escorrentía originada en las partes altas de la cuenca avanza hacia el Salar en forma de quebradas, vertientes o ríos, infiltrándose en las zonas de mayor permeabilidad y originando la recarga. En sectores como el Núcleo, Zona Marginal y Aluvial, caracterizados por su permeabilidad, es posible encontrar recarga directa por precipitación, es decir, parte de la precipitación es retenida por el suelo originando recarga subterránea.

De acuerdo con la caracterización de la geología y drenaje de la cuenca, la Zona de Subcuencas (Figura 4-2) está caracterizada por presentar sectores con escorrentía superficial permanente e intermitente, la cual se genera sobre un lecho rocoso afectado por erosión, meteorización y fallas. Esto le brinda una capacidad aparente de infiltración elevada. No obstante, debido a la topografía de la cuenca, esta capacidad de infiltración se ve contrarrestada por las pendientes que caracterizan las partes altas de la cuenca, favoreciendo la escorrentía superficial especialmente en momentos de precipitación muy intensa. Este fenómeno se ve reflejado en la incisión que se reconoce sobre las ignimbritas, producida por la erosión de dicha escorrentía.

Por otro lado, en las partes más bajas, tales como la Zona Aluvial, Marginal y Núcleo, los gradientes son más bajos que en las partes altas de la cuenca. Esto, sumado a la presencia de materiales detríticos, favorece la infiltración tanto de la escorrentía proveniente de las zonas altas como de la precipitación caída directamente sobre estos sectores. Por lo general la escorrentía suele infiltrarse a su llegada a la Zona Aluvial, salvo en eventos hidrometeorológicos extremos, en donde la escorrentía puede llegar hacia la Zona Marginal o el Núcleo. Por su parte, la precipitación que infiltra puede evaporarse tanto desde las primeras capas del suelo de forma inmediata, o bien de manera mucho más extendida desde toda la zona no saturada (sector entre la superficie del suelo y la napa del acuífero). Este fenómeno se ve intensificado por la presencia de vegetación, zonas de cultivo o alguna intervención antrópica que favorezca la evaporación y/o transpiración del recurso hídrico.

Por lo anterior, es necesario caracterizar el papel de la topografía, tipo y usos del suelo en la cuenca para la cuantificación de la recarga en el Salar de Atacama, a partir del análisis de la capacidad de infiltración inicial del suelo y, a su vez, de los eventos de precipitación. El cálculo de la recarga en la cuenca se ha realizado considerando dos fases de desarrollo, las cuales se explican en detalle en el Anexo MC8.

4.8.1 Descripción y caracterización de la influencia de la topografía, tipos y usos del suelo en la recarga del Salar de Atacama.

El método aplicado para el cálculo de la recarga se basa en el planteamiento del número de curva, el cual es uno de los métodos más extendidos y experimentados de los modelos empíricos de infiltración enfocados principalmente para el análisis de escorrentía. Fue establecido por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos en 1972 (Mockus, 1972), y su valor es definido a partir del análisis de tipo y usos de suelo. Temez (1978) realiza una modificación al planteamiento original, incorporando la topografía como variable a considerar. El planteamiento matemático de este

método, así como el cálculo detallado de la recarga para la cuenca del Salar de Atacama se indican en el Anexo MC2.

El uso frecuente de este método ha permitido cuantificar términos de escorrentía superficial en balances de cuencas, siendo la capacidad de infiltración del sustrato el sustento de dichas estimaciones. Esta capacidad de infiltración queda conceptualizada en un número, el cual ha sido definido a partir de la consideración del tipo hidrogeológico del suelo, los usos del suelo y la topografía, a partir de mapas geológicos e hidrogeológicos, cartografía de usos del suelo y modelos digitales de elevación. De esta manera, la aplicación del planteamiento del número de curva para el cálculo de la recarga se realizó a partir del análisis y descripción de la capacidad de infiltración de agua de lluvia en la cuenca.

En el Salar de Atacama, los eventos de precipitación generan escorrentía en la Zona de Subcuencas. Esta escorrentía se infiltra una vez llega a la zona aluvial, convirtiéndose en recarga subterránea que avanza hacia el Salar. En la Zona Aluvial, Zona Marginal y en el Núcleo, las características litológicas y topográficas no favorecen la generación de escorrentía superficial, por lo que el agua precipitada se convierte en recarga subterránea directa una vez superada la abstracción inicial.

A la parte de la precipitación que genera escorrentía o recarga es lo que se denomina precipitación neta, precipitación efectiva o en exceso (Sánchez, 2017). La parte de la precipitación que es retenida o abstraída es denominada abstracción inicial o umbral de escorrentía, la cual es posteriormente evaporada, transpirada y/o retenida (Mockus, 1972) (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Este umbral refleja la capacidad de infiltración del suelo a partir de la integración del número de curva en su planteamiento (ver Anexo MC8). Superado este umbral, se genera escorrentía en la zona de subcuencas o bien, recarga directa en la zona del salar. De esta manera, de acuerdo con el planteamiento del número de curva, la recarga (Q) en la cuenca del Salar de Atacama queda definida por la siguiente expresión:

$$Q = \frac{(P - P_0)^2}{(P - P_0) + S} \quad ; P > P_0$$

$$Q = 0; \quad P < P_0$$

Donde **P**: Precipitación bruta acumulada del evento; **P₀**: Umbral de Escorrentía o abstracción inicial; **S**: Máxima infiltración potencial. La definición de cada uno de estos parámetros se describe en el Anexo MC8.

Esta aplicación se realiza asumiendo ciertas consideraciones previas:

- Temez (1978) con base en los trabajos experimentales del SCS (Mockus, 1972), ha permitido relacionar la máxima infiltración potencial con el número de curva (CN) mediante la siguiente expresión:

$$CN = \frac{5000}{(50 - P_0)}$$

De esta manera, a partir del número de curva se define el umbral de escorrentía o la abstracción inicial:

- En la Zona de Subcuencas representa la cantidad de precipitación necesaria para que el suelo se encharque y la escorrentía superficial aparezca (Ferrér, Rodríguez, & Estrela, 1995) durante el evento de precipitación
 - En el sector Salar representa la cantidad de precipitación necesaria para que el suelo se sature y genere recarga directa por precipitación.
- Es posible que parte de la precipitación retenida pueda convertirse en recarga subterránea. Sin embargo, se debe ponderar el rol de la evaporación en ambientes extremos y áridos como en la cuenca del Salar de Atacama. Debido a esto, para el cálculo de la recarga se asume que el umbral de escorrentía o abstracción inicial están reflejando la cantidad de agua que es retenida y posteriormente evaporada o transpirada, dado que los eventos de precipitación importantes ocurren en la temporada estival, coincidiendo con los meses de mayor evaporación o evapotranspiración. Este comportamiento será más notable en el sector Salar dada la presencia de vegetación en comparación a las zonas de subcuencas. Allí, además, los tipos de suelo y las características prácticamente planas que la destacan propician la infiltración y a su vez la evaporación inmediata una vez cesan los eventos de precipitación.
- Se descarta la evaporación de lámina libre que pueda ocurrir al generar escorrentía superficial en la zona de subcuencas, principalmente porque la evaporación en corrientes en movimiento está condicionada por una serie de factores no extrapolables directamente, como la temperatura del agua a lo largo de su trayectoria o el gradiente del lecho de circulación. Esto es razonable de asumir considerando que la Zona de Subcuencas presenta gradientes topográficos que permiten la rápida circulación del agua por gravedad. No obstante, en las zonas con menor circulación se distinguen sistemas vegetacionales tipo bofedal, cuya actividad evapotranspirativa sí ha sido considerada para el cálculo del balance en la cuenca. La forma como se han definido estos sistemas, así como el cálculo de la correspondiente evapotranspiración, se describe en el apartado 4.6.
- SCS (Mockus, 1972) recomienda reanalizar la representatividad del umbral de escorrentía cuando los tiempos de análisis consideran varios días de precipitación. En este caso, se consideraron las características previas de humedad del suelo, y definieron umbrales de acuerdo con condiciones secas, normales y húmedas, aplicados según la representatividad de cada uno de los eventos analizados. En el Anexo MC8 se detalla la forma de calcular los umbrales en cada una de las tres condiciones definidas.

En estudios cercanos a la cuenca del Salar de Atacama, como por ejemplo el detallado en el informe “Hidrología sector Salar de Pajonales, II Región de Antofagasta”, realizado por GCF Ingenieros para Aguas Amarilla LTDA, en mayo de 2003 (DGA, 2010), la recarga al salar se define en base al número de curva considerando los eventos mensuales de precipitación y las estimaciones del balance hidrológico nacional de 1987.

El cálculo de recarga obtenido de la aplicación de este método permite definir la precipitación efectiva como principal responsable de la recarga en el salar. Debido a los supuestos que aguarda la aplicación del método, es necesario contrastar estos resultados con aquellos obtenidos mediante secciones de paso o incluso con los cálculos de evaporación, ya que, en el contexto de una cuenca endorreica y árida, la recarga debe ser menor o igual a la evaporación.

4.8.2 Caracterización y análisis de la distribución temporal y espacial de los eventos de precipitación.

A partir de la descripción realizada en el apartado 4.2, se desprende que la precipitación tiene una distribución espacial dominada principalmente por la topografía y la latitud, así como una distribución temporal sesgada a la ocurrencia de precipitaciones estivales importantes, con una menor participación de eventos durante la temporada invernal. Por ello, es conveniente analizar la precipitación agrupándola en eventos. Un evento se define como la ocurrencia sucesiva de días lluviosos registrados en al menos una estación meteorológica de la cuenca, con una duración máxima de cinco días para cada evento.

Una vez agrupados los eventos, se aplica la clasificación de Singh (1992), la cual considera las condiciones de humedad en el suelo debido a los eventos de precipitación ocurridos durante cinco días consecutivos (Tabla 4-17).

Tabla 4-17. Criterio para la definición de condiciones húmedas, secas y estándar. Fuente: (Singh, 1992)

Precipitación Total en cinco días		
Condición Seca	Condición Estándar	Condición Húmeda
Menos de 13 mm	De 13 a 32 mm	Más de 32 mm

Los eventos agrupados bajo esta metodología pueden catalogarse mayormente como Condición Seca y, en raras ocasiones, como Estándar. A pesar de que probablemente entre 1 y un 10% de los eventos de precipitación podrían catalogarse como Condición Húmeda, debe ponderarse también la magnitud de la evaporación en la cuenca, especialmente en verano que es cuando ocurren los mayores eventos de precipitación. Para mayor detalle del análisis realizado consultar el Anexo MC8.

Debido a esto, la recarga de la cuenca del Salar de Atacama se calculó considerando:

- Condición SECA del suelo previa a un evento de precipitación, cuando entre un evento y su antecesor ha pasado 1 día o más sin precipitación.
- Condición NORMAL o ESTÁNDAR del suelo previa a un evento de precipitación, cuando han ocurrido eventos de precipitación continuos, es decir, no han pasado ni un día entre un evento y su antecesor.

5 GEOLOGÍA

5.1 Geomorfología y morfotectónica de la Cuenca del Salar de Atacama

En la cuenca del Salar de Atacama destaca la presencia de siete rasgos morfoestructurales y geomorfológicos de rumbo aproximadamente nor-noreste a norte-sur, limitados por sistemas estructurales de escala regional (Figura 5-1) y caracterizados por diferentes extensiones, alturas y unidades aflorantes:

(i) **Cordillera de Domeyko.** Cadena montañosa limitante occidental de esta cuenca, fue alzada y erosionada durante el Eoceno. Está constituida por complejos magmáticos paleozoicos a triásicos, sobre los que se depositan en discordancia secuencias sedimentarias y evaporíticas del Mesozoico al Cenozoico (*e.g.* Muñoz *et al.*, 2002; Warren, 2006; Arriagada, 2009). Se caracteriza por persistir por más de 100 km, con un ancho promedio de 10 km. Su altura media es de 3.000 msnm, alcanzando máximos cercanos a 3.200 msnm en los alrededores de la Cuenca del Salar de Atacama. En su borde oriental limita con el Llano de la Paciencia y con la Cordillera de la Sal (Figura 5-1).

(ii) **Llano de la Paciencia.** Cuenca intermontana y endorreica de dirección NNE ubicada entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal. Su extensión es de 136 km² y su relleno se constituye de secuencias paleógenas a neógenas no consolidadas correspondientes a: depósitos detríticos provenientes de flujos de barro y detritos desde la Cordillera de Domeyko, depósitos evaporíticos locales y depósitos aluviales, coluviales y eólicos recientes (*e.g.* Muñoz *et al.*, 2002; Warren, 2006; Arriagada, 2009).

(iii) **Cordillera de la Sal.** Franja morfotectónica de rumbo NNE que se extiende por casi 80 km entre el Llano de la Paciencia y el Salar de Atacama (Figura 5-1), y se eleva hasta por 200 m respecto a este salar, limitada al este por un sistema de fallas inversas de alto ángulo. Está formada principalmente por depósitos consolidados del Oligoceno al Reciente, como las formaciones Vilama y Campamento, que sobreyacen a la Formación San Pedro, y por flujos ignimbríticos neógenos en su extremo norte (Ramírez & Gardeweg, 1982; Flint *et al.*, 1993; Wilkes & Görler, 1994; Muñoz *et al.*, 2002; Warren, 2006; Arriagada, 2009).

(iv) **Planicie Aluvial** (incluido el Delta del Río San Pedro). Agrupa las franjas de relieve suave y baja pendiente (<5°) localizadas alrededor del Salar de Atacama; al este de la Cordillera de la Sal y al oeste de la Cordillera Occidental y del Cordón de Lila. Sus anchos son variables, desde <3 km hasta 10 a 12 km en el borde este y norte. Se conforma por abanicos aluviales provenientes de la Cordillera de la Sal, de la Cordillera Occidental y del Cordón de Lila, respectivamente. Están constituidos por depósitos detríticos, que en bordes más distales desde el Salar corresponden a gravas y arenas gruesas. Su parte norte, este y sur corresponde a la principal área de recarga de la cuenca. (Xterrae, 2018; Marazuela *et al.*, 2019; IDAEA-CSIC, 2017). En esta unidad se incluye el Delta del Río San Pedro, ubicado al norte de la depresión del Salar, aguas abajo de la confluencia

de los ríos Grande y Salado, consistente en una secuencia formada por limos, arcillas, arena, sulfatos y materia orgánica (Bevacqua, 1994).

(v) **Salar de Atacama** (incluidos núcleo y zona marginal). Planicie limitada por depósitos aluviales por el este, oeste y norte, y por el Cordón de Lila, al sur. Su extensión es de aproximadamente 3.000 km², con 100 km de largo y 50 km de ancho. La zona marginal del Salar se ubica a elevaciones entre 2.300 y 2.320 msnm, en el margen sureste, este y norte del núcleo, y está constituida por depósitos aluviales en las zonas más distales, adyacente a los abanicos aluviales del margen oriental, y evaporíticos que gradan desde los bordes hacia el núcleo en facies de carbonatos y sulfatos, hasta llegar a las facies cloruradas del núcleo, con algunas intercalaciones de materia orgánica. La morfología del actual depocentro de la cuenca, el núcleo de halita, es plana con márgenes irregulares. Su relleno consta de una serie de sedimentos clásticos y evaporíticos desde el Mioceno superior alcanzando una potencia de 1.400 m en algunas zonas. Topográficamente presenta un alto grado de rugosidad debido a la evaporación y deformación de grietas de desecamiento. En su mayoría se encuentra en un estado seco y duro sin un mayor proceso de inundación reciente. (*e.g.* Ramírez & Gardeweg, 1982; Bevacqua, 1992; Muñoz *et al.*, 2002; Pananont *et al.*, 2004; Mpodozis *et al.*, 2005; Warren, 2006; Jordan *et al.*, 2007; Boschetti *et al.*, 2007; Xterrae, 2011; Pueyo *et al.*, 2017; Vásquez *et al.*, 2013, IDAEA-CSIC, 2017).

(vi) **Cordón de Lila**. Franja morfotectónica que conforma el límite austral de los depósitos evaporíticos del Salar de Atacama, alzándose en promedio 3.200 m s.n.m. Hacia el norte desciende y subyace a las secuencias detríticas y evaporíticas del Salar de Atacama. Se caracteriza por estar conformado por las rocas más antiguas de la cuenca: rocas ígneas y sedimentarias paleozoicas, y unidades volcánicas y plutónicas mesozoicas y cenozoicas (*e.g.* Muñoz *et al.* 2002; Warren, 2006; Niemeyer, 2013).

(vii) **Cordillera Occidental** (incluido el arco volcánico actual). Unidad morfoestructural elongada en dirección norte-sur, que incluye el arco volcánico actual. Se dispone en el borde occidental del Altiplano-Puna y conforma el límite oriental de la Cuenca del Salar de Atacama, inmediatamente al este de la Planicie Aluvial oriental. Allí, las cimas alcanzan alturas cercanas a 5.600 msnm en los edificios volcánicos plio-pleistocénicos a actuales (Gardeweg & Ramírez, 1987; De Silva, 1989). Se compone de unidades ígneas y sedimentarias, paleozoicas a mesozoicas, cubiertas en discordancia por depósitos ignimbríticos neógenos. En esta área, todas estas unidades están disectadas por quebradas de rumbo aproximadamente este-oeste y parcialmente cubiertas por depósitos de piedemonte (*e.g.* Ramírez y Gardeweg, 1982; Muñoz *et al.*, 2002; Warren, 2006; Arriagada, 2009; Salisbury *et al.*, 2011; Xterrae, 2011).

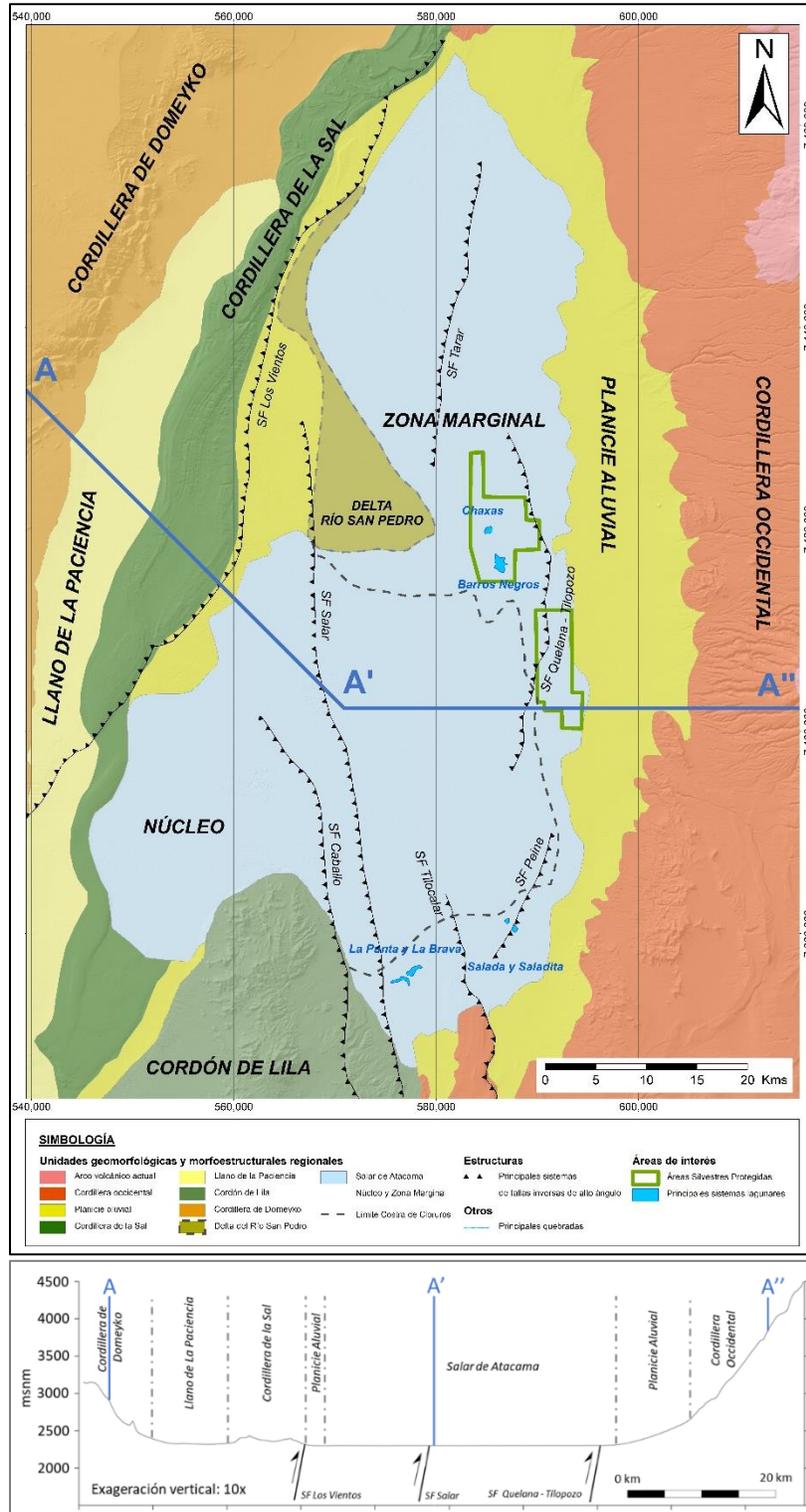


Figura 5-1. Salar de Atacama, indicando los principales rasgos morfológicos y estructurales. Arriba: Mapa geomorfológico. Abajo: Transecta que destaca los principales rasgos morfoestructurales y sistemas de falla. La traza se indica en el mapa. Fuente: Elaboración propia basado en Xterrae, 2019.

5.2 Geología superficial

La superficie de la Cuenca del Salar de Atacama y su entorno está caracterizada por el afloramiento de rocas ígneas y sedimentarias de edad paleozoica a holocena, depósitos no consolidados y secuencias evaporíticas (Figura 5-2), delimitadas y cortadas por sistemas de fallas regionales (*e.g.* Mpodozis *et al.*, 2005; Arriagada *et al.*, 2006; Jordan *et al.*, 2002; 2007).

La geología del Salar de Atacama y sus alrededores ha sido descrita por varios autores (*e.g.* Brüggén, 1943; 1959; Dingman, 1965; Moraga *et al.*, 1974; Ramírez & Gardeweg, 1982; Marinovic & Lahsen, 1984; Arriagada, 2009; Niemeyer, 2013; Becerra *et al.*, 2014), la que es detallada en la Línea Base de Geología del presente informe. Para efectos del modelo hidrogeológico conceptual se agruparon las unidades geológicas según litología, edad y distribución (Figura 5-2), como se indica a continuación.

Basamento. Agrupa las unidades más antiguas y consolidadas de la Cuenca del Salar de Atacama: intrusivos paleozoicos a cretácico-paleocenos, secuencias deltaicas, de plataformas, fluviales y marinas paleozoicas, secuencias continentales paleozoicas a cretácicas, y secuencias volcánicas paleozoicas a cretácicas. También se incluyen los edificios volcánicos que constituyen la Cordillera Occidental, cuyas edades van del Mioceno superior al Holoceno.

Aflora en las cimas más altas de la Cordillera de Domeyko, en el Cordón de Lila e inmediatamente al este de la Planicie Aluvial al oriente del salar, formando parte de la Cordillera Occidental. Estos afloramientos se encuentran parcialmente cubiertos por secuencias sedimentarias continentales del Eoceno – Oligoceno, ignimbritas neógenas y depósitos no consolidados antiguos a recientes.

Secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno. Secuencias continentales clásticas del Eoceno al Pleistoceno, que incluyen algunos niveles volcánicos y evaporíticos. Estratigráficamente se ubican sobre el Basamento y localmente presentan una relación de engrane con depósitos ignimbríticos del neógeno en la parte oriental de la cuenca.

Estas secuencias forman gran parte de la Cordillera de la Sal, al norte y noroeste del Sistema de Falla Los Vientos, donde están parcialmente cubiertas por depósitos no consolidados antiguos y recientes, por ignimbritas neógenas y por limos salinos del Llano de la Paciencia. En la Cordillera de Domeyko afloran localmente, al igual que en la Cordillera Occidental, en forma de los Estratos de Quepe, al este de la localidad de Peine.

Secuencias estratificadas del Mioceno superior. Corresponde a las partes más altas de las Secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno, correspondiente a areniscas a arcillolitas de colores pardo rojizo a anaranjado con abundante contenido de evaporitas (Travisany, 1978; Ramírez, 1979; Marinovic & Lahsen, 1984; Henríquez *et al.*, 2014).

Expuesta al suroeste del Salar de Atacama, al sur del Sistema de Falla Los Vientos, se encuentra parcialmente cubierta por depósitos de salar moderno, Depósitos no consolidados y Limos Salinos del Llano de la Paciencia, y en contacto por falla bajo los niveles medios e inferiores de las Secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno.

Depósitos ignimbríticos del Mioceno al presente. Corresponden por un lado a flujos de ceniza y aglomerados débilmente consolidados, además de secuencias de tobas riolíticas a dacíticas, moderada a fuertemente soldadas.

Cubren extensas áreas de la Cordillera Occidental (Figura 5-2), las faldas del Cordón de Lila, localmente la parte norte de las Cordillera de la Sal y algunas zonas de la Cordillera de Domeyko. En estos sectores se encuentran en discordancia sobre intrusivos paleozoicos (Basamento) y sobre Secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno, con las que también localmente muestran una relación de engrane. Se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos fluviales, aluviales y eólicos, y por sedimentos salinos pertenecientes al salar. En algunos sectores estos depósitos sobreyacen a depósitos lacustres de limo y yeso del Salar de Atacama, lo que indica que se derramaron sobre depósitos que formaban el antiguo salar.

Evaporitas antiguas (Pleistoceno). Definidas como Formación El Tambo (Moraga *et al.*, 1974), corresponden a depósitos lacustres calcáreos a silíceos del Plioceno – Pleistoceno (*e.g.* Moraga, 1974; Lin *et al.*, 2016).

Afloran en el ápice de la Península de Tilocalar y en Peine, donde cubren parcialmente y de forma discordante a la Ignimbrita Tucúcaro, y están cubiertas por depósitos aluviales y salinos en estos mismos sectores.

Limos salinos del Llano de la Paciencia. Depósitos morrénicos de till, depósitos de limos y arcillas, con algo de evaporitas, distribuidos de forma marginal en el Llano de la Paciencia, parcialmente cubiertos por depósitos aluviales recientes (Xterrae, 2019).

Depósitos no consolidados. Esta unidad incluye depósitos no consolidados de origen aluvial, fluvial eólico, lahárico y morrénico. Su litología corresponde a gravas, brechas, arenas y limos, con matrices arenosas, arcillosas y salinas, cuyas edades van desde el Oligoceno al Holoceno (Ramírez & Gardeweg, 1982; Mpodozis *et al.*, 1983; Marinovic & Lahsen, 1984; Ramírez, 1988; Mpodozis *et al.*, 2000; 2005; González *et al.*, 2009; Basso & Mpodozis, 2012; Cortés, 2012; Becerra *et al.*, 2014; Henríquez *et al.*, 2014; Solari *et al.*, 2017).

Estos depósitos afloran principalmente a lo largo del Llano de la Paciencia, al oriente de la Cordillera de la Sal, en el piedemonte de la Cordillera Occidental, en las cercanías de los centros eruptivos actuales y volcanes inactivos, y en las faldas del Cordón de Lila. En estos sectores se apoya discordantemente sobre parte del Basamento, sobre Secuencias del Eoceno al Mioceno y sobre ignimbritas neógenas, con las que también presenta relaciones de engrane.

Delta del Río San Pedro. Unidad que agrupa los depósitos del lóbulo activo de este delta, consistentes en cloruros, carbonatos, arenas, limos y arcillas. La mayor parte de la superficie del lóbulo está formada por una costra de depósitos aluviales y cloruros (Bevacqua, 1988).

Depósitos Cuaternarios evaporíticos

La superficie del Salar de Atacama está constituida por sedimentos evaporíticos y clásticos actuales. Estos depósitos muestran una zonación química desde el núcleo del salar a la zona marginal, observándose la siguiente sucesión: facies cloruradas, sulfatadas y carbonatadas (Figura 5-2; *e.g.* Moraga *et al.*, 1974; Bevacqua, 1992). Estas facies se agruparon según sus características composicionales como se muestra a continuación.

- **Cloruros.** Es la facies que mayor extensión presenta en el Salar de Atacama y consiste en una costra de color gris, compuesta principalmente por halita con sulfatos y materia orgánica ocasionales, que conforma el núcleo del salar. Se distinguen varias sub-facies en función de su textura y proporción de detritos. Presenta una relación de engrane con facies sulfatadas por el este y norte, y con facies aluviales por el oeste del Salar (Moraga *et al.*, 1974; Bevacqua, 1992; Xterrae, 2011).
- **Sulfatos.** Su distribución ocurre en forma de franja de hasta 6 km de ancho, desde el Delta del Río San Pedro, por el norte, hasta el sector de Tilopozo, por el sur, cubriendo el borde oriental, nororiental y suroriental del Salar. Formados entre el núcleo de cloruros y las facies carbonatadas, consisten en yesos y anhidritas con algo de cloruros y/o detritos (Bevacqua, 1988; Xterrae, 2011).
- **Sulfatos con limos.** Corresponde a la facies sulfatada con mayor cantidad de detritos. Esta se extiende al norte del Salar de Atacama, inmediatamente al este del Delta del Río San Pedro. Su composición es similar a la de los sulfatos descritos anteriormente, pero su proporción de sedimentos aumenta debido a la proximidad del delta (Bevacqua, 1988; 1992).
- **Carbonatos con limos.** Corresponde a la franja evaporítica más externa del Salar de Atacama. Está constituida principalmente por facies carbonatadas con aporte de material detrítico, sulfatos en menor cantidad y materia orgánica. Sobreyacen a las Evaporitas antiguas (Pleistoceno) y presentan una relación de engrane con las facies sulfatadas y con las facies distales de depósitos aluviales.

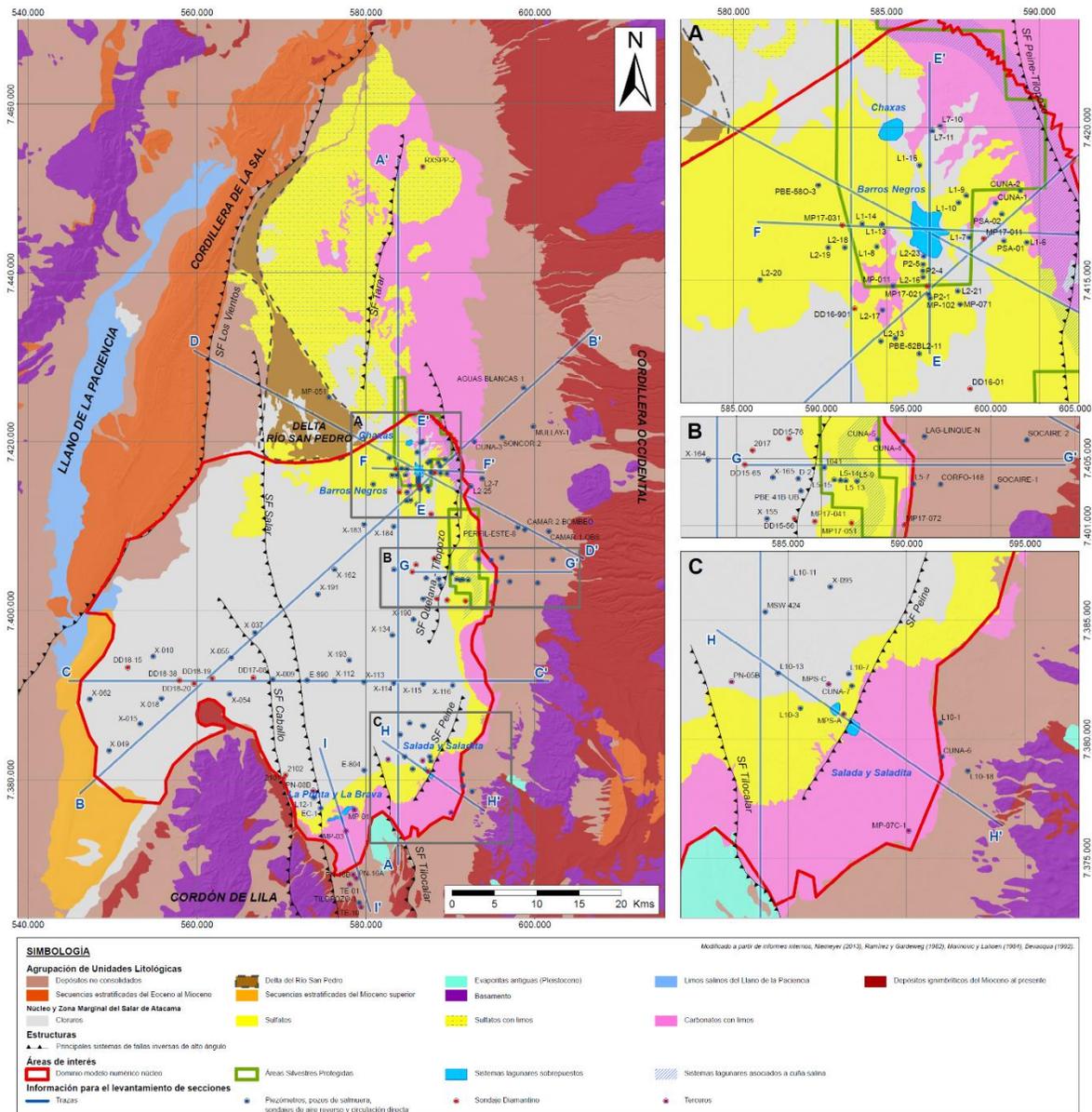


Figura 5-2. Mapa geológico del Salar de Atacama, indicando unidades geológicas simplificadas, estructuras y trazas de secciones detalladas en 5.4 Geología Subsuperficial y 5.6 Geología de Sistemas locales. Fuente: Elaboración propia basada en informes internos, Niemeyer (2013), Ramírez y Gardeweg (1982), Marinovic y Lahsen (1984), Bevacqua (1992).

5.3 Geología estructural

El Salar de Atacama es una cuenca de origen tectónico compresivo desde el Mioceno (*e.g.* Mpodozis *et al.*, 2005; Rubilar, 2015), que se encuentra delimitada y disectada por fallas inversas activas que afectan desde el basamento a la cobertura actual (Kuhn, 2002; Mpodozis *et al.*, 2005; Arriagada *et al.*, 2006; Jordan *et al.*, 2002; 2007), responsables de generar el espacio para la deposición de los materiales de relleno, así como de la morfología actual de la cuenca (Mpodozis *et al.*, 2005; Arriagada *et al.*, 2006).

A continuación, se describen los principales sistemas de fallas (Figura 5-2) que son los que mayor efecto tienen sobre el relleno de la cuenca y sobre las unidades hidrogeológicas modernas.

Sistema de Falla Los Vientos. Sistema de fallas inversas de alto ángulo, de rumbo NNE, que se extiende en el borde oriental de la Cordillera de la Sal. Es responsable del alzamiento de las Secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno sobre Secuencias Estratificadas del Mioceno superior y Depósitos no consolidados, en forma de una faja plegada y corrida de 5 – 10 km de ancho (*e.g.* Flint *et al.*, 1993; Arriagada *et al.*, 2006; Cembrano *et al.*, 2007).

Sistema de Falla Caballo. Estructura norte-sur a nor-oeste que nace en el Cordón de Lila y desde ahí se proyecta hacia el norte, afectando el relleno de la cuenca hasta la actualidad. Su componente principal es inversa, aunque no se descarta una de rumbo, de alto ángulo con vergencia este. Las unidades evaporíticas más recientes al oeste de la falla se encuentran elevados en relación con el bloque este (Arriagada, 2009).

Sistema de Falla Salar. Es el rasgo estructural más importante del centro del salar, desarrollándose en dirección NNW-SSE desde el Paleógeno hasta hoy (Jordan *et al.*, 2002; 2007; Arriagada *et al.*, 2006), y extendiéndose en superficie desde el Cordón de Lila hasta el Delta del Río San Pedro en forma de un sistema de fallas inversas subverticales de vergencia este (*e.g.* Muñoz *et al.*, 2002).

Sistema de Falla Tarar. Se ubica en la parte norte de la zona marginal del Salar de Atacama y está conformado por fallas verticales a subverticales de vergencia este y rumbo NNE, que persisten por más de 20 km (Universidad de Chile, 2016).

Sistema de Falla Quelana-Tilopozo. Sistema de fallas inversas subverticales a verticales, con componente de rumbo, que se extienden desde el Sistema Aguas de Quelana hacia el norte. Las estructuras mayores mantean al oeste y su actividad se registra hasta la actualidad. (*e.g.* Jordan *et al.*, 2007). Este sistema favorece la generación de depresiones locales con el subsecuente depósito de rellenos finos y evaporitas, sustentando así el desarrollo de la zona marginal al este del salar (Universidad de Chile, 2016).

Sistema de Falla Tilocalar. Sistema de fallas inversas a transpresivas de alto ángulo, de rumbo NNW y vergencia este, que se expresa en superficie por más de 20 km, al sureste del salar, en la Península de Tilocalar (Figura 5-2). Representa el límite natural entre los Sistemas de Tilopozo y

Peine, expresado en las Lomas de Tilocalar (*e.g.* Arriagada, 2009; Universidad de Chile, 2016; Rubilar *et al.*, 2017).

Sistema de Falla Peine. Sistema de fallas inversas subverticales, de rumbo noreste y vergencia oeste, emplazado en el Sistema Peine. Coincide parcialmente con el contacto en superficie entre facies carbonatadas y sulfatadas de la zona marginal y afecta a los afluentes que van desde esta zona hacia el núcleo del salar.

5.4 Geología subsuperficial

La estratigrafía del Salar de Atacama ha sido estudiada por varios autores (*e.g.* Hydrotechnica, 1987; Wilkes & Görler, 1994; Breitzkreuz, 1995; Muñoz *et al.*, 2002; Jordan *et al.*, 2002; Arriagada *et al.*, 2006; Amphos, 2008; González *et al.*, 2009), quienes distinguieron un relleno sedimentario pre-neógeno y uno neógeno, constituido por sedimentos clásticos y evaporitas (*e.g.* Mpodozis *et al.*, 2005).

Para caracterizar la disposición y relaciones de contacto entre las unidades que conforman el relleno más reciente se compiló la información de 125 sondajes (Figura 5-3) construyeron cuatro secciones regionales (Figura 5-4), cuyas trazas se muestran en la Figura 5-2, integrando información de sondajes y de métodos geofísicos que se han desarrollado por parte de CORFO, Hydrotechnica, SQM, y otros (referencias). Los pozos utilizados disponen de información representativa tanto de los márgenes como del núcleo del salar, y sus profundidades van desde 69 m (Pozo X-049) hasta 653 m (Pozo X-162). Esta información se ha extrapolado lateralmente de manera interpretativa, a través de la correlación de unidades geológicas, considerando los datos y bibliografía disponible. Los pozos con antecedentes estratigráficos utilizados para el análisis de la geología subsuperficial se presentan en los Anexos MC3 y MC4.

Luego, las geometrías resultantes responden a correlaciones establecidas a través de similitudes petrológicas, sedimentológicas y a su ubicación respecto a un nivel guía tobáceo que parece extenderse ampliamente en la subsuperficie del salar, guardando consistencia con los datos geofísicos y la geología superficial disponible.

5.4.1 Unidades geológicas en profundidad

A partir de la información estratigráfica disponible, se distinguen tres tipos de material: (1) Secuencias principalmente evaporíticas, (2) Secuencias principalmente sedimentarias y (3) Rocas ígneas y volcánicas antiguas, que constituyen el basamento geológico (*e.g.* Amphos, 2008).

Las rocas ígneas y volcánicas antiguas afloran en el Cordón de Lila, en la ladera oeste de la Cordillera Occidental y en la Cordillera de Domeyko (Figura 5-2) y se extienden subyaciendo a las unidades que conforman el relleno del Salar de Atacama a través de una discordancia erosiva

(Figura 5-4 y Figura 5-5), mientras que en la Península de Tilocalar son truncadas por la falla homónima (Figura 5-4a).

Las secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno conforman la Cordillera de la Sal (Figura 5-2) y en subsuperficie se encuentran alzadas a través del Sistema de Falla Los Vientos sobre Depósitos no consolidados en el borde occidental del Salar de Atacama (Figura 5-5b).

Apoyada directamente sobre el basamento (pozos CAMAR-2-BOMBEO, CAMAR-1-OBS y SOCAIRE-2 en Figura 5-5b; ubicación en Figura 5-2) se encuentra la secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas, la que está constituida principalmente por facies evaporíticas intercaladas con tufitas hacia el núcleo del salar, que lateralmente gradan a facies clásticas con tufitas bajo la zona marginal y aluvial, en forma de Depósitos no consolidados finos y gruesos antiguos. Su techo corresponde a un nivel tobáceo continuo, que aflora en la Cordillera Occidental como parte de los depósitos ignimbríticos del Mioceno superior y que puede ser correlacionado a la Ignimbrita Tucúcaro. Se encuentra en contacto por falla con Depósitos no consolidados en la Península de Tilocalar (Figura 5-4a) y engrana lateralmente con las Secuencias estratificadas del Mioceno superior (Figura 5-4b y Figura 5-5a), que afloran al suroeste del salar. Su geometría está afectada principalmente por las Fallas Salar y Caballo, responsables de hallar esta unidad a cerca de 50 metros de profundidad al oeste de estos sistemas de falla, y a más de 400 metros al este de los mismos (Figura 5-4b y Figura 5-5a). Por ende, las unidades que sobreyacen a la Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas, en particular los Cloruros Inferiores, ocurren al este de estos sistemas de fallas con una potencia varios cientos de metros mayor que al oeste de los mismos (Figura 5-4b).

Los Cloruros Inferiores representan un nivel de halita de potencia muy variable (ca. 50 - 400 m), presente en toda la extensión del núcleo del salar, apoyado a través de una discordancia erosiva sobre la Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas, en forma de *onlap* hacia el suroeste (Figura 5-4b y Figura 5-5a). Lateralmente engrana con secuencias sulfatadas y carbonatadas de la zona marginal (Figura 5-4 y Figura 5-5a), y presenta contacto por falla con Secuencias del Eoceno al Mioceno al este de la Cordillera de la Sal (Figura 5-5b). Se encuentran sobreyacidos por depósitos del Delta del Río San Pedro y por Evaporitas con Materia Orgánica, con las que también presentan una relación de engrane (Figura 5-4 y Figura 5-5).

Las Evaporitas con Materia Orgánica agrupan unidades de halitas y yesos que incluyen materia orgánica intersticial como uno de sus componentes principales, y en menor medida sedimentos finos. Se encuentran ubicadas entre los Cloruros Superiores y Cloruros Inferiores a profundidades entre los 2100 y 2250 msnm. Se distribuye en gran parte del núcleo del salar, alcanzando mayores profundidades y potencias donde está en contacto por engrane con las unidades de la zona marginal, en particular bajo los Sistemas Peine y Soncor, y bajo el Delta del Río San Pedro. Información de pozos diamantinos y de aire reverso en las partes más potentes de esta unidad (DD16-901, MP17-031, MP17-011, MP17-021, X-116, DD16-01 en Figura 5-4 y Figura 5-5) permiten identificar varios niveles de sedimentos finos (limos y arcillas) intercalados entre los niveles evaporíticos.

Los Cloruros Superiores representan la unidad evaporítica más joven del núcleo del salar, formando la costra expuesta del mismo. Su potencia no supera los 50 m y muestra una relación de engrane con las unidades evaporíticas de la zona marginal (Figura 5-4 y Figura 5-5).

Desde la información estratigráfica de la zona marginal del salar se identifica una zonación bien definida en profundidad de las unidades evaporíticas y clásticas (*e.g.* Vásquez *et al.*, 2013), que forman una serie de bandas subverticales. Las secuencias sedimentarias más recientes, representadas por Depósitos no consolidados (Figura 5-4 y Figura 5-5), siguen una tendencia grano decreciente hacia el núcleo del salar, indicando que la fuente de estos sedimentos son la Cordillera de la Sal por el oeste y la Cordillera Occidental por el este (*e.g.* Hydrotechnica, 1987). En superficie corresponden a las porciones más distales de abanicos aluviales, caracterizadas por la presencia de areniscas finas y limolitas con escasas intercalaciones de tobas y gravas (HARZA, 1978; Salas *et al.*, 2010), que en profundidad muestran una relación de engrane con las unidades evaporíticas de la zona marginal del salar.

Los carbonatos y limos corresponden a las evaporitas más externas de la zona marginal del Salar de Atacama. Se apoyan directamente sobre las Secuencias heterogéneas de sulfatos, tobas y tufitas, por lo que su potencia varía desde *ca.* 200 m en los sectores de Soncor, Quelana y Tilopozo – Peine, hasta *ca.* 400 m en el norte del salar (Figura 5-4 y Figura 5-5a). Presentan un contacto de engrane lateral tanto con los Cloruros Superiores, Inferiores y con las Evaporitas con Materia Orgánica del núcleo del Salar, como con las secuencias sulfatadas y clásticas de la zona marginal. Información subsuperficial de sondajes (ej. CUNA-3 en Figura 5-4b) permite identificar niveles con sedimentos finos en esta unidad.

Las secuencias sulfatadas de la zona marginal se apoyan discordantemente sobre las Secuencias heterogéneas de sulfatos, tobas y tufitas y lateralmente engranan con Evaporitas con Materia Orgánica, Carbonatos y limos, Depósitos no consolidados bajo el Sistema de Cejar y bajo el Sistema de Soncor, y con depósitos del Delta del Río San Pedro. Su potencia máxima es de *ca.* 400-500 m en el norte del salar, donde se caracteriza por el alto contenido de limos (Figura 5-4a).

Los depósitos del Delta de Río San Pedro alcanzan una potencia de 100 m, apoyándose sobre Evaporitas con Materia Orgánica y sobre los Cloruros Inferiores (Figura 5-5b). Lateralmente presentan una relación de engrane con Depósitos no consolidados, y facies sulfatadas de la zona marginal (Figura 5-5b). Información de sondajes (ej. MP-051) en este delta permiten identificar niveles de sedimentos finos (limos y arcillas) en profundidad, tal como indica Bevacqua (1994).

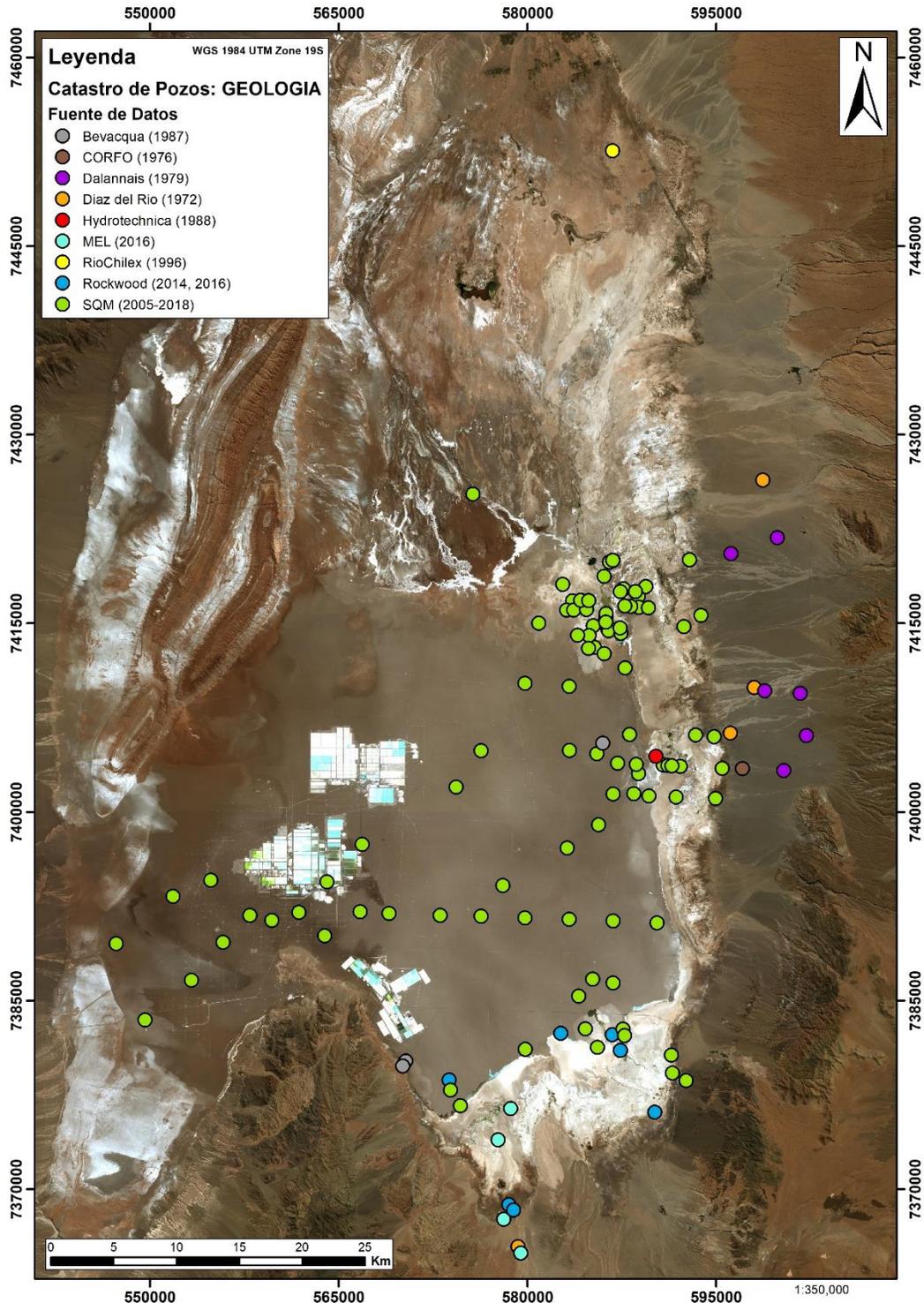


Figura 5-3 . Catastro de pozos cuyos datos fueron utilizados para elaboración de las secciones geológicas. Se distinguen los pozos según la fuente de la cual se obtiene la información. Fuente: Elaboración propia.

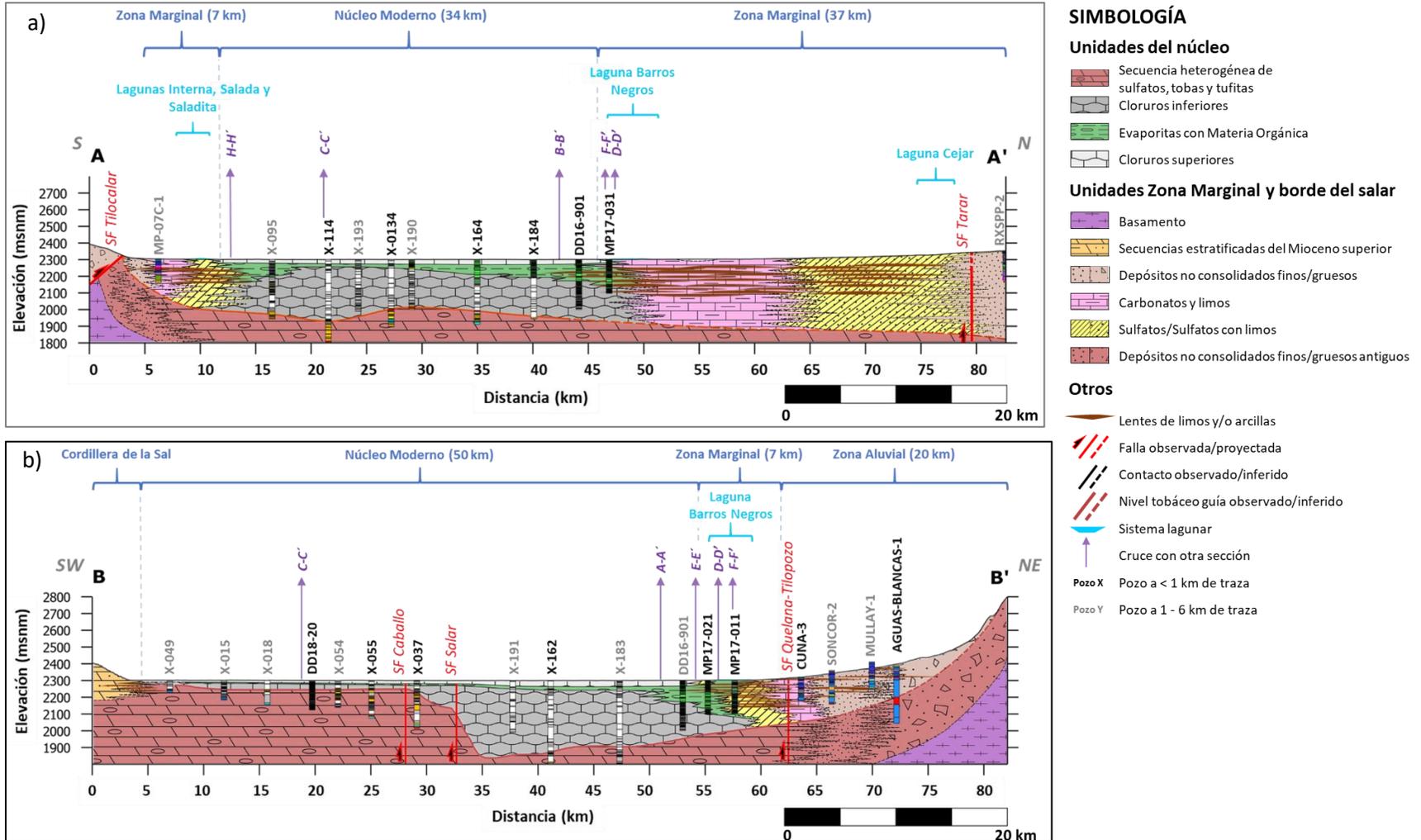


Figura 5-4. Secciones A-A' y B-B' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Sal de Atacama en dirección sur-norte (a) y suroeste-noreste (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos internos y de Rockwood (2016), Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972).

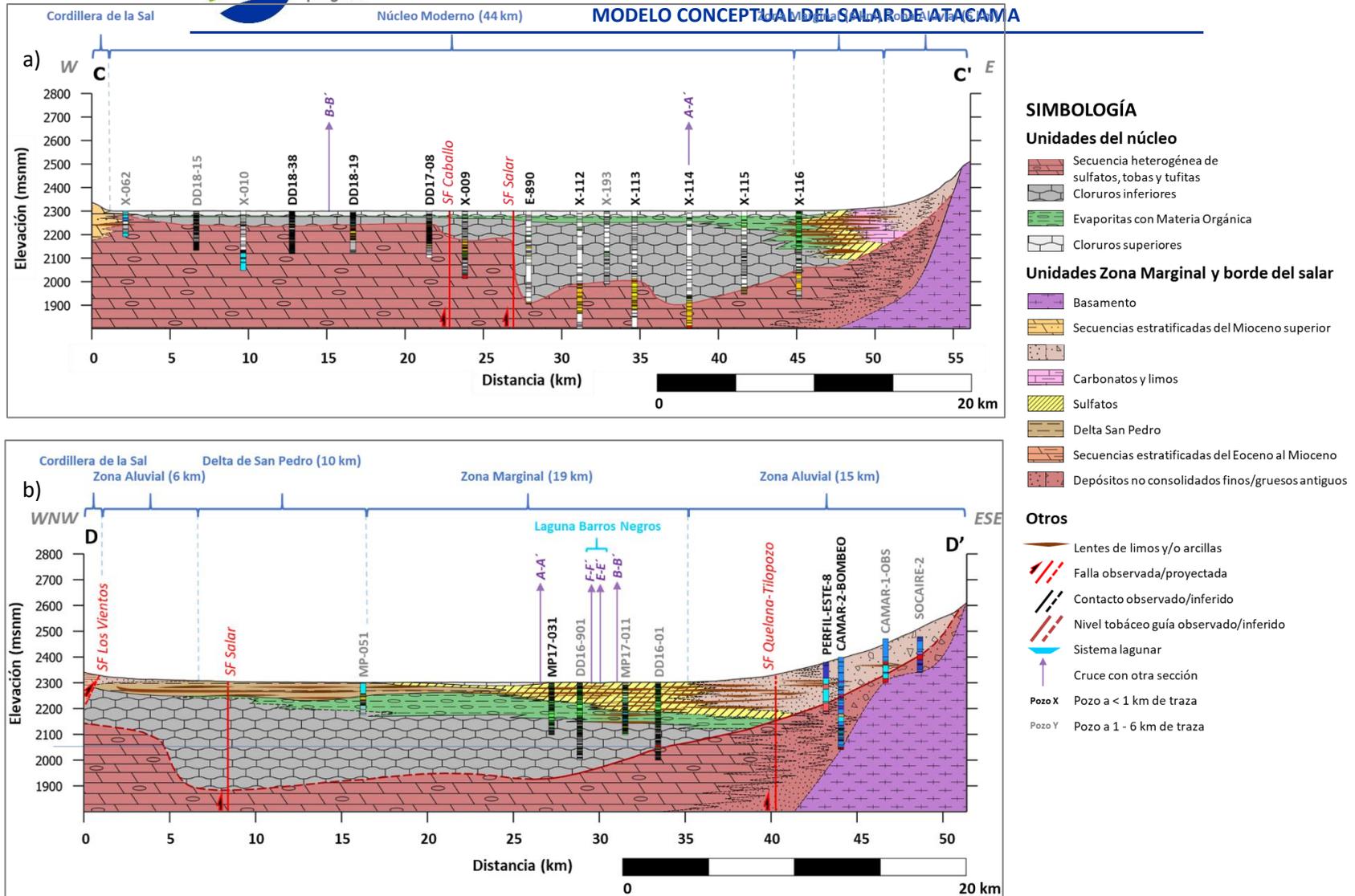


Figura 5-5. Secciones C-C' y D-D' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Salar de Atacama en dirección este-oeste (a) y noroeste-sureste en el norte del salar (b), respectivamente, hasta a 500 metros de profundidad desde la superficie del núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos internos y de Dalannais (1979) y Díaz Del Río (1972).

5.5 Geofísica

Históricamente, la información geofísica ha sido integrada junto a información geológica e hidrogeológica para interpretar características hidrogeológicas subsuperficiales y como apoyo a la generación de diversos modelos multidisciplinarios. Con el objetivo de levantar estos modelos, se ha realizado una compilación de información histórica y se han realizado nuevos estudios geofísicos a cargo de SQM en el Salar de Atacama.

Para conceptualizar la geología subsuperficial del Salar de Atacama, se han revisado y verificado trabajos tanto de geofísica de superficie como de geofísica de pozo que han sido de apoyo en distintas áreas geográficas y etapas de modelación. En total se han integrado más de 770 kilómetros lineales de estudios de geofísica de superficie, cuyos datos han sido adquiridos principalmente mediante contratistas (Tabla 5-1); y más de 50 kilómetros lineales de perfilaje de pozos mediante metodologías de geofísica de pozos, principalmente desarrollada por SQM desde la adquisición de sus datos hasta su integración final en los distintos modelos (Tabla 5-2).

Es importante mencionar los resultados de sismica de reflexión integrados, donde si bien no se cuentan en la actualidad con trabajos propios encargados por SQM, sí se hace una revisión a publicaciones y trabajos de carácter científico (Muñoz *et al.*, 2002; Jordan *et al.*, 2002, 2007; Arriagada, 2003, 2009; Pananont *et al.*, 2004; Arriagada *et al.*, 2006; Universidad de Chile, 2016; Rubilar *et al.*, 2018; Figura 5-6 y Figura 5-7a). En la Figura 5-5, la fuente de los datos TEM, NanoTEM, Magnetotelúrica y Tomografía Eléctrica corresponden a Geodatos (2000, 2005, 2017), NX-UNO (2004, 2006, 2007, 2011), DGA (2014), IGT (2012), Rio Chilex (1999), RWL (2012, 2013). La Figura 5-7b muestra un ejemplo de sección TEM utilizada para la determinación de la posición de la interfaz salina. Este análisis ha sido importante en el entendimiento del comportamiento estructural y estratigráfico del Salar de Atacama.

Tabla 5-1. Resumen de información geofísica lineal revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial.

GEOFÍSICA DE SUPERFICIE		
Metodología	Secciones estudiadas	Largo de estudio
TEM	120 perfiles	643 km lineales
TEM y NanoTEM	9 perfiles	54 km lineales
Magnetotelúrica	5perfiles	67 km lineales
Tomografía Eléctrica de alta resolución	6 perfiles	7.3 km lineales

Tabla 5-2. Resumen de información geofísica de pozos revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial.

GEOFÍSICA DE POZOS		
Metodología	Secciones estudiadas	Largo de estudio
Caliper	234	18,531 m lineales
Gamma Natural	238	18,090 km lineales
NMR	94	12,650m lineales

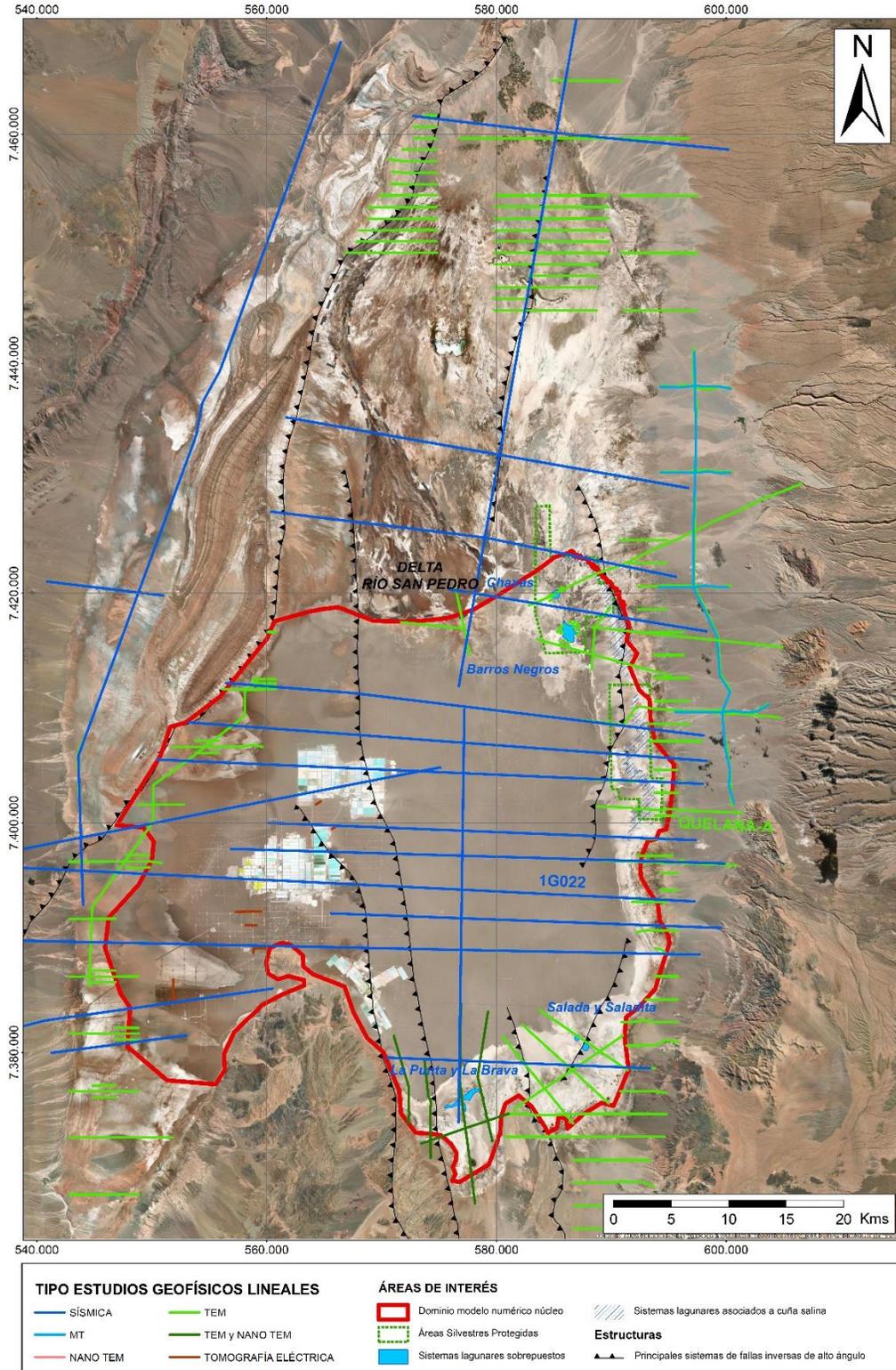


Figura 5-6. Tipo de geofísica lineal realizada en el Salar de Atacama. Fuentes citadas en texto. Se indica el nombre de las secciones sísmica y TEM de la Figura 5-6.

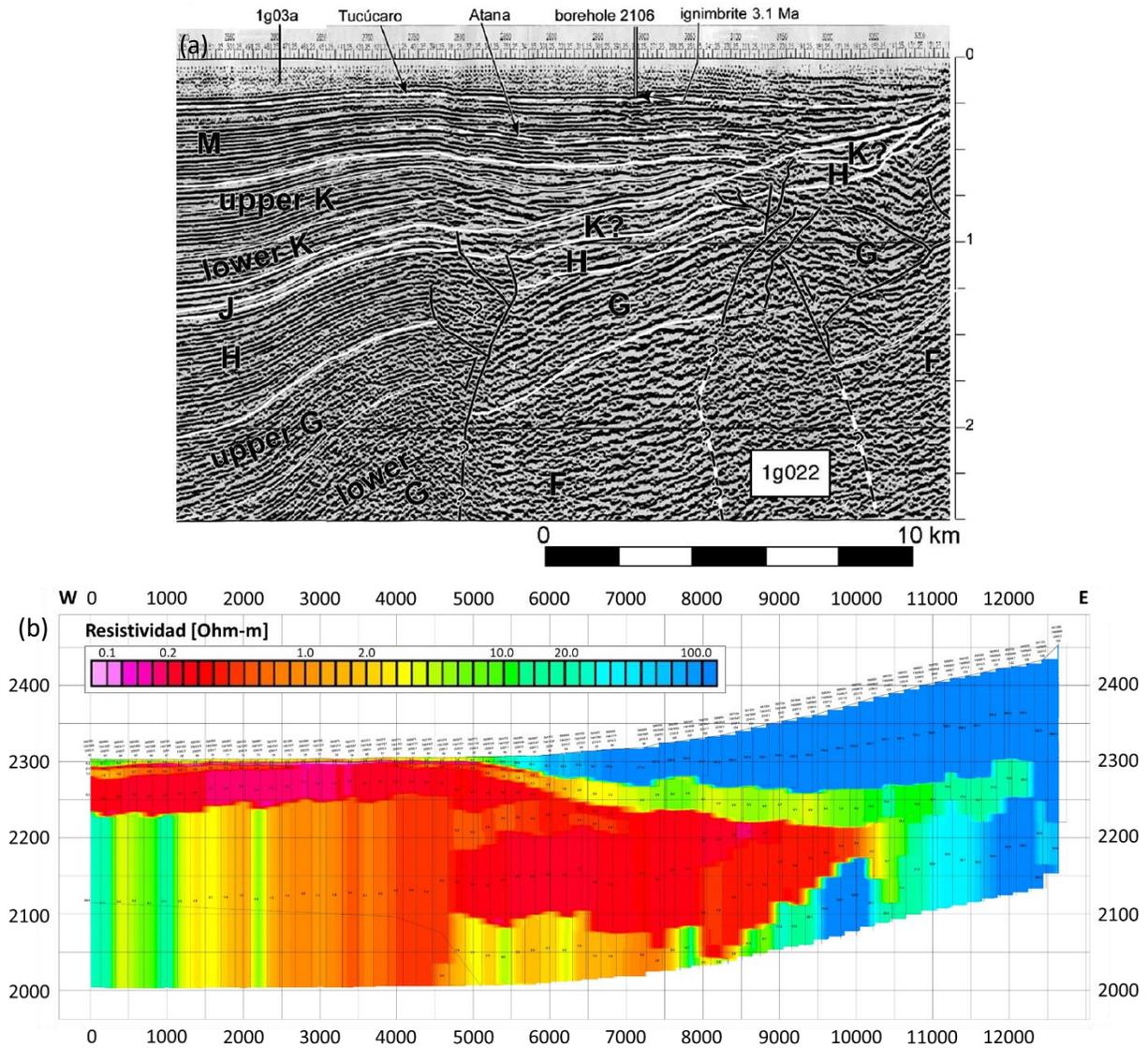


Figura 5-7. Ejemplos de secciones geofísicas utilizadas para el modelamiento geológico e hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama, ubicación en Figura 5-5. (a) Sección sísmica 1g022 (ENAP) interpretada por Jordan et al. (2007). (b) Sección TEM levantada por Geodatos (2017) para SQM en Sector de Quelana.

5.6 Geología de sistemas locales

5.6.1 Sistema de Soncor

Para conceptualizar la geología subsuperficial del Sistema de Soncor, se trazaron dos secciones locales (E-E' y F-F' en Figura 5-2), que cruzan el Sistema lagunar de Barros Negros; una de ellas además cruza el Sistema de Laguna Chaxas. Estas secciones, ilustradas en la Figura 5-8 tienen 10 y 14 km de longitud, respectivamente, y una profundidad de 100 m cada una.

El subsuelo de este sistema se caracteriza por el contacto entre unidades evaporíticas del núcleo y unidades evaporíticas y clásticas de la zona marginal. Además, se destaca por la ocurrencia de numerosos cuerpos lenticulares de sedimentos finos (limos y arcillas) emplazados en las Unidades Sulfatadas y en Evaporitas con Materia Orgánica (Figura 5-8) y de depósitos sulfatados y detríticos ricos en materia orgánica (Amphos, 2008), la que se concentra en los primeros 50 m de profundidad.

Los Cloruros Superiores ocurren tanto al norte y sur como al este de la Laguna Barros Negros, en una relación de engrane con Evaporitas con Materia Orgánica, Sulfatos y localmente con Carbonatos y limos. Los Cloruros Inferiores por su parte ocurren en forma de enclave entre Evaporitas con Materia Orgánica y engranando con Sulfatos de la zona marginal.

Las Evaporitas con Materia Orgánica representan una transición natural entre las unidades de la zona marginal y las del núcleo, y representan la unidad principal bajo la Laguna Barros Negros.

Los Sulfatos se encuentran en relación de engrane con las Evaporitas con Materia Orgánica y Carbonatos y limos, mientras que localmente se encuentran apoyados sobre los Cloruros Superiores (Figura 5-8a). Hacia los extremos norte y este del Sistema de Soncor, se encuentra una franja de unidades carbonatadas que hacia el sur y oeste engrana con Evaporitas con Materia Orgánica, Cloruros Superiores e Inferiores y Sulfatos (Figura 5-8b), mientras que al este engrana con las facies más finas de los abanicos aluviales (Figura 5-8b).

Amphos21 (2008) describen la interacción en este sector de un ambiente de deposiciones de cono aluvial (depósitos arcillosos y limosos provenientes del este) y de un ambiente evaporítico de yesos y yesos con detritos, característicos del dominio de estas lagunas; además de la superposición de un ambiente lacustre restringido. Por lo anterior, además de la interacción de las evaporitas en una configuración geológica dinámica, caracterizada por la ocurrencia de cuerpos evaporíticos irregulares y la carencia de una zonación bien definida, que sí se presenta en el resto de los sistemas lagunares.

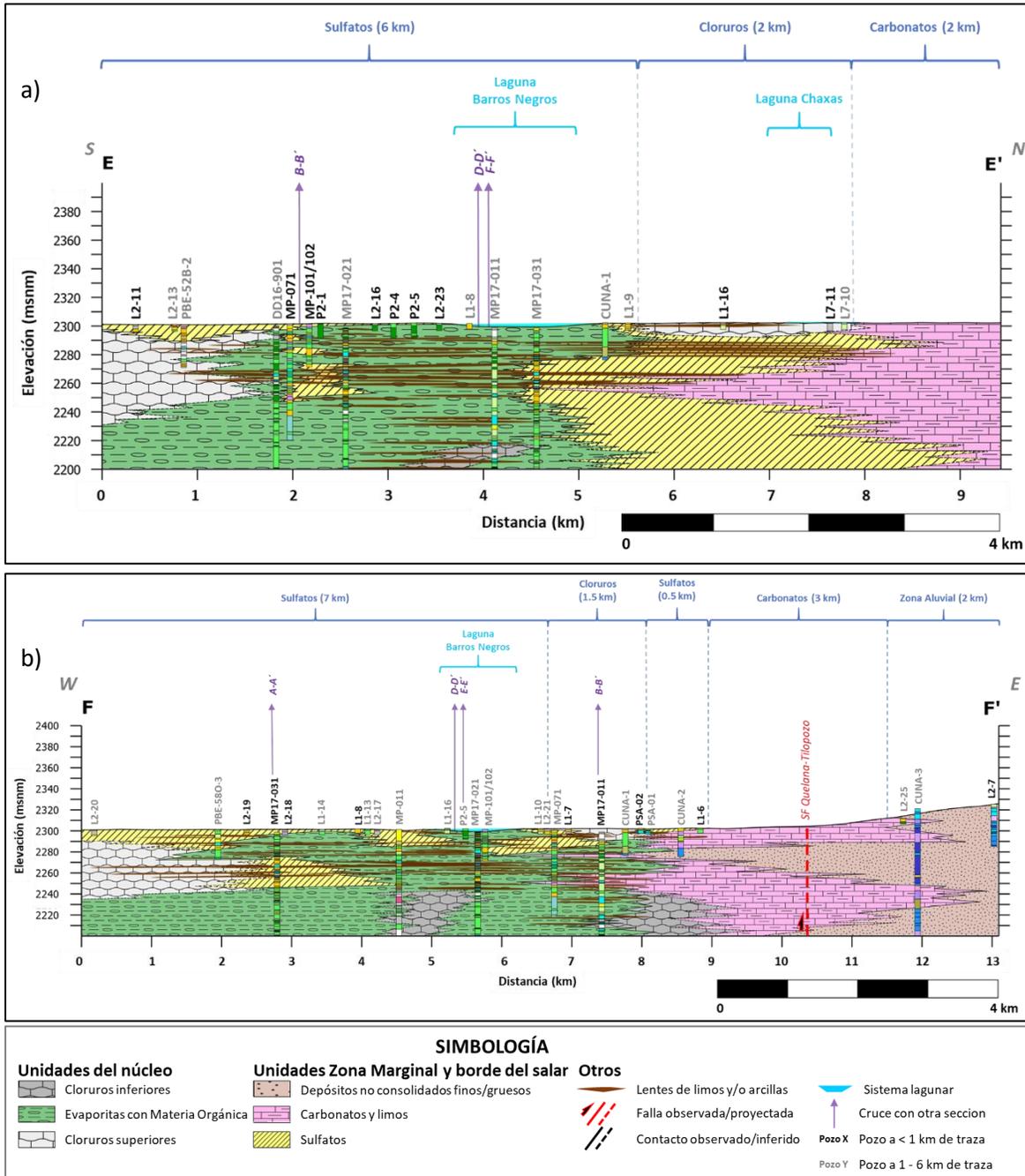


Figura 5-8. Secciones E-E' y F-F' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial del Sistema de Soncor en dirección sur-norte (a) y oeste-este (b), respectivamente, hasta a ca. 100 metros de profundidad desde la superficie de la zona marginal. Fuente: Elaboración propia con datos internos.

5.6.2 Sistema Aguas de Quelana

La geología subsuperficial del Sistema Aguas de Quelana es representada en la sección de la Figura 5-9, cuya traza se muestra en la Figura 5-2, de 18 km de largo y 250 m de profundidad. Los pozos SOCAIRE-1 y SOCAIRE-2 permiten identificar un pronunciado basculamiento del basamento, sobre el que se depositan de manera discordante y en *onlap* las secuencias heterogéneas de sulfatos, tobas y tufitas. Sobreyaciendo a esta secuencia se depositan las unidades evaporíticas y clásticas de la zona marginal y del núcleo del salar (Figura 5-9).

Al oeste de los sistemas lagunares de este sector, hacia el núcleo del salar, afloran los Cloruros Superiores subyacidos por Evaporitas con Materia Orgánica y Cloruros Inferiores, apoyados sobre la Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas. Lateralmente engranan con Unidades Sulfatadas, las que a su vez engranan con Unidades Carbonatadas de la zona marginal. El límite de la zona marginal está marcado por las facies más finas de los abanicos aluviales provenientes de la Cordillera Occidental.

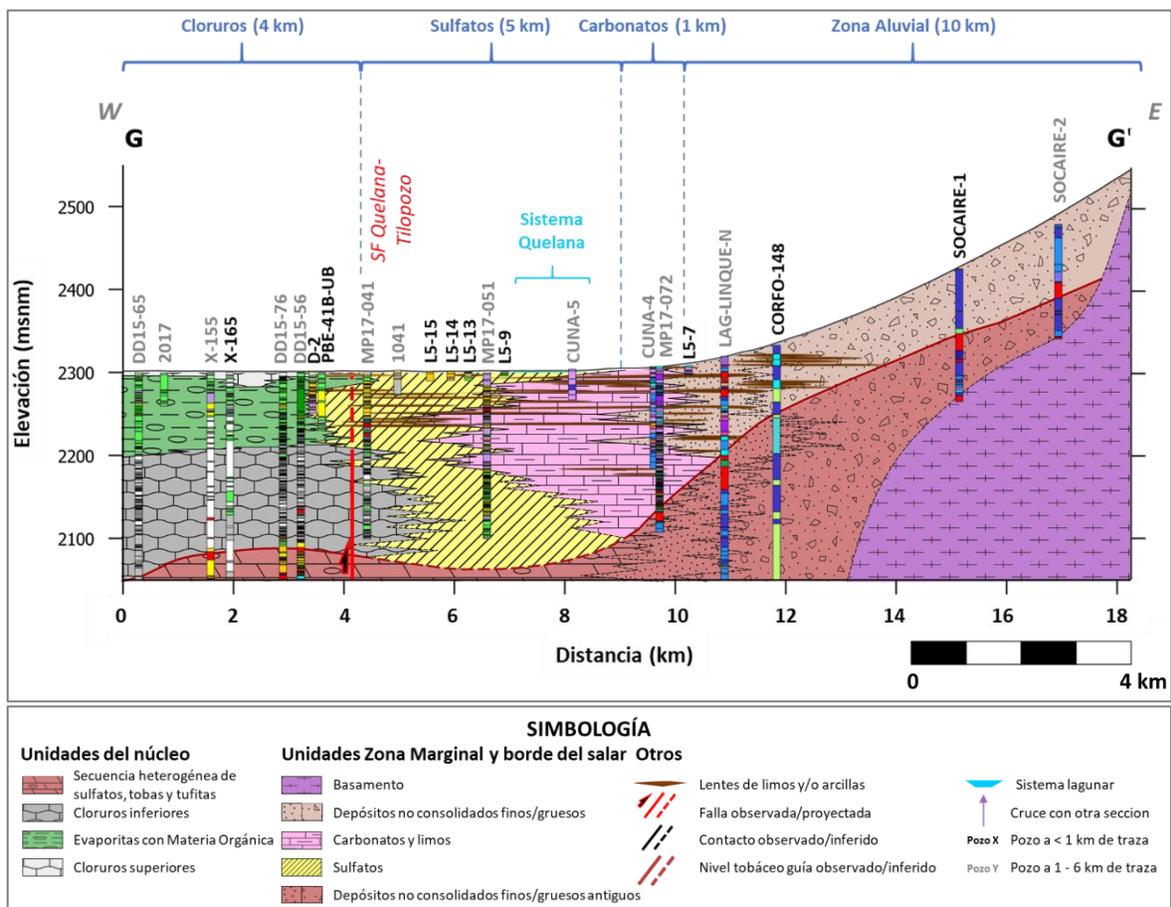


Figura 5-9. Sección G-G' (Figura 5-2) que conceptualiza la geología subsuperficial del Sistema Aguas de Quelana en dirección oeste-este a 250 metros de profundidad desde la superficie de la zona marginal. Fuente: Elaboración propia con datos internos (Díaz Del Río, 1972; CORFO, 1977; Dalannais, 1979).

Los sistemas lagunares del sector se encuentran alojados sobre la transición entre Unidades Sulfatadas y Carbonatadas, y subyacidos por lentes de sedimentos finos que se intercalan con las unidades de la zona marginal.

5.6.3 Sistema Peine - Tilopozo

La geología subsuperficial de los Sistemas de Peine y Tilopozo está representada en la Figura 5-10, en las secciones H e I, cuyas trazas alcanzan 15 y 20 km de largo, respectivamente, con una profundidad de 250 m. El Basamento aflora en superficie (Figura 5-10a) y es representado con un pronunciado basculamiento en subsuperficie, sobre el cual se depositan en discordancia y en onlap la Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas. Sobre esta unidad se depositan en discordancia erosiva las unidades evaporíticas y clásticas del sector.

Hacia el norte de las secciones, en el núcleo del Salar de Atacama, afloran los Cloruros Superiores, que, con una potencia máxima de 40 m, engranan y sobreyacen con las Evaporitas con Materia Orgánica. Éstas tienen una potencia máxima de ~80 m y sobreyacen a los Cloruros Inferiores.

Lateralmente estas tres unidades engranan hacia el sur con las unidades de sulfatos, que a su vez engranan con los Carbonatos y limos, que engranan con los Depósitos no consolidados.

La potencia dispar de las unidades evaporíticas y clásticas en ambos sistemas (~120 m en Tilopozo y ~250 m en Peine, Figura 5-10) es explicado por el Sistema de Fallas Tilocalar (Figura 5-2, Figura 5-4a y Figura 5-10a), división natural de ambos sistemas, cuyo estilo estructural (falla inversa de alto ángulo de vergencia este) generaría un depocentro en su ladera oriental, lo que favorecería un aumento del espesor para las series evaporíticas y clásticas en el sector de Peine (Figura 5-10a).

Las lagunas de ambos sistemas se alojan en plena zona marginal, en la transición entre las unidades sulfatadas y carbonatadas, y son subyacidas por numerosos lentes de sedimentos finos, que aparecen intercalados con las unidades evaporíticas y clásticas de la zona marginal (Figura 5-10).

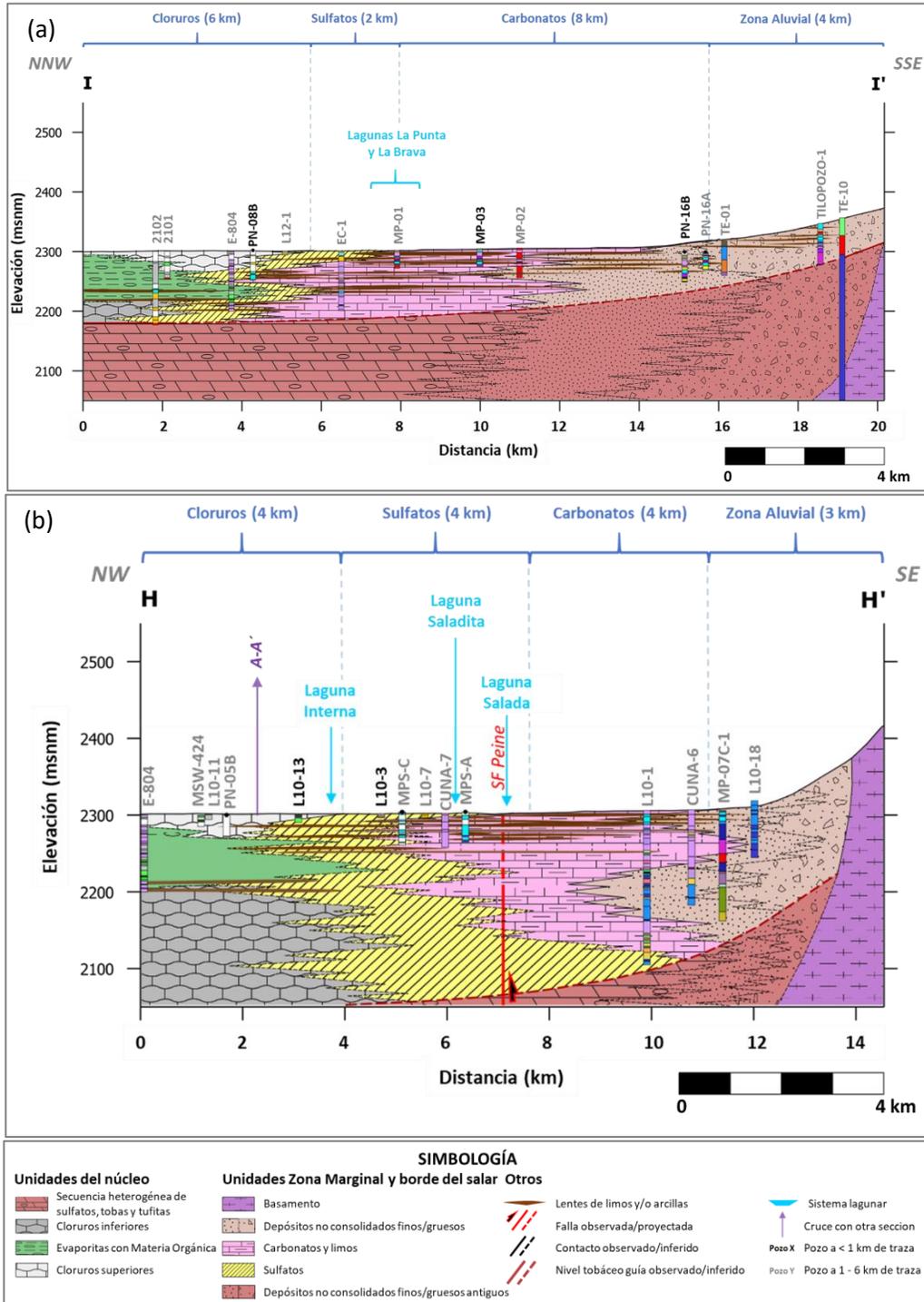


Figura 5-10. Secciones H-H' e I-I' (Figura 5-2) que conceptualizan la geología subsuperficial de los Sistemas de Peine-Tilopozo en dirección NW-SE(a) y NNW-SSE (b), respectivamente, hasta a ca. 250 metros de profundidad desde la superficie de la zona marginal. Fuente: Elaboración propia con datos internos, de Rockwood (2014, 2016), CORFO (1977), MEL (2016) y Díaz Del Río (1972).

6 HIDROGEOLOGÍA

6.1 Catastro de pozos

Para la elaboración del modelo conceptual hidrogeológico se han considerado un total de 1373 infraestructuras. De ellas, 125 se utilizaron para la confección del mapa geológico y secciones geológicas presentados en el capítulo 5 (Figura 5-3); 631 han sido utilizados para los análisis hidráulicos de las unidades geológicas (Figura 6-1); 601 para análisis de niveles freáticos y piezométricos (Figura 6-2); y 291 para análisis hidroquímicos e isotópicos (Figura 6-3).

La información relativa a los pozos considerados corresponde fundamentalmente a los de la red del Plan de Seguimiento Ambiental (PSAH) y de monitoreo complementario de SQM. Adicionalmente, se consideran los pozos del plan de monitoreo ambiental de Albemarle, los pozos de extracción de agua y salmuera tanto de SQM como de Albemarle, y datos de infraestructuras del registro histórico (eg. Hydrotechnica, 1987; MINSAL, 1988 y 1989).

Por su parte, la Tabla 6-1. resume el número y tipo de puntos de extracción, tanto de agua dulce como salmuera, y de reinyección. Para facilitar el posterior análisis numérico, se han utilizado Puntos de Extracción Equivalente (PEEx), los que representan las extracciones en conjunto por cada 1 km² de área, distribuidas dichas áreas en una grilla regular (ver Anexo MC3). La información recopilada se presenta consolidada en el Anexo MC3 y se sintetiza en la Figura 6-4.

Tabla 6-1. Resumen del tipo y cantidad de puntos de extracción y reinyección considerados. Fuente: elaboración propia

Tipo de punto	Cantidad	Propietario
Punto equivalente de extracción de salmuera	258	SQM
Pozo de extracción de agua industrial	6	SQM
Punto de reinyección de salmuera	4	SQM
Pozo de extracción de salmuera	50	ABL
Pozo de extracción de agua industrial	3	ABL

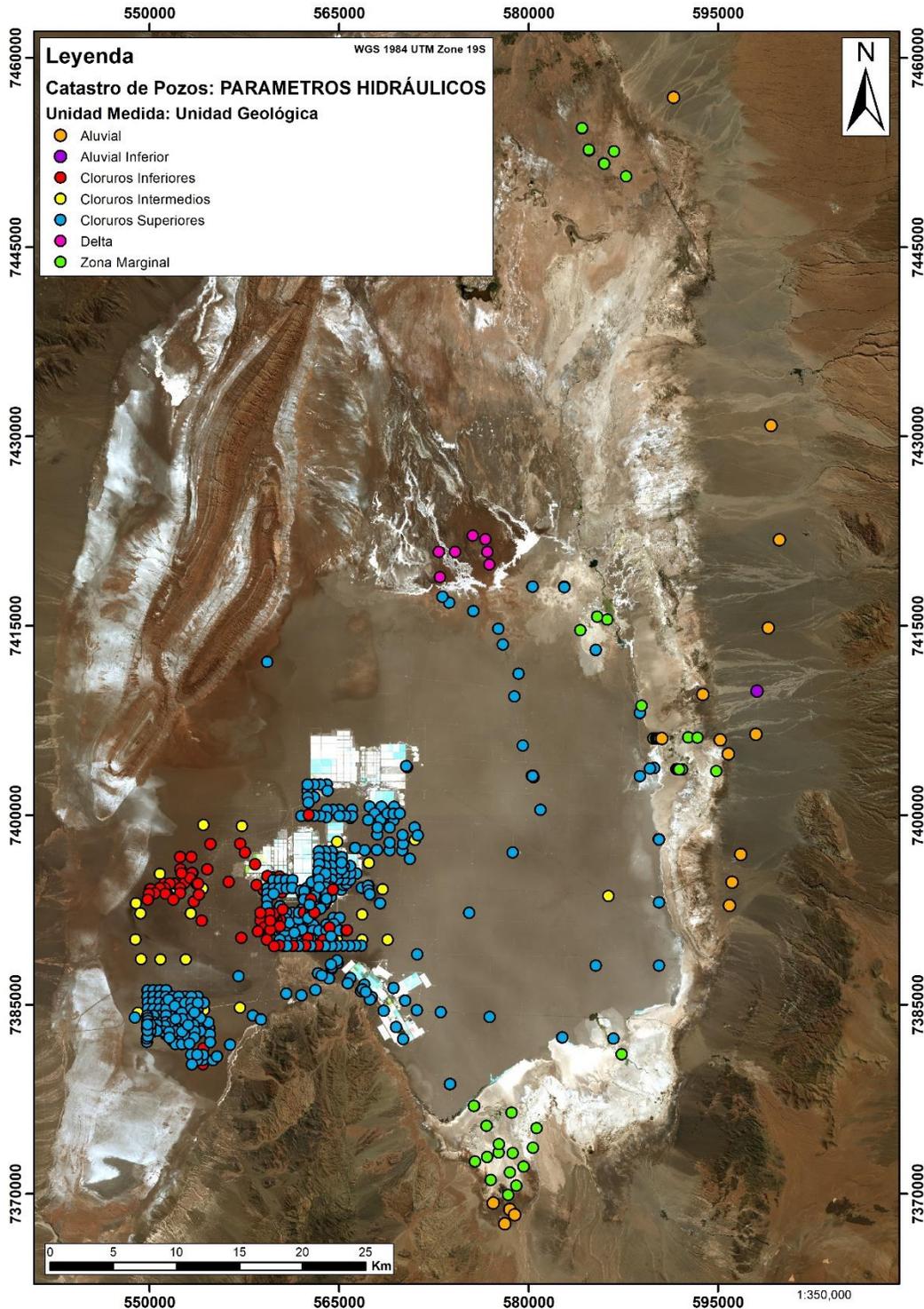


Figura 6-1. Catastro de pozos utilizados para la definición de unidades hidrogeológicas y análisis de parámetros hidráulicos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la unidad geológica a la cual se asocia la medición. Fuente: Elaboración propia.

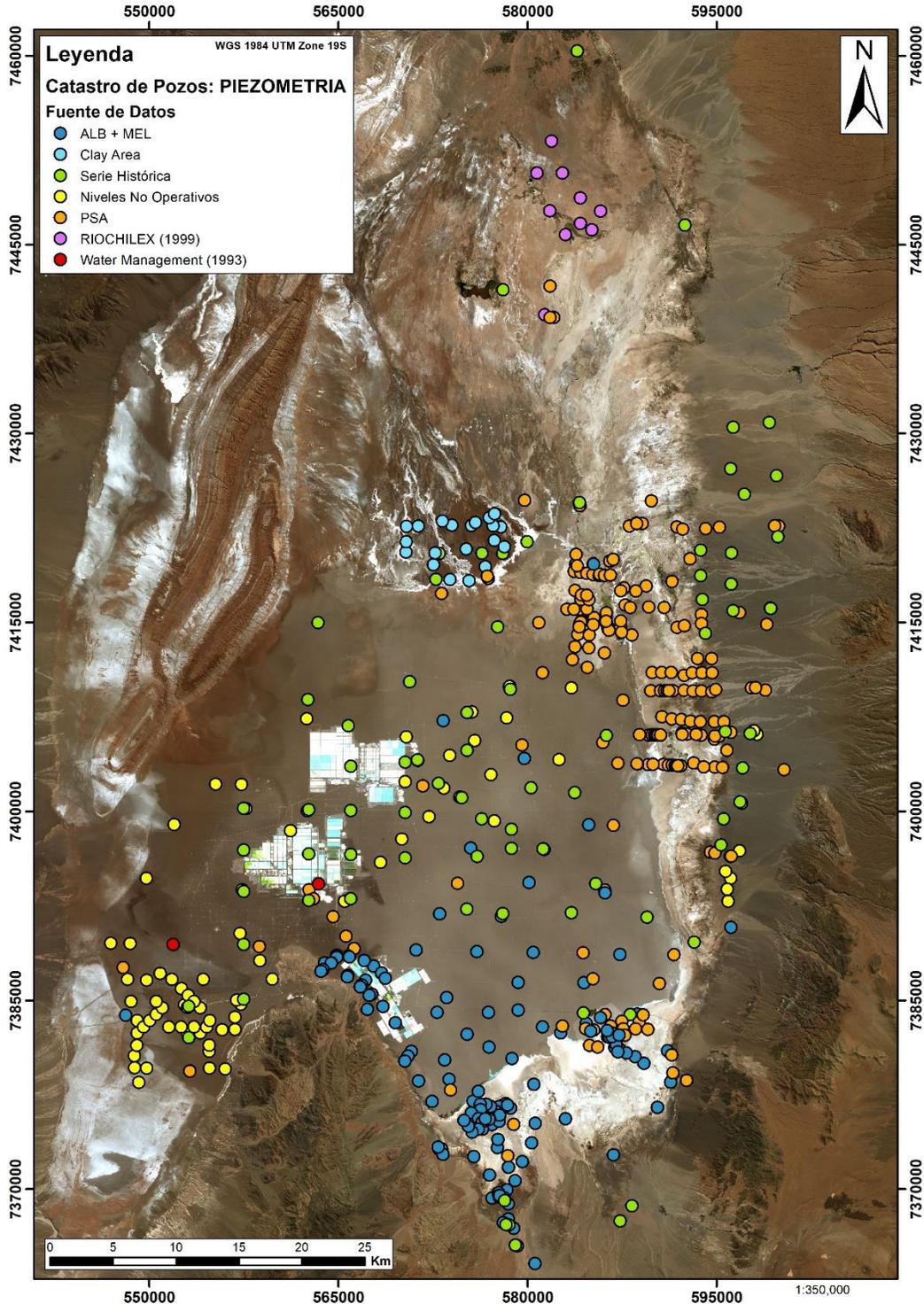


Figura 6-2. Catastro de pozos utilizados para la confección de mapas piezométricos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la fuente de la cual se obtuvo la información de niveles. En el capítulo 6.5.4, y las figuras allí mencionadas, se detalla respecto del uso de estos datos. Fuente: Elaboración propia.

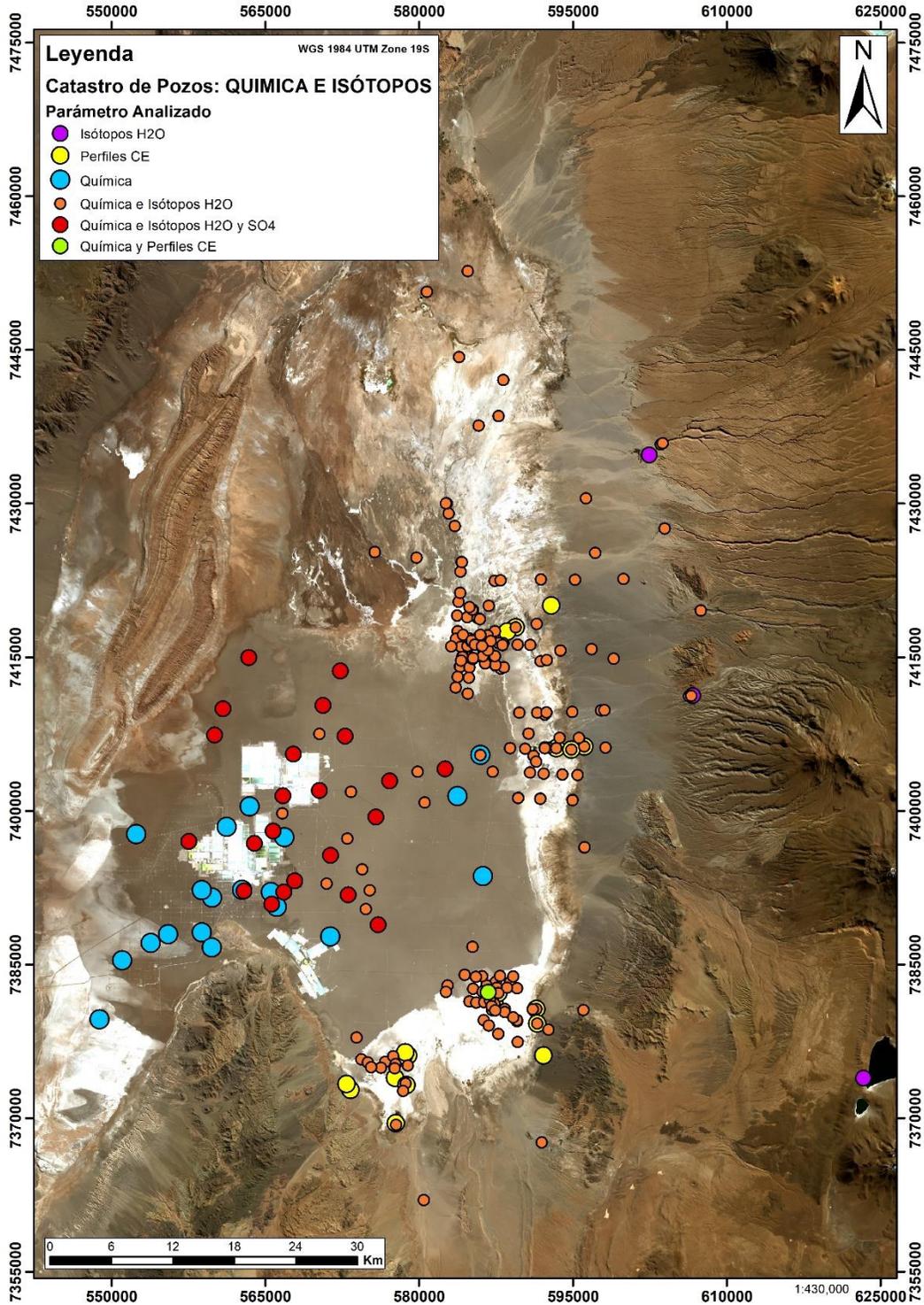


Figura 6-3. Catastro de pozos utilizados para el análisis de química e isótopos. Se indica el parámetro medido en cada uno de estos puntos. Fuente: Elaboración propia.

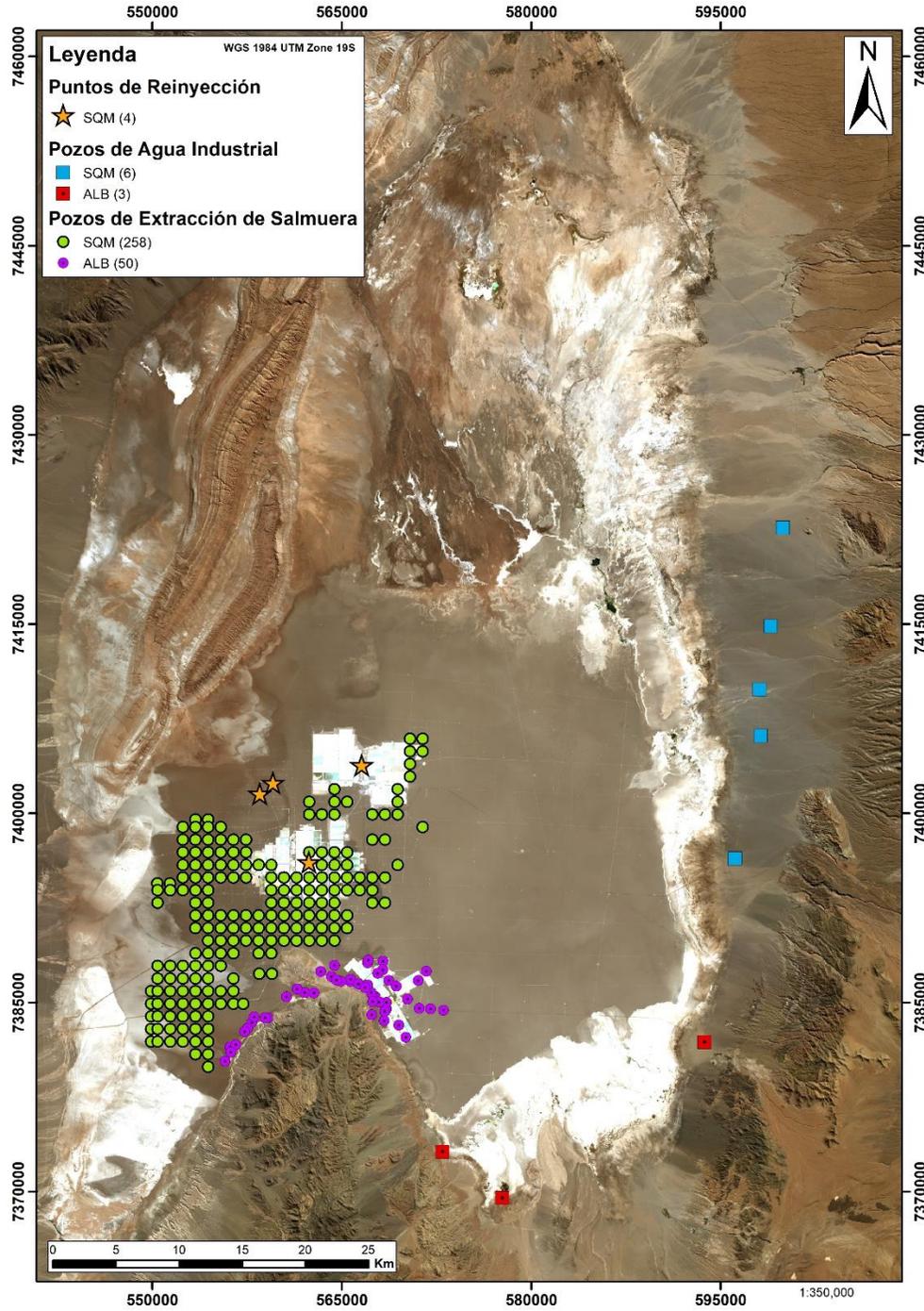


Figura 6-4. Distribución de puntos de extracción, puntos de extracción equivalente y de reinyección para SQM, y puntos de extracción de ABL. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Parámetros Hidráulicos

Los parámetros hidráulicos, permeabilidad (K) y almacenamiento (S), se utilizan para caracterizar el potencial hidráulico de las unidades geológicas y definir sus características hidrogeológicas. Los datos presentados a continuación corresponden a los resultados de ensayos de bombeo y pruebas de packer, los cuales han sido complementados con datos recopilados de antecedentes. La mayor fuente de información corresponde a datos obtenidos de pruebas de bombeo.

Se utilizaron un total de 631 puntos con información de parámetros hidráulicos, donde 631 poseen valores de permeabilidad y 96 de almacenamiento. La Tabla 6-2. detalla la cantidad de información disponible por cada unidad geológica definida anteriormente. En el Anexo MC3 se detalla la ubicación de cada uno de estos puntos, mientras que el detalle de los ensayos hidráulicos utilizados se presenta en el Anexo MC5.

La mayor cantidad de pruebas se han realizado en las unidades definidas dentro del núcleo del Salar, especialmente en la unidad Cloruros Superiores. Por el contrario, las unidades con menor cantidad de ensayos realizados corresponden a la unidad del Delta del río San Pedro, seguida por la unidad Aluvial.

Tabla 6-2. Información hidráulica disponible por unidad geológica. Fuente: Elaboración propia

Unidad Geológica	Zona	Cantidad de Datos		
		Prueba de Bombeo	Packer	Total
Depósitos No Consolidados	Aluvial	18	0	18
Delta del Río San Pedro	Aluvial	7	0	7
Carbonatos Con Limos	Marginal	33	0	33
Sulfatos	Marginal	17	0	17
Sulfato Con Limos	Marginal	4	0	4
Cloruros Inferiores	Núcleo	81	0	81
Evaporitas con Materia Orgánica	Núcleo	0	31	31
Cloruros Superiores	Núcleo	440	0	440
Total		600	31	631

6.2.1 Conductividad Hidráulica (K)

6.2.1.1 Núcleo

Para caracterizar las unidades del núcleo del Salar, se han elaborado tres mapas (uno para cada unidad) que muestran la distribución en planta de la conductividad hidráulica: Cloruros Superiores (Figura 6-5), Evaporitas con Materia Orgánica (Figura 6-6) y Cloruros Inferiores (Figura 6-7). Para la primera, se aprecia una buena distribución de información hidráulica, debido a que esta unidad es la de más fácil acceso. Las otras dos unidades del núcleo que se observan en profundidad están caracterizadas principalmente en el bloque oeste.

De las tres unidades del núcleo, los Cloruros Superiores muestran una mayor variabilidad de los datos, con rangos de conductividad que oscilan entre un mínimo de 5×10^{-3} m/d hasta máximos de 4×10^4 m/d. Los valores más altos se ubican principalmente en el bloque este.

Los Cloruros Inferiores presentan rangos de 2×10^{-3} hasta 1×10^2 m/día, siendo menos permeable que los Cloruros Superiores. Además, muestran una tendencia de aumento de conductividad hidráulica hacia el oeste, siendo en el norte de la península de Chépica, donde se identifican los valores de conductividad hidráulica más bajos para esta unidad. Finalmente, las Evaporitas con Materia Orgánica presentan rangos de permeabilidad menores que las dos unidades mencionadas anteriormente, con rangos que oscilan entre 6×10^{-4} hasta 2×10^0 m/día.

La distribución de los valores de permeabilidad de estas tres unidades puede ser observada en la Figura 6-9, mientras que la Tabla 6-3 resume los valores mencionados.

Tabla 6-3. Parámetros hidráulicos por unidad geológica. Fuente: Elaboración propia.

Unidad Geológica	Conductividad Hidráulica (m/día)		Coeficiente de Almacenamiento	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Depósitos No Consolidados	4.E-01	3.E+02	7.E-03	3.E-01
Delta del Río San Pedro	9.E-05	9.E-05		
Carbonatos Con Limos	5.E-03	2.E+02	2.E-05	5.E-05
Sulfatos	3.E-03	6.E+02	8.E-03	2.E-01
Sulfato Con Limos	9.E+00	2.E+01	6.E-06	6.E-06
Cloruros Inferiores	2.E-03	1.E+02		
Evaporitas con Materia Orgánica	6.E-04	2.E+00		
Cloruros Superiores	5.E-03	4.E+04	4.E-04	6.E-01

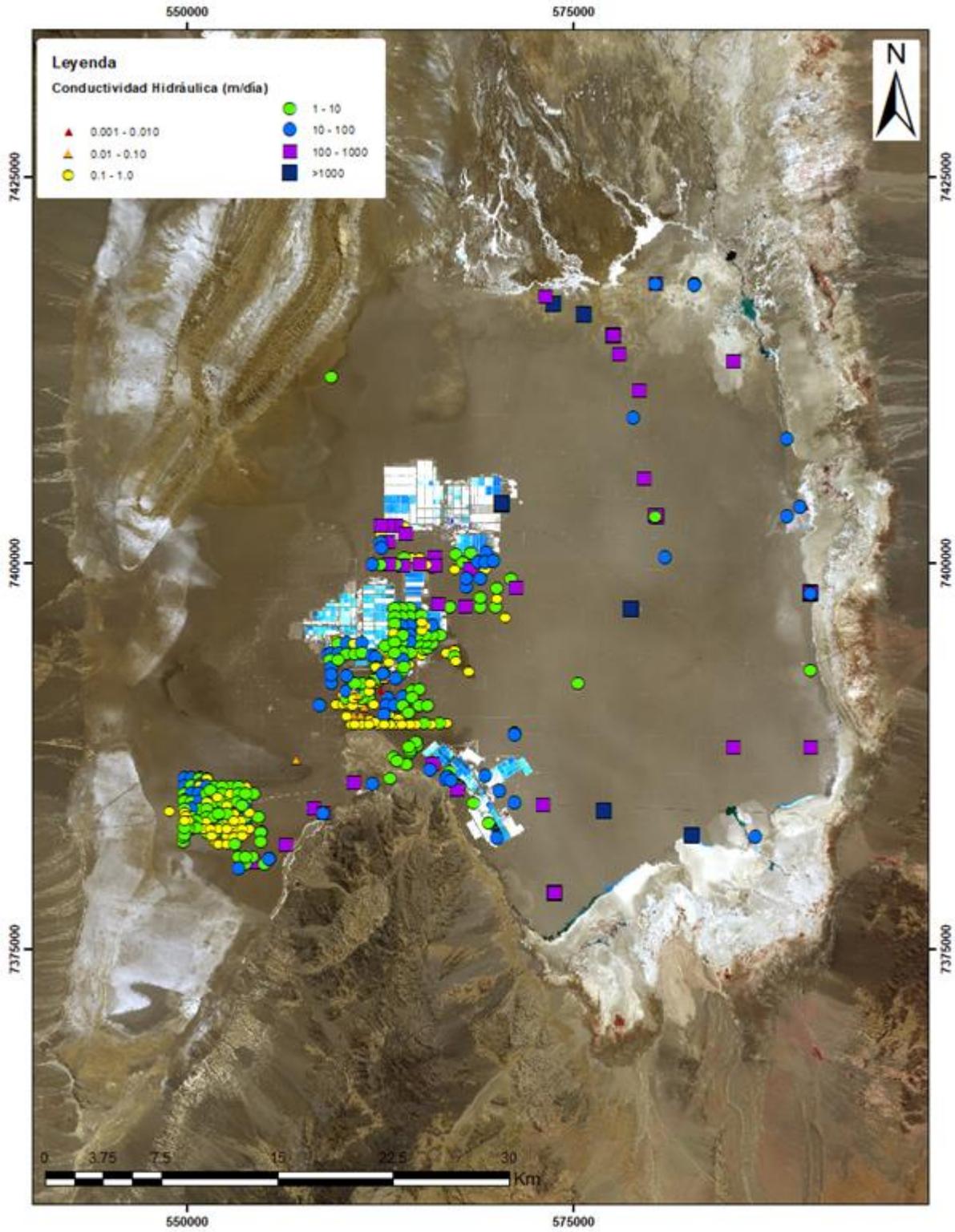


Figura 6-5. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Superiores. Fuente: Elaboración propia.

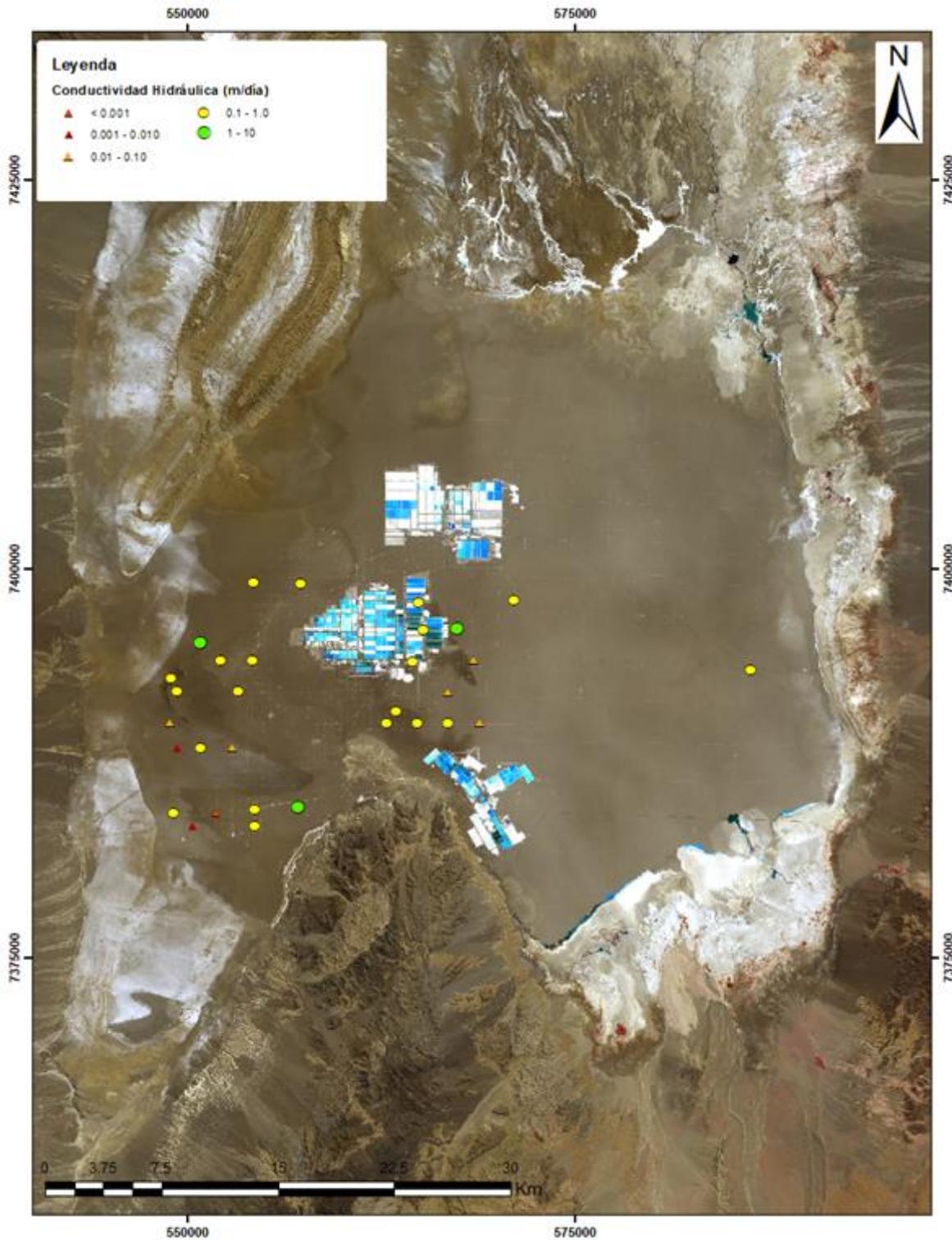


Figura 6-6. Distribución de permeabilidades en unidad Evaporitas con Materia Orgánica. Fuente: Elaboración propia.

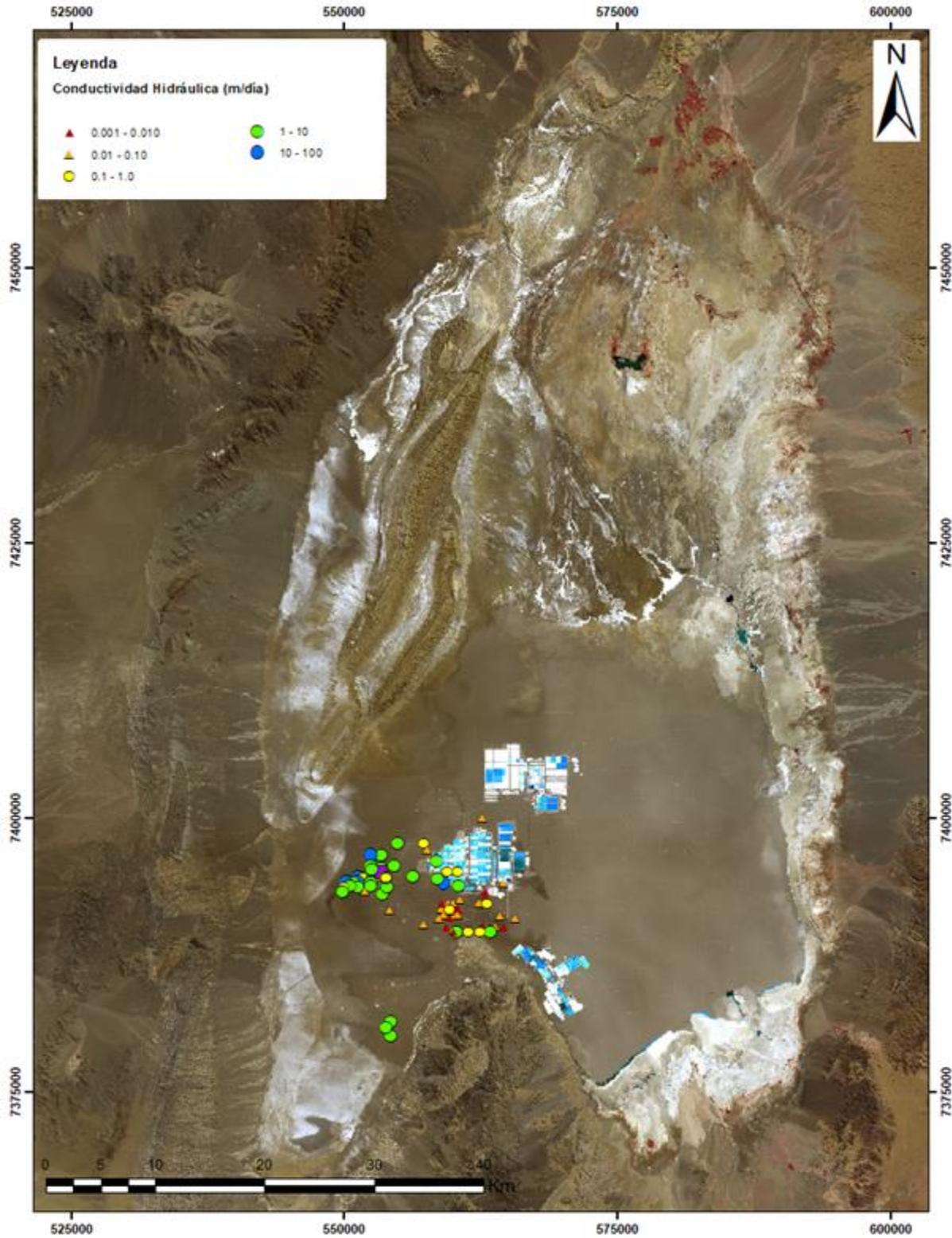


Figura 6-7. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Inferiores. Fuente: Elaboración propia.

6.2.1.1 Zona Marginal y Aluvial

La distribución de conductividad hidráulica en la zona marginal y aluvial se presenta en el mapa de la Figura 6-8. Los datos de este mapa corresponden a las unidades Delta del Río San Pedro, Depósitos No Consolidados y Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos).

Los valores de conductividad hidráulica de la unidad Delta San Pedro sugieren que esta unidad es la menos permeable, con valores del orden de 9×10^{-5} m/día. Estos valores son consistentes con todas las pruebas hidráulicas realizadas, y con las facies detríticas de limos y arcillas observadas en esta unidad.

La unidad de Depósitos No Consolidados posee los mayores valores de conductividad hidráulica fuera de la zona del núcleo, de entre 0.4 y 300 m/día (Tabla 6-3). En planta, la distribución de la conductividad hidráulica es relativamente homogénea, aunque en la zona aluvial sur se observan los valores relativamente menores. Geológicamente, esta unidad presenta sedimentos clásticos grano-decrecientes hacia el núcleo. Esto es consistente con una disminución de la conductividad hidráulica en los Depósito No Consolidados en sectores cercanos a la zona marginal.

Finalmente, la unidad Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos) presenta rangos de conductividad hidráulica amplios, que oscilan entre los 3×10^{-3} hasta los 6×10^2 m/día. En esta unidad se observa una variación de conductividad, observando valores más altos cercanos al núcleo, disminuyendo hacia la zona aluvial, comportándose como una zona de baja permeabilidad en el sector entre el núcleo y la zona marginal. Ese comportamiento ha sido descrito anteriormente por Hydrotechnica (1988; Figura 6-10). La distribución de los valores de permeabilidad puede ser observada en la Figura 6-9, mientras que la Tabla 6-3 resume los valores mencionados.

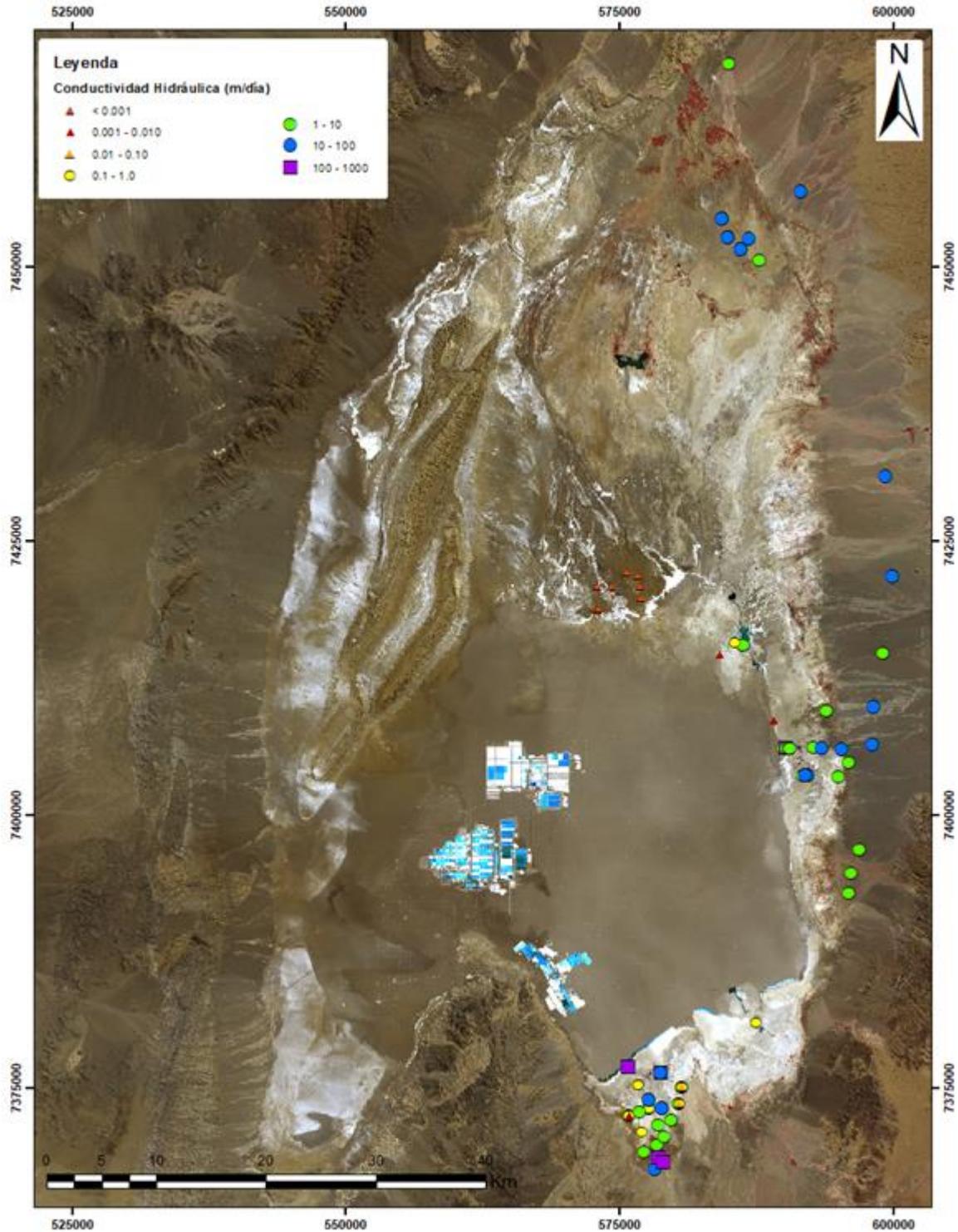


Figura 6-8. Distribución de permeabilidades en unidades Depósitos No Consolidados, Delta del Río San Pedro y Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfato, Sulfato con limos y Carbonato con limos). Fuente: Elaboración propia.

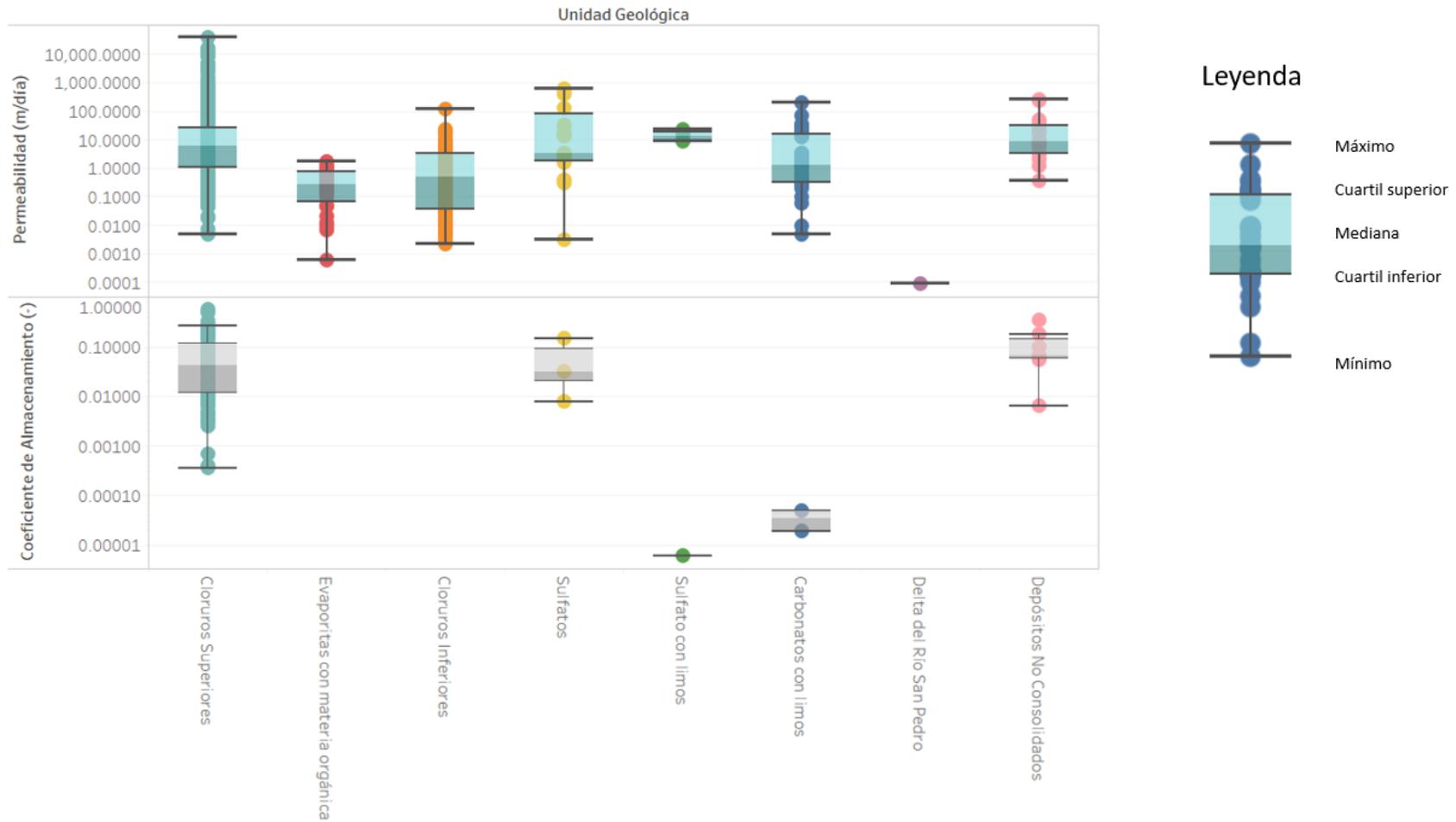


Figura 6-9. Box Plot de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades geológicas. Fuente: Elaboración propia.

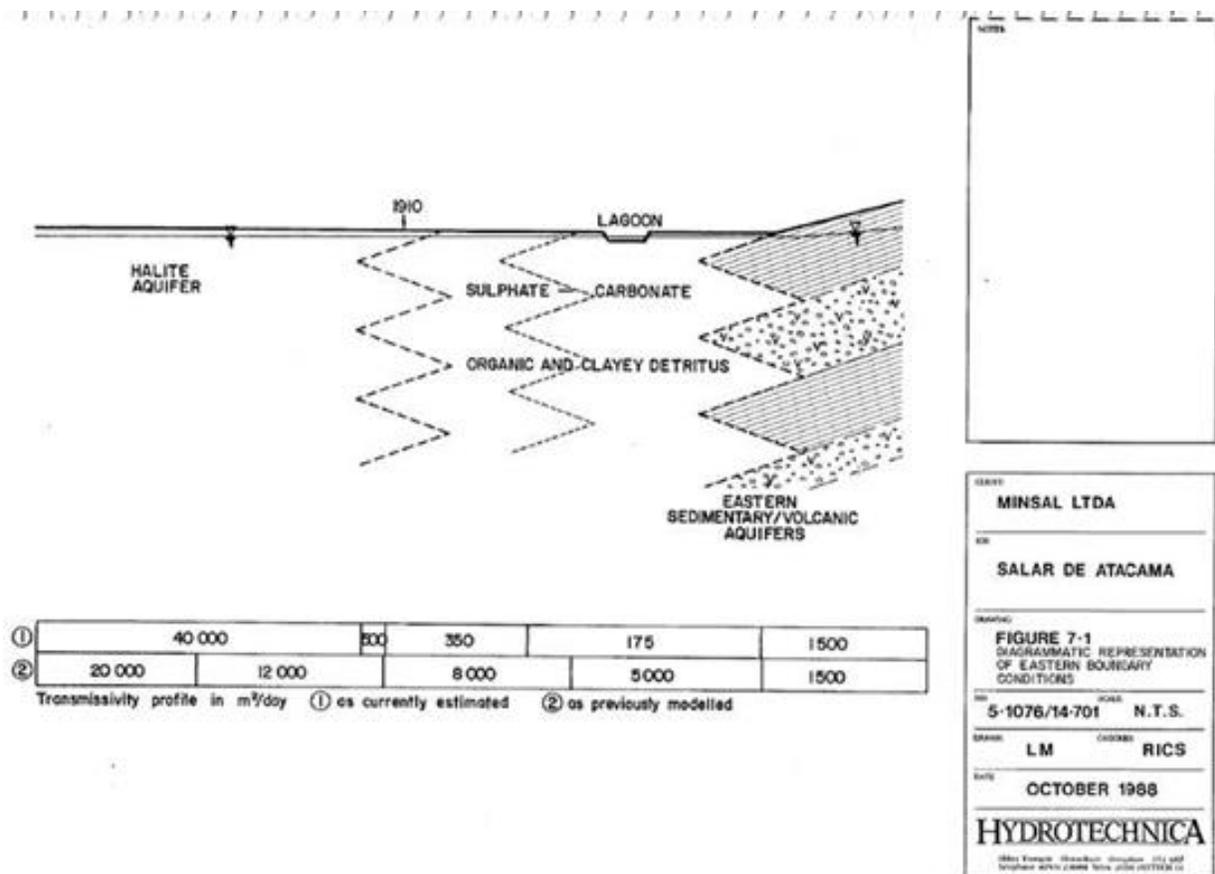


Figura 6-10. Sección esquemática oeste-este que representa la variación de transmisividad desde el núcleo hasta la zona aluvial. Los valores son consistentes con lo observado en la actualidad. Fuente: Hydrotechnica (1988).

6.2.2 Almacenamiento (S)

Para este parámetro se cuenta con información directa para las unidades Depósitos No Consolidados, Depósitos Cuaternarios Evaporíticos, facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos y Cloruros (Superiores). La Figura 6-11 muestra la distribución del coeficiente de almacenamiento para todas las unidades con datos disponibles.

La unidad Depósitos No Consolidados posee rangos de almacenamiento del orden de 6×10^{-3} hasta 3×10^{-1} . La unidad Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos), cuenta con información en el norte y sur del núcleo, y presenta valores de almacenamiento dentro de un amplio rango, que va desde los 6×10^{-6} hasta los 1.5×10^{-1} . Finalmente, la unidad Cloruros Superiores presenta valores mínimos de 4×10^{-4} hasta máximos de 6×10^{-1} , estando estos últimos valores posiblemente asociados a la presencia de cavernas en halitas.

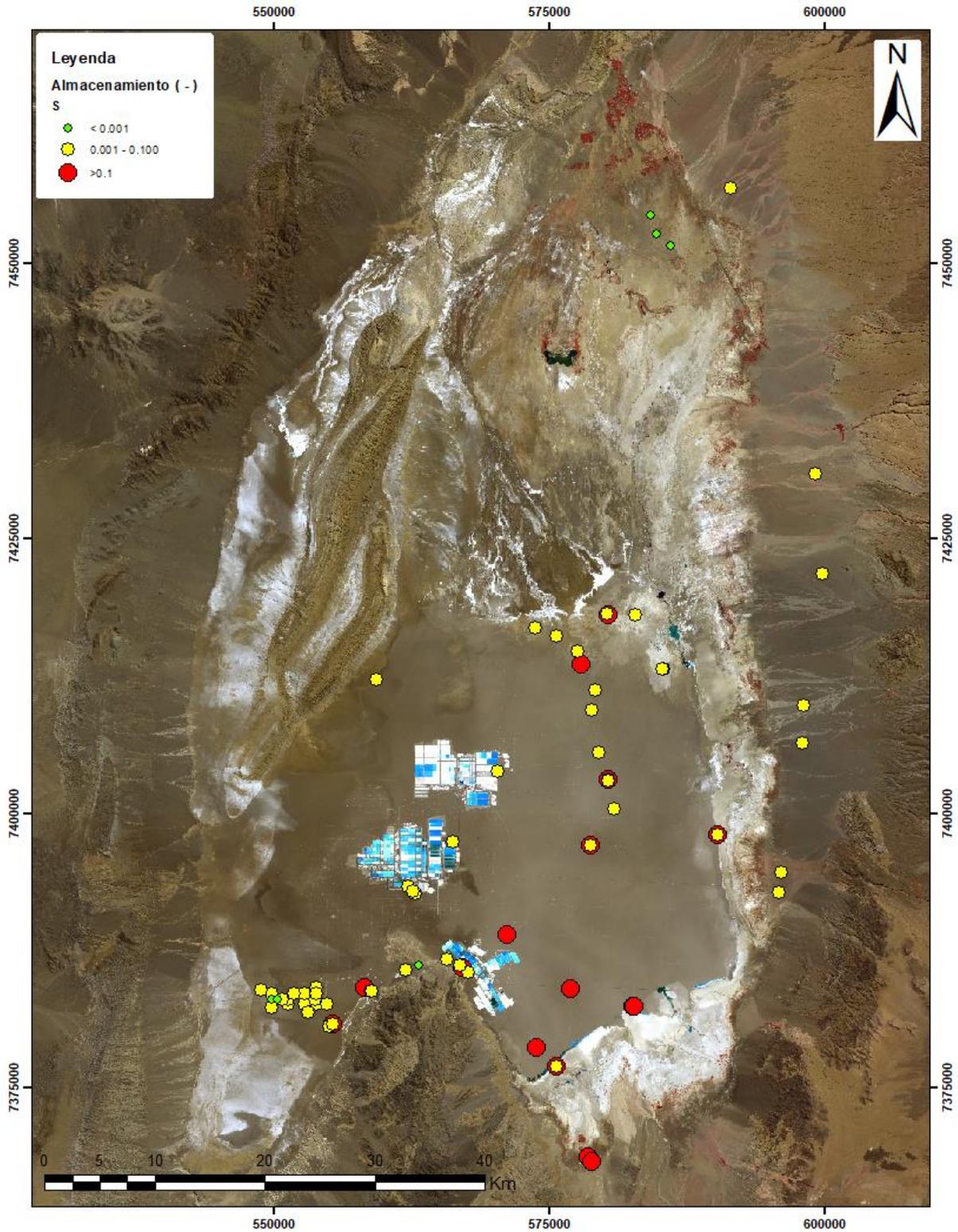


Figura 6-11. Distribución de coeficiente de almacenamiento.

6.3 Unidades Hidrogeológicas

Complementando la definición de las unidades geológicas definidas con los parámetros hidráulicos obtenidos para cada unidad, se han definido las unidades hidrogeológicas (UH) de la zona de estudio². Esto se realiza agrupando aquellas unidades geológicas que se encuentren en contacto y que posean un rango similar de parámetros hidráulicos (K y S). Así, para el Salar de Atacama se han definido 7 unidades hidrogeológicas (UH) mayores, de las cuales una de ellas se ha subdividido en dos (Unidad Hidrogeológica Aluvial Superior de Alto y de Medio potencial).

La distribución en planta de las UH que se observan en superficie se muestra en la Figura 6-12. Además, en la

Figura 6-13 y la Figura 6-14 se muestra la disposición de estas unidades en profundidad, mientras que la Figura 6-15 muestra los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de la interpretación de pruebas hidráulicas. Finalmente, la Tabla 6-4 muestra un resumen de cada UH con sus rangos estimados de K y S.

En general, el funcionamiento hidrogeológico del núcleo del Salar de Atacama está fuertemente condicionado por la presencia de los sistemas de fallas Salar y Caballo, las que alzan el bloque oeste respecto del bloque este, generando un gran depocentro en este último. Esto explica la gran potencia de evaporitas observada en el bloque este comparado con el oeste, que impacta directamente en el volumen de salmuera almacenada en el Salar de Atacama. Las unidades hidrogeológicas definidas se describen a continuación:

- **Unidad Hidrogeológica Núcleo Superior**

Corresponde a la unidad más somera ubicada en el núcleo del Salar de Atacama, y está compuesta principalmente por la unidad geológica Cloruros (halita porosa, pura o con sedimentos) del núcleo. Se extiende lateralmente en todo el núcleo del Salar, con una potencia que fluctúa entre 15 y 45 m, siendo mayor al este de la Falla Salar (

Figura 6-13). Por información de pruebas hidráulicas se le ha asignado un amplio rango de K entre 0,1 y 5.000 m/día, y un rango de almacenamiento (S) entre 1 y 15%; sin embargo, la presencia de cavernas en algunas zonas de esta unidad podría aumentar abruptamente el almacenamiento de manera local, a la vez que las zonas con valores menores a 5% están restringidas a los tramos basales de los Cloruros Superiores. Esta unidad se comporta como un acuífero libre.

Su techo está en superficie, y su base está limitada por la UH Núcleo Intermedio. Lateralmente se encuentra en contacto con la UH Zona Marginal en su margen este, sureste y norte, mientras que por el oeste y por el sur se encuentra en contacto tanto con el Basamento Hidrogeológico y en parte con la UH Aluvial Superior. En el extremo noreste, en tanto, incluye un tramo identificado en el mapa de la Figura 6-12 como zona de desbordes (Núcleo Superior Desbordes). Dicho sector, cuyo comportamiento hidrogeológico es consistente con la UH Núcleo Superior, representa la influencia de los desbordes generados por las lagunas adyacentes lo cual tiene implicancias geológicas (variaciones locales, someras, en la composición mineralógica) e hidroquímicas (variación de niveles y química según la ocurrencia o

² Unidad Hidrogeológica: Cualquier unidad de roca o suelo, o zona en general, que por sus propiedades hidráulicas generan una influencia distintiva en el almacenamiento y/o movimiento del agua subterránea. Fuente: traducido de USGS (https://or.water.usgs.gov/projs_dir/willgw/glossary.html).

no de los desbordes). Respecto de esto se ahondará en los siguientes capítulos del presente informe.

- **Unidad Hidrogeológica Núcleo Intermedio**

Corresponde a una unidad intermedia del núcleo del Salar de Atacama, compuesta por la unidad geológica Evaporitas con materia orgánica (halitas y yesos con materia orgánica). Se extiende en todo el núcleo, y tiene una potencia estimada entre 0,2 m al oeste de la Falla Caballo, gradando a 15-20 m en el bloque este, y aumentando hasta 100-150 m en la zona cercana a la zona marginal de todo el Salar. Al igual que la UH Núcleo Superior, se extiende lateralmente en todo el núcleo. Con base en pruebas hidráulicas se le ha asignado un rango de K entre 0,01 y 1 m/día. Para el S, al no contar con pruebas hidráulicas, se le ha asignado, con base en valores de literatura (ver capítulo 3.4), un rango entre 0,1 y 10%. Se comporta prácticamente como un acuitardo, confinando parcial a totalmente a la UH Núcleo Profundo.

Su techo corresponde a la UH Núcleo Superior, mientras que su base corresponde a la UH Núcleo Profundo. Análogo a la UH Núcleo Superior, lateralmente se encuentra en contacto con la UH Zona Marginal (bordes E, SE y N), y con el Basamento Hidrogeológico y UH Aluvial Superior (bordes oeste y sur).

- **Unidad Hidrogeológica Núcleo Profundo**

Corresponde a la unidad hidrogeológica más profunda del presente modelo del núcleo del Salar de Atacama, compuesta por la unidad geológica de Cloruros inferiores (halitas muy poco porosas). Se extiende en todo el núcleo, y tiene una potencia estimada entre 20 m en el bloque oeste y 300 m en el bloque este del núcleo. Con base en pruebas hidráulicas se le ha asignado un rango de K entre 0,01 y 50 m/día, y un rango de S entre 1×10^{-5} y 1×10^{-3} .

Su techo corresponde a la UH Núcleo intermedio, mientras que su base corresponde al Basamento Hidrogeológico; particularmente, en su base ha sido identificada una unidad de tobas y tufitas que son reconocibles prácticamente en todo el sector del núcleo, en la zona marginal, y en los depósitos aluviales, y que se correlaciona con la unidad geológica Depósitos ignimbríticos del Mioceno al presente.

Análogo a las otras UH del núcleo, lateralmente engrana con la UH Zona Marginal (bordes este, sureste y norte), y con el Basamento Hidrogeológico y UH Aluvial superior (bordes oeste y sur; relación esquemática en Figura 6-10 y en secciones de unidades hidrogeológicas del presente informe, por ejemplo

Figura 6-13 y Figura 6-14).

Considerando el almacenamiento calculado, la relación geológica e hidrogeológica con el entorno y el análisis de los gráficos diagnóstico de las pruebas de bombeo realizadas en esta unidad, se infiere que está unidad se comporta hidráulicamente como acuífero confinado.

- **Unidad Hidrogeológica Zona Marginal**

Corresponde a la unidad hidrogeológica que engloba la mayor parte de los depósitos evaporíticos localizados en la zona marginal del Salar de Atacama (unidades geológicas Sulfatos y Carbonatos que se observan en los bordes norte, este, y sureste del Salar), intercalados con depósitos sedimentarios detríticos de grano fino (arcillas y limos) y materia orgánica, dispuestos en su mayoría en capas de poco

espesor y/o lenticulares. Su extensión lateral es acotada en el borde este (sector Quelana), entre 4 y 7 km, más ancha en el borde sureste (sectores Peine y Tilopozo), entre 4 y 9 km de ancho, mientras que en el borde norte del Salar tiene una extensión mucho mayor, alcanzando en planta de más de 10 km.

Lateralmente está engranando completamente con las UH del núcleo, por lo que su base corresponde al Basamento Hidrogeológico. Su techo corresponde a la actual superficie. Se ha estimado un espesor mínimo de 100 m, llegando a los 200 m en el borde este y algunas zonas del borde norte. Por información de pruebas hidráulicas complementadas con datos de literatura se le ha asignado un rango de K entre 1×10^{-3} y 5 m/día, y un rango de S entre 1×10^{-5} y 0,1; este rango de almacenamiento se explica por la gran cantidad de intercalaciones de sedimentos finos, resultando en el confinamiento parcial de esta unidad.

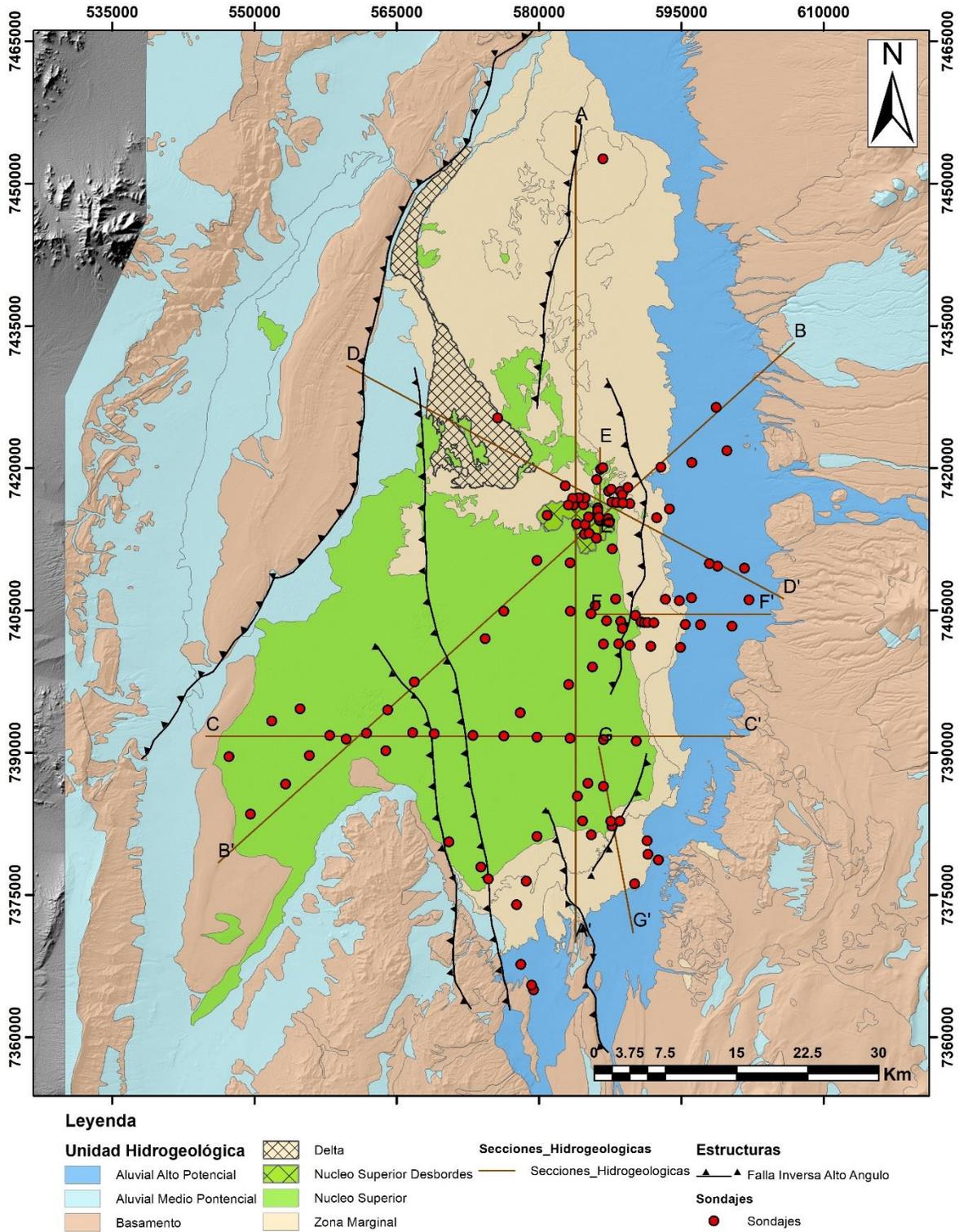


Figura 6-12. Mapa de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

- **Unidad Hidrogeológica Aluvial**

Corresponde a la unidad hidrogeológica que alberga el agua dulce en las zonas aluviales. Está compuesta por facies detríticas (unidad geológica Depósitos no consolidados) dispuestas en forma granodecreciente desde los bordes del área de estudio hacia el Salar de Atacama, desde gravas hasta arenas finas y limos. Se extiende prácticamente en todos los bordes del Salar de Atacama, con una potencia estimada desde 25 hasta 300 m.

En el borde oriental del Salar es donde se tiene más información sobre esta unidad, definiéndose allí como de “alto potencial”. En contraste, en el borde occidental, debido a la falta de información hidráulica y de niveles, se le ha asignado un “medio potencial”. Lateralmente engrana con la UH Zona Marginal, mientras que su techo y base corresponde a la actual superficie y al Basamento Hidrogeológico, respectivamente.

En esta unidad se observa el nivel de tobas y tufitas de la base de la UH Núcleo Profundo, atravesándola completamente. Debido a esto, se podría subdividir en una porción superior y otra inferior inferior en los sectores donde ello ocurre. Se estima que este nivel tobáceo produciría un confinamiento total a parcial en la porción inferior de la UH Aluvial.

Por información de pruebas hidráulicas complementadas con datos de literatura se le ha asignado un rango de K entre 1 y 100 m/día, y un rango de S entre 1 y 25%. Cabe destacar que a medida que la unidad se acerca a la zona marginal, su K tiende a disminuir.

- **Delta San Pedro**

Corresponde a la unidad hidrogeológica conformada por los depósitos de delta del Río San Pedro, en el borde norte del núcleo del Salar de Atacama. Está compuesto de sedimentos finos (limos y arcillas) en profundidad, con una potencia mínima de 100 m. Su base son las UH Núcleo Intermedio y UH Núcleo Profundo, y su techo es la actual superficie. Lateralmente engrana con la UH Aluvial en el borde noroeste, y con la UH Zona Marginal por el sur y por el norte. Pruebas hidráulicas indican una K de 1×10^{-4} m/día, siendo una unidad muy poco transmisiva. Según datos de literatura, se le ha asignado un rango de S entre 1×10^{-4} y 1×10^{-2} .

- **Basamento Hidrogeológico**

En el presente modelo conceptual, el Basamento Hidrogeológico comprende todas las unidades geológicas localizadas bajo la unidad geológica Depósitos ignimbríticos del Mioceno al presente. En el bloque oeste del núcleo, esta unidad se observa a los 60-80 m de profundidad, mientras que en el bloque este se observa entre 100 y 400 m de profundidad. Esta profundidad disminuye progresivamente desde la zona marginal (200m) hacia los depósitos no consolidados aluviales.

Si bien bajo esta capa de ignimbritas se han reconocido algunas facies evaporíticas (especialmente en el bloque este), no se consideran relevantes para explicar el funcionamiento hidrogeológico del sistema ya que los antecedentes disponibles no indican una conexión con los niveles superiores.

La geometría de cada una de las unidades hidrogeológicas descritas ha sido representada en un modelo 3D hidrogeológico (utilizando el software Leapfrog Geo). Este modelo comprende gran parte de los sondeos que SQM ha perforado en la zona de estudio, además de información geofísica levantada en la cuenca. Este modelo 3D se ha utilizado como base para el modelo numérico regional realizado en la cuenca del Salar de Atacama.

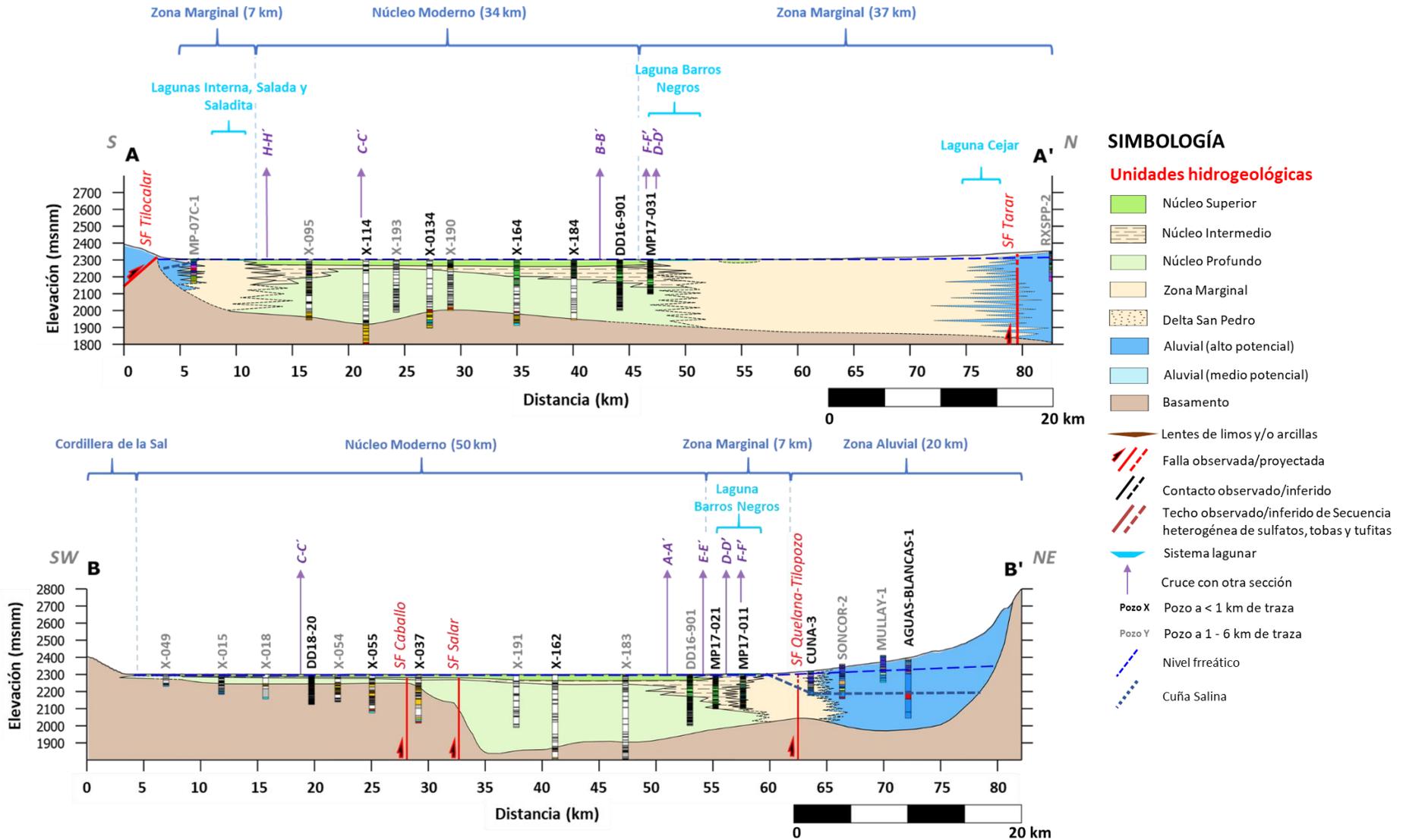


Figura 6-13. Secciones hidrogeológicas regionales A-A' y B-B'. Trazas de las secciones en Figura 6-12. Fuente: Elaboración propia

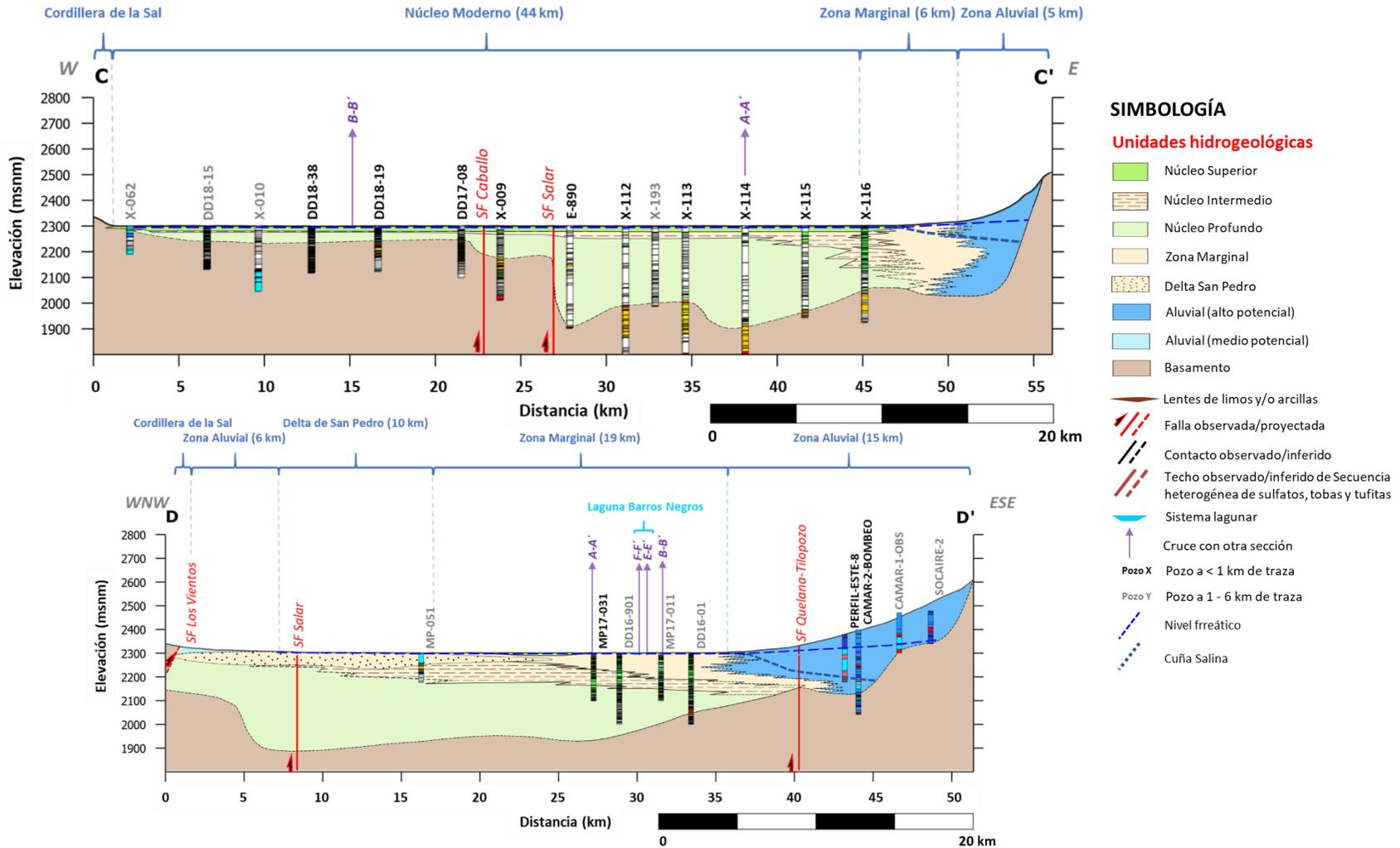


Figura 6-14. Secciones hidrogeológicas regionales C-C' y D-D'. Trazas de las secciones en Figura 6-12. Fuente: Elaboración propia

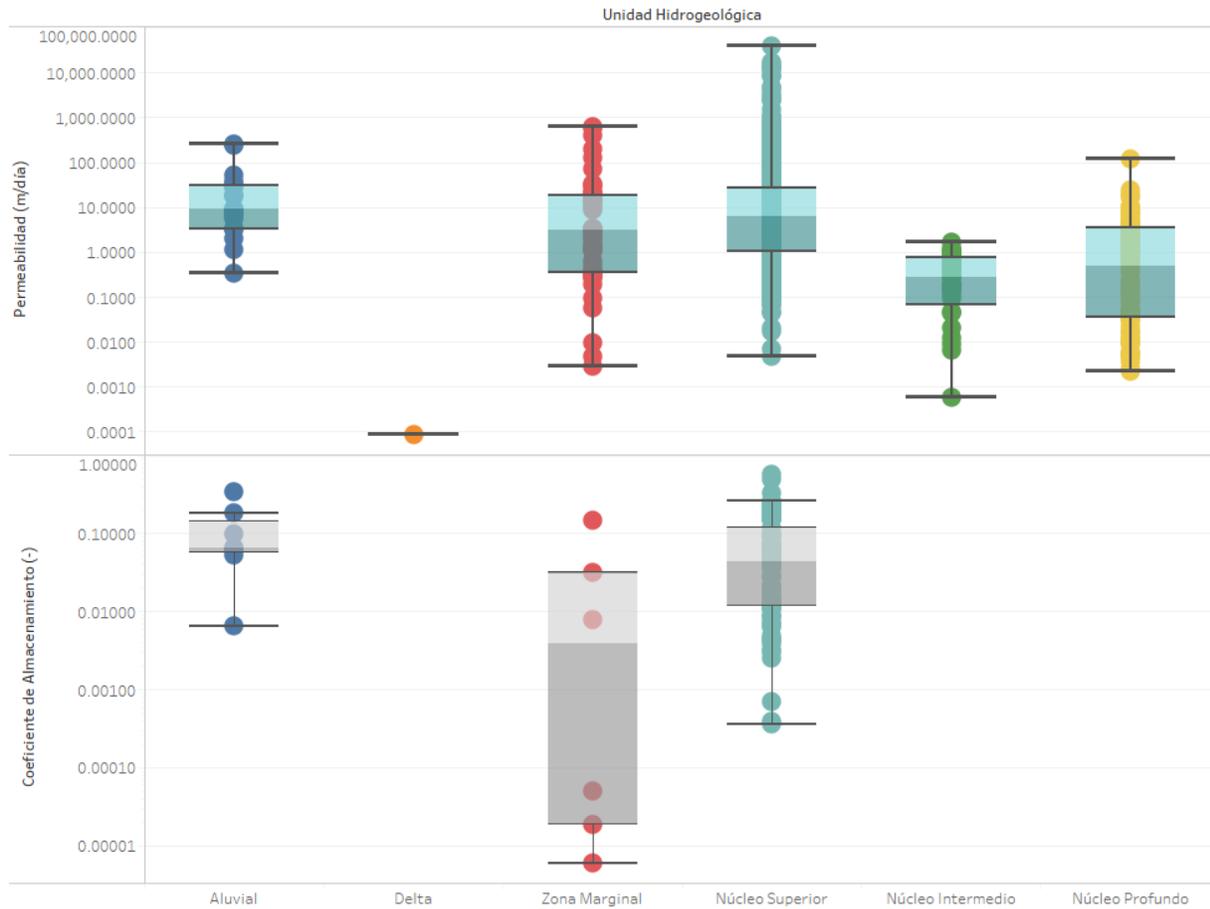


Figura 6-15. Diagrama de Caja y Bigotes de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades hidrogeológicas. Datos obtenidos a partir de mediciones de SQM. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-4. Parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica. Se incluyen datos de SQM y antecedentes de terceros. Fuente: Elaboración propia.

Unidad Hidrogeológica	Unidad Geológica Asociada	Conductividad Hidráulica (m/día)		Coeficiente de Almacenamiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Aluvial	Depósitos No Consolidados	1.E+00	1.E+02	1E.-02	2,5E+01
Núcleo Profundo	Cloruros Inferiores	1.E-02	5.E+01	1.E-05	1.E-03
Núcleo Intermedio	Evaporitas con Materia Orgánica	1.E-02	1.E+00	1.E-03	1.E-01
Núcleo Superior	Cloruros Superiores	1.E-01	5.E+03	1.E-02	1,5E-1
Delta San Pedro	Delta San Pedro	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-02
Zona Marginal	Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos	1.E-03	5.E+00	1.E-05	1.E-01

6.4 Interfaz Salina

Uno de los elementos clave para entender el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Atacama es la presencia de una cuña o interfaz salina en todos los márgenes del Salar (Figura 6-16). Esta interfaz se forma por el contraste de densidad del agua dulce, que fluye hacia el núcleo del Salar, con la salmuera que se encuentra almacenada en las unidades hidrogeológicas del núcleo. Cuando ambos fluidos entran en contacto, el agua dulce, al ser menos densa ($\sim 1.025 \text{ g/cm}^3$), tiende a posicionarse por sobre la salmuera, que posee una densidad mucho mayor ($\sim 1.23 \text{ g/cm}^3$). La zona de contacto entre ambos fluidos es la que se denomina cuña o interfaz salina (Figura 6-16).

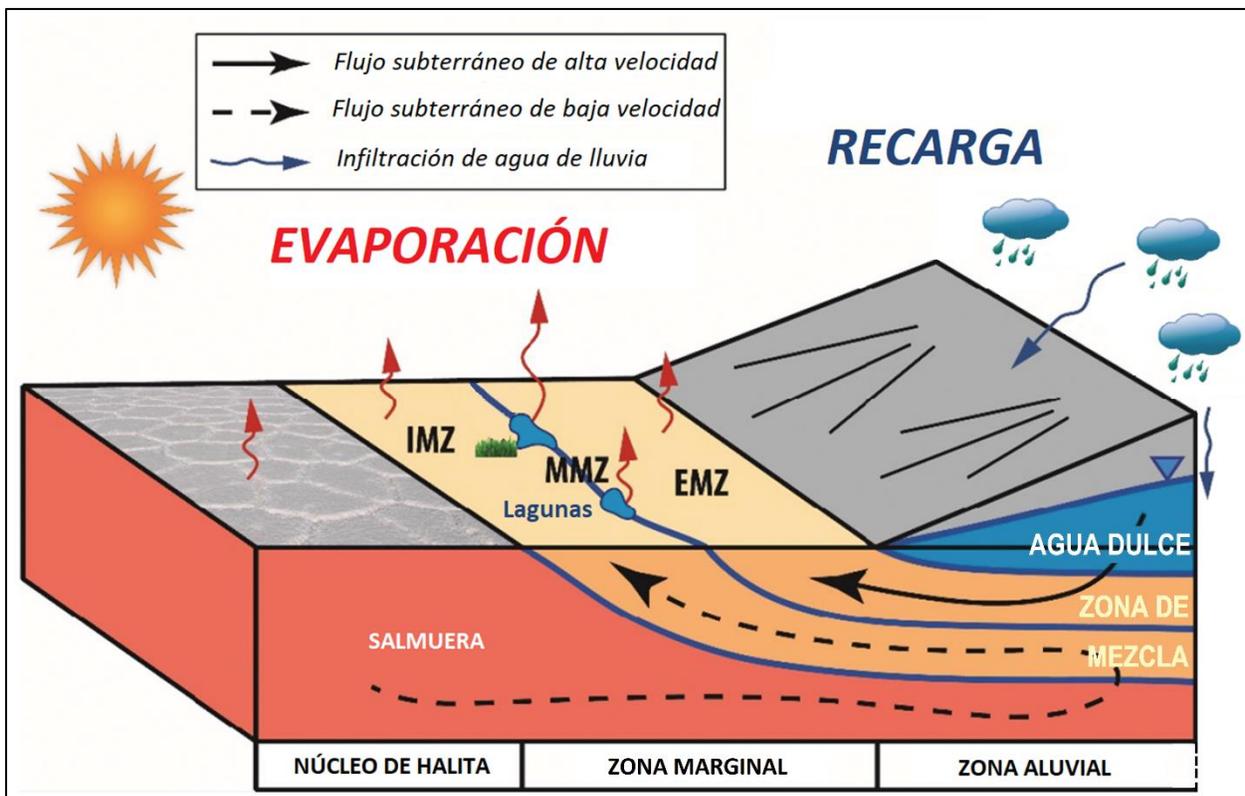


Figura 6-16. Esquema de la zona de interacción salmuera-agua en el Salar de Atacama. Fuente: Modificado de Marazuela et al. (2019).

En la zona de estudio se cuenta con numerosa información química, isotópica y geofísica para determinar la profundidad observada de la interfaz salina. Además, SQM realiza semestralmente (a partir del año 2009) perfilajes de conductividad eléctrica en pozos localizados (en planta) tanto en la UH Zona Marginal como en la UH Aluvial, con el fin de determinar la variabilidad de la profundidad en que se encuentra el quiebre entre el agua dulce y la salmuera. En la Tabla 6-5. y la Figura 6-17 se muestra la distribución de pozos en los cuales se tiene información de perfilajes. En el Anexo MC9 se presenta el análisis y monitoreo de la posición de esta interfaz en el tiempo.

Como resultado del análisis de los datos de SQM, se ha inferido que la posición de la interfaz durante el periodo monitoreado no ha experimentado variaciones significativas. Esto es consistente con los resultados obtenidos por los distintos autores que han analizado la variabilidad de la posición de la interfaz salina (Albemarle, 2019) y (Escondida B. , 2019).

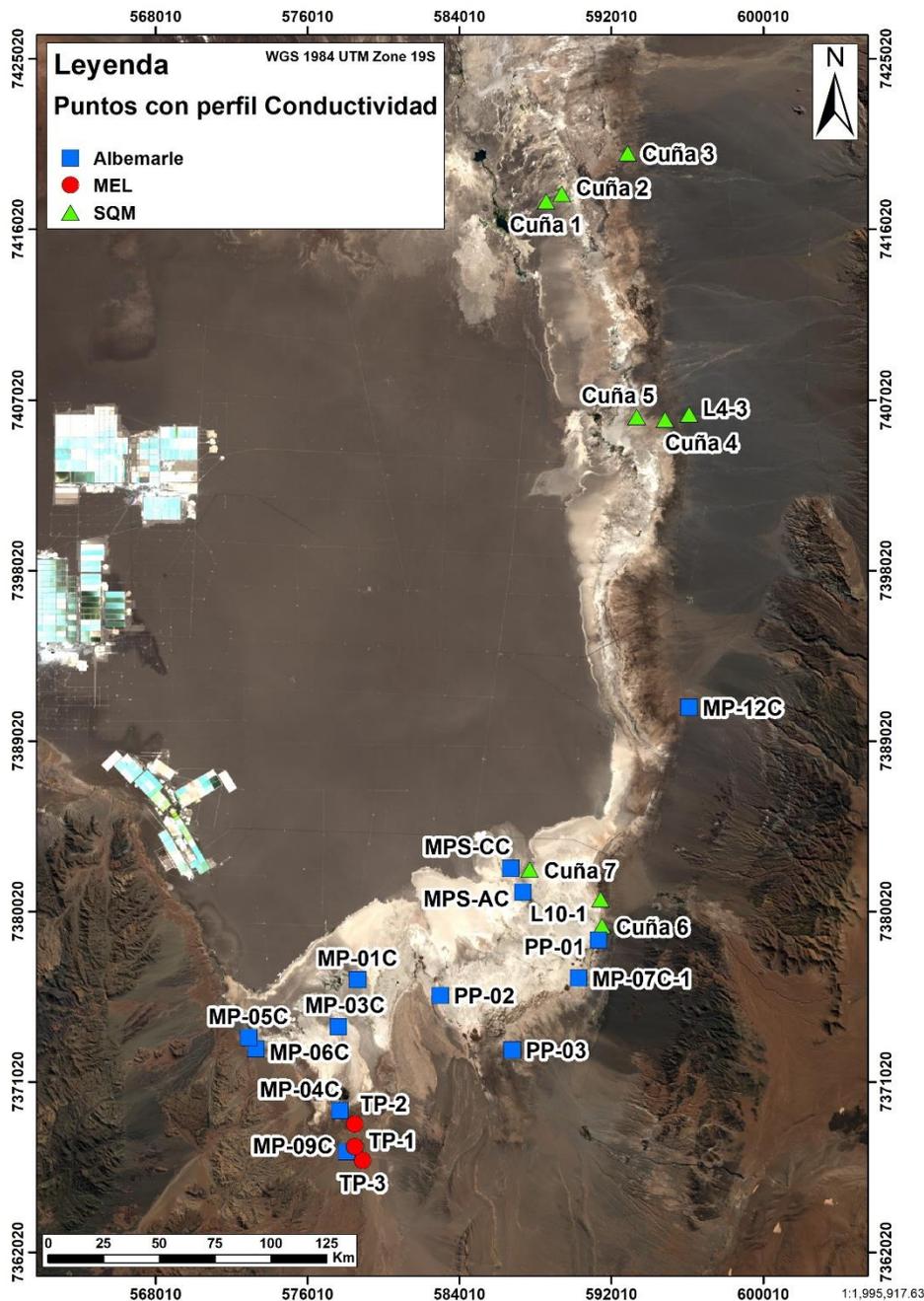


Figura 6-17. Ubicación de puntos con perfilaje de conductividad eléctrica por SQM, (Albemarle, 2019) y (Escondida B. , 2019). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-5. Propietarios y características de los puntos con perfil de conductividad. Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Propietario	Profundidad (m)	Tramo Ranurado (m)
Cuña 1	SQM	22,39	0 - 20
Cuña 2	SQM	24,87	0 - 24
Cuña 3	SQM	138,5	100 - 138
Cuña 4	SQM	84,8	65 - 84
Cuña 5	SQM	38,2	0 - 24
Cuña 6	SQM	124	42 - 122
Cuña 7	SQM	43,5	6-40
L10-1	SQM	201	74 - 160
L4-3	SQM	140	sin info
MPS-CC	Albemarle	43,3	Completo
MPS-AC	Albemarle	40	Completo
MP-06C	Albemarle	81,5	Completo
MP-05C	Albemarle	80	Completo
MP-04C	Albemarle	120,7	Completo
MP-03C	Albemarle	30,3	Completo
MP-01C	Albemarle	30,6	Completo
MP-09C	Albemarle	100	Completo
MP-07C-1	Albemarle	140	Completo
PP-01	Albemarle	100	Completo
PP-02	Albemarle	80	Completo
PP-03	Albemarle	120	Completo
MP-12C	Albemarle	100	Completo
TP-3	MEL	118	sin info
TP-2	MEL	80	sin info
TP-1	MEL	98	sin info

6.4.1 Reconocimiento de interfaz salina en pozos

En el límite oeste del sector aluvial, SQM cuenta con piezómetros profundos que interceptan la interfaz salina, que corresponde a la zona de mezcla entre las aguas de recarga y las salmueras del núcleo. Estos puntos presentan características químicas e isotópicas variables en función de la profundidad a la que hayan sido perforados y habilitados. Un ejemplo de estos puntos puede verse en la Figura 6-18, los cuales corresponden a una plataforma multipiezómetro perforada en 2017. Puede verse los 4 piezómetros que componen la plataforma, habilitados en las profundidades 0-15 m, 35-45m, 70-85 m y 190-200 m. Se observa también que los perfiles de conductividad una vez realizado el purgado de los piezómetros, presentan homogeneidad, evidenciando que la muestra proviene de los tramos habilitados.

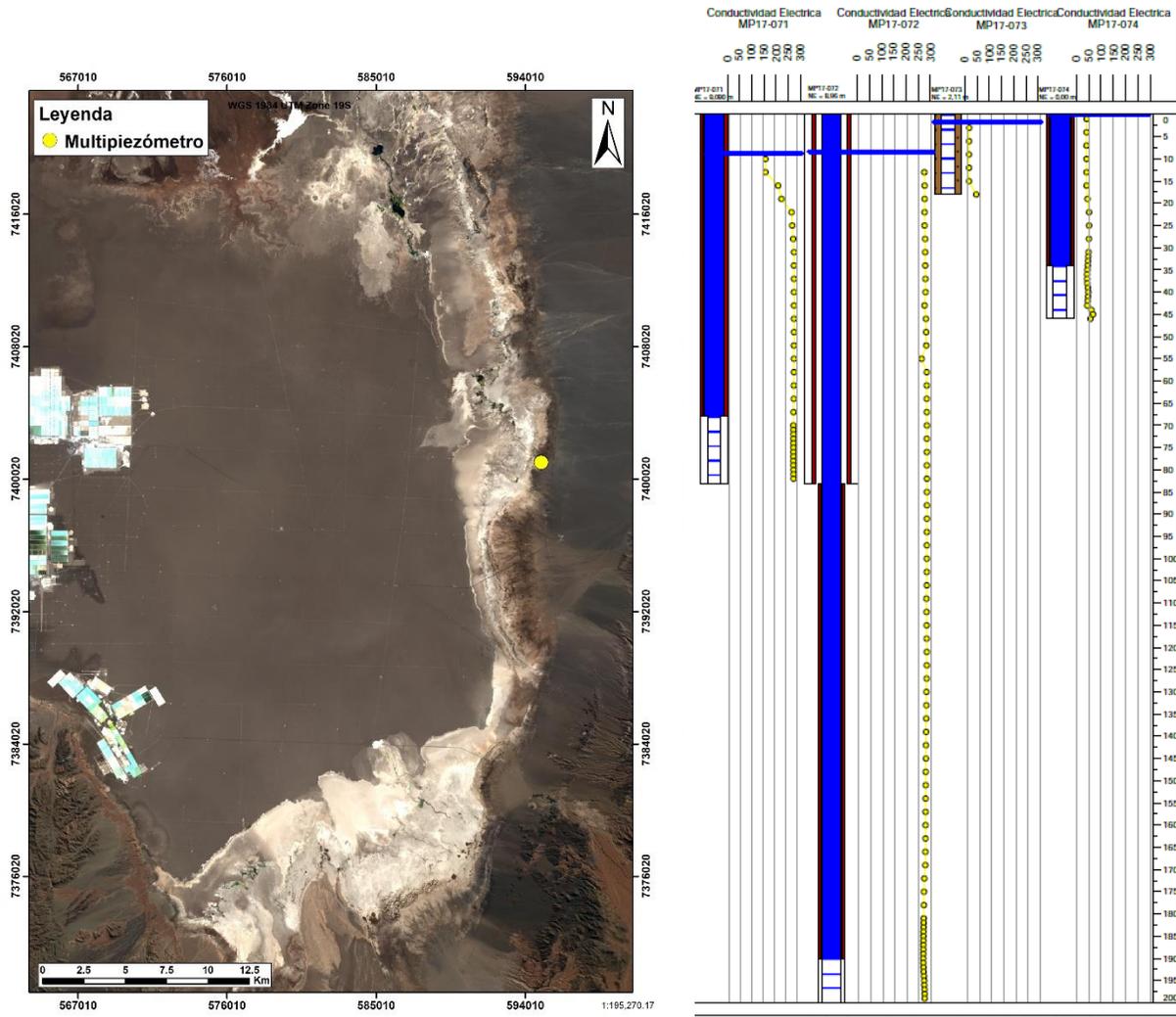


Figura 6-18. Detalle plataforma multipiezómetro y habilitación de los distintos piezómetros que la componen. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-19 se muestran los valores de conductividad y $\delta^{18}\text{O}$ para 4 piezómetros habilitados a distinta profundidad en la zona aluvial distal. En el Anexo MC3 de este informe se muestran los nombres y ubicaciones de los puntos. El piezómetro más somero presenta características de agua de recarga, con valor de $\delta^{18}\text{O}$ empobrecido y con un valor de conductividad bajo cercano a 10 mS/cm. En el punto habilitado a 46 metros de profundidad se observa influencia de la zona de mezcla de la interfaz salina, mientras que en los puntos más profundos se distingue claramente la salmuera.

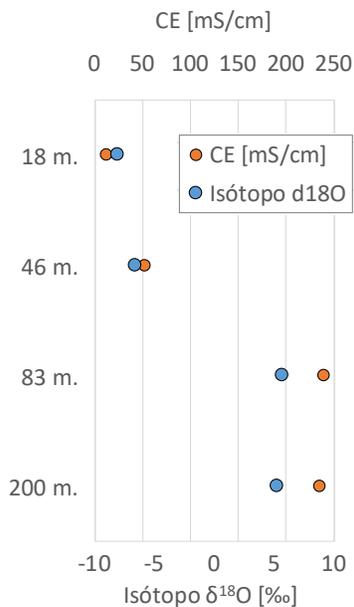


Figura 6-19. Caracterización de la interfaz salina en base a resultados de CE e isótopo $\delta^{18}\text{O}$ en piezómetros habilitados a distinta profundidad en el sector aluvial de Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia.

Las aguas que recargan en los depósitos aluviales avanzan hacia el oeste siguiendo el gradiente hidráulico, encontrándose con la interfaz salina en profundidad, la cual corresponde a una zona de mezcla entre dos aguas extremas (agua de los depósitos aluviales, con densidad $\approx 1\text{g/mL}$ y salmuera con densidad $\approx 1,23\text{g/mL}$). El contraste de densidad entre ambas aguas origina que el agua dulce al avanzar hacia el oeste ascienda por encima de la interfaz, lo que ocasiona una somerización de los niveles a medida que se avanza hacia el oeste, descargando las aguas del acuífero aluvial en la zona marginal.

6.4.2 Reconocimiento de interfaz salina mediante geofísica

Para delimitar la interfaz salina se trabajó a partir de secciones de modelado de resistividad eléctrica obtenidas a través de estudios de Transiente Electromagnético (TEM) realizadas históricamente por la empresa Geodatos bajo solitud de diversos mandantes (Tabla 6-6 y Figura 6-20). La compilación de estos resultados entregó 243 kilómetros lineales de estudio en distintas áreas del borde este del Salar de Atacama, con modelos de profundidades de investigación efectiva superiores a 300 - 400 m. Un detalle de los perfiles TEM empleados puede verse en el Anexo MC9.

Además, como se indicó al inicio de este capítulo, se analizó información de caracterización eléctrica de fluidos en pozos, donde conductividades eléctricas relativamente altas indican la presencia de la superficie de interfaz salina, típicamente con valores sobre 150 mS/cm. Se compiló la información de caracterización en 14 pozos usados en campañas de Geodatos como puntos de control de los modelos de resistividad obtenidos, y de 7 pozos de monitoreo periódico de interfaz salina periódica de SQM (Pozos Cuña). Con esto, se interpretó la ubicación de la interfaz, la cual se asocia a curvas de iso-

resistividad baja del modelo de velocidades compilado, típicamente menores a 2 ohm-m, y a la antes mencionada conductividad alta de fluidos (Figura 6-21).

Tabla 6-6. Fuente de información para modelo de resistividad base para interpretación de interfaz salina en borde este del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

AÑO	Contratista	Mandante	Secciones estudiadas	Largo Total de estudio
2000	Geodatos	SQM SALAR SA	2 perfiles	18 km. lineales
2005	Geodatos	SQM SALAR SA - DICTUC	3 perfiles	21 km. lineales
2014	Geodatos	ICASS LTDA - DGA	5 perfiles	66 km. lineales
2017	Geodatos	SQM SALAR SA	5 perfiles	61 km. lineales
2013	Geodatos	RWL	8 perfiles	77 km. lineales

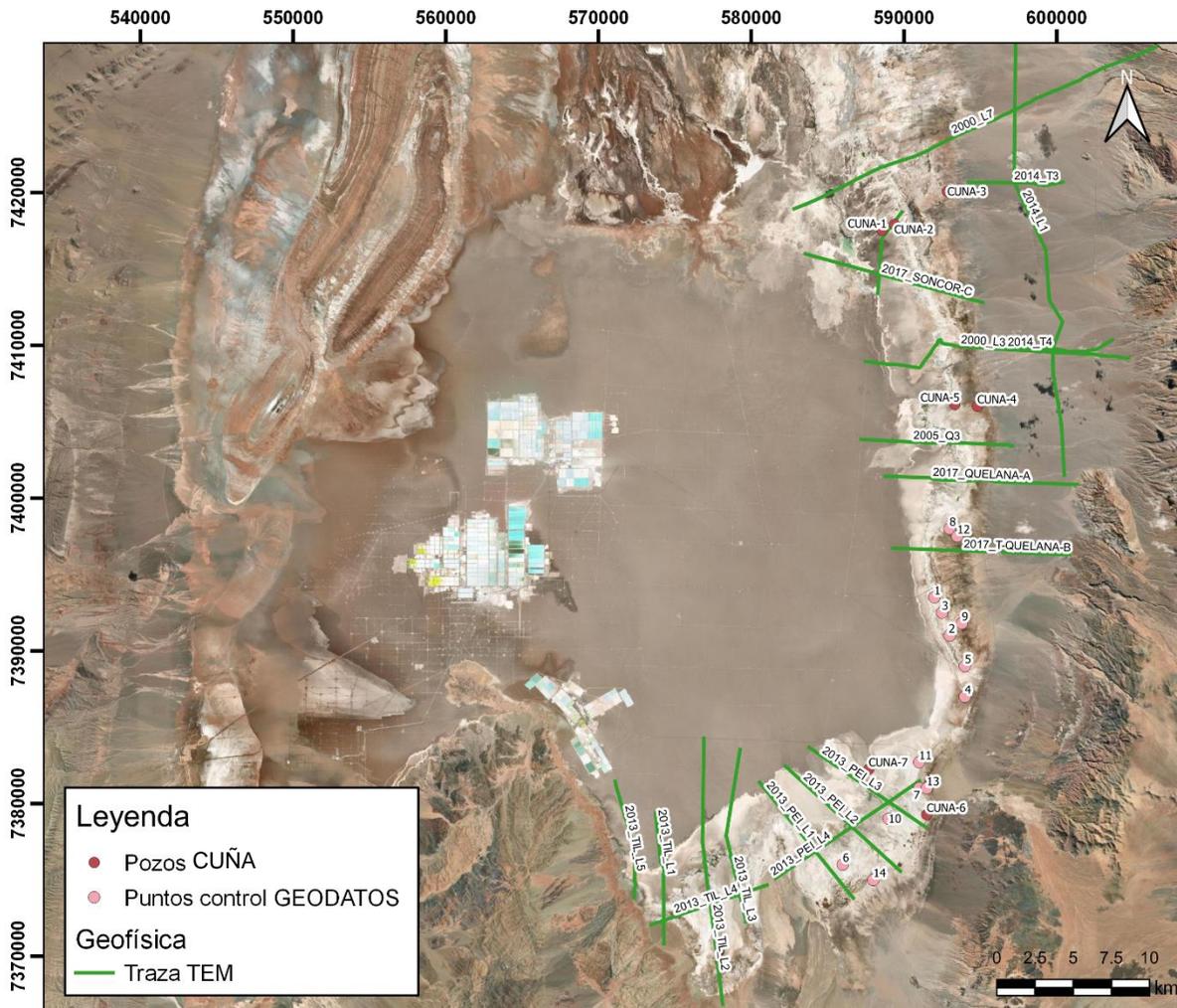


Figura 6-20. Ubicación de perfiles de estudios Geofísicos (TEM) y pozos de control y monitoreo compilados e integrados en delimitación de interfaz salina. Fuente: Elaboración propia

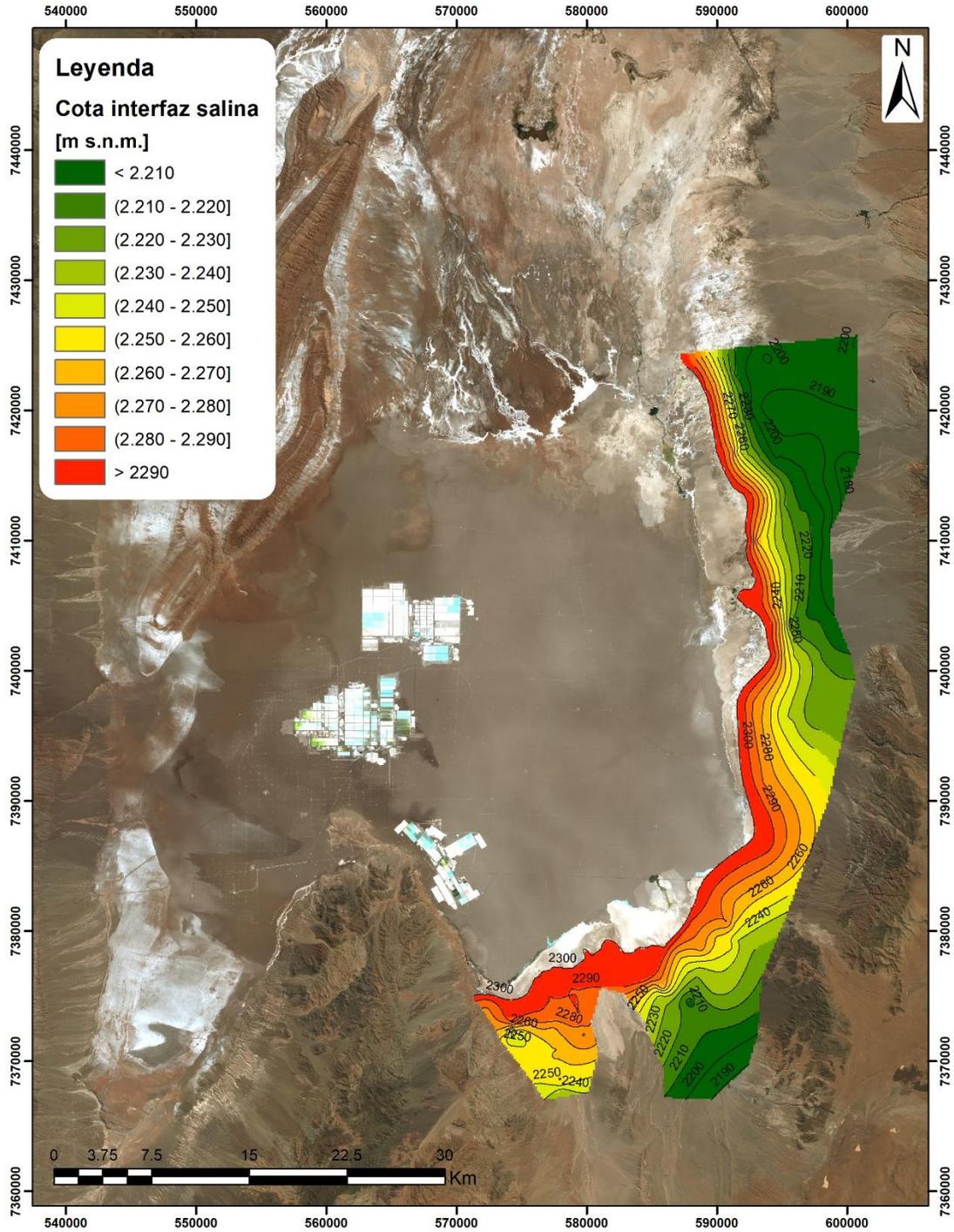


Figura 6-21. Mapa de elevación (cota) de la interfaz salina, indicativo de elevación sobre modelo geoidal (m s.n.m.) y geometría en profundidad del contacto superior del cuerpo de alta salinidad. Fuente: elaboración propia.

6.5 Análisis de niveles de agua subterránea

Se ha realizado un análisis de niveles de la mayoría de las unidades hidrogeológicas definidas, el que se separa, en un principio, en sistema de agua dulce y sistema de salmuera. Por lo general, en el Salar de Atacama se distinguen al menos tres comportamientos tipo para los niveles de agua subterránea, los cuales están determinados principalmente por las características hidrogeológicas de las unidades que se monitorean. Dos de estos tipos pertenecen al sistema de agua dulce (comportamiento tipo zona marginal y zona aluvial), y uno para el sistema de salmuera (comportamiento tipo zona núcleo).

Se cuenta con numerosos pozos dentro del núcleo que tienen información de niveles, con una buena distribución espacial a lo largo de todo el núcleo (Figura 6-22). Por otro lado, de la UH Zona Marginal y de la UH Aluvial se cuenta con información de niveles en su mayoría del borde este, y en menor parte de los bordes norte y sur (Figura 6-23).

La metodología de análisis utilizada consiste en presentar primero un análisis de la evolución histórica de niveles en pozos de los grandes sistemas. Luego, presentar mapas piezométricos en planta para distintas fechas en el tiempo, con el fin de poder observar la distribución de la evolución de los gradientes hidráulicos. El detalle de los datos y series de nivel utilizados para este análisis se presenta en el Anexo MC6.

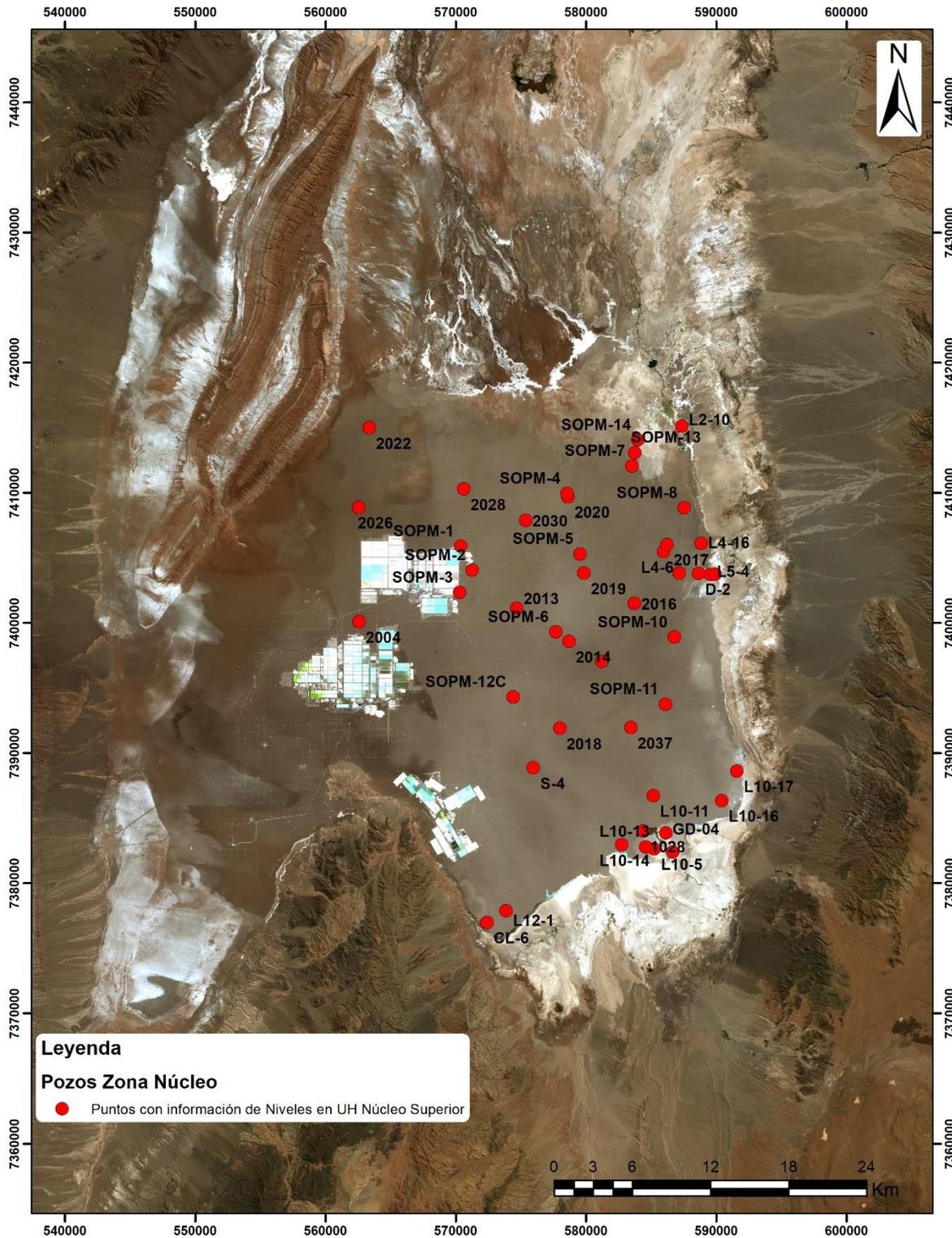


Figura 6-22. Puntos con información de niveles de salmuera. Fuente: elaboración propia.

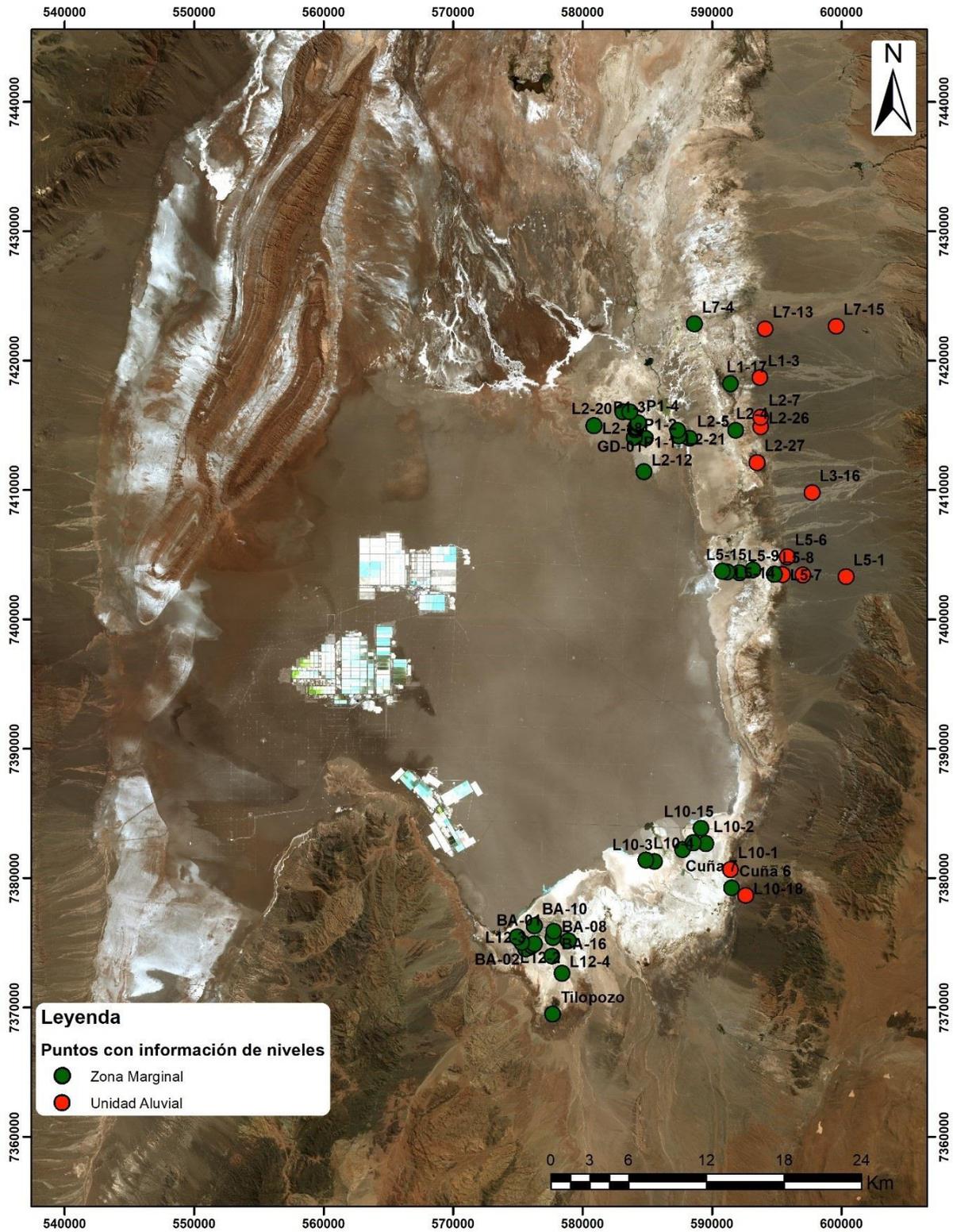


Figura 6-23. Puntos con información de niveles localizados en las UH Zona Marginal y Aluvial. Fuente: elaboración propia.

6.5.1 Evolución histórica de niveles en el Sistema de Salmuera

Los pozos con comportamiento tipo núcleo se caracterizan por presentar una tendencia a la baja durante todo el período de registros, variando sólo en su pendiente. También se caracterizan por presentar un comportamiento sensible a los eventos de precipitación directa sobre el núcleo del salar, respondiendo de forma inmediata a eventos significativos y recuperando la tendencia original al corto tiempo de haber ocurrido dichos eventos. Los 12 pozos incluidos en la Figura 6-24 se localizan en el sector norte del núcleo; en esta figura también se incluyen los registros de precipitaciones desde el año 1997.

Durante el período preoperacional (1986 a 1994), en todos los pozos del núcleo se observa una tendencia a la baja, sin signos aparentes de eventos de precipitación. En este período, los niveles observados presentan un comportamiento oscilatorio estacional con una leve tendencia al descenso (-3,16 cm/año en promedio, con un rango entre -2 y -4 cm/año), presentando una oscilación promedio anual del orden de 6 cm. Los máximos locales se verifican en enero y febrero, mientras que los mínimos se dan en Julio y Agosto (Figura 6-24).

A partir del año 1994, cuando comienzan las operaciones de SQM (MINSAL en ese momento), se observa que las oscilaciones casi desaparecen y la pendiente del descenso de los niveles aumenta (-8,83 cm/año en promedio), aumentando esta tendencia ligeramente en el año 2001, cuando se aumentó el caudal de extracción de salmuera.

Cabe destacar que todos los pozos con larga data de niveles de salmuera se encuentran habilitados en la UH Núcleo Superior, con una buena distribución en toda la extensión del Salar de Atacama. Por el contrario, la UH Núcleo Profundo tiene sólo registros en el bloque oeste del núcleo, por lo que en su mayoría corresponden a niveles dinámicos, muy dependientes de los caudales de extracciones de salmuera. En tanto, de la UH Núcleo Intermedio casi no se tienen registros de niveles estáticos.

6.5.1.1 Respuesta de los niveles de salmuera a eventos de precipitación

El registro histórico de niveles de salmuera muestra ascensos de nivel bruscos e inmediatos producto de los eventos de precipitaciones que se observan desde el año 1986 (Figura 6-24). Con el objetivo de comprender los eventos de precipitación en mayor detalle, se analizaron las series de los piezómetros SOPM (Figura 6-22) considerando el descenso desde una fecha particular. La fecha elegida corresponde al 1 de abril del año 2000, fecha desde que todos los piezómetros tienen registro de niveles (Figura 6-25).

Al observar la serie de descensos, se observa que independientemente de la ubicación del piezómetro, éstos tienen un comportamiento similar, tanto en los descensos asociados al bombeo del núcleo por parte de SQM y Albemarle, como a la respuesta frente a los eventos de precipitación, reflejados en un ascenso abrupto.

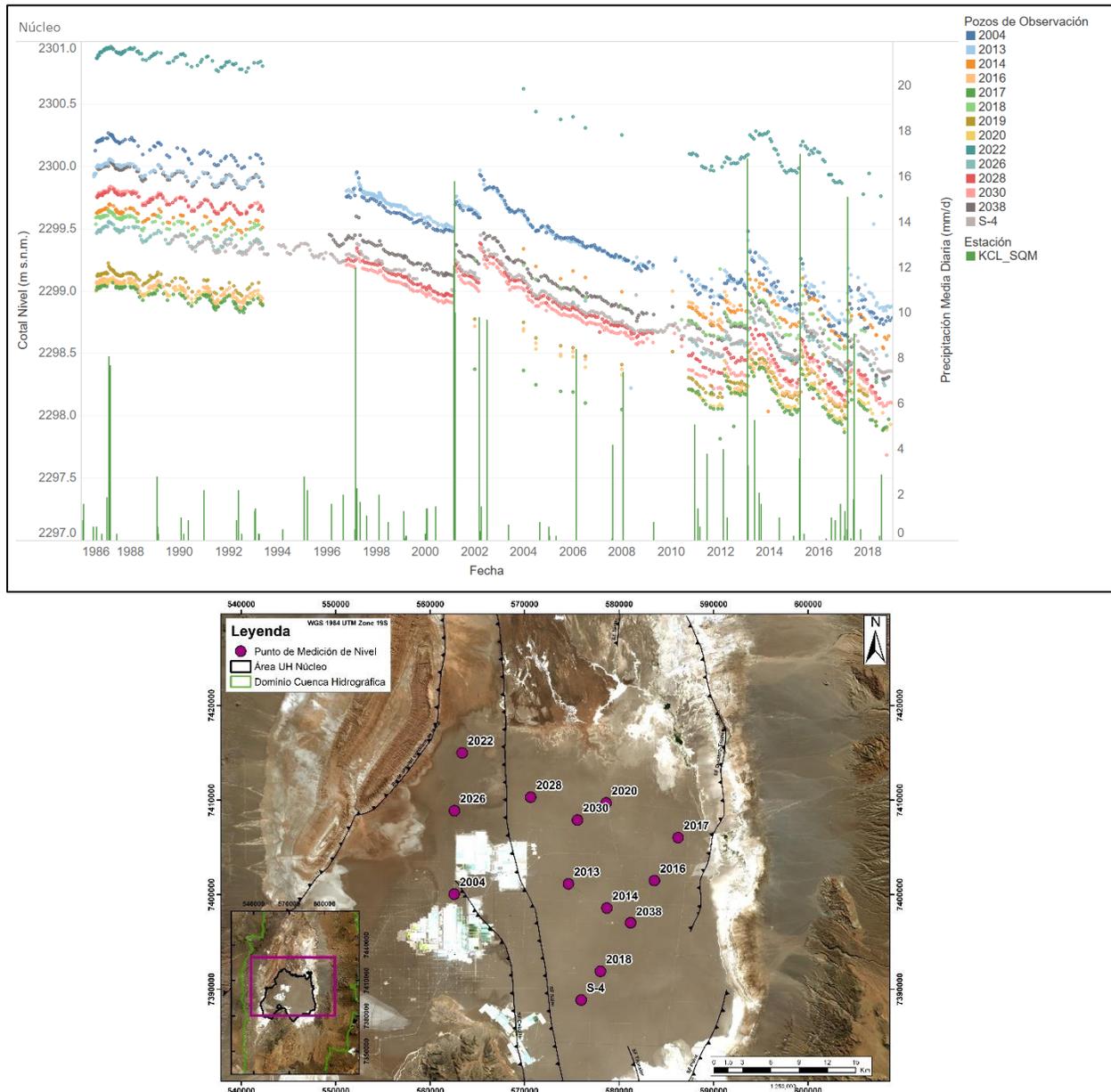


Figura 6-24. Series de nivel en los puntos de observación característicos (PObs) (zona norte) del núcleo del salar y series de precipitación de las estaciones de KCL y SOP. Fuente: elaboración propia.

Lo anterior implica que el descenso de niveles de salmuera en distintas zonas del bloque este del núcleo son similares (Figura 6-25). Para analizar esta observación y reconocer, además, la relación entre las variaciones en la tasa de descenso y los distintos factores externos que inciden en la variación de nivel (eg. Precipitación), se buscaron datos que permitieran completar, desde el año 1986, las series de nivel presentadas en la Figura 6-25. El resultado fue incluir los piezómetros 2018, SOPM-11 y SOPM-12C de SQM, además del piezómetro S-4 de Albemarle, con lo cual se pudo construir una única curva de descenso compilada para el periodo 1986-2018 (Figura 6-26).

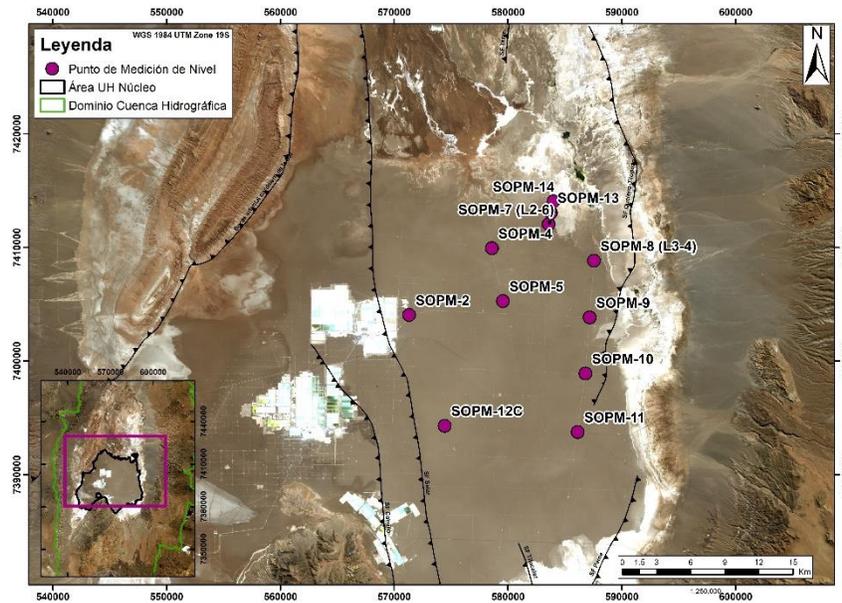
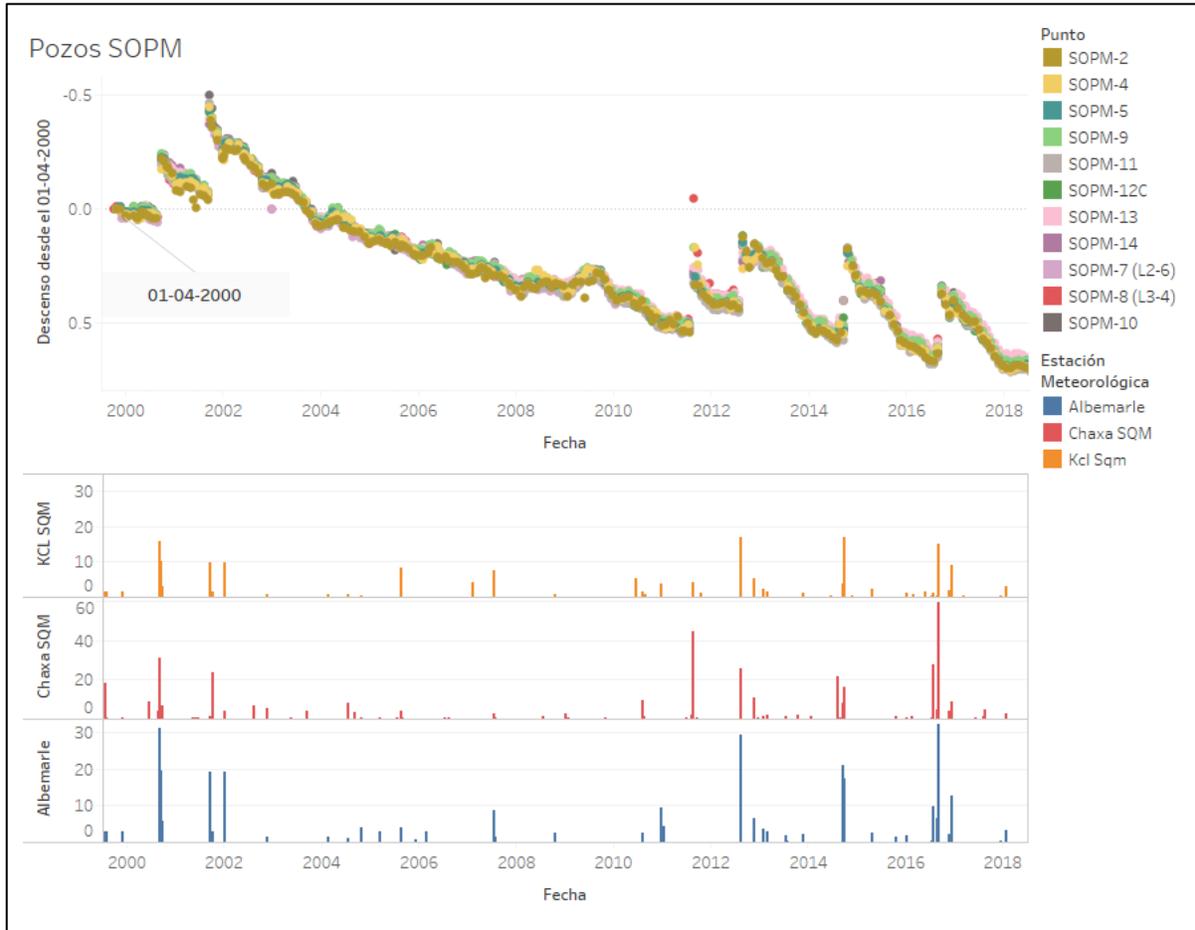


Figura 6-25. Series de descenso de los pozos SOPM entre abril de 2000 y diciembre de 2018, contrastadas con la serie de precipitación de las estaciones KCL, Chaxa y Albemarle. Fuente: Elaboración propia.

Se consideró como “descenso base” al piezómetro 2018, que inicia su registro en agosto de 1986 y finaliza el 31 de diciembre de 2018, con un período sin registro entre abril de 1993 y enero de 2002, y con medición esporádica de niveles entre 2002 y 2007. La serie se rellenó con el piezómetro S-4 de Albemarle, cuyo registro va entre agosto de 1989 y diciembre de 2018, con un período sin registro entre agosto de 1999 y enero de 2001. Para el relleno de la serie se asumió que el descenso observado en el piezómetro 2018 es el punto de inicio de la serie del piezómetro S-4, observándose un buen ajuste. Finalmente, el periodo entre agosto de 1999 y enero de 2001 se rellenó con los descensos de los pozos SOPM-11 y SOPM-12C, observándose también un buen ajuste de la serie (Figura 6-26).

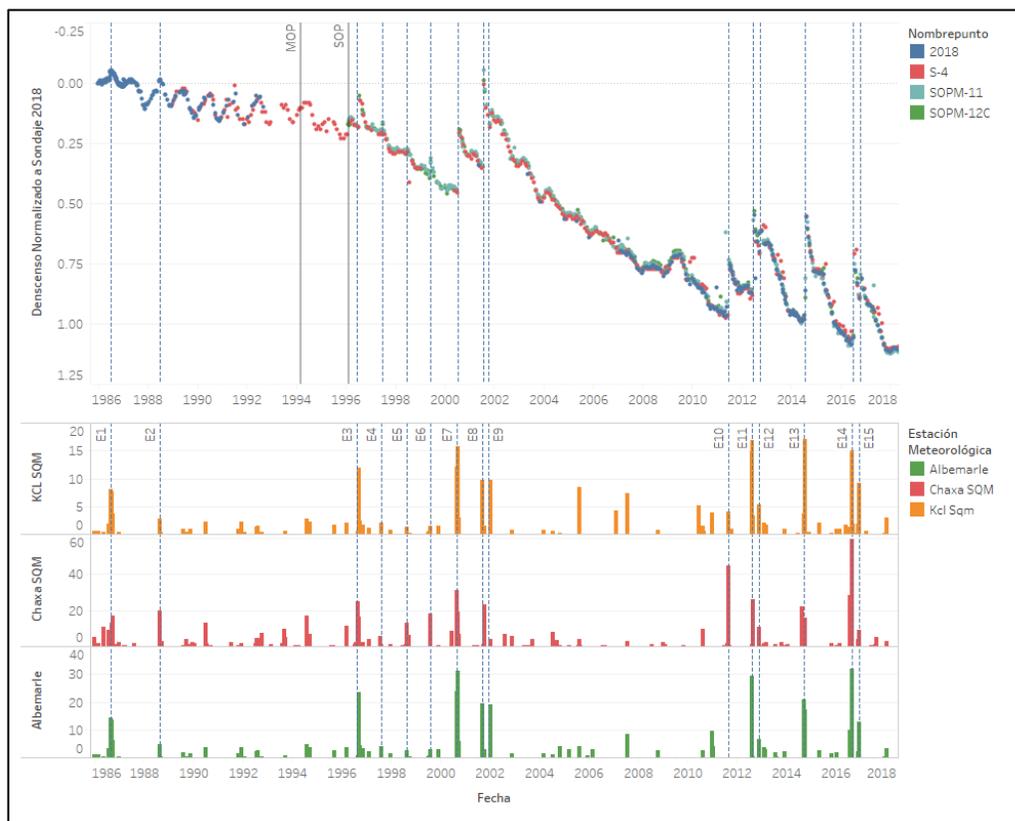


Figura 6-26. Series de descenso compilada de los piezómetros 2018, S-4, SOPM-11 y SOPM-12C, entre agosto de 1986 y diciembre de 2018, contrastadas con la serie de precipitación de las estaciones KCL, Chaxa y Albemarle. Ver ubicación en Figura 6-24 y Figura 6-25. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar la serie de descensos del piezómetro 2018 con las series de precipitación de KCL, Chaxa y Albemarle, se observan 15 eventos importantes donde es posible observar una recuperación abrupta de los niveles (Figura 6-26). Los eventos de precipitación registrados se presentan en la Tabla 6-7.

A partir de la distribución de precipitación en el núcleo del Salar de Atacama (ver mapa isoyetas Figura 4-6), el núcleo fue dividido en tres sectores en los que se midieron los ascensos en distintos piezómetros de la serie 2000 (Figura 6-24), para los 15 eventos de precipitación registrados. El resultado del análisis por sector se describe a continuación:

- Sector Oeste: corresponde al área comprendida entre la Cordillera de la Sal y el límite occidental del sector MOP, con ascensos menores que varían entre 0 y 22 cm para los 15 eventos registrados.
- Sector Central: corresponde al área comprendida entre el límite occidental del sector MOP y la falla Cabeza de Caballo, con ascensos entre 0 y 76 cm para los 15 eventos registrados.
- Sector Este: corresponde al área al este de la falla Cabeza de Caballo, con ascensos que varían entre 3 cm y 43 cm.

Que los ascensos en el Sector Central sean mayores a los medidos en el Sector Este puede atribuirse a una diferencia en el almacenamiento/porosidad del acuífero libre en el Bloque Oeste respecto del Bloque Este.

Tabla 6-7 Eventos de precipitación que generan un marcado ascenso en los niveles. Fuente Elaboración propia.

Evento	Fecha	Precipitación mm/día			Sector			
		Kcl SQM	Albemarle	Chaxa SQM	Oeste 255 Km ²	Central 209 Km ²	Este 986 Km ²	Promedio 1450 Km ²
1	17-02-1987	8.1	14.2	6.2	0.00	0.02	0.04	0.02
2	17-02-1989	3.4	6.0	31.1	0.00	0.00	0.04	0.01
3	05-03-1997	12.0	23.6	11.9	0.22	0.16	0.11	0.16
4	09-02-1998	2.0	4.0	1.3	0.00	0.01	0.03	0.01
5	11-02-1999	3.5	7.0	18.6	0.02	0.00	0.03	0.01
6	22-01-2000	2.8	5.6	18.8	0.01	0.01	0.06	0.03
7	01-03-2001	37.9	74.5	54.4	0.01	0.30	0.25	0.19
8	12-03-2002	10.2	20.0	1.1	0.19	0.37	0.35	0.30
9	03-06-2002	9.7	19.0	3.9	0.00	0.00	0.06	0.02
10	14-02-2012	4.0	0.0	44.8	0.00	0.10	0.19	0.10
11	07-02-2013	20.1	29.5	27.3	0.04	0.76	0.27	0.35
12	19-05-2013	5.3	6.5	10.9	0.00	0.57	0.10	0.22
13	20-03-2015	20.9	38.1	24.3	0.00	0.41	0.43	0.28
14	22-02-2017	17.5	38.4	64.2	0.00	0.27	0.28	0.18
15	09-06-2017	9.1	12.8	8.8	0.00	0.09	0.09	0.06

6.5.1.2 Cálculo de la recarga por precipitación en el núcleo del Salar de Atacama a partir de las series de niveles de salmuera

Para evaluar el cambio del volumen almacenado (recarga), se calculó el aumento del volumen almacenado con la siguiente relación:

$$\Delta V = \Delta h * A * S_y$$

Donde ΔV es el cambio en el volumen almacenado; Δh corresponde al ascenso de niveles registrado para cada sector; A es el área de cada sector; y S_y es el almacenamiento.

Dado que el almacenamiento de la UH Núcleo Superior varía en un rango entre 1 y 15%, se evaluaron distintas combinaciones de almacenamiento para cada sector asociado a cada evento (Tabla 6-8). Adicionalmente se calculó el cambio en el volumen almacenado asumiendo el promedio de los ascensos y con un almacenamiento del 10%.

Se definieron 2 grandes períodos: el preoperacional, entre septiembre de 1986 y octubre de 1994, con una duración de 8.1 años; y el período operacional, entre noviembre de 1994 y diciembre de 2018. De acuerdo con los ascensos marcados en los niveles de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama, el rango de recarga por precipitación en todo el período varía entre 149 y 448 L/s. Cabe destacar que el período preoperacional (~8 años) sólo registra dos eventos de precipitación, por lo que los caudales estimados son relativamente bajos, entre 15 y 46 L/s. Estos valores se consideran pesimistas para un período preoperacional, y se entiende que en el largo plazo deberían ser similares al período total (~32 años). El período operacional (~24 años), con un rango de caudales entre 194 y 583 L/s, se considera representativo de ese período.

Tabla 6-8 Cambio en el volumen almacenado para los 15 eventos de precipitación registrados.

Evento	Fecha	Período	Volumen [Mm ³] ponderado por sector para distintos almacenamientos				
			5%	8%	10%	12%	15%
1	17-02-1987	Preoperación	2.0	3.2	4.0	4.8	6.0
2	17-02-1989	Preoperación	1.9	3.1	3.8	4.6	5.8
3	05-03-1997	Operación	9.9	15.8	19.7	23.7	29.6
4	09-02-1998	Operación	1.6	2.6	3.3	3.9	4.9
5	11-02-1999	Operación	1.5	2.5	3.1	3.7	4.6
6	22-01-2000	Operación	3.1	5.0	6.2	7.5	9.3
7	01-03-2001	Operación	15.5	24.9	31.1	37.3	46.6
8	12-03-2002	Operación	23.6	37.8	47.2	56.6	70.8
9	03-06-2002	Operación	3.0	4.7	5.9	7.1	8.9
10	14-02-2012	Operación	10.5	16.7	20.9	25.1	31.4
11	07-02-2013	Operación	21.7	34.6	43.3	52.0	65.0
12	19-05-2013	Operación	10.9	17.4	21.8	26.2	32.7
13	20-03-2015	Operación	25.2	40.3	50.4	60.5	75.6
14	22-02-2017	Operación	16.6	26.6	33.3	40.0	49.9
15	09-06-2017	Operación	5.2	8.4	10.5	12.6	15.7
Total Mm ³ Preoperación (8.1 años)			3.9	6.3	7.9	9.4	12
Total Mm ³ Operación (24.2 años)			148	237	297	356	445
Total Mm³ (32.3 años)			152	244	305	365	457
Caudal Equivalente L/s Preoperación (8.1 años)			15	25	31	37	46
Caudal Equivalente L/s Operación (24.2 años)			194	311	389	467	583
Caudal Equivalente L/s Pre y Op			149	239	299	359	448

6.5.2 Evolución histórica de niveles en el Sistema de Agua Dulce

Se cuenta con información de niveles históricos tanto en la UH Zona Marginal como en la UH Aluvial. Los pozos con comportamiento tipo zona marginal (Figura 6-27) tienen la particularidad de reflejar principalmente la influencia estacional característica de la evaporación, debido a que los niveles en este sector se encuentran muy próximos a la superficie. De esta manera, es posible visualizar una ciclicidad producto de la estacionalidad de la evaporación durante el verano e invierno, a consecuencia de lo cual los niveles disminuyen y aumentan respectivamente.

Aunque la tendencia de las series mantiene los niveles en un mismo valor promedio a lo largo de su registro, mostrando sus características oscilaciones estacionales asociadas a las variaciones en la evaporación, se observa una disminución en la amplitud de las oscilaciones (Figura 6-27). Esto sugiere que tanto la menor recarga que recibe el sistema por efectos de las variaciones en la precipitación, como también la extracción de agua desde la UH Aluvial, serían la causa de esta variación. El cambio en la amplitud se evidencia específicamente en el extremo oriental de la zona marginal. No obstante, estos niveles no muestran afección alguna causada por las extracciones de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama, evidenciado por la ausencia del patrón de descenso que se observa en pozos ubicados en el núcleo (ver Figura 6-26).

Actualmente, en la UH Aluvial existen 5 pozos de extracción de agua industrial; 2 de ellos comenzaron sus operaciones en el año 1997 (Socaire-5 y P-2), mientras que el resto de ellos comenzaron a operar en el año 2008.

Los pozos con comportamiento tipo zona aluvial (Figura 6-28) se distinguen por mostrar una tendencia al descenso desde los primeros registros, incluso antes que comenzara la operación de los pozos de agua industrial. La tasa de descenso en este período se estima entre 1 y 2 cm/año, y era común a todos los pozos. Al comenzar la extracción de agua, la tasa aumentó hasta 10 cm/año con los 5 pozos en operación.

En general, los pozos de la UH Aluvial no presentan afecciones a estímulos inmediatos relacionados por eventos atmosféricos (precipitaciones o evaporación), debido especialmente a la mayor profundidad de los niveles (Figura 6-28).

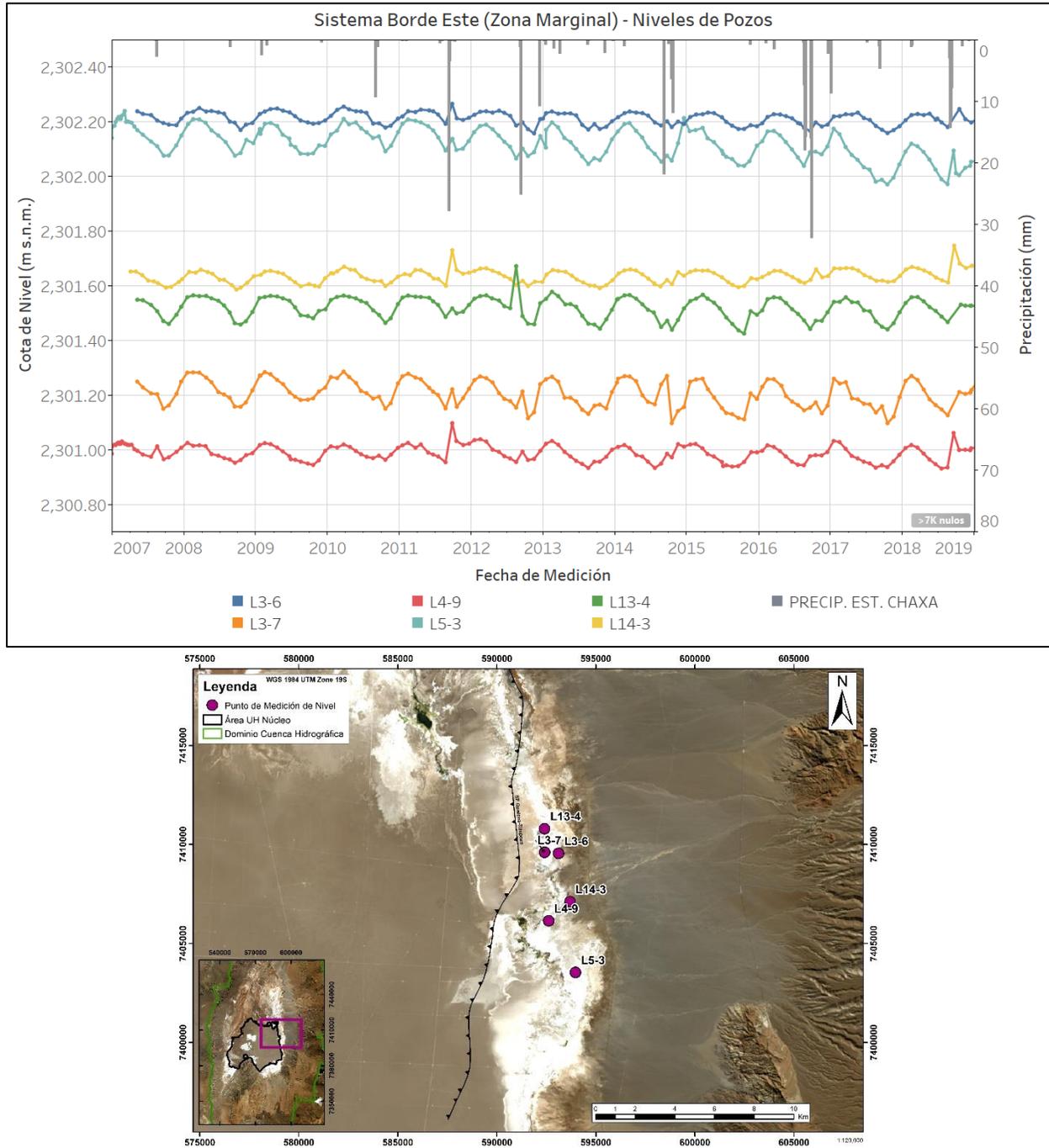


Figura 6-27. Ejemplo de pozos con comportamiento de nivel tipo zona marginal. Fuente: elaboración propia.

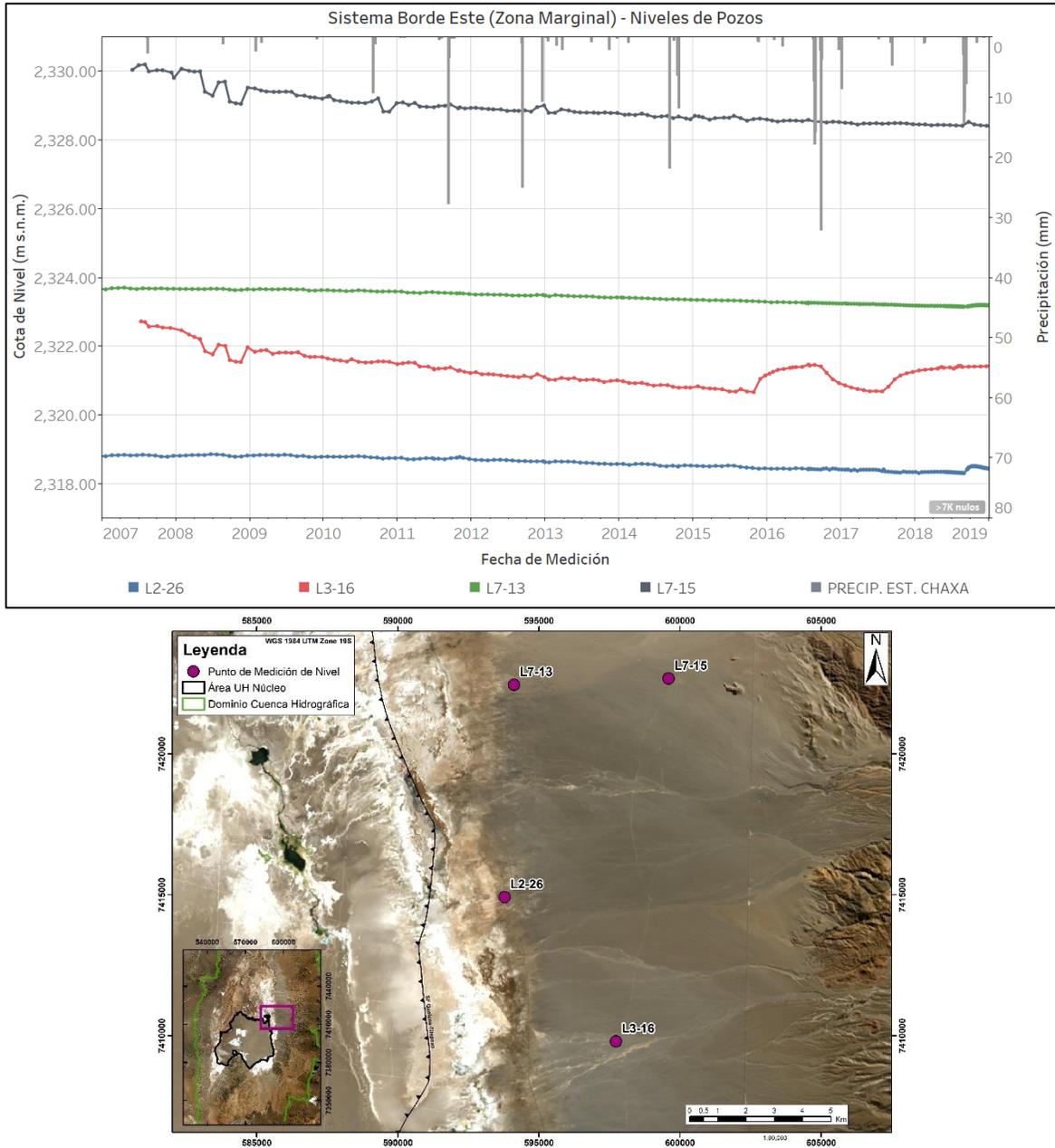


Figura 6-28. Ejemplo de pozos con comportamiento de nivel tipo zona aluvial. Fuente: elaboración propia.

Con base en lo anterior, se presentan los distintos comportamientos de los niveles de agua subterránea en los sectores de sensibilidad ambiental Soncor, Quelana, Peine y Tilopozo.

6.5.3 Comportamiento de niveles en sistemas locales

6.5.3.1 Sector Soncor

Este sector contempla principalmente la UH Zona Marginal, aunque existen pozos habilitados en profundidad que tienen un comportamiento de pozos tipo núcleo (Figura 6-29). El comportamiento de los niveles de agua subterránea en el sector de Soncor está determinado principalmente por la evaporación y la dinámica natural de las lagunas del sistema: Puilar, Chaxa y Barros Negros, y los desbordes de esta última (Cola de Pez y Barros Negros Sur).

En particular, los desbordes corresponden a escorrentía superficial generada cuando el nivel de la laguna es sobrepasado. Esto ocurre tanto por recargas anómalas que suelen suceder durante la época de mayor precipitación en la cuenca, como por una menor tasa de evaporación durante el invierno. El que ocurran desbordes podría incidir en los niveles del acuífero ya que son flujos transportados en superficie con potencial de infiltrarse fuera del área de la laguna. Se detallará más al respecto en los capítulos posteriores del presente informe.

En el sector de Soncor los desbordes son dominados por los aportes superficiales que ocurren a través del canal Burro Muerto. En esta zona, además, se puede observar cómo las series de nivel presentan comportamientos combinados según su ubicación, tendencia y estacionalidad: tipo núcleo, tipo marginal y tipo aluvial.

En la Figura 6-30 se muestran los registros de nivel de algunos puntos representativos del comportamiento tipo núcleo del sector de Soncor (GD-01, L2-12, L2-17, L2-18, L2-19, L2-20, P1-1, P1-2, P1-3, P1-4, SOPM-14). Se observa una tendencia descendente de los niveles (-6.93 cm/año) marcada por bruscas recuperaciones que se corresponden con los eventos de precipitación. Sin embargo, estos puntos, al comienzo de su registro, muestran también un patrón tipo Zona Marginal, evidenciando que el sector se ve influenciado por la presencia de desbordes desde los cuerpos lagunares cercanos. Que el patrón haya pasado a ser tipo Núcleo implica que los desbordes dejaron de ocurrir en la misma dirección y/o con la misma magnitud que en el pasado. Se menciona más respecto de estos puntos en los apartados 6.6.5 y 7.2 del presente informe.

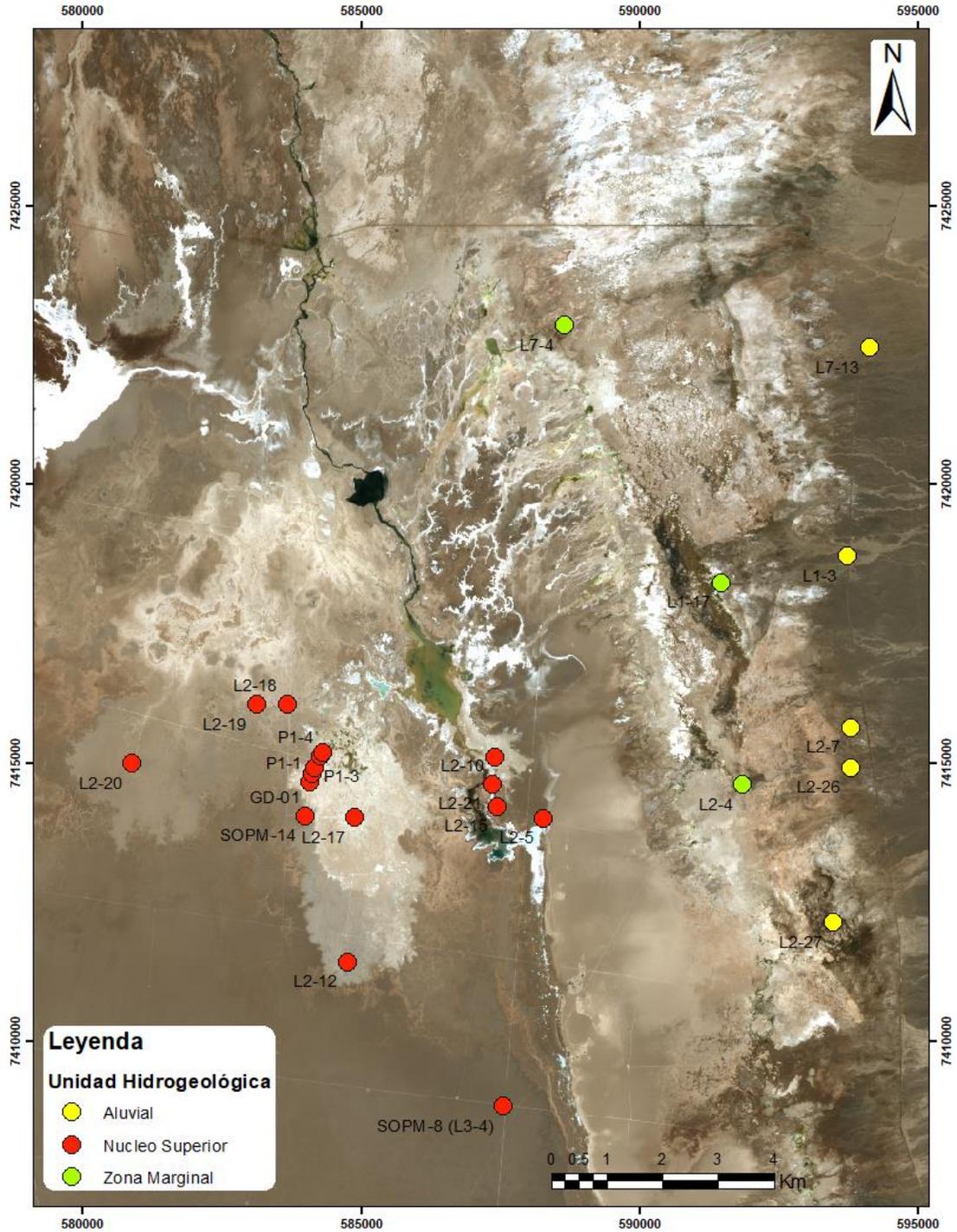


Figura 6-29. Puntos de observación de niveles, sector de Soncor. Fuente: elaboración propia.

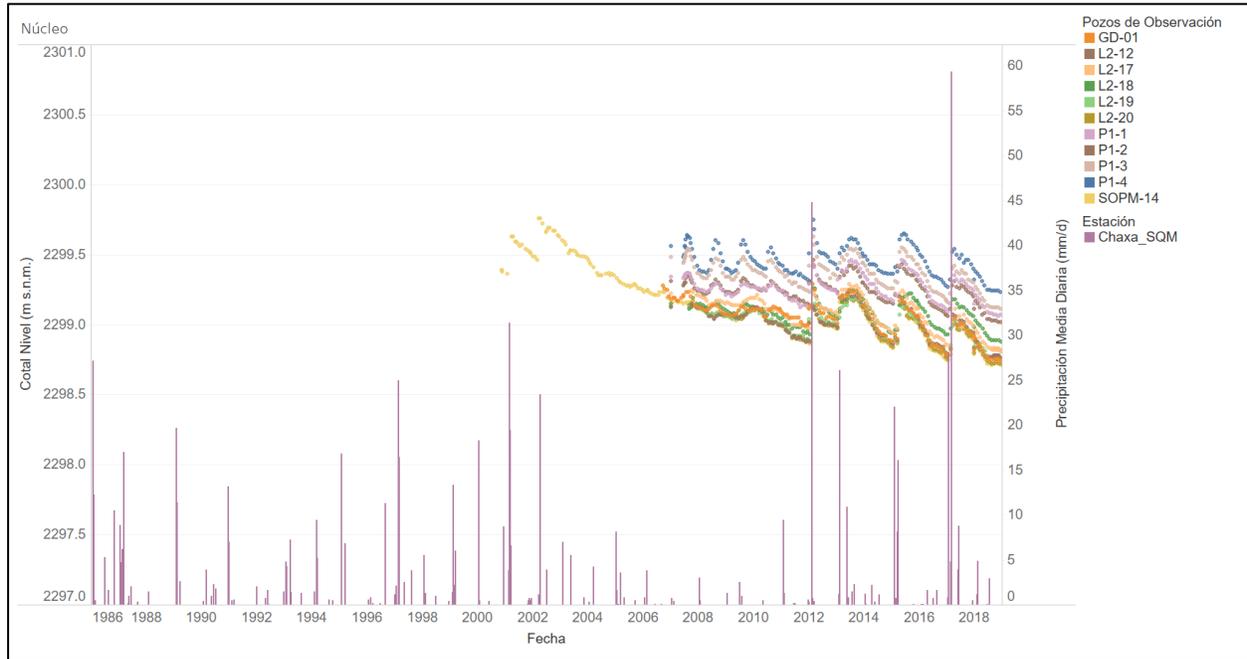


Figura 6-30. Comportamiento de niveles sector de Soncor y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Chaxa. Fuente: elaboración propia.

Respecto del comportamiento de los niveles tipo zona marginal del sistema Soncor, se aprecia un comportamiento oscilatorio estacional entorno a un nivel relativamente estable, sin tendencia al ascenso o descenso. Esto es destacable ya que, a pesar de la cercanía con los pozos tipo núcleo (afectados por las extracciones de salmuera), los pozos de la UH Zona Marginal no se ven afectados en absoluto; esto implica que su régimen sólo depende la cantidad de agua de recarga (precipitaciones en zonas altas) y de la evaporación. En la Figura 6-31, se muestran los registros medidos en los puntos representativos de este sector (L7-4, L1-17, L2-4 y L2-27).

Finalmente, es importante considerar el comportamiento de los niveles en la UH Aluvial, de donde proviene parte de la recarga al sistema. En los puntos de observación que se encuentran situados en el margen este del sector aluvial se observa que el nivel está condicionado por las extracciones de agua industrial. En la Figura 6-32 se muestra a modo de ejemplo, el registro de nivel en los pozos L1-3, L1-7 y L2-26. La mayor particularidad que se observa en las series de nivel de estos pozos es el cambio de pendiente a partir del año 2010 (-5,47 cm/año). Cabe destacar que los niveles de estos pozos no se ven afectados por las extracciones de salmuera del núcleo del Salar de Atacama.

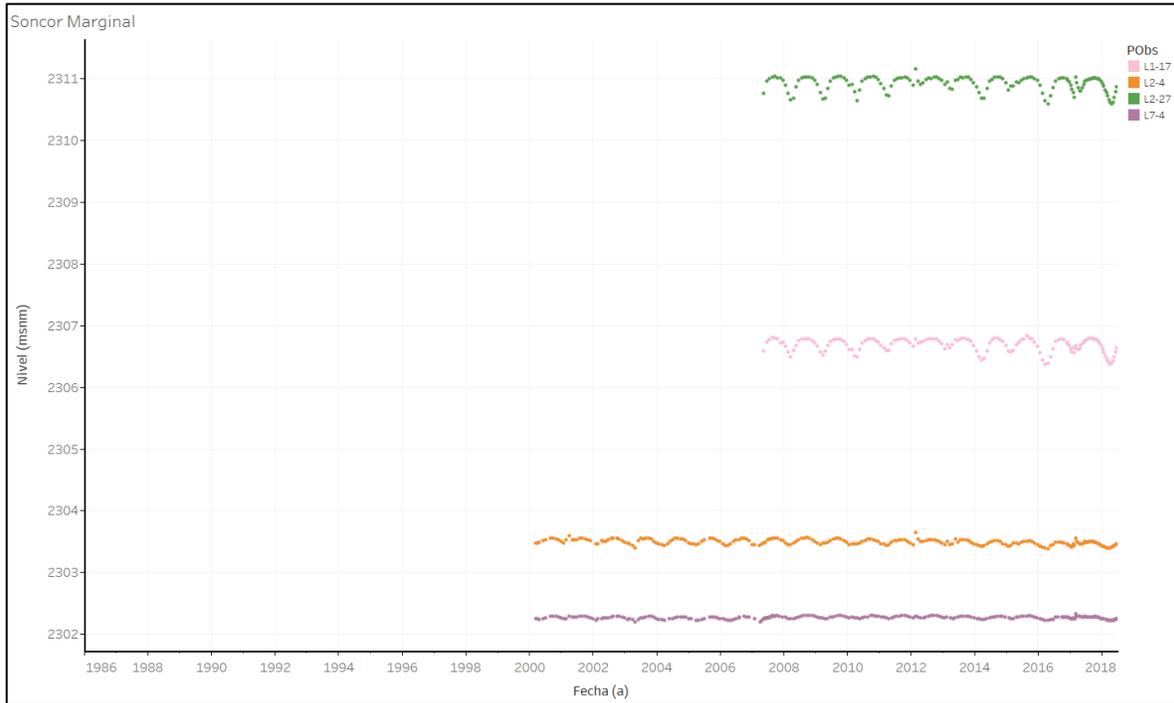


Figura 6-31. Niveles representativos del tipo marginal en el sector de Soncor. Fuente: elaboración propia.

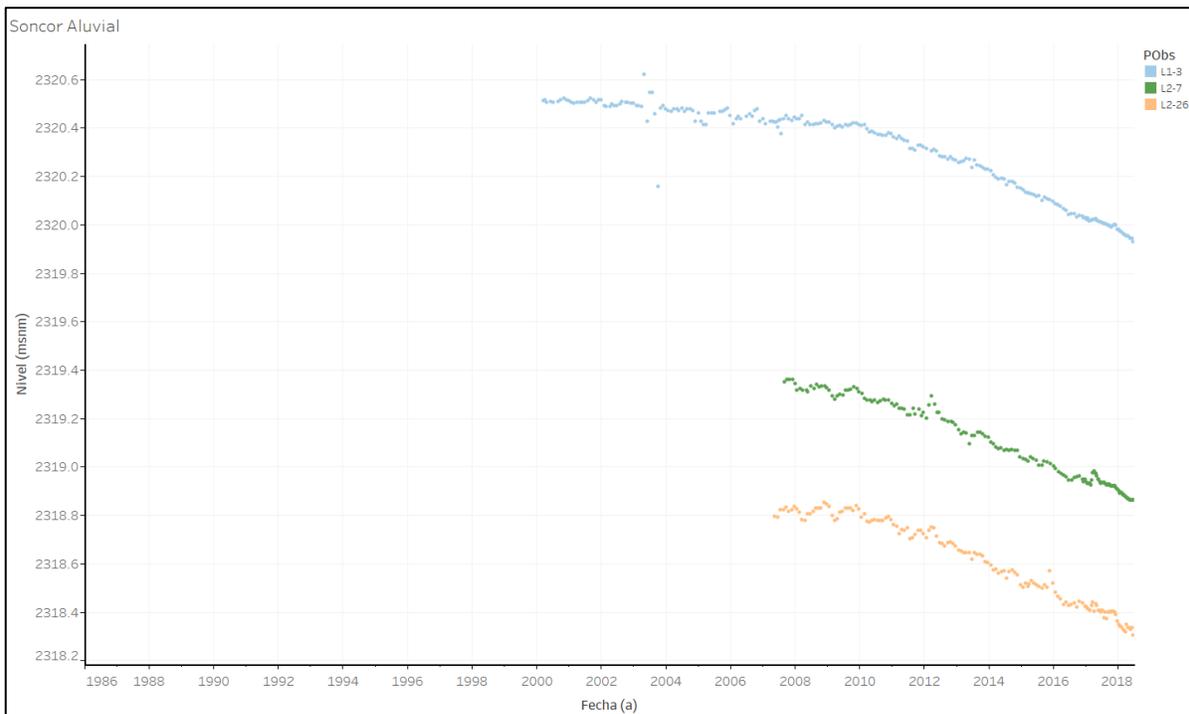


Figura 6-32. Registro de niveles de los puntos de observación situados en la zona aluvial. Fuente: elaboración propia.

6.5.3.2 Sector Aguas de Quelana

En este apartado se analiza la evolución de los niveles históricos registrados en los puntos de observación del sector de Aguas de Quelana, en el borde este (Figura 6-33), incluyendo parte de las UH del Núcleo, UH Zona Marginal y UH Aluvial. La Figura 6-34 muestra el comportamiento histórico de niveles de pozos en el sector de Aguas de Quelana. Se han escogido pozos que se encuentran alineados de Oeste a Este, ya que de este modo se observan los comportamientos típicos de las zonas principales: zona núcleo, zona marginal y zona aluvial.

A partir de la Figura 6-34, se observan claramente los distintos comportamientos de los niveles según su distribución espacial. Los pozos L5-1 y L5-2 se encuentran situados en plena UH Aluvial; por lo tanto, es probable que su comportamiento esté influenciado por el efecto de la extracción del pozo de agua industrial cercano (Socaire-5B). El nivel de estos pozos se encuentra a 23 y 15 metros respectivamente por encima del nivel de los pozos que se ubican más hacia el oeste en este Sector (SOPM-9).

Los pozos L5-6, L5-7, L5-8 y L5-G3, situados en la UH Zona Marginal y en el límite con la UH Aluvial (Figura 6-33), dan cuenta que los dos primeros, debido a que se encuentran en el límite entre las dos UH, muestran una oscilación estacional más marcada que los dos últimos. El comportamiento de los puntos de observación L5-8 y L5-G3 sugiere que el medio geológico en el que se encuentran atenúa los efectos atmosféricos, aun cuando a una menor escala es posible ver la oscilación estacional de sus niveles (Figura 6-35).

Los pozos de observación del sector de Quelana más representativos para mostrar el comportamiento de la UH Núcleo Superior son: L5-9, L5-14, L5-15, GD-02, SOPM-9, L5-4, D-2, 2017p (Figura 6-34 y Figura 6-35). En ellos se observa una tendencia general al descenso debido a la extracción de salmuera en el núcleo. Inicialmente, se puede observar como la serie muestra las oscilaciones de nivel debidas a la evaporación y, a medida que aumentan los descensos, este efecto se ve atenuado hasta desaparecer (bajo la profundidad de extinción de la evaporación).

En resumen, el comportamiento de los niveles está estrechamente ligado con la ubicación del punto de observación. Los pozos situados más próximos a la UH Aluvial presentan los niveles piezométricos más elevados con una leve tendencia al descenso debido a la extracción de agua industrial y al efecto de los periodos en que no existen eventos de precipitación relevantes. Por su parte, en la UH Zona Marginal, los niveles presentan una oscilación característica que refleja la fuerte influencia de la evaporación. Finalmente, el comportamiento de la UH Núcleo Superior muestra una leve tendencia al descenso, con una oscilación pequeña producto de la evaporación, la cual va disminuyendo a medida que los niveles se acercan a la profundidad de extinción de la evaporación.

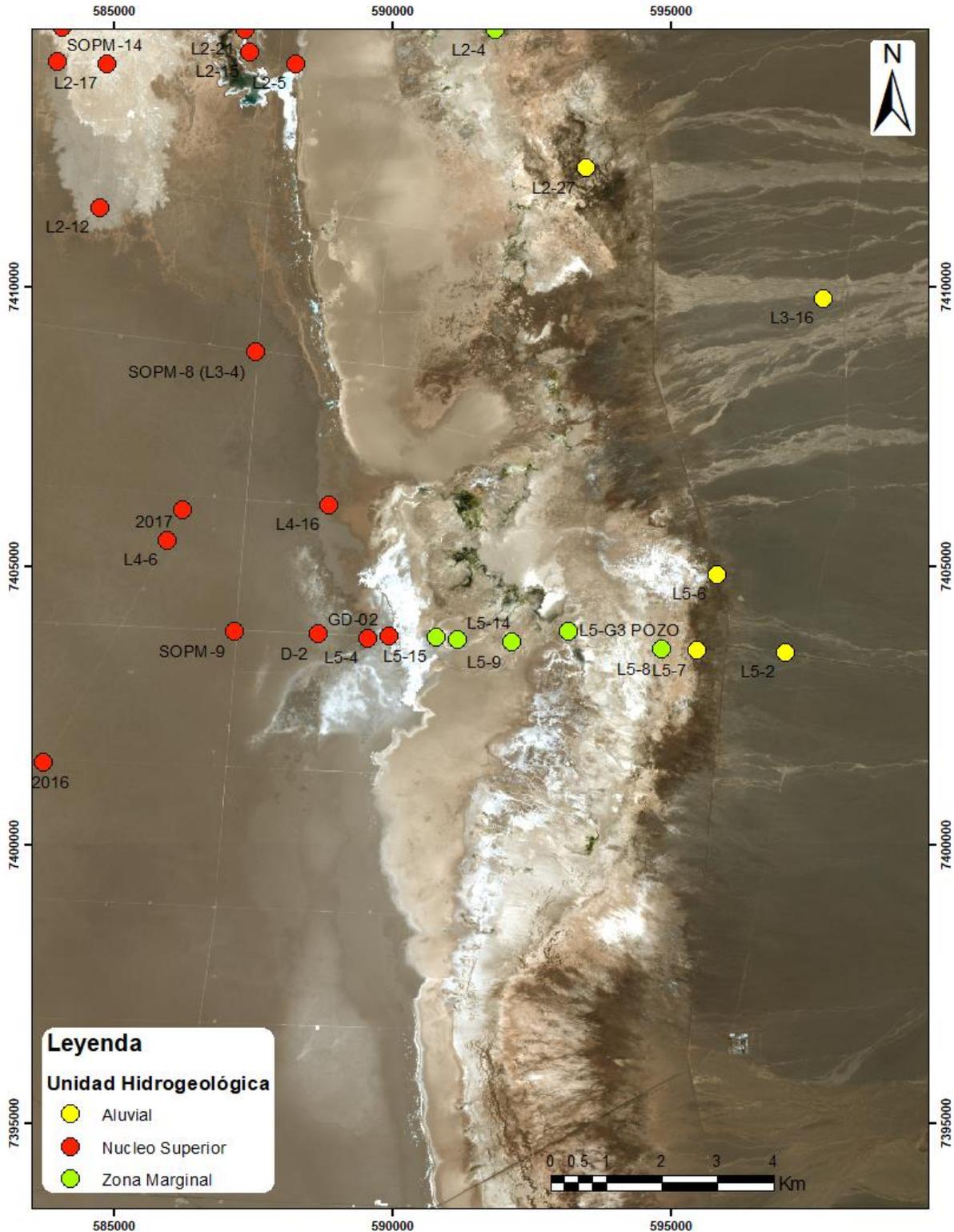


Figura 6-33. Puntos de observación de nivel, sector de Aguas de Quelana. Fuente: elaboración propia.

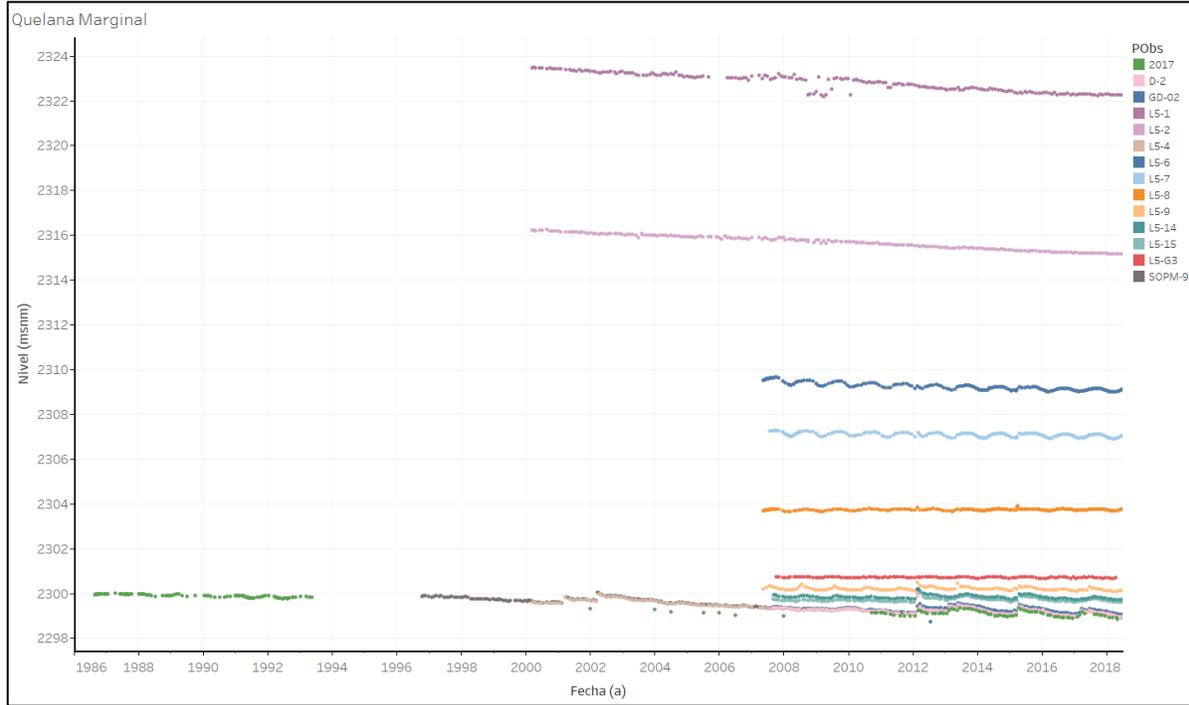


Figura 6-34. Registro de los niveles representativos de las distintas zonas (núcleo, marginal y aluvial) en el sector de Quelana.
Fuente: elaboración propia.

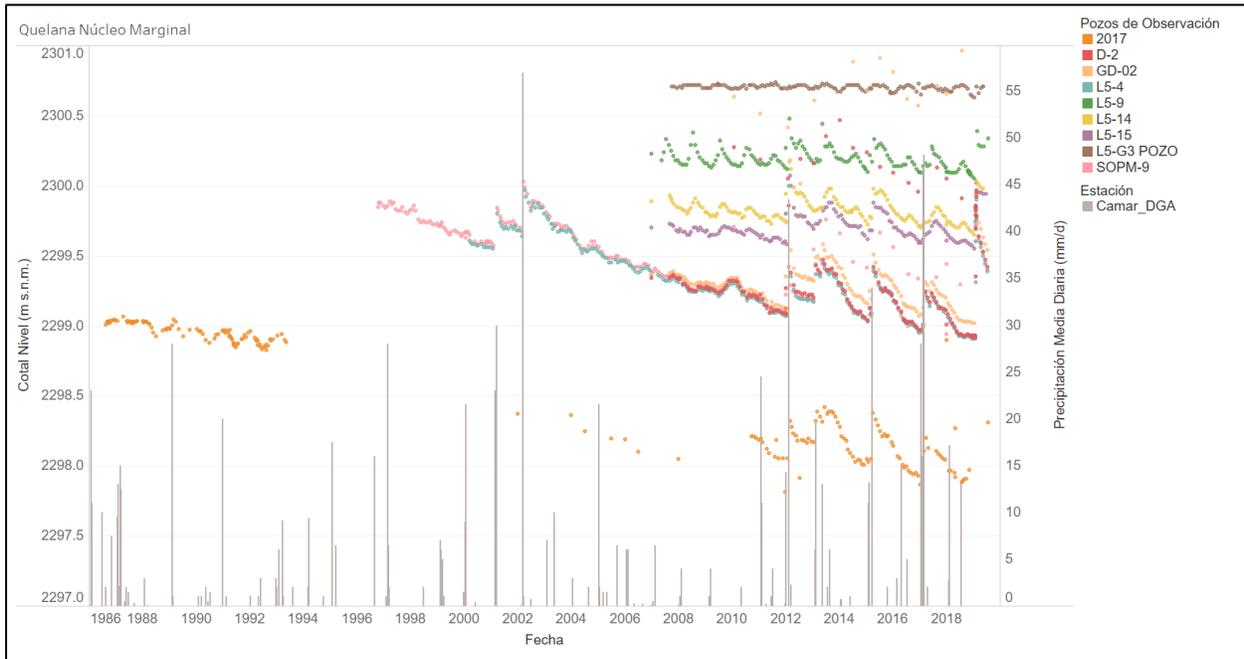


Figura 6-35. Registro de los niveles representativos del núcleo y zona marginal en el sector de Quelana y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Camar. Fuente: elaboración propia.

6.5.3.3 Sector Peine

En este apartado se analiza el comportamiento de los niveles históricos registrados en los puntos de observación del sector de Peine. Esta zona se caracteriza por la presencia de las lagunas Salada, Saladita e Interna, las cuales corresponden a zonas ambientalmente sensibles. Este sector se localiza principalmente en la UH Zona Marginal; no obstante, al igual que en los otros dos sectores, se considera el análisis de niveles de la UH Núcleo Superior y UH Aluvial, dada su importancia y relación hidrogeológica.

La Figura 6-36 muestra la distribución espacial de los pozos ubicados en este sector. En esta figura se identifican los pozos existentes y el tipo de comportamiento observado en cada uno de ellos en función de su tendencia y estacionalidad: núcleo, marginal y aluvial.

El pozo L10-18 se encuentra situado en plena UH Aluvial. En él se observa una oscilación interanual de los niveles, que está determinada por el efecto de la evaporación, presentando los máximos niveles a finales de invierno, y los mínimos a finales de verano. El nivel de este pozo se encuentra unos 9 m por encima del nivel de los pozos que se ubican en el núcleo del Salar en este sector (Figura 6-37). Además de la oscilación estacional, la tendencia de este pozo es plana (ni al ascenso ni al descenso).

El pozo L10-1, se encuentra situado en la zona de transición entre la UH Aluvial y la UH Zona Marginal, en la parte más distal del abanico aluvial de Peine. En la Figura 6-37 se puede apreciar que este pozo presenta un comportamiento distinto del resto, con una oscilación marcada por la estacionalidad de la evaporación y un leve ascenso de los niveles en los últimos 10 años. El pozo Cuña-6, también situado en la zona de transición entre la UH Aluvial y la UH Zona Marginal, muestra un comportamiento con tendencia plana (ni ascenso ni descenso), respondiendo sólo a la estacionalidad (Figura 6-37).

El resto de los pozos cuyos niveles se muestran en la Figura 6-37, muestran una tendencia de pozos tipo núcleo, sugiriendo que todos ellos logran ser levemente afectados por las extracciones desde el núcleo del Salar. Además, todos ellos responden a los peaks de precipitaciones. En la Figura 6-38 se muestran sólo los pozos cuyo comportamiento se asocia a la UH Núcleo Superior.

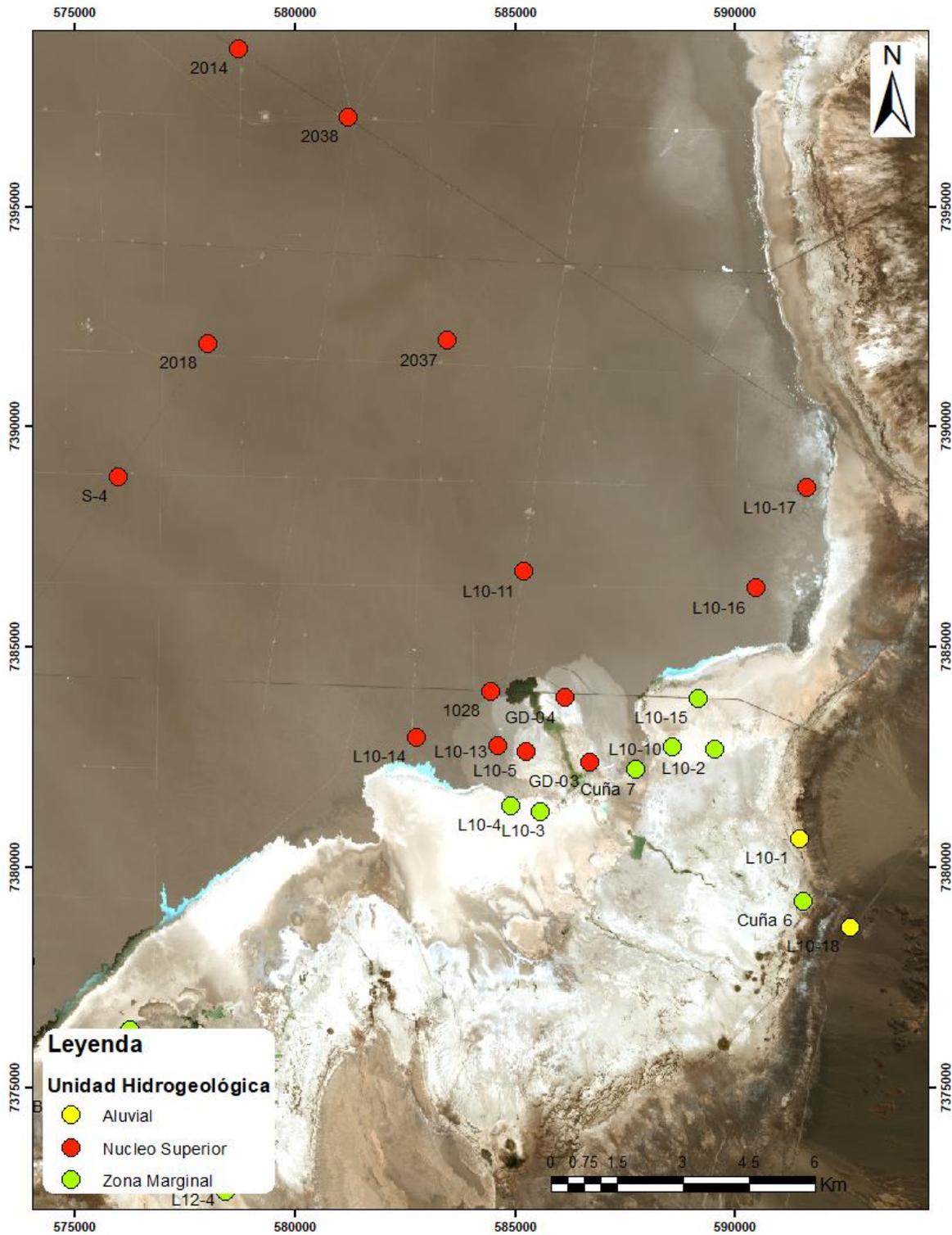


Figura 6-36. Puntos de observación de niveles, sector de Peine. Elaboración propia.



Figura 6-37. Registro de los niveles representativos del sector de Peine. Fuente: elaboración propia.

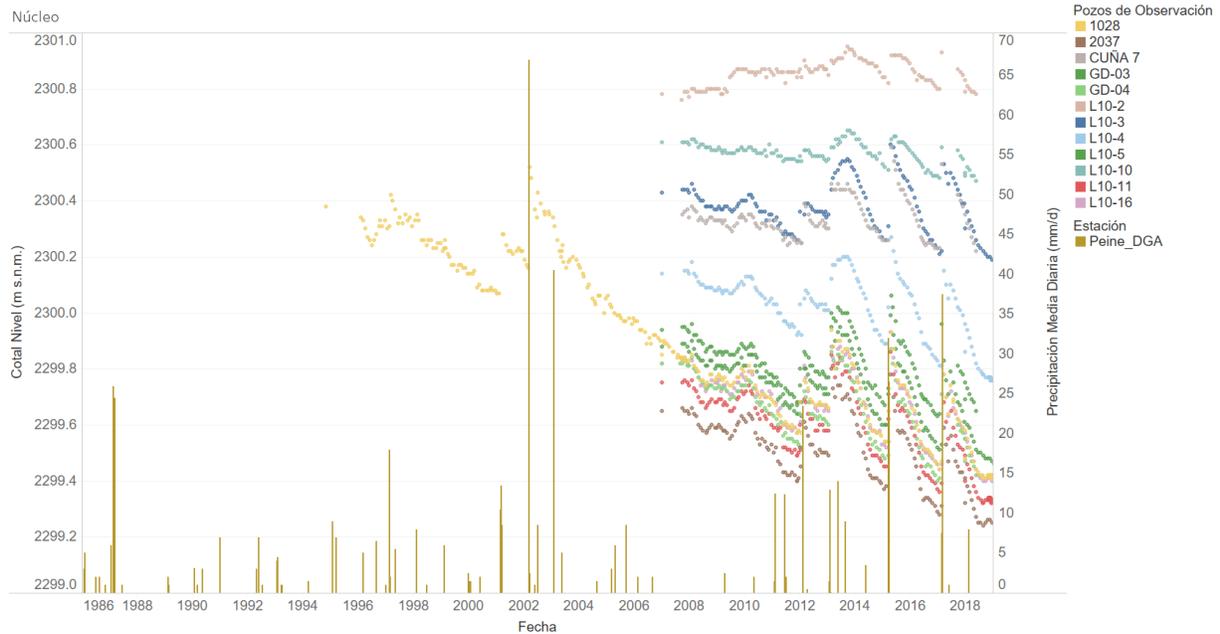


Figura 6-38. Niveles representativos del tipo núcleo y de la zona marginal en el sector de Peine. Para una mejor interpretación del comportamiento de los datos observados, se han cruzado con los datos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Peine. Fuente: elaboración propia

6.5.3.4 Sector Tilopozo

En el sector de Tilopozo, ubicado en el sur del Salar de Atacama, entre el cordón de Lila y el sector Peine, se encuentran las lagunas La Punta-La Brava, las cuales corresponden a los objetos de protección ambiental del sector. En la Figura 6-39 se identifican los pozos existentes en esta zona, cuyas series de niveles se presentan en la Figura 6-40. En esta última se observan pozos de observación con comportamiento típico de la UH Aluvial, UH Zona Marginal y UH Núcleo Superior, de acuerdo con su ubicación.

Los pozos representativos de la UH Zona Marginal (L12-2, L12-3, L12-4, BA-01, BA-02, BA-03, BA-08, BA-16, MP-03C) muestran registros de nivel oscilando alrededor de una cota fija, que varía en función de la posición del pozo. Mientras, los pozos más cercanos al núcleo presentan registros de nivel con oscilaciones de mayor amplitud y con una cierta tendencia al descenso (BA-10). Los más cercanos a la UH Aluvial (L12-4) muestran series con oscilaciones mucho más atenuadas entorno a niveles hidráulicos más altos y sin tendencia. Esto es consistente con lo observado en todos los otros sistemas locales.

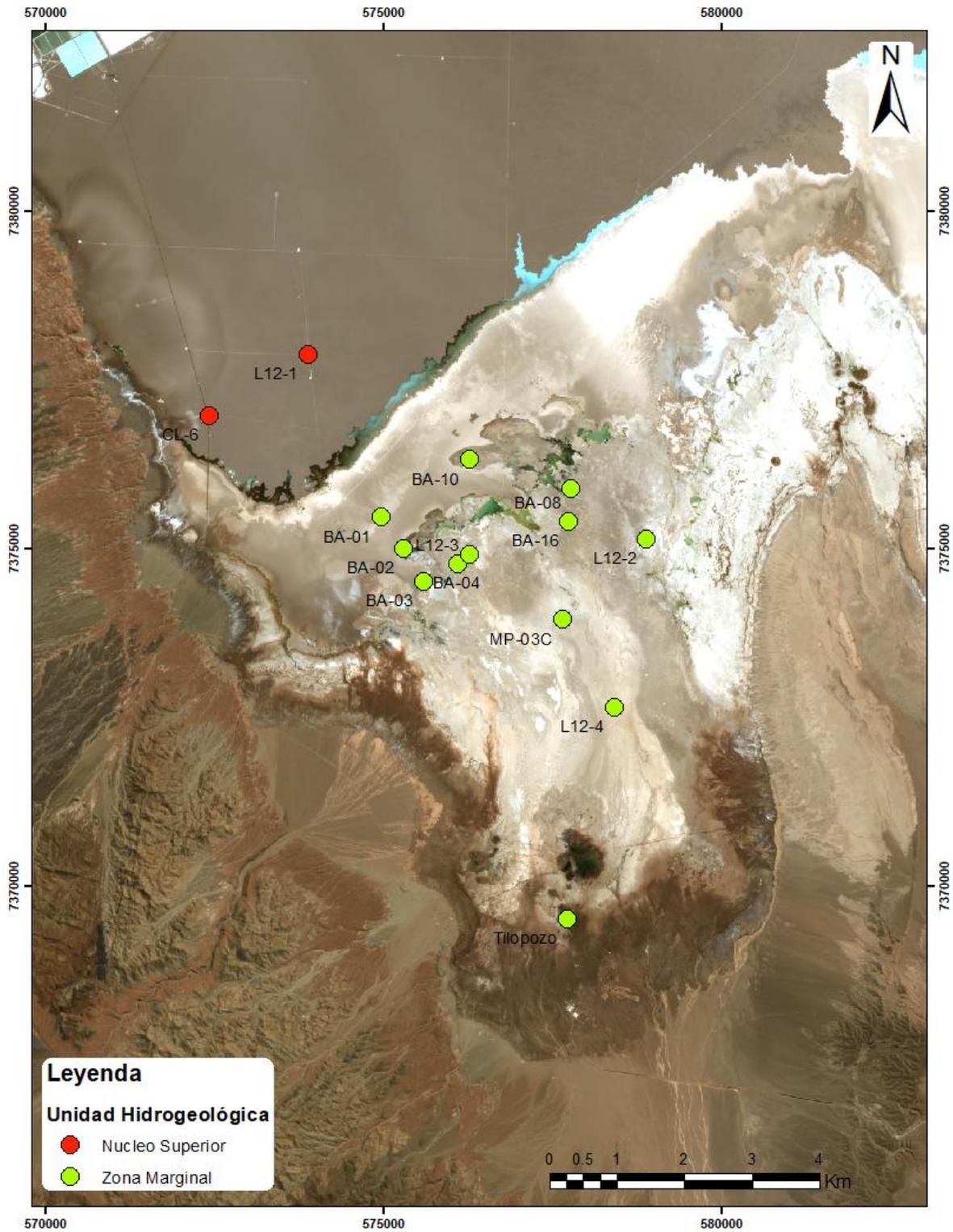


Figura 6-39. Puntos de observación sector de Tilopozo. En la imagen se han diferenciado algunos de los puntos representativos de los diferentes tipos de comportamientos (núcleo, marginal, aluvial). Elaboración propia.

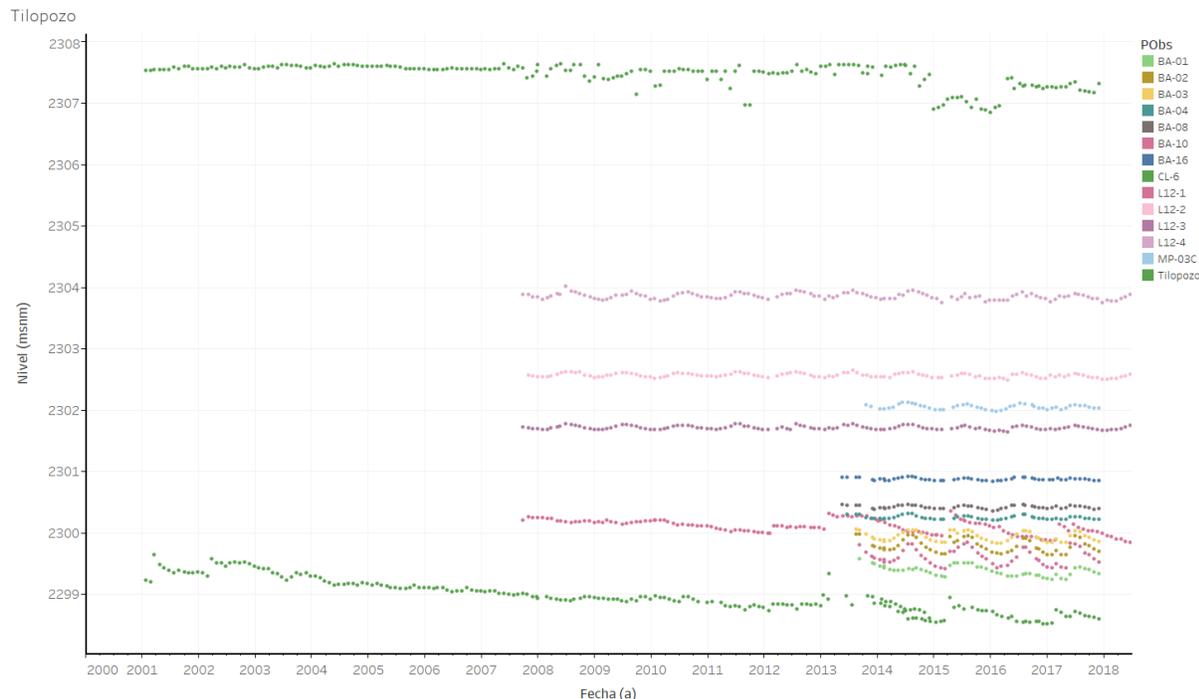


Figura 6-40. Registro de niveles representativos en el sector de Tilopozo. Fuente: elaboración propia.

6.5.4 Piezometría y direcciones de flujo

Para la confección de mapas piezométricos se considera la información de distintas fuentes de datos que poseen algún registro de nivel. Estas fuentes son mayoritariamente internas (Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico -PSAH- y Monitoreo No Operativo), o de registros históricos: datos del trabajo de Hydrotechnica (1987), MINSAL (1988) y MINSAL (1989). Otras fuentes de datos corresponden a la información disponible de Albemarle (ALB) y Minera Escondida Limitada (MEL), del trabajo de Water Management (1993) y del trabajo de RIOCHILEX (1999).

Para el análisis de la piezometría y caracterización del gradiente hidráulico se debe tener en consideración la diferencia entre el acuífero aluvial (agua, densidad $\sim 1,004 \text{ g/cm}^3$) y el reservorio del núcleo (salmuera, densidad $\sim 1,223 \text{ g/cm}^3$), y realizar una corrección por densidad, llevando los niveles a una misma referencia de agua equivalente. Sin embargo, considerando que existe un comportamiento que se puede asumir homogéneo en el núcleo y en el sistema aluvial -cada uno por separado-, se realiza un primer análisis piezométrico por separado entre estas dos grandes zonas, sin corregir los niveles por densidad, para luego compararlo con los resultados de una segunda iteración en la que sí se recurre a dicha corrección.

Por otro lado, para comparar la evolución de la piezometría en el tiempo y el impacto de la operación en los niveles y gradientes, se realizan mapas piezométricos representativos de tres momentos distintos: año 1986, diciembre de 2007 y diciembre de 2018. Por esta razón, en el presente capítulo se presentan

seis mapas piezométricos -dos por cada año de análisis-, y se compara, por separado, la evolución de los niveles en el núcleo y en la zona aluvial. El resumen de las fuentes y cantidad de datos utilizados para cada una de las interpolaciones se muestra en la Tabla 6-9. El detalle de los puntos de medición utilizados para realizar este análisis se presenta en los Anexos MC3 y MC6.

6.5.4.1 Sistema de salmuera

Los mapas piezométricos del núcleo, al año 1986, 2007 y 2018 se muestran en las Figura 6-41, Figura 6-42, y Figura 6-43. A partir del análisis de niveles, se desprenden los siguientes hechos generales:

- Entre los años 1986 y 2018, los niveles en el núcleo han sufrido una variación de hasta 12 m en el Bloque Oeste, efecto que tendría relación directa con la operación, mientras que el Bloque Este da cuenta de descensos de, en promedio, entre 0,5 y 1,5 m en 32 años (entre 1,5 y 4,6 cm/año), con máximos locales que no superan los 3 m de diferencia.
- Entre los años 2007 y 2018, el cambio de nivel más notorio ocurre también en el Bloque Oeste, donde en los dos sectores más deprimidos del año 2007 los niveles se mantienen relativamente iguales o más altos con respecto al 2018, mientras que el extremo suroeste experimenta el mayor abatimiento del nivel por efecto de la operación en dicho sector. En efecto, el sector SW no había experimentado cambios mayores en su nivel con respecto al año 1986.
- En el Bloque Este, en cambio, la diferencia de cota es de entre -0,5 y -0,1 m (descenso) en 11 años. Esto representa una tasa de descenso de entre 4.5 cm y 1.0 cm por año, consistente con la estimación realizada para el periodo 1986-2018 (Figura 6-47). Al contrario, los pozos SOPM-4 y L2-14 marcan las zonas de ascenso en el Bloque Este (0,38 y 0,29 m, respectivamente), de manera similar que el pozo M7 en el Bloque Oeste (6,92 m).
- Los bloques Este y Oeste, cuyo límite está dado por el Sistema de Falla Salar (SFS), pueden ser analizados por separado debido al notorio efecto de la operación sobre el Bloque Oeste, que no es reflejado de igual manera en el Bloque Este.
- En el Bloque Este, los niveles en los tres años revisados (1986, 2007 y 2018) muestran que las direcciones de flujo de primer orden son de sur a norte, presentándose mínimos piezométricos locales dentro de dicho bloque.
- El límite oriental, nororiental y suroriental del Bloque Este muestra un aumento abrupto del gradiente en las tres fechas revisadas, pasando de cotas del orden de 2300 m s.n.m. hasta 2303 m s.n.m. (1986), o menores a 2299 m s.n.m. y hasta 2305 m s.n.m. (año 2018) en distancias menores a 3 km (ej. sector Peine). Los mayores gradientes se observan aguas abajo del poblado de Peine.
- En el Bloque Oeste las isopiezas tienden a ser perpendiculares a todo el borde occidental, hacia donde se encuentra la Cordillera de la Sal, excepto en sectores puntuales del límite suroeste. Desde antes del comienzo de la operación de SQM, en este bloque se observa un mínimo

piezométrico aproximadamente en el sector centro-este, donde los niveles alcanzan a estar a cotas menores a 2299,8 m s.n.m. Al año 2018, este sector da cuenta del abatimiento del nivel producto de la operación, descendiendo hasta cotas menores a 2290 m s.n.m. en el límite suroccidental.

Año 1986 (Figura 6-41)

Los niveles más deprimidos se observan en el Bloque Oeste, donde localmente la cota de nivel alcanza a quedar bajo los 2299,8 m s.n.m. Similarmente, en el Bloque Este los mínimos piezométricos quedan apenas por debajo de la cota 2300 m s.n.m. en todo el sector central de dicho bloque, y bajo la cota 2299,8 m s.n.m. hacia el extremo norte del núcleo. Los niveles más altos en el Bloque Oeste se alcanzan en el extremo suroeste (~2300,5 m s.n.m.), mientras que en el Bloque Este es el extremo centro-sur, al sureste de la península de Chépica, en donde los niveles se aprecian a una cota mayor, alcanzando la cota 2300,8 m s.n.m.

Respecto del gradiente, éste tiende a ser bajo en el núcleo, con variaciones de nivel que son máximas inmediatamente al sur de donde se encuentran actualmente las pozas del MOP, del orden de 50 cm en una distancia de 3 km. Los gradientes más altos se observan hacia los bordes del núcleo, específicamente en los límites sur, norte y este.

Las líneas de flujo del Bloque Este se disponen principalmente de sur a norte, y desde el este y el oeste hacia el centro del Bloque. Por su parte, en el Bloque Oeste marcan una dirección tanto de sur a norte como de norte a sur, encontrándose en el centro del Bloque, aproximadamente en el sector entre las actuales pozas del MOP y SOP.

Finamente, cabe destacar que las isopiezas son perpendiculares a la Cordillera de la Sal, lo que representa un borde por donde los ingresos serían marginales o nulos. En el sector inmediatamente al oeste del Sistema de Falla Cabeza de Caballo (SFCC), desde el sur hasta el centro del núcleo, se observan altos piezométricos tendientes a estar alineados con la traza de dicha estructura. Inmediatamente al este del Sistema de Falla Salar (SFS), existen altos piezométricos locales donde los niveles quedan por sobre los 2300,2 m s.n.m.

Año 2007 (Figura 6-42)

Los niveles más deprimidos se observan en el Bloque Oeste, en la zona central inmediatamente al oeste de la traza del Sistema de Falla Cabeza de Caballo (SFCC). Allí, los niveles descienden por debajo de la cota 2290 m s.n.m. Hacia el sur, también al oeste del SFCC, se distingue otro bajo piezométrico en donde la cota más baja queda por debajo de los 2296 m s.n.m. Por su parte, en el sector central y norte del Bloque Este se observan mínimos piezométricos que, no obstante, no alcanzan a ser menores a la cota 2298.

Los niveles más altos en el Bloque Oeste se alcanzan en el extremo suroeste (~2300,5 m s.n.m.), mientras que en el Bloque Este es el extremo sur en donde los niveles se aprecian a una cota mayor, alcanzando la cota 2308 m s.n.m. El gradiente es mayor en los límites sureste, este y noreste del área del

núcleo, y localmente cercano a los sectores del Bloque Oeste donde existe operación a esa fecha. Desde el sur, siguiendo la traza del SFS, las isopiezas tienden a alinearse con respecto a dicha estructura.

Por su parte, existen bajos piezométricos locales en el bloque este que, por ausencia de más datos, se han presentado de manera aislada en lugar de representar una gran zona como en la interpolación al año 1986 (Figura 6-41). No son valores excesivamente bajos (2299 m s.n.m.) y siguen siendo consistentes con una dirección de flujo de sur a norte. Sin embargo, la presencia de estos bajos piezométricos puntuales podría estar asociada a una diferencia en las características hidrogeológicas del sector, siendo una zona de menor conductividad hidráulica que el entorno y, por tanto, siendo más pronunciado el efecto de la evaporación.

Año 2018 (Figura 6-43)

Los niveles más deprimidos se observan en el Bloque Oeste, en el extremo suroeste del área del núcleo (niveles bajo 2290 m s.n.m.). Similar a lo observado en el año 2007, en el sector inmediatamente al este de la península de Chépica se observan también mínimos piezométricos que pueden atribuirse a la operación en dicho sector (bajo cota 2293). En el Bloque Este, en cambio, los niveles no descienden por debajo de la cota 2297, observándose de igual forma estos mínimos en el sector central del Bloque.

Los niveles más altos en el Bloque Oeste se alcanzan en el sector central, donde el cese de la operación en la zona habría permitido recuperar los niveles por sobre la cota 2298 m s.n.m. En el extremo sureste de este bloque, en el entorno del SFS, sigue observándose el alto piezométrico alineado con dicha estructura. El Bloque Este mantiene el mismo comportamiento que en los años anteriores, con niveles que habrían descendido hasta poco más de 2 m desde el año 1986. El gradiente es mayor en los límites sureste, este y noreste del área del núcleo, y localmente cercano a los sectores del Bloque Oeste donde existe operación a esa fecha.

Tabla 6-9. Resumen de los antecedentes considerados para la interpolación de nivel y consecuente generación de mapas piezométricos.

Año	Zona	Método Interpolación	Número de Puntos	Fuentes de datos
1986	Núcleo	Radial Basis Function y Topo to Raster	99 puntos, correspondientes al nivel promedio del año 1986 de los piezómetros ubicados dentro del área del “Modelo-Núcleo” y, localmente, fuera de él en el entorno cercano (sector norte).	Serie Histórica (51 puntos: pozos de Hydrotechnica documentados en informe MINSAL 1989) y Proyección de datos: ALB+MEL (2), WM 1993 (2).
	Externo	Radial Basis Function y Topo to Raster	93 puntos, correspondientes al nivel promedio del mes de año 1986 de los piezómetros ubicados fuera del área del núcleo y, localmente, dentro del dicha área en los bordes norte, sur y este.	Serie Histórica (45 puntos: pozos de Hydrotechnica documentados en informe MINSAL 1989) y Proyección de datos: ALB+MEL (1), RIOCHILEX 1999 (10), PSA (13), Proyección Serie Histórica (3), Clay Area (21).
2007	Núcleo	Radial Basis Function y Topo to Raster	240 puntos, correspondientes al nivel promedio del mes de diciembre de 2007, de los piezómetros ubicados dentro del área del “Modelo-Núcleo” y, localmente, fuera de él en el entorno cercano (sector norte).	Serie del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA; 47 puntos), datos de Albemarle (ALB) y Minera Escondida Limitada (MEL), homologados (25 puntos) y Monitoreo No Operativo (8).
	Externo	Radial Basis Function y Topo to Raster	219 puntos, correspondientes al nivel promedio del mes de diciembre de 2007, de los piezómetros ubicados fuera del área del núcleo y, localmente, dentro del dicha área en los bordes norte, sur y este.	Serie del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA; 165 puntos) y datos de Albemarle (ALB) y Minera Escondida Limitada (MEL), homologados (36 puntos).
2018	Núcleo	Radial Basis Function y Topo to Raster	378 puntos, correspondientes al nivel promedio del mes de diciembre de 2018, de los piezómetros ubicados dentro del área del “Modelo-Núcleo” y, localmente, fuera de él en el entorno cercano (sector norte).	Serie del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA; 155 puntos), datos de Albemarle (ALB) y Minera Escondida Limitada (MEL), homologados (155 puntos) y Monitoreo No Operativo (68).
	Externo	Radial Basis Function y Topo to Raster	299 puntos, correspondientes al nivel promedio del mes de diciembre de 2018, de los piezómetros ubicados fuera del área del núcleo y, localmente, dentro del dicha área en los bordes norte, sur y este.	Serie del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA; 174 puntos), datos de Albemarle (ALB) y Minera Escondida Limitada (MEL), homologados (113 puntos) y Monitoreo No Operativo (12)

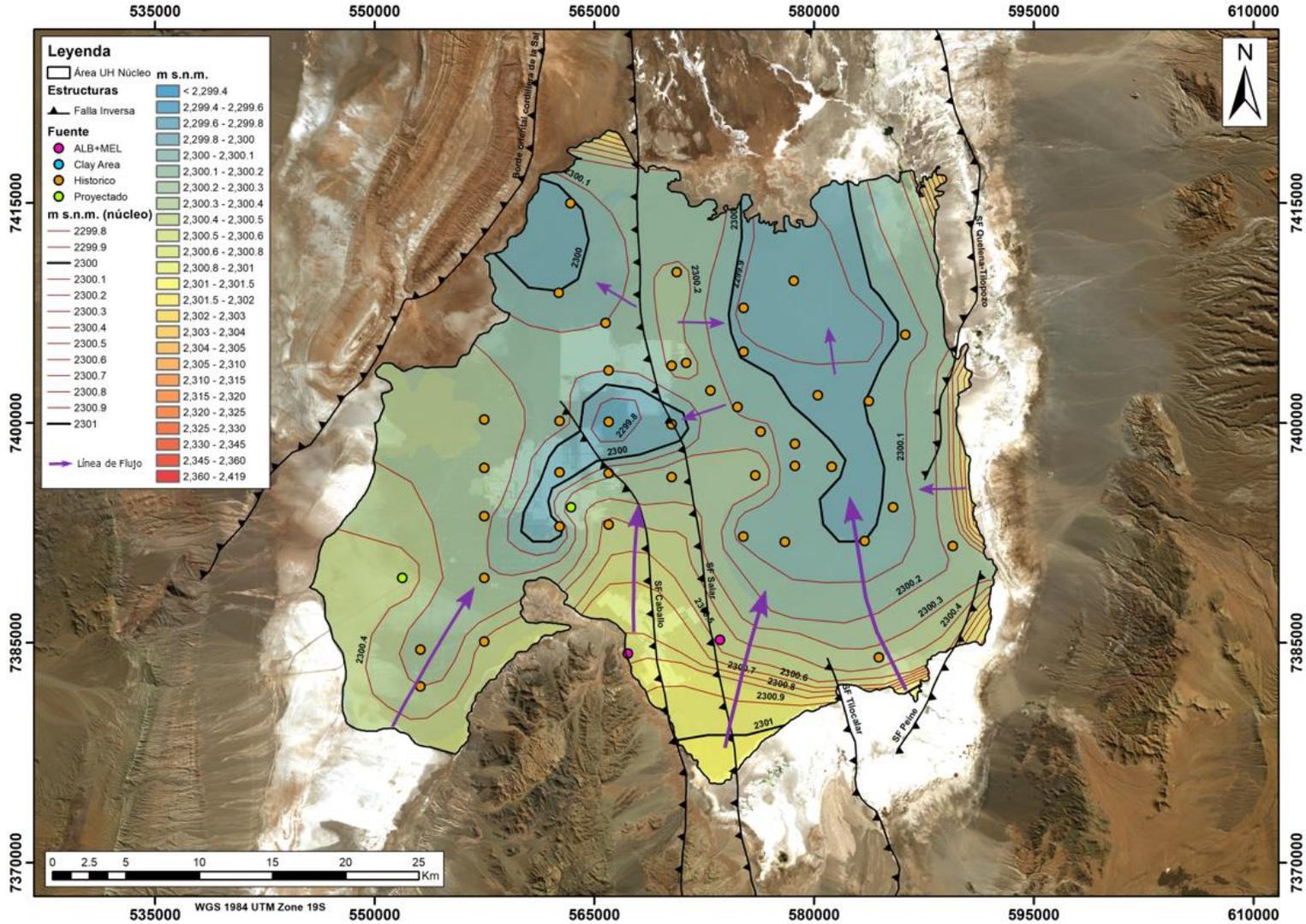


Figura 6-41. Mapa piezométrico e isopiezas del núcleo, al año 1986. Fuente: elaboración propia.

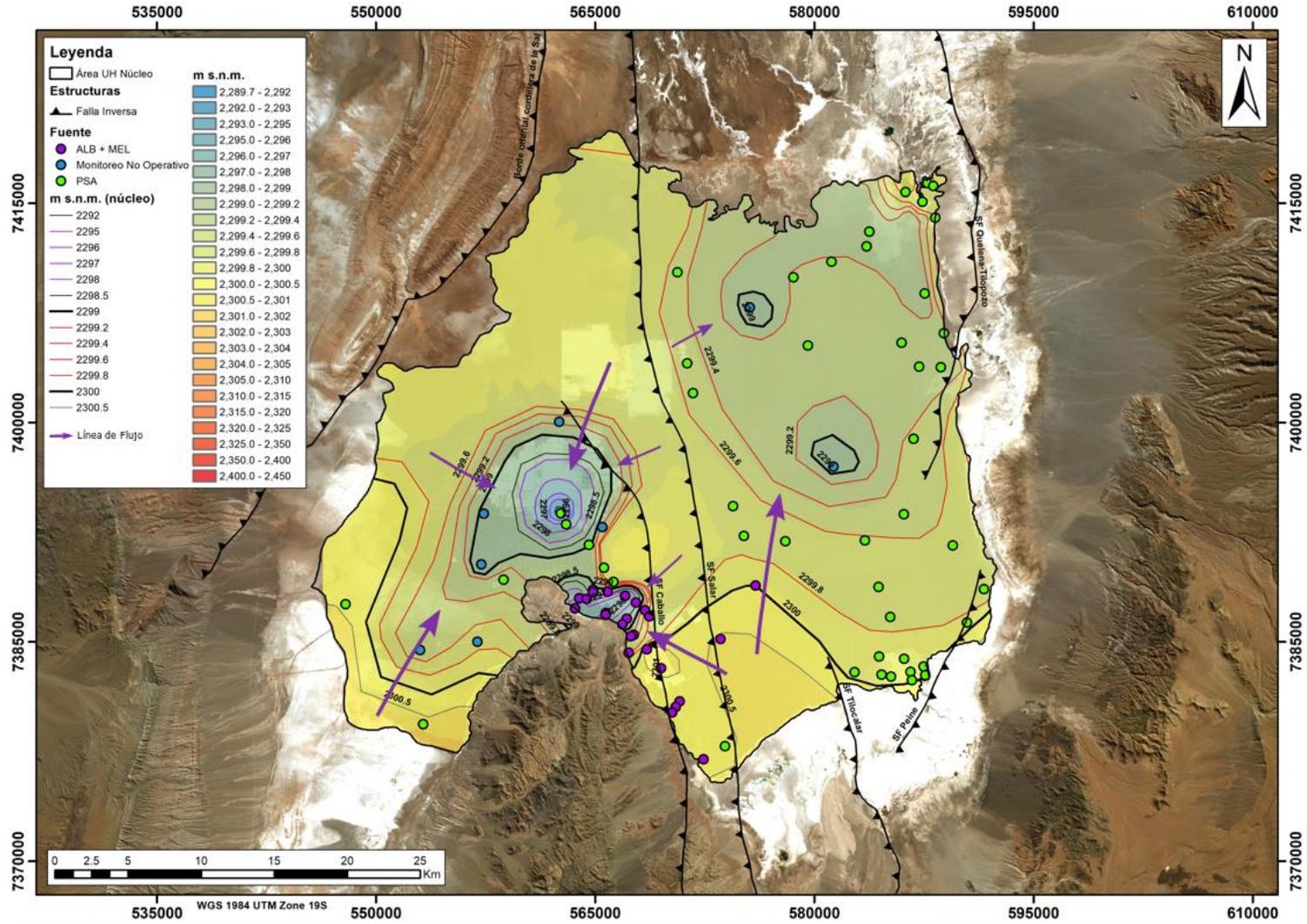


Figura 6-42. Mapa piezométrico e isopiezas del núcleo, a diciembre 2007. Fuente: elaboración propia.

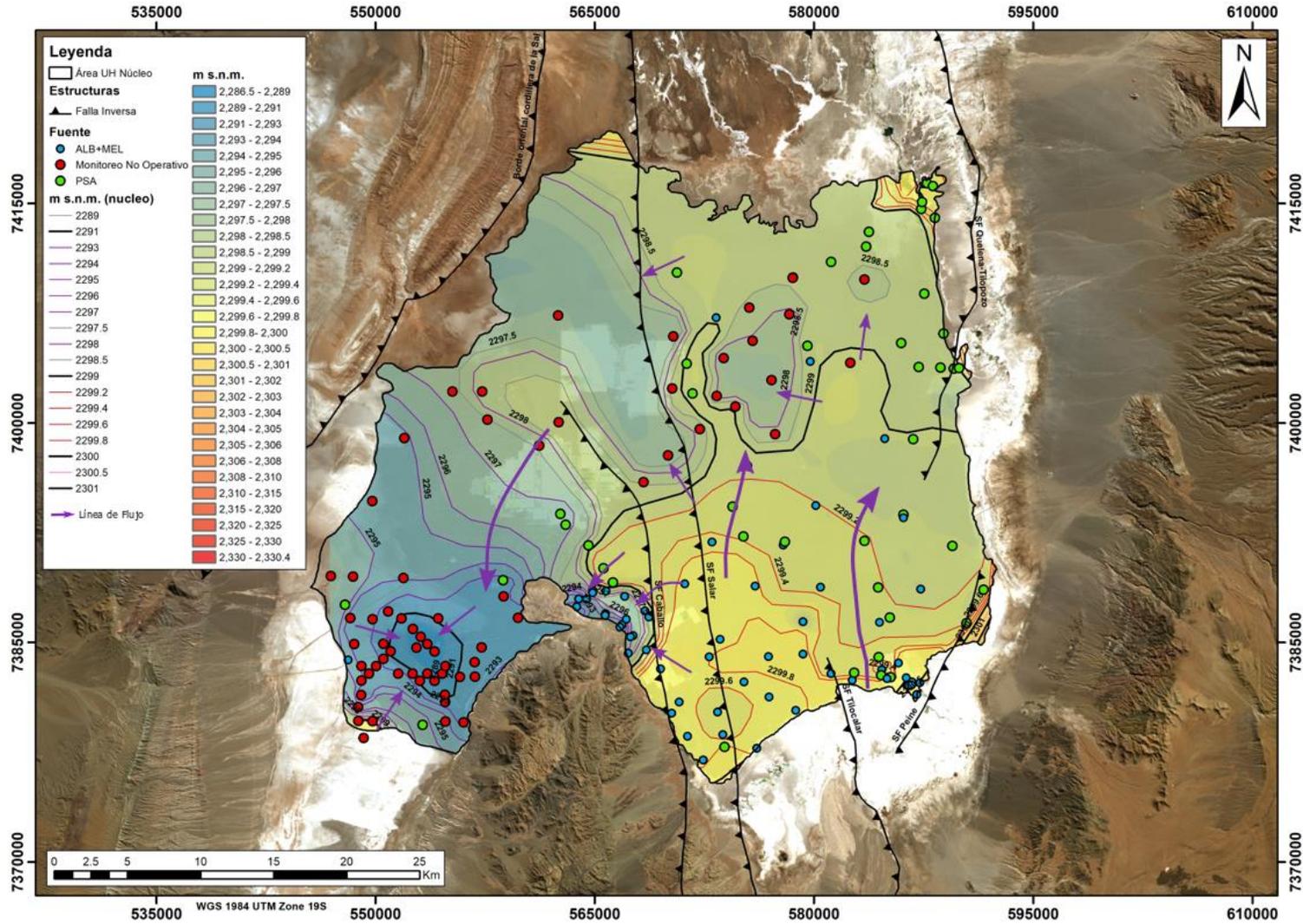


Figura 6-43. Mapa piezométrico e isopiezas del núcleo, a diciembre, 2018. Fuente: elaboración propia.

6.5.4.2 Sistema de agua

Los mapas piezométricos que describen el acuífero de agua, al año 1986, 2007 y 2018 se muestran en la Figura 6-44, Figura 6-45, y Figura 6-46. En términos generales, las variaciones de nivel son de poca magnitud, en general no superior a los 2 m, y las tendencias en relación con el gradiente hidráulico, entre los tres años analizados, son equivalentes. Sólo se observan variaciones en aquellos sectores puntuales donde se han puesto en operación pozos de extracción de agua industrial. En particular, en la piezometría del año 2007 ya se reconoce el efecto de la operación de los pozos P-2 (inicio operación: 1998) y SOCAIRE-5B (inicio operación: 1997).

En cuanto a las direcciones de flujo, en el margen oriental las isopiezas se disponen con una orientación NNE-SSW, indicando una dirección de flujo desde el NNE hacia el SSW. Hacia el norte la cantidad de datos disponibles es limitada; aun así, la distribución de niveles sugiere una orientación de las isopiezas en W-E y un flujo de N-S a NNE-SSW.

Los datos disponibles son consistentes con un límite de no-flujo por el oeste, hacia el sector de la Cordillera de la Sal. Al otro extremo, en cambio, el gradiente es alto cercano al núcleo, observándose variaciones de nivel que alcanzan los 14 m en una distancia de 2,5 km en el sector de Quelana (0,56 cm por cada 100 m).

Respecto de la variación de niveles entre los años 2007 y 2018, la tendencia general indica un descenso de entre 0 y -1,5 m en toda la UH Aluvial, con una tendencia a ser progresivamente mayor mientras más al este se ubique el pozo (Figura 6-47). Cabe destacar, además, la estabilidad de los niveles observados en la UH Zona Marginal, con descensos leves respecto de lo observado al este hacia la UH Aluvial, entre 0 y -0.5 m en el período analizado. Esto puede estar asociado tanto a la desconexión que existe entre la Zona Marginal y el Núcleo, al menos desde el punto de vista del impacto de la operación en los niveles - como se mencionó en el capítulo 6.5.2- y al radio de influencia del bombeo de pozos de agua industrial, los que -al menos hasta el periodo revisado- no alcanzarían aún la Zona Marginal. Por otro lado, los descensos observados en el núcleo responden no sólo a los efectos del bombeo de salmuera sino que también al descenso natural que se observa en este sector desde antes que existiera operación (ver Figura 6-24 y Figura 6-26).

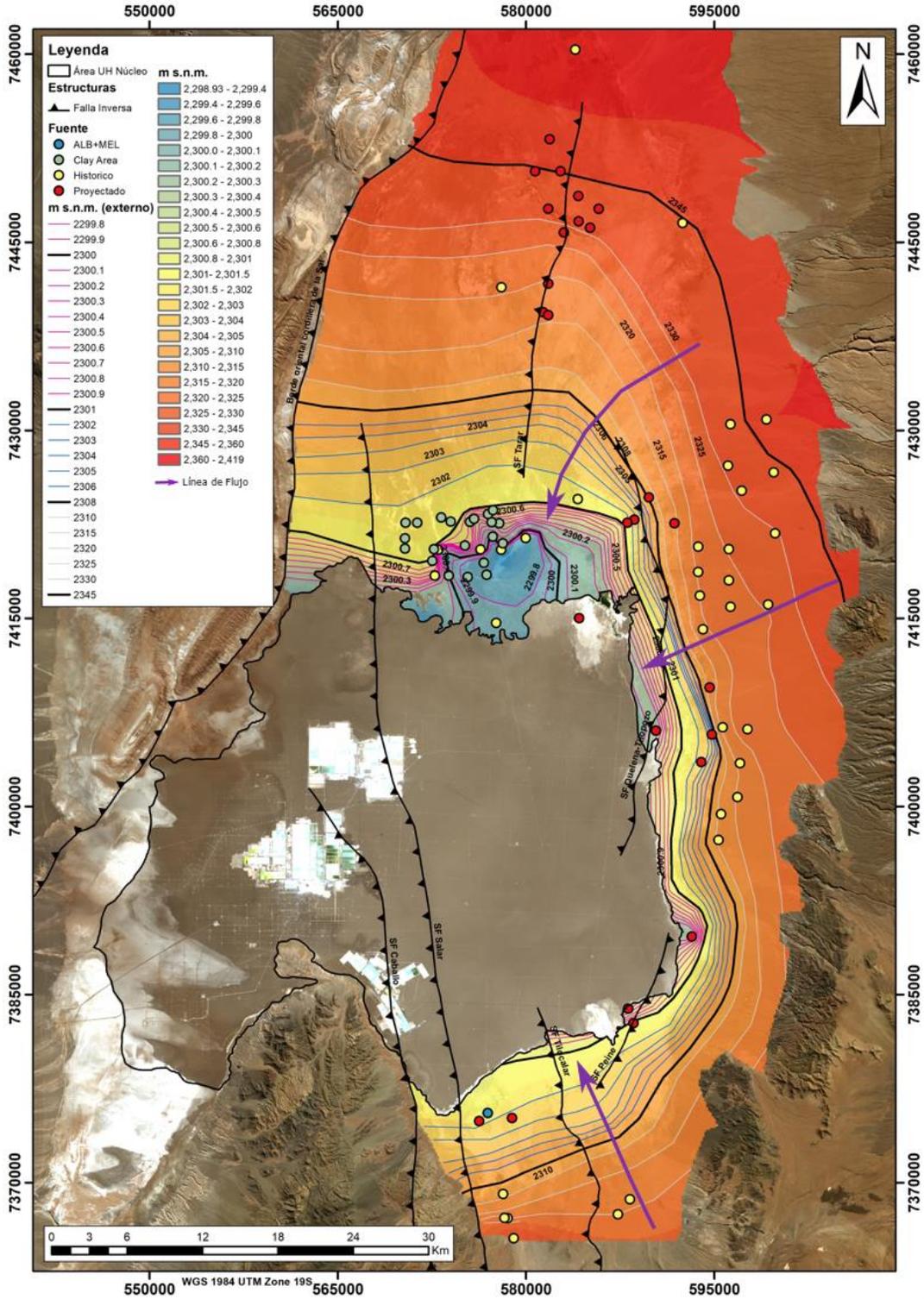


Figura 6-44. Mapa piezométrico e isopiezas del margen, al año 1986. Fuente: elaboración propia

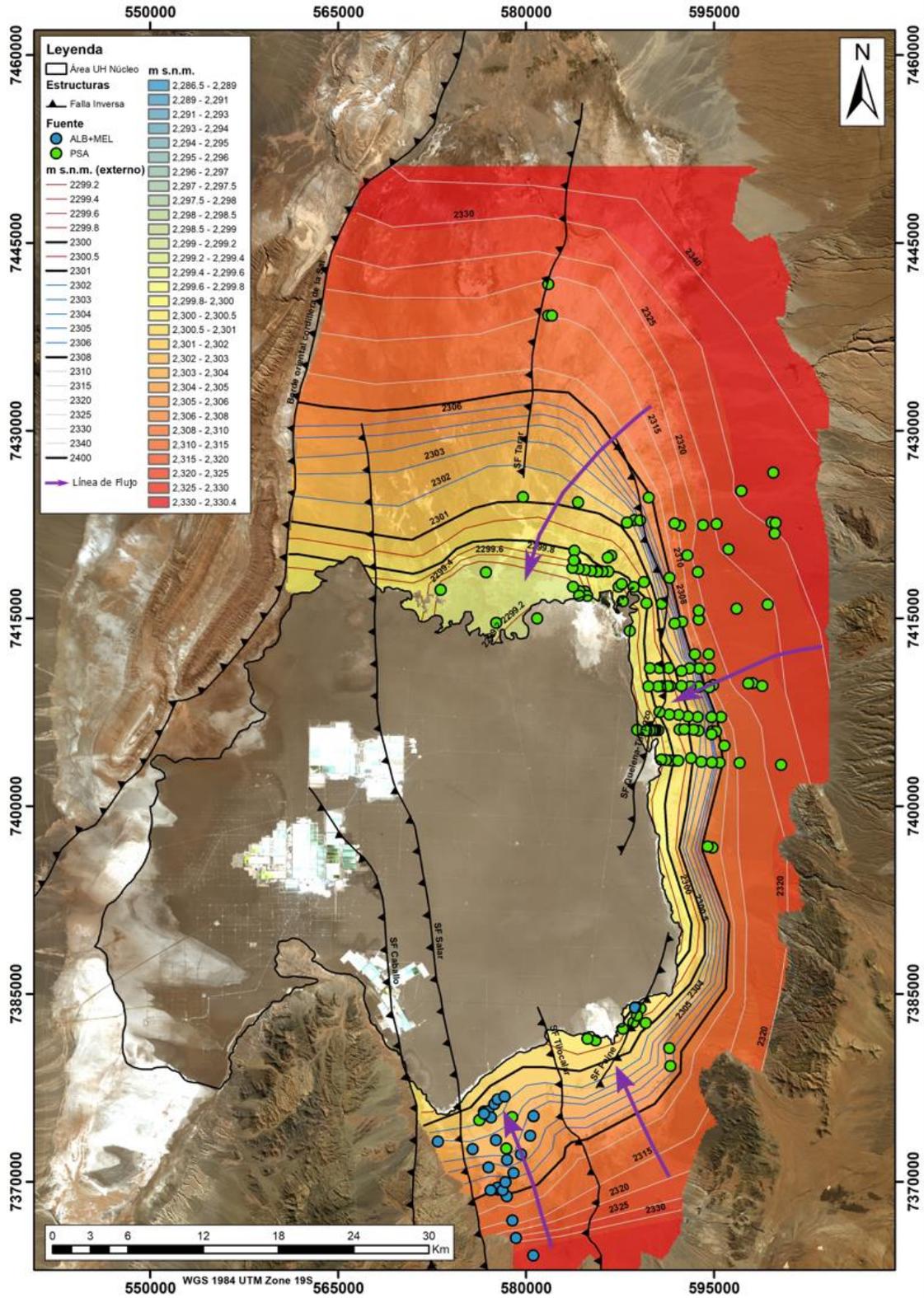


Figura 6-45. Mapa piezométrico e isopiezas del margen, a diciembre 2007. Fuente: elaboración propia

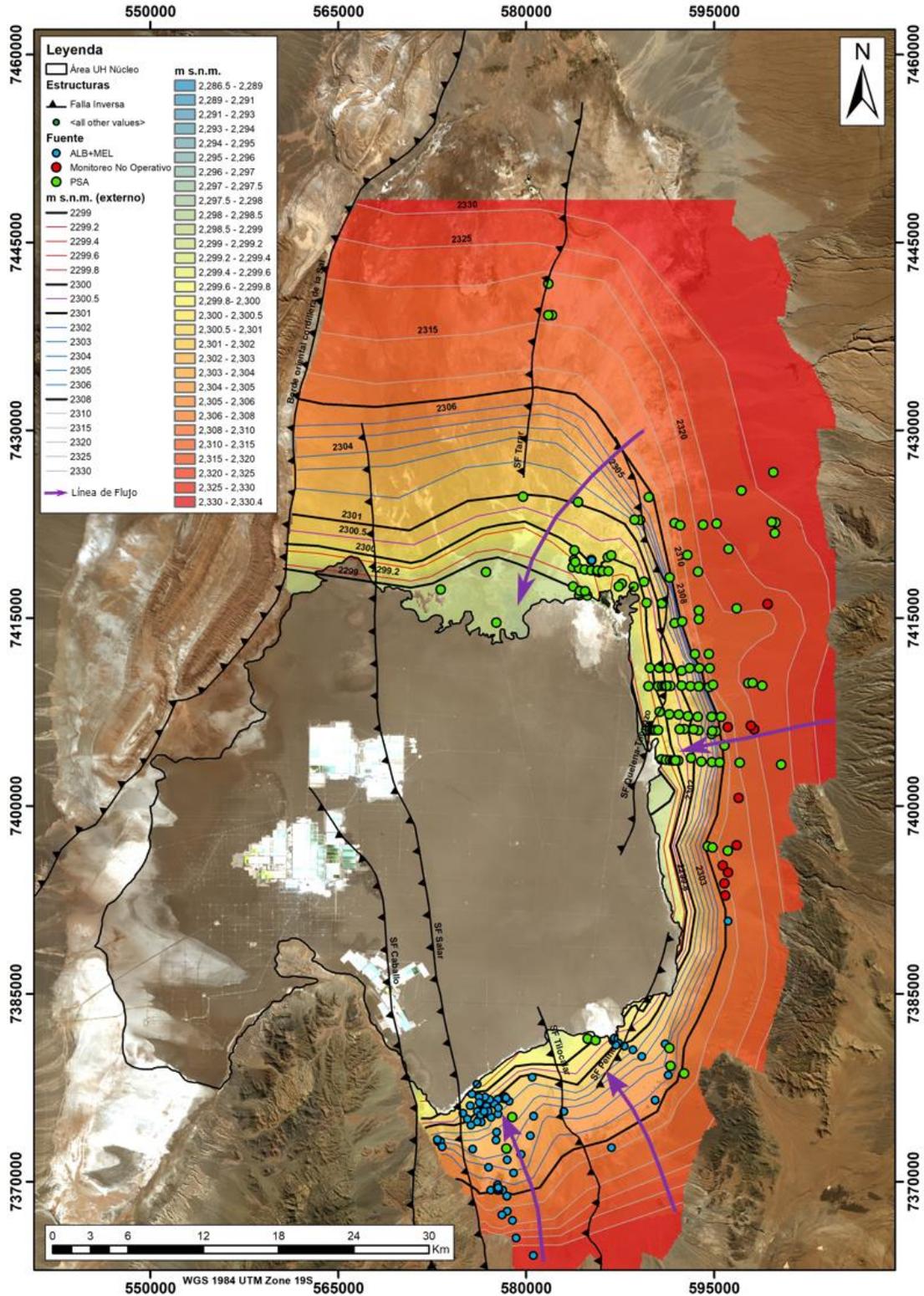


Figura 6-46. Mapa piezométrico e isopiezas del margen, a diciembre, 2018. Fuente: elaboración propia

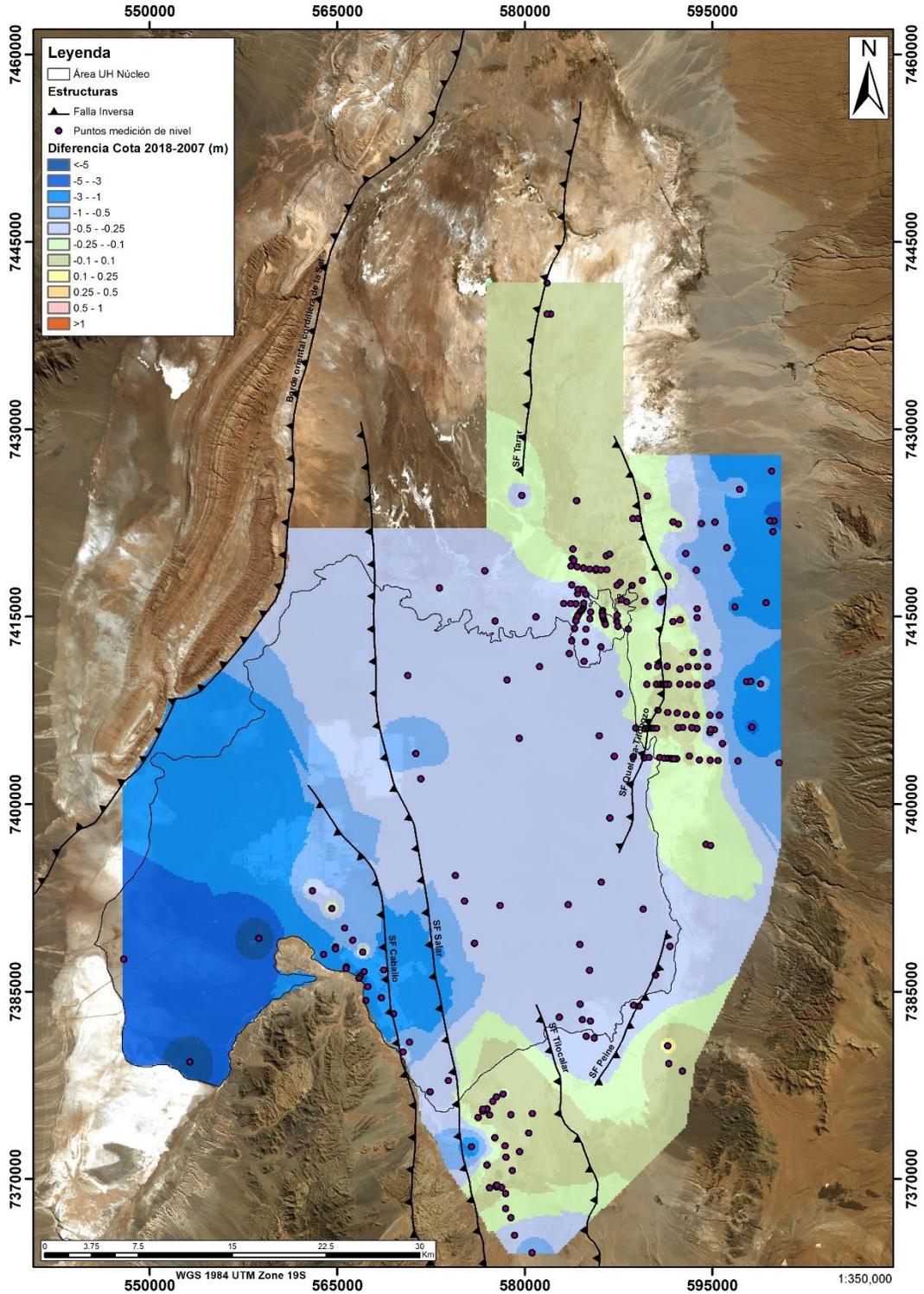


Figura 6-47. Interpolación (IDW) a partir de la diferencia de cota de nivel entre diciembre de 2007 y diciembre de 2018. Valores negativos representan descensos de nivel. Fuente: elaboración propia.

6.5.4.3 Corrección por densidad

Para evaluar el efecto de la diferencia de densidad entre el agua y la salmuera y, consecuentemente, estudiar la piezometría de los sistemas núcleo-marginal-aluvial en conjunto, se opta por efectuar la corrección por densidad a agua dulce ($\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$) utilizando la ecuación 12 descrita por Post et al. (2007). La formulación de dicha expresión se muestra en la Figura 6-48.

Esta expresión añade un factor adicional a la habitual ecuación 6 (Figura 6-48; Post et al., 2007), el cual permite corregir no sólo el fluido contenido en el tramo ranurado del pozo, sino que también el aporte del mismo acuífero que no alcanza a ser captado por el pozo (ver ejemplo Figura 6-48). Se considera idóneo utilizar este método debido a que se tiene seguridad que sigue existiendo fluido en el medio en tramos más profundos al de captura del pozo, y se cuenta con una amplia diversidad de diseños de pozos que, de usar la ecuación 6, serían difícilmente comparables. Lo que se busca, en definitiva, es hacer comparable la carga hidráulica de pozos que no son directamente comparables por tener profundidades distintas y, por tanto, percibir una carga hidráulica de salmuera también distinta.

Para utilizar esta expresión se deben cumplir ciertos requisitos y asumir ciertos supuestos, los que se detallan a continuación:

1. Se debe definir un DATUM de referencia. En general, utilizar el nivel del mar es lo más práctico debido a que los instrumentos miden las cotas con respecto a ella.
2. Se debe conocer la densidad en la cota de medición (Z_i). Dado que en la práctica se toma una muestra representativa del pozo y no a una profundidad en específico, se asume que ella es representativa de la columna de agua que aportará a la altura de presión.
3. Se debe conocer el diseño del pozo. En particular, si se considerará el fondo del pozo como la cota de medición (Z_i), debe conocerse dicha profundidad o, en su defecto, la profundidad máxima del tramo ranurado. En caso de que se utilice el punto medio del tramo ranurado, lo cual Post et al. (2007) también sugiere como válido, se tendría que conocer la cota de inicio y término de la ranura para definir dónde estaría la cota intermedia. En la aproximación actual, se utiliza el fondo de cada pozo como la cota de medición.
4. Se debe definir una cota de referencia a la cual realizar la corrección (Z_r). Se puede considerar, por ejemplo, la cota del fondo de aquel pozo más profundo (menor cota), la de alguna infraestructura de interés o cualquier otra cota que sea conveniente utilizar de acuerdo con el estudio que se realice. En el presente estudio, se toma la cota 2260 m s.n.m. como la referencia debido a su sentido hidrogeológico: la base de la UH Núcleo Superior puede asumirse que, en promedio, se encuentra aproximadamente a dicha cota, a la vez que la UH Aluvial se sabe con certeza que también se encontrará a dicha profundidad. Es decir, un pozo que tenga su cota de fondo de pozo a los 2295 m s.n.m. probablemente tenga por debajo 35 metros más de acuífero que se considera necesario compensar. Esto es un supuesto fuerte ya que es sabido que la cota de la base de las unidades hidrogeológicas es variable. Sin embargo, parece más razonable que sólo tomar el tramo de captura de cada pozo cuando ellos tienen diseños muy disímiles.

5. Se debe conocer el perfil de densidad en profundidad, o la densidad promedio (ρ_a), para el tramo entre la cota de referencia (Z_r) y la cota de medición (Z_i). A pesar de que no se cuenta con dicho registro en detalle, como la comparación que se desea realizar es entre dos sistemas muy distintos entre ellos (salmuera versus agua), se considera que esta densidad será la misma medida en el pozo. Es decir, se asume que el tramo adicional que se compensará por debajo la base de cada pozo posee un fluido con la misma densidad que la medida en la infraestructura, sea dicho fluido agua, salmuera o agua salobre, según corresponda.
6. Se debe definir la densidad del fluido de referencia con respecto al cual realizar la corrección. En este caso, se considera el agua ($\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$) como dicho fluido.

De manera conceptual, se debe tener en consideración que un determinado volumen de fluido con mayor densidad tiene más peso que un mismo volumen de otro fluido de menor densidad. Análogamente, dos fluidos de distinta densidad, pero igual masa, ocuparán un volumen distinto, siendo el de mayor densidad el que ocupe el menor volumen.

Considerando lo anterior, una manera simple de entender qué significa la corrección por densidad es considerando que, al corregir desde salmuera (ej. $\rho_s = 1.22 \text{ g/cm}^3$) a agua dulce ($\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$), se está evaluando cuánto volumen ocuparía dicha salmuera si, manteniendo su masa, disminuyera su densidad. En ese escenario, sus partículas se separarían respecto de su estado inicial y el volumen resultante sería, por supuesto, mayor. Sin embargo, dado que el contenedor de la salmuera -el acuífero o reservorio- tiene un volumen limitado, ocurrirá que la presión equivalente que se ejercería si el fluido fuese agua dulce sería más alta. Por lo tanto, el nivel piezométrico que se mediría, si fuese agua dulce, sería mayor.

En resumen, al corregir por densidad hacia agua dulce, los niveles de salmuera ascenderán respecto de su valor inicial, mientras que los niveles de agua dulce tenderán a mantenerse similares. Por ejemplo, si se utiliza la ecuación 12 con todos los supuestos antes descritos, el nivel corregido de un pozo de salmuera, cuya base se encuentra a la cota 2295 m s.n.m., será mayor utilizando esta ecuación que utilizando la ecuación 6, ya que se añaden 35 m de aporte a la compensación (diferencia entre $Z_i = 2295$ y $Z_r = 2260$ m s.n.m.). A modo de referencia, para un pozo de salmuera de 5 metros de profundidad y cota sin corregir a los 2299 m s.n.m., esta diferencia sería de alrededor de 8 metros (2299.8 vs 2307.3 m s.n.m., entre la ecuación 6 y la ecuación 12, respectivamente).

El resultado de la corrección por densidad para los pozos del núcleo, tomando los niveles medidos a diciembre de 2018, se muestra en la Figura 6-49 y Figura 6-50. En particular, la sección de la Figura 6-50 da cuenta del efecto de la corrección sobre los niveles de la UH Núcleo Superior, cuyo nivel de agua equivalente los ubica por sobre los niveles de la UH Zona Marginal. En esta última se genera un bajo piezométrico que luego asciende nuevamente hacia la UH Aluvial. Es decir, la carga energética que posee la salmuera permitiría que se generen flujos convectivos desde el núcleo hacia la zona marginal. El detalle de los datos utilizados para realizar este análisis se presenta en el Anexo MC6.

$$h_{f,r} = z_r + \frac{P_r}{\rho_f g} = z_r + \frac{\rho_i}{\rho_f} \overbrace{(h_i - z_i)}^{AP} - \frac{\rho_a}{\rho_f} (z_r - z_i) \quad (12)$$

Carga Potencial

Densidad observada vs densidad hacia la cual corregir para el tramo ranurado.

Densidad promedio vs densidad hacia la cual corregir, entre la cota de referencia y la de medición.

La ecuación 12 (Post et al., 2007) permite corregir los niveles por densidad considerando no sólo el tramo de captura del pozo, sino que la porción de fluido que pueda existir bajo dicho tramo. Esto es particularmente útil en sistema como el estudiado ya que, por ejemplo, al corregir una infraestructura de sólo 1 m de profundidad, con la ecuación habitual (ecuación 6, Post et al., 2007) se estaría omitiendo el aporte que genera a la corrección de nivel los 20 o 30 m restantes que existen de acuífero bajo dicho metro.

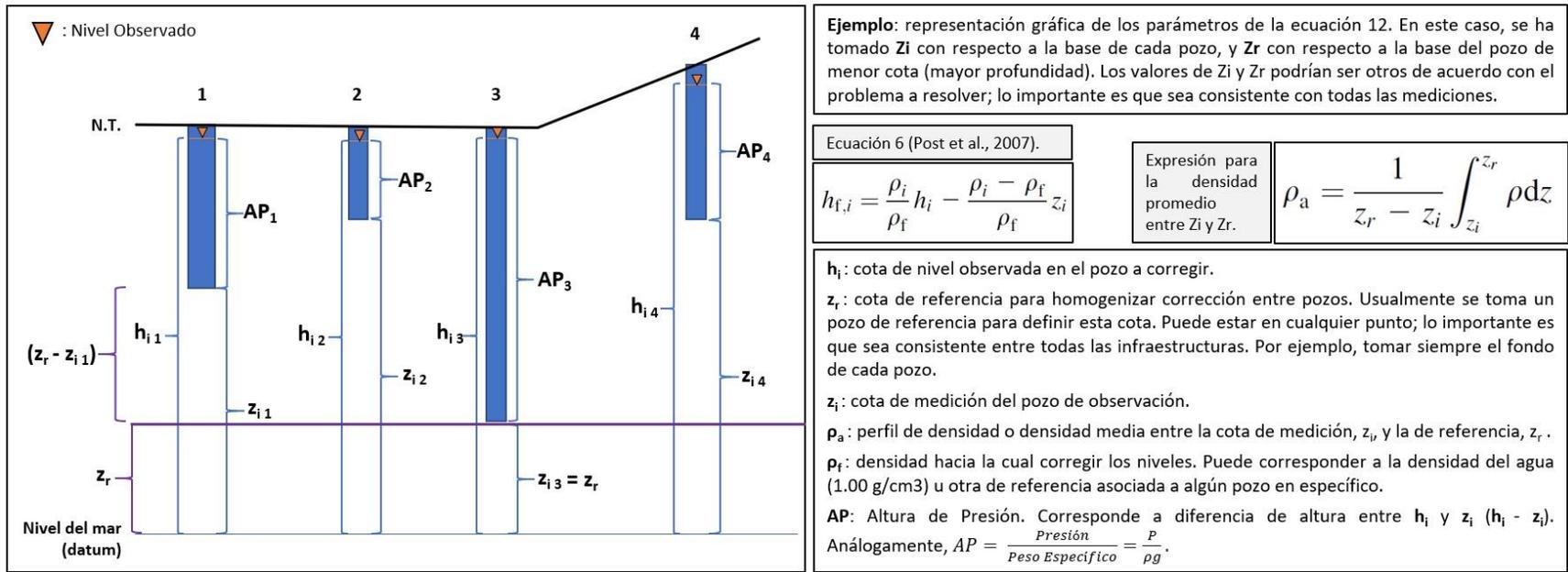


Figura 6-48. Explicación ecuación 12 de Post et al. (2007) para realizar la corrección por densidad. Fuente: elaboración propia.

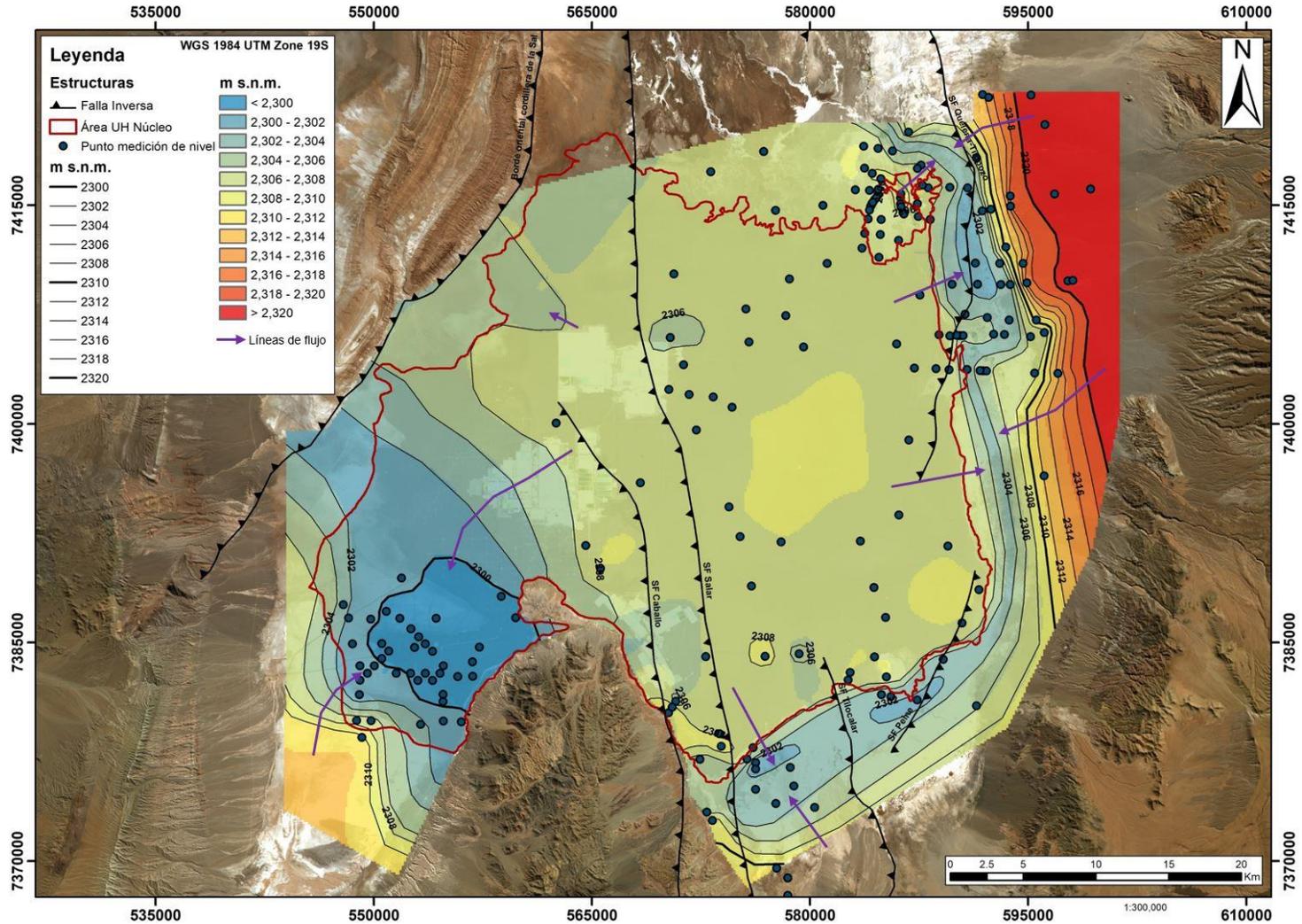


Figura 6-49. Interpolación de la piezometría a julio-2018 utilizando niveles corregidos por densidad. Fuente: elaboración propia.

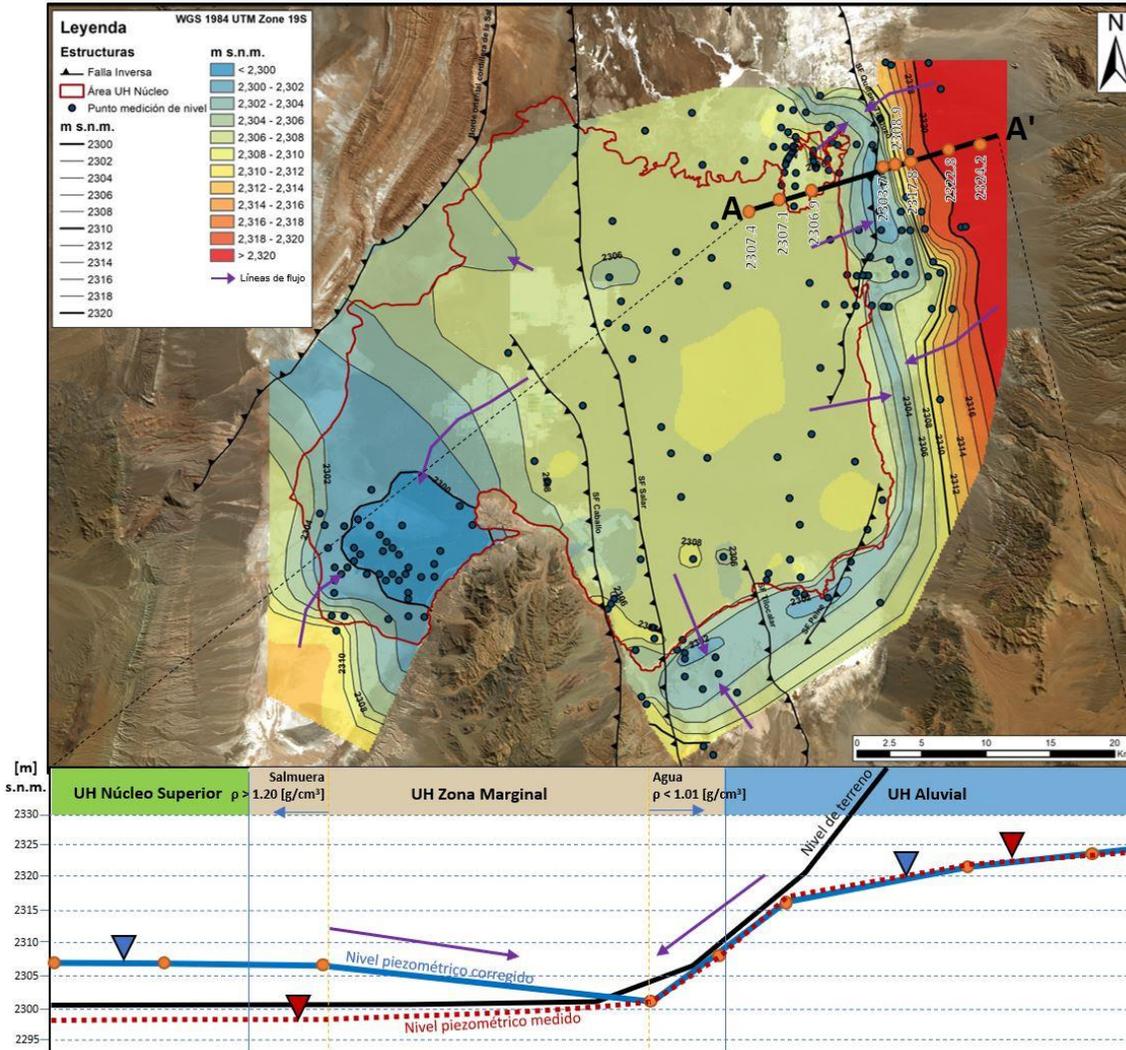


Figura 6-50. Sección esquemática en la que se compara la piezometría medida con la corregida por densidad (corrección a agua dulce).

6.6 Hidrogeoquímica

En este apartado se presenta una síntesis del modelo conceptual hidroquímico e isotópico para las aguas dulces y salmueras del Salar de Atacama, realizado con información levantada tanto por SQM como por terceros. Los resultados de laboratorio utilizados para realizar este análisis se presentan en el Anexo MC7.

6.6.1 Metodología, catastro de puntos y validación de información

El objetivo de esta sección es caracterizar las aguas pertenecientes al sistema de agua dulce, tanto del agua de recarga como de su evolución hasta llegar a la zona marginal del núcleo, y al sistema de salmuera de la cuenca del Salar de Atacama.

Para la hidroquímica, la metodología de análisis consiste principalmente en el estudio de la conductividad eléctrica (CE) en el agua. Este parámetro físico químico es proporcional a la salinidad del agua, y por tanto es útil en sistemas donde se aprecia gran variabilidad en la concentración iónica del agua, como es el caso de la cuenca del Salar de Atacama. Además, donde ha sido posible, se realizan análisis con los elementos mayoritarios del agua (Ca, Mg, Na, K, SO₄, Cl, HCO₃).

Finalmente, se caracteriza cada sistema (agua dulce y salmuera) mediante el análisis de isótopos estables (deuterio, $\delta^2\text{H}$; y oxígeno-18, $\delta^{18}\text{O}$). Estos parámetros brindan información acerca del origen de cada tipo de agua analizada, además de los posibles procesos de fraccionamiento a los que el agua se ve sometida.

6.6.1.1 Catastro de puntos con información hidroquímica

Los datos que sustentan las conclusiones de este modelo conceptual provienen de dos tipos de fuentes fundamentales: información levantada por SQM e informes realizados por terceros. De estos últimos, algunos han sido realizados para SQM y otros fueron tomados a partir de información pública, ya sea de carácter científico o de estudios de impacto ambiental ingresados a la autoridad ambiental.

1. Información levantada por SQM

a) Muestras del Plan Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH) y CONAF

En el marco del PSAH, SQM realiza desde el año 2007 un muestreo trimestral de química en 30 puntos. CONAF, por su parte, realiza un muestreo trimestral desde 1995 en 7 puntos. La ubicación de los puntos considerados en estos muestreos se presenta en la Figura 6-51 (las etiquetas corresponden a los análisis que se realizan en cada punto según la agrupación seguida en la Tabla 6-10). En el Anexo MC3 de este informe se presentan los nombres y ubicaciones de los puntos. El total de muestras tomadas para el PSAH es de 1765 y para CONAF de 500.

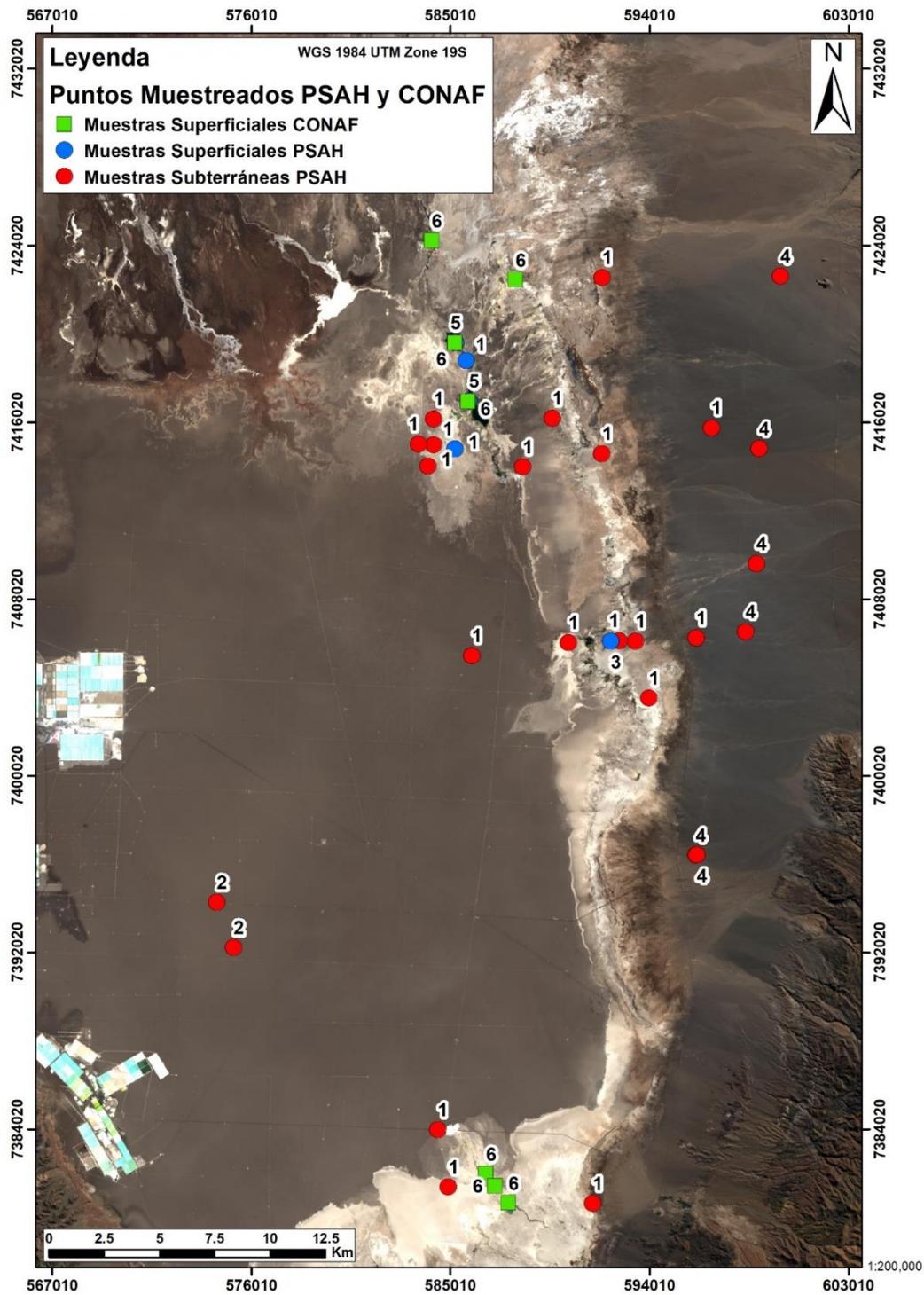


Figura 6-51. Distribución espacial de puntos con medición trimestral desde 2007 (PSAH) y 1996 (CONAF). Las etiquetas corresponden a los análisis que se realizan en cada punto, según el grupo que se distingue en la Tabla 6-10.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-10 Análisis realizados para los puntos de muestreo de la Figura 6-51 agrupados según los análisis de laboratorio que se realizan en cada punto. Fuente: Elaboración propia

PSAH		
Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Densidad, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, pH y conductividad eléctrica	Sólidos disueltos totales, Densidad	Salinidad, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, Sodio total, Potasio total, Calcio, Magnesio, dureza total, Carbonatos, Bicarbonatos (alcalinidad bicarbonato), Sulfato, Cloruro, Arsénico, Nitratos, Fosfatos, pH, temperatura, alcalinidad y Oxígeno disuelto
PSAH		CONAF
Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Alcalinidad Carbonato, alcalinidad Bicarbonato y alcalinidad Total, Arsénico, Calcio, Cloruro, Conductividad eléctrica, Densidad, Hierro, Manganeso, Magnesio, Nitrógeno Nitrito, Nitrógeno Nitrito, pH, Sodio Total, Sólidos Disueltos totales, Sulfato, Potasio Total y Zinc Total.	Detergente, Hidrocarburos totales, Nitrógeno Amoniacal, Conductividad eléctrica, Coliformes totales y Coliformes Fecales	Oxígeno disuelto in situ, pH in situ, Temperatura in situ, Sólidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos en suspensión, Dureza, Na total, As total, K total, Ca total, Mg total, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , CO ₃ , NO ₃ , PO ₄ , Sílice y alcalinidad total

b) Levantamiento periódico de información

Con el objetivo de complementar los antecedentes químicos históricos, se han realizado campañas de muestreo semestral en todo el borde este y trimestrales en el entorno de la laguna Barros Negros, desde los meses de invierno de 2017. Adicionalmente, en 2017 se habilitaron 3 plataformas multipiezómetro con 16 piezómetros habilitados a distinta profundidad en el sector Soncor y 3 plataformas multipiezómetro con 12 piezómetros habilitados a distintas profundidades en el sector Aguas de Quelana. Los puntos muestreados con carácter semestral se presentan en la Figura 6-52, Figura 6-53, Figura 6-54 y los de carácter trimestral en la Figura 6-55 junto a los multipiezómetros. En el Anexo MC3 se detallan los nombres y ubicaciones de los puntos muestreados. En total, han sido colectadas 587 muestras (Tabla 6-11).

Tabla 6-11 Total de muestras tomadas en campañas internas desde junio de 2017. Fuente: Elaboración propia

Invierno 2017 (Junio - Agosto)	Verano 2018 (Agosto - Septiembre)	Invierno 2018 (Enero - Marzo)	Trimestrales Soncor	Nuevos multipiezómetros (Quelana y Soncor)
139	142	154	124	28

La mayoría de los puntos subterráneos muestreados corresponden a pozos del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH) de SQM, por lo que, para evitar una posible alteración en los niveles, las muestras de agua subterránea fueron tomadas con un *bailer* desechable. En el caso de los puntos nuevos (plataformas multipiezómetros) las muestras fueron tomadas con bomba después de haber purgado el punto tres veces. Los parámetros para analizar corresponden a:

- Parámetros de terreno (CE, pH, temperatura y densidad),
- Química: Alcalinidad total, alcalinidad HCO_3 , alcalinidad CO_3 , Cl, F, NO_3 , SO_4 , Sílice, TSD y cationes totales (todas las campañas) y disueltos (campañas invierno 2017 y verano 2018): Los cationes analizados son: Al, Sb, As, Ba, Be, Bi, B, Cd, Ca, Co, Cu, Cr, Sn, Sr, P, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Ag, Pb, K, Se, Si, Na, Tl, Ti, V y Zn.
- Isótopos estables de agua: $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ VSMOW y $\delta^2\text{H}\text{-H}_2\text{O}$ VSMOW

Las muestras para análisis químico son enviadas al laboratorio ALS Environmental, y las muestras de isótopos de H_2O al laboratorio de la Universidad de Waterloo, en Canadá. En las campañas realizadas se analizaron los cationes mediante ICP-OES y los aniones mediante: SM2320 B, SM 4500 CL – B; SM4500-F-C; SM 4500-NO3-B y SM 4500-SO4-D. Los isótopos de H_2O se analizaron mediante LGR OA-ICOS, aplicando destilación azeotrópica en aquellas muestras con valores de CE mayor que 10 mS/cm. Los métodos empleados pueden verse en el Anexo MC 7.

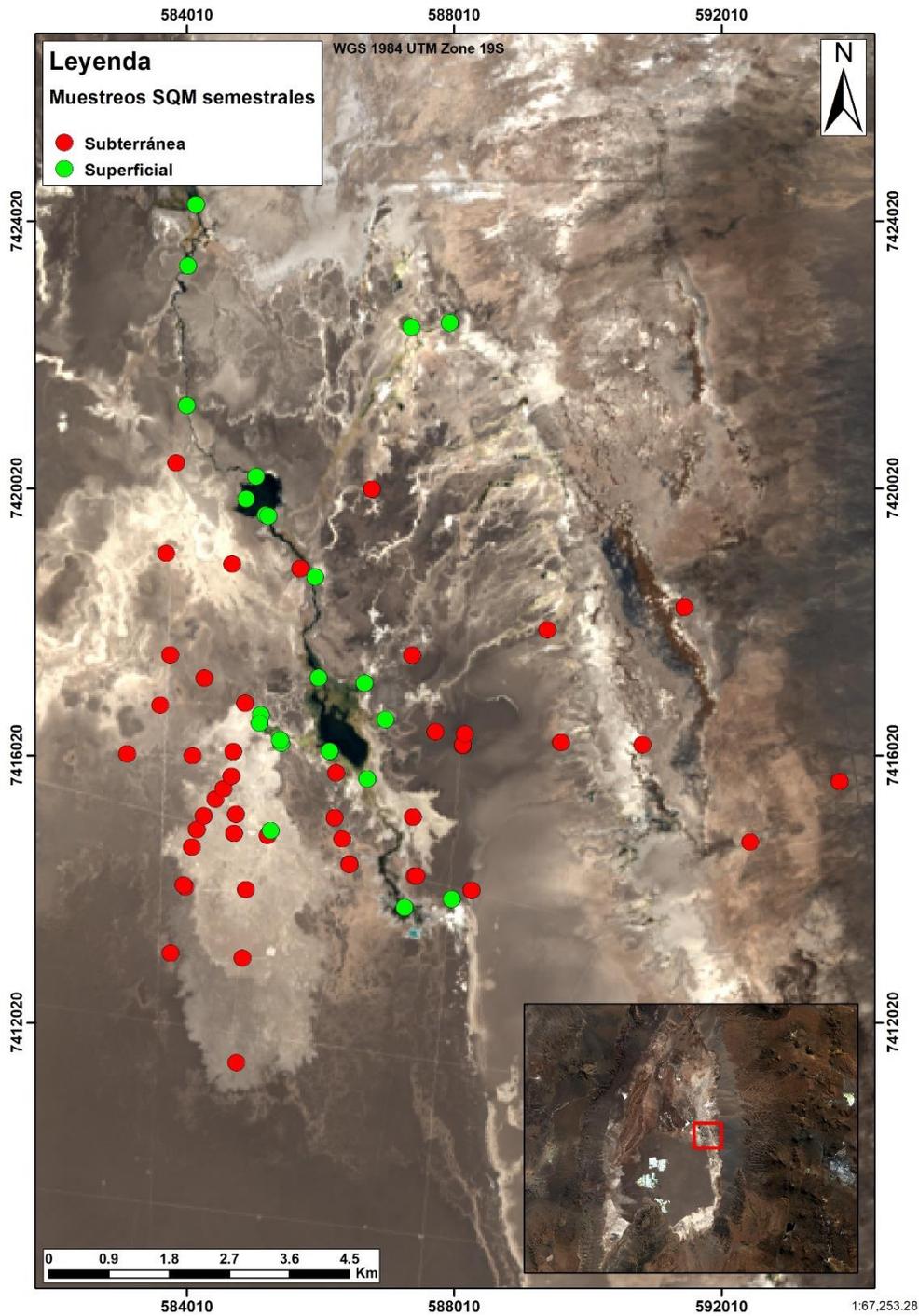


Figura 6-52. Puntos con muestreo semestral de SQM para el sistema lagunar Soncor. Fuente: Elaboración propia.

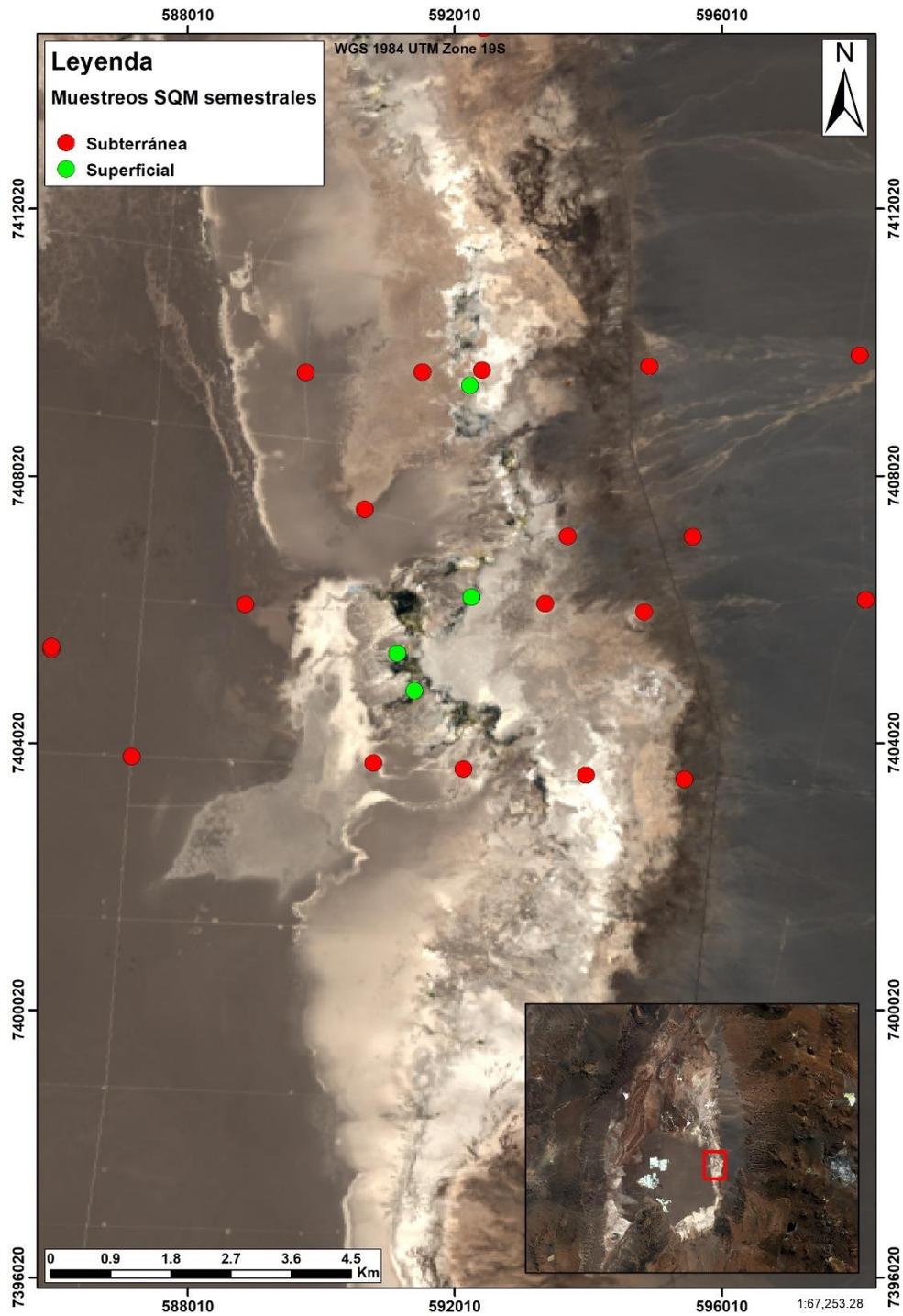


Figura 6-53. Puntos con muestreo semestral de SQM para el sistema Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia.

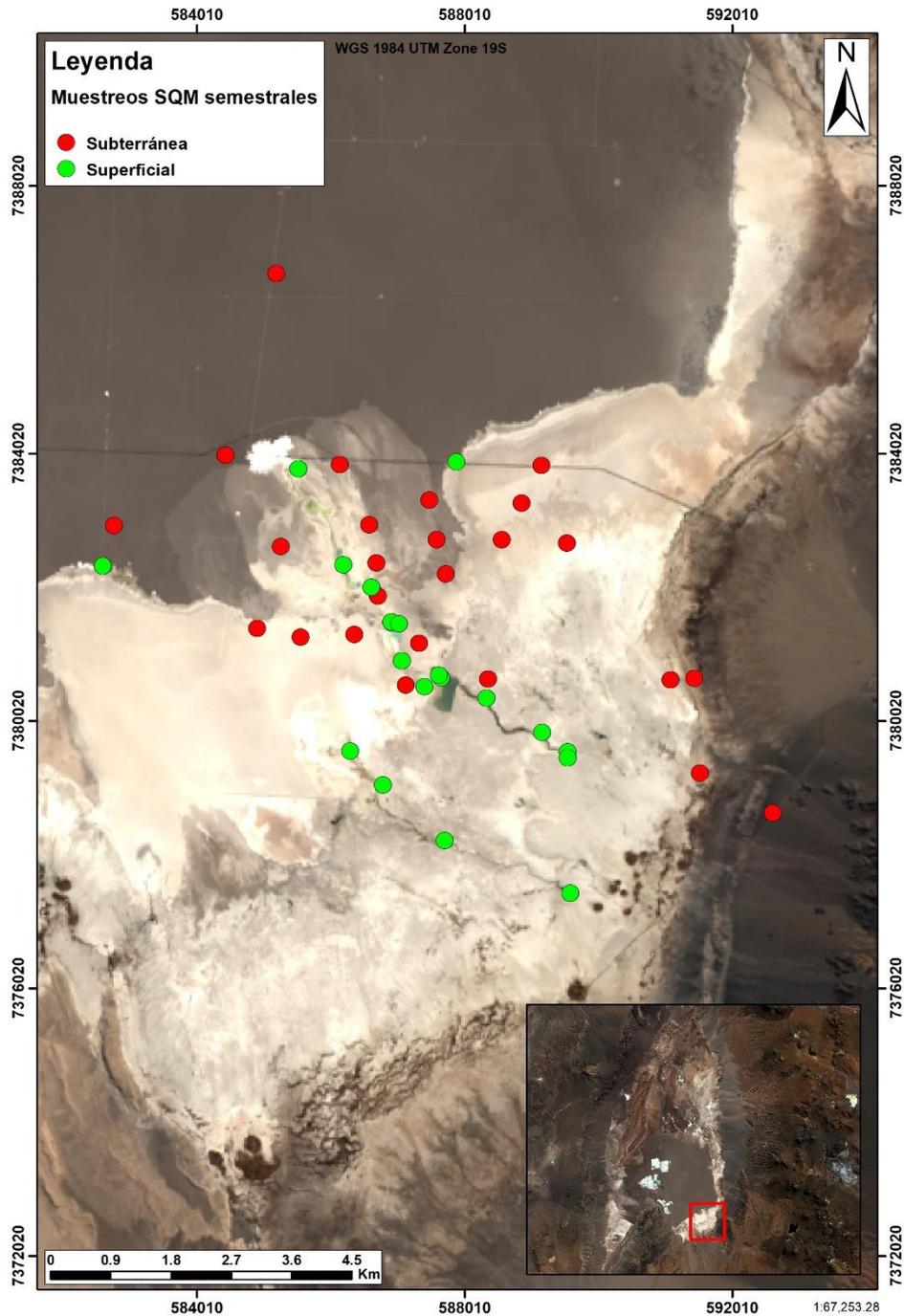


Figura 6-54. Puntos con muestreo semestral de SQM para el sistema lagunar Peine. Fuente: Elaboración propia.

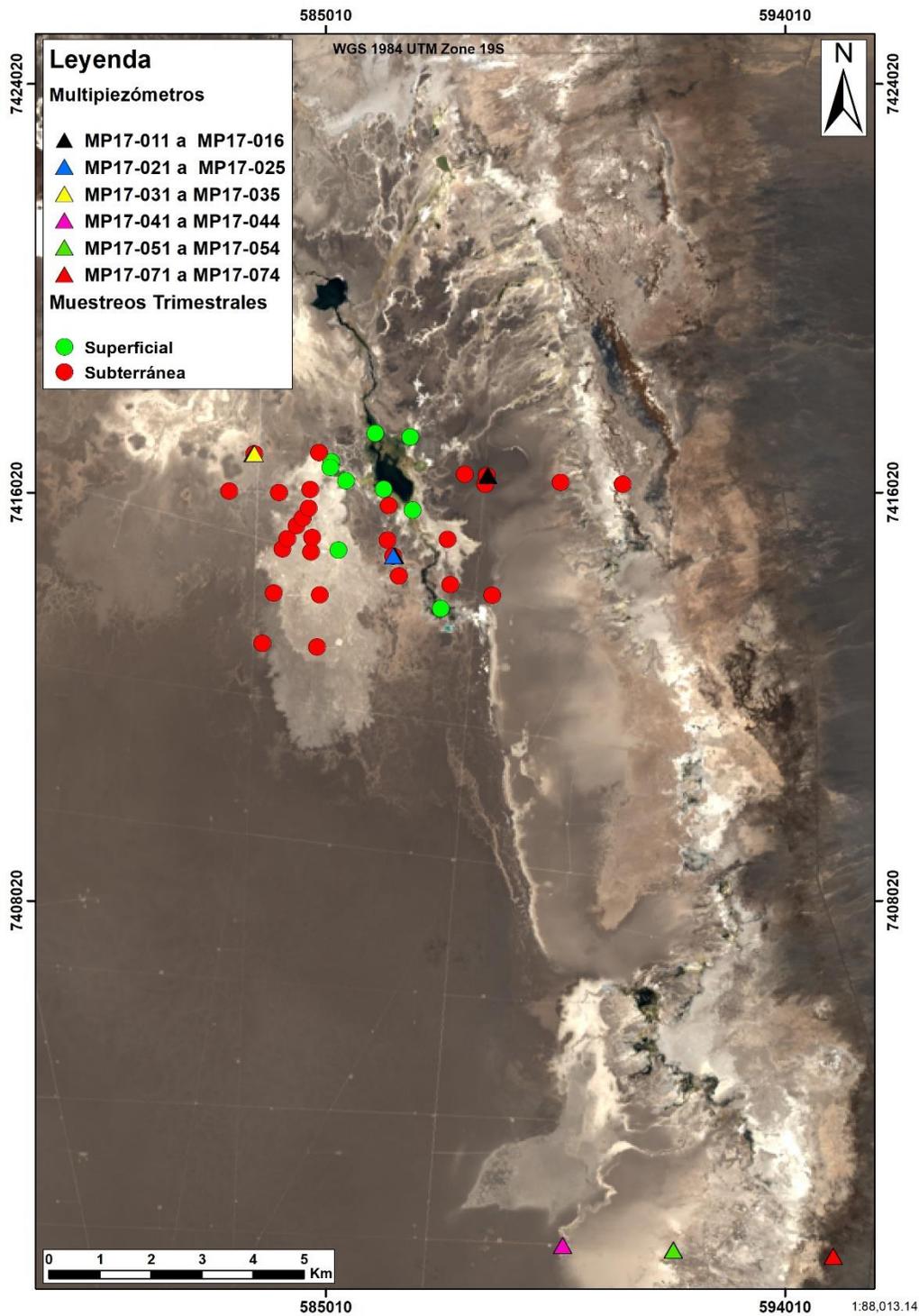


Figura 6-55 Puntos con muestreo trimestral en el sistema Soncor y multipiezómetros (Soncor y Aguas de Quelana). Fuente: Elaboración propia.

c) Campañas de muestreo en el núcleo

Se han realizado dos campañas de muestreo para análisis de química de la salmuera del núcleo, con el fin de caracterizar los distintos reservorios existentes en él. La primera fue realizada para el estudio de (Huerta, 2012), a petición de SQM Salar, y la segunda fue realizada por personal de SQM en diciembre de 2018. El total de muestras corresponde a 34 de Huerta (2012), y 15 para el muestreo de diciembre 2018. La Figura 6-56 muestra la ubicación de los puntos de muestreo en el núcleo del Salar de Atacama. Los análisis químicos realizados para las distintas campañas de muestreo pueden verse en la Tabla 6-12.

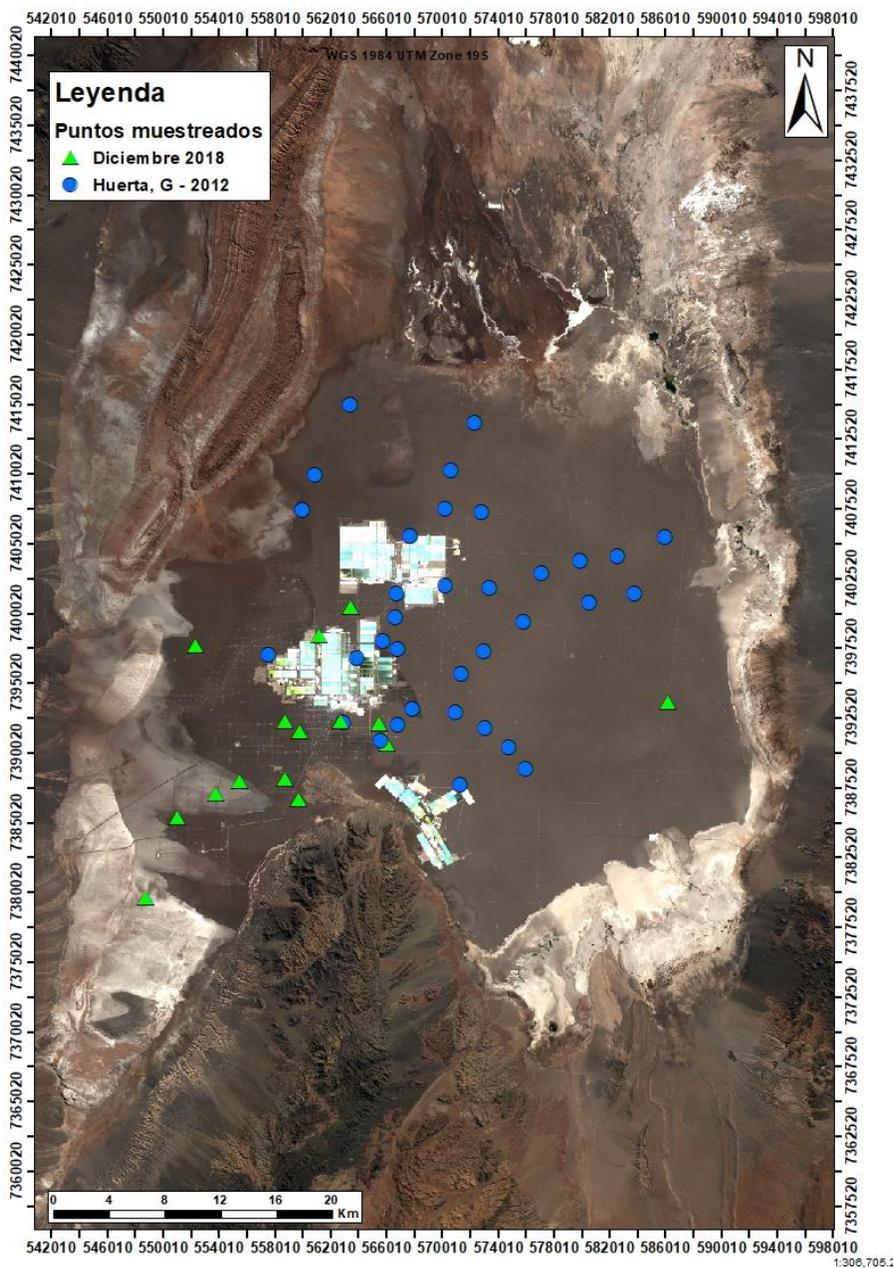


Figura 6-56 Distribución muestras de salmuera analizadas en el núcleo. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-12 Parámetros químicos y físico químicos analizados en las distintas campañas para el núcleo.

Parámetro	(Huerta, 2012)	Diciembre 2018
Aniones	Alc HCO ₃ , Alc Total, Br, Cl, SO ₄ , NO ₃ ,	SO ₄ , H ₃ BO ₃ , Cl
Metales Totales	Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sr, Ti, V, Zn,	Ca, K, Mg, Na
Metales Disueltos	Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Sr, Ti, V, Zn,	
Parámetros FQ		Densidad

En el presente informe se han empleado los datos de metales totales para que resulten comparables los de la campaña anterior y la actual. En (Huerta, 2012) se analizaron también isótopos estables de H₂O y SO₄ (24 muestras), y 8 muestras con isótopos de H₂O. La ubicación de las muestras se observa en la Figura 6-57.

2. Informes de terceros

Se cuenta con numerosos informes hidrogeológicos de terceros en la cuenca del Salar de Atacama, algunos de los cuales han sido realizados para SQM, mientras que otros corresponden a estudios realizados en el marco de la tramitación de permisos por parte de la autoridad ambiental. La Figura 6-58 ilustra la evolución temporal de los principales estudios identificados en informes, tesis y artículos científicos realizados dentro del área de estudio desde 2007 hasta comienzo de 2019. Estos estudios han ido mejorando el conocimiento del modelo conceptual hidroquímico e isotópico de la cuenca y representan la base del modelo conceptual aquí presentado.

Algunos de los informes realizados por terceros para SQM son:

- i. *Estudio Isotópico en Aguas de la Región de Peine* (Aravena R. , 2018a). Actualización de estudios isotópicos anteriores (Amphos 21, 2009b; Aravena R. , 2017b; Aravena R. , 2017c). Se emplearon datos de muestreos realizados por SQM para el sector de Peine desde junio de 2017 a marzo de 2018.
- ii. *Estudio Isotópico Aguas de Quelana* (Aravena R. , 2018b). Actualización de estudios isotópicos anteriores (Amphos 21, 2009c; Aravena R. , 2017a). Se emplearon datos de muestreos realizados por SQM para el sector de Aguas de Quelana desde junio de 2017 a marzo de 2018.
- iii. *Tercer informe de avance sobre estudios e investigaciones que intentan explicar el estado actual de ejemplares de algarrobo, en una población ubicada en las proximidades del pozo CAMAR 2 de SQM, en el Salar de Atacama, Chile* (CRICYT, 2017b). En el marco de este estudio se tomaron 2 muestras de agua de lluvia y 1 de nieve que resultan interesantes para la caracterización de la recta meteórica local.

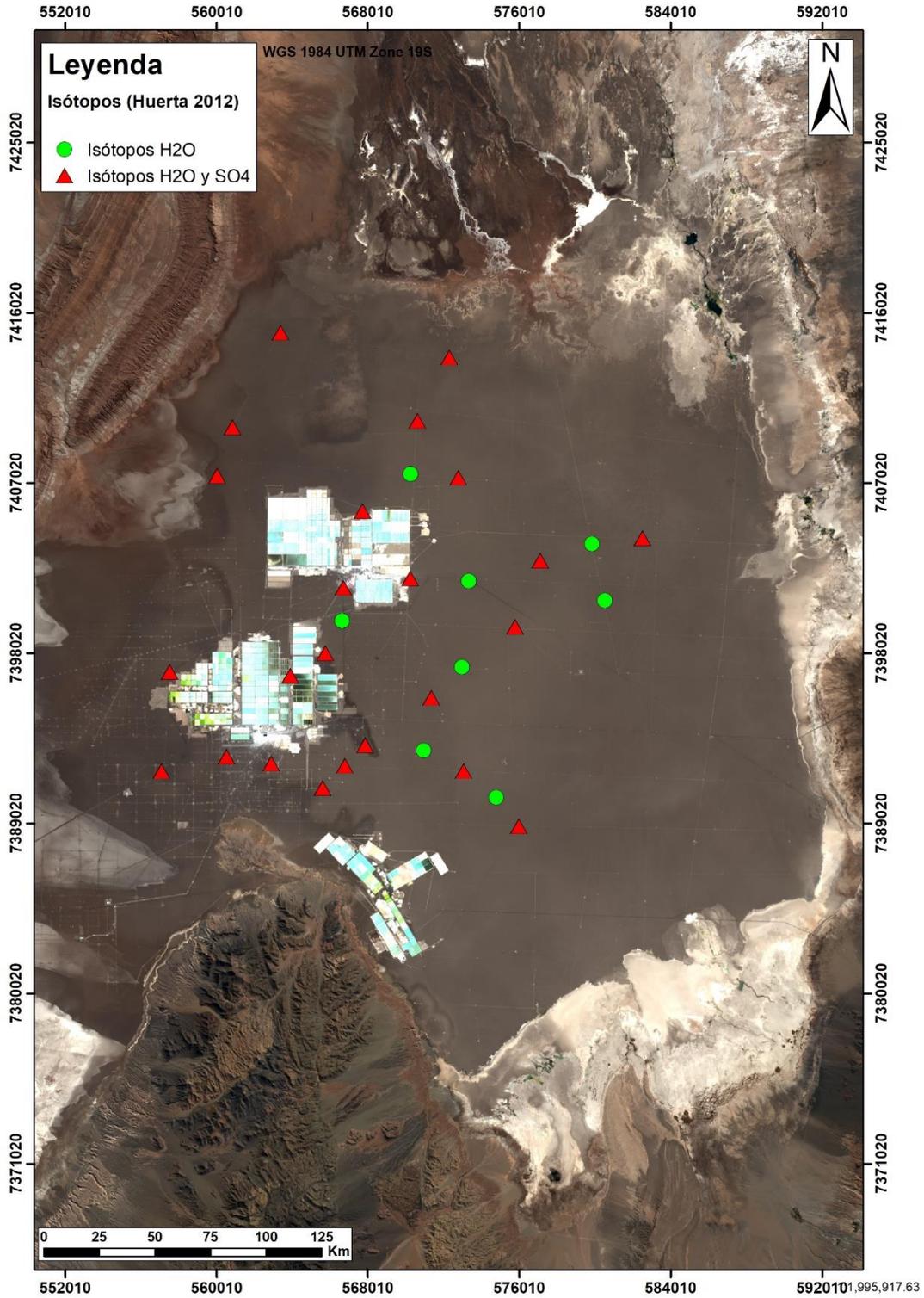


Figura 6-57 Distribución de muestras para isótopos estables de H₂O y SO₄ en el núcleo. Fuente: Elaboración propia

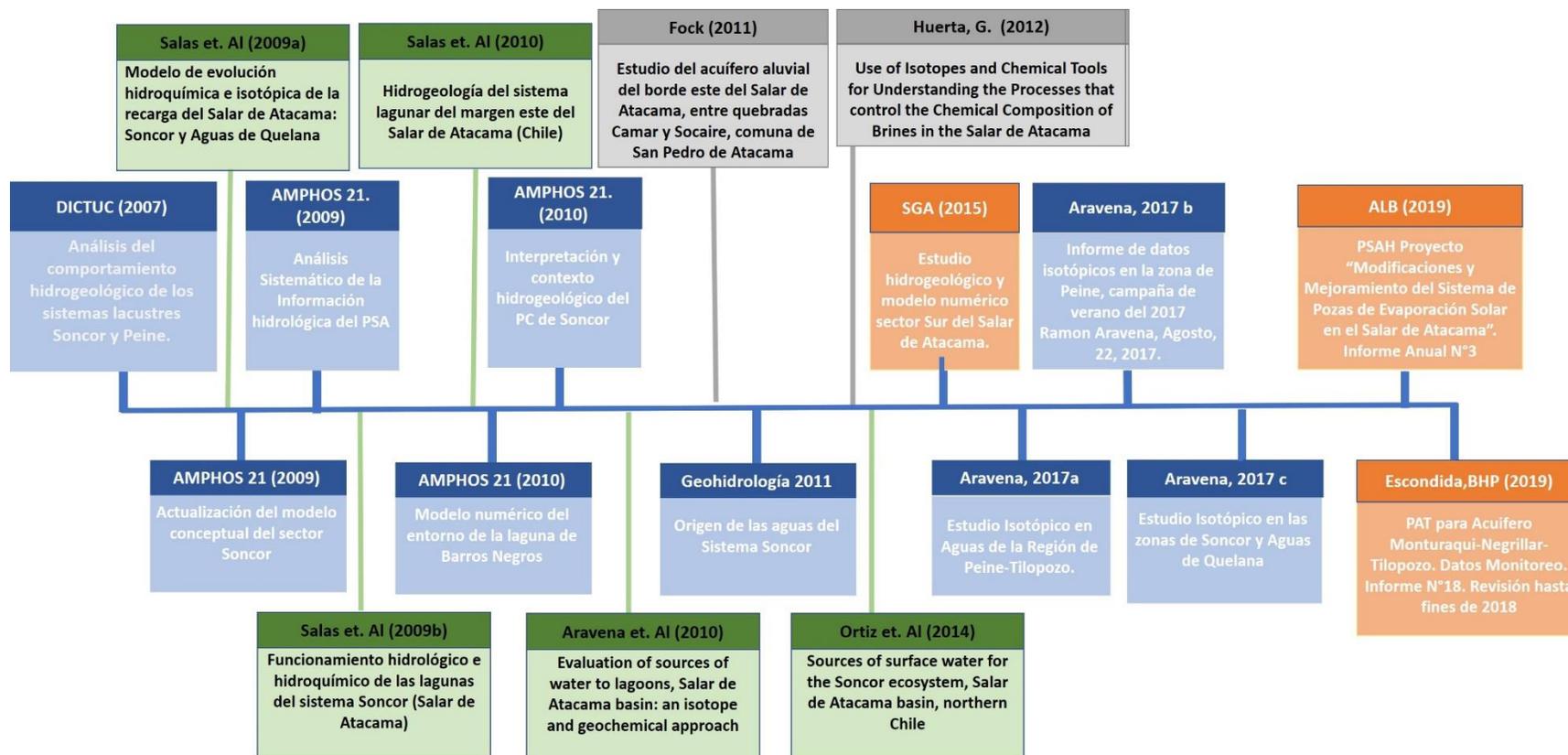


Figura 6-58. Antecedentes revisados considerados para el presente trabajo. En color azul informes internos (SQM), en naranja informes de otros actores de la cuenca, en verde artículos científicos y en gris tesis de máster. Fuente: Elaboración propia

6.6.1.2 Validación de la información

Las muestras tomadas en terreno para la realización de este informe han sido validadas mediante el cálculo de balance de cargas entre cationes y aniones, según la expresión:

$$BI(\%) = 100 \frac{\sum \text{cat} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) - \sum \text{an} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right)}{\sum \text{cat} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right) + \sum \text{an} \left(\frac{\text{meq}}{\text{L}} \right)}$$

Por lo general se suele admitir un valor de 5% según la bibliografía existente (Custodio & Llamas, 2001). Dadas las elevadas concentraciones que se encuentran en la salmuera, el criterio de aceptación adoptado ha sido un 8% de error de balance de cargas, esto de acuerdo con la literatura disponible para el análisis de muestras de salmueras con elevadas concentraciones (Garcés et al, 1996). Como puede verse en la Figura 6-59, para el total de 383 muestras, sólo 2 de ellas no cumplen con este criterio. Dadas las pequeñas desviaciones respecto del criterio de aceptación (8,1 y 8,0), se han admitido todas las muestras tomadas en terreno para la realización de este informe.

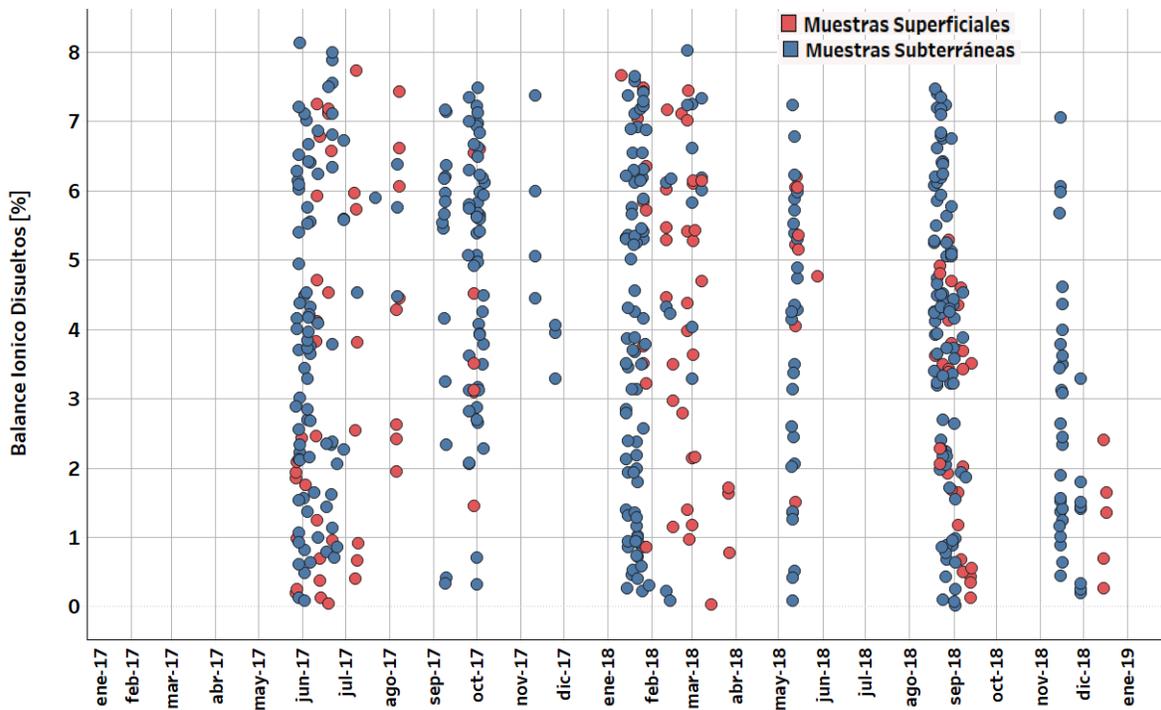


Figura 6-59. Balance iónico para las campañas de muestreo realizadas desde junio de 2017 (Incluye muestras de agua dulce, salobre y salmuera). Fuente: Elaboración propia.

La validación empleada para las muestras en el núcleo ha seguido el mismo criterio, validándose los resultados menores de 8%, pero realizando el balance iónico con metales totales, ya que en la campaña de 2018 no se analizaron metales disueltos.

Puede verse en la Figura 6-60 que se han descartado para los análisis 15 de las 49 muestras por presentar errores de BI mayores a lo aceptado.

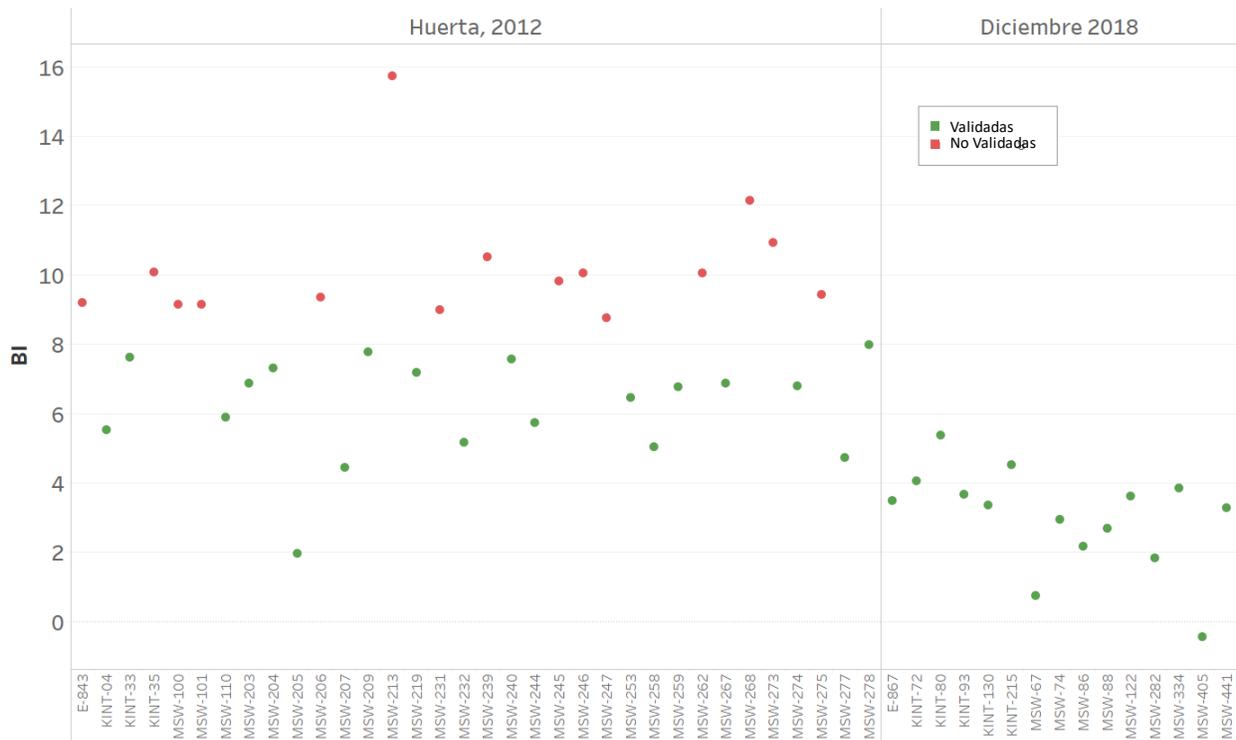


Figura 6-60. Resultados de balance iónico en las muestras del núcleo. Fuente: Elaboración propia.

6.6.2 Sistema de agua y transición a salmuera

Según los análisis de niveles freáticos y de la superficie piezométrica del sistema de agua, parte del agua que cae en la cuenca en forma de precipitación de agua y nieve se infiltra directamente en el subsuelo, y otra parte escurre superficialmente, antes de infiltrarse en el subsuelo, pero aguas abajo de la zona de recarga directa. Se cuenta con muestras de agua de precipitación, nieve, y también con muestras de agua subterránea que fluye en la UH Aluvial y otras que fluyen por la UH Zona Marginal. Además, se cuenta con muestras de agua superficial de las lagunas del borde Este, y de los sistemas lagunares de Soncor y de Peine/Tilopozo. Por tanto, es posible la caracterización hidroquímica de todo el sistema de agua dulce y de la zona de transición hasta la salmuera.

6.6.2.1 Caracterización general

Se ha realizado un diagrama de Piper para definir la composición general de las aguas analizadas. Los iones representados en el diagrama son metales disueltos, y las muestras corresponden a las colectadas desde 2017. La Figura 6-61 muestra la ubicación de los puntos de muestro que se han representado en el diagrama de Piper en la Figura 6-62.

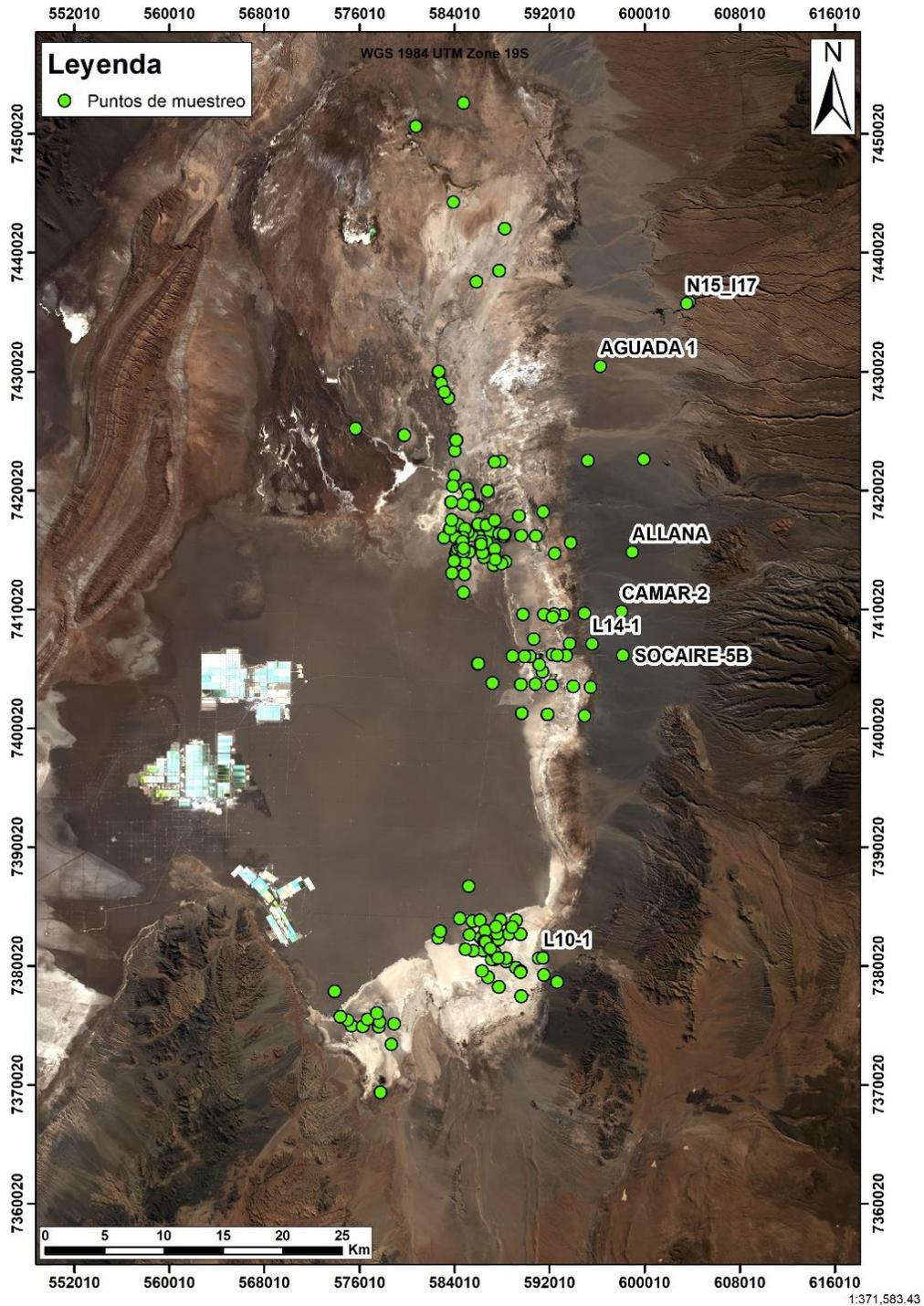


Figura 6-61. Ubicación de puntos de muestreo representados en el diagrama de Piper. Fuente: Elaboración propia

Prácticamente todas las aguas analizadas son cloruradas sódicas. En las Figura 6-61 y Figura 6-62, se han añadido las etiquetas de los puntos que corresponden a la zona más externa de cada uno de los sectores que conforman el Borde Este, Sur y Noreste. Pueden verse algunos puntos con características sulfatadas (Allana, Camar 2, L10-1), y el pozo N15_I17 con composición cercana a bicarbonatada. Estas aguas, así como el resto de la cuenca, muestran una evolución a aguas cloruradas sódicas, muy marcada a medida que se acercan al núcleo. Esta evolución se encuentra determinada por procesos de disolución y mezcla con aguas más salinas, como se verá a lo largo del siguiente apartado.

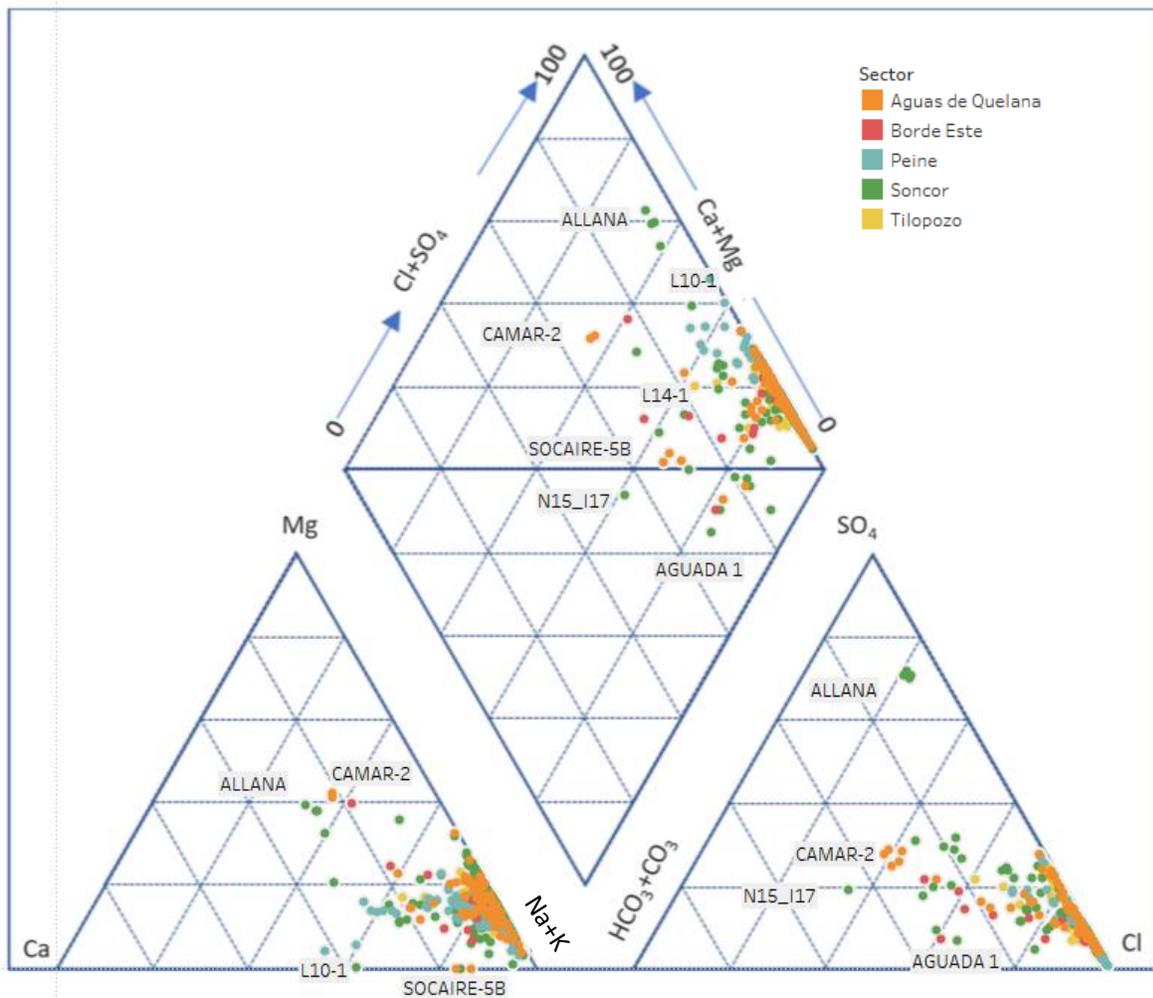


Figura 6-62. Diagrama de Piper para las muestras colectadas desde 2017. Los metales representados corresponden a metales disueltos. Fuente: Elaboración propia

6.6.2.2 Aguas de recarga y agua subterránea de la UH Aluvial

Se han tomado 2 muestras de agua lluvia en enero de 2017 para alturas representativas de 2.500 a 2.700 m s.n.m., y 1 muestra de nieve en julio de 2017 a una altura de 4.100 m s.n.m. (CRICYT, 2017b). Asimismo, se cuenta con resultados de isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en vertientes, quebradas y aguas

subterráneas de la UH Aluvial, de modo que puede hacerse una comparación entre las aguas que representan la recarga por lluvia y nieve, y las aguas superficiales muestreadas en las quebradas, vertientes y subterráneas de la zona aluvial. La ubicación de los puntos de muestreo analizados se presenta en la Figura 6-64. En el Anexo MC3 de este informe se muestran los nombres y ubicaciones de los puntos. Se han clasificado los puntos según el origen del agua y la entidad responsable de la realización de los muestreos.

La composición química de las aguas en las quebradas y zona aluvial muestra diferentes características. El agua de lluvia presenta CE mucho menores de 1 mS/cm, debido a la ausencia de sales en su composición. El agua de las quebradas y del acuífero aluvial presenta mayores valores de conductividad debido a la interacción con el terreno y al proceso de disolución de sales (Figura 6-63). Debido a la disolución de sales, las aguas de recarga aumentan sus valores de CE a lo largo de la UH Aluvial, cuyas aguas presentan valores menores de CE de aproximadamente 10 mS/cm.

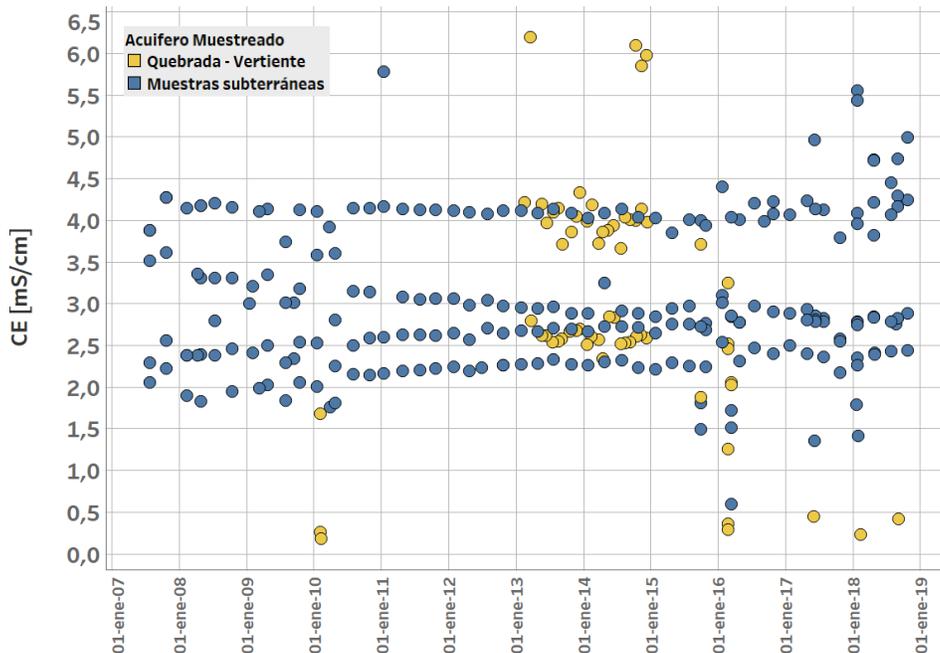


Figura 6-63. Evolución temporal de Conductividad [mS/cm] en quebradas y puntos subterráneos del aluvial. Fuente: Elaboración propia con datos de terceros (SGA, 2015) y propios.

La Figura 6-65 muestra la distribución $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para las muestras colectadas presentadas en la Figura 6-64, por muestreos internos de SQM y terceros (SGA, 2015; CRICYT, 2017b). Se observa que las muestras de agua lluvia y nieve se alinean según una pendiente igual a la Recta Meteorica Local (RML) definida para el norte de Chile (Aravena et. Al, 1999). Las muestras de quebradas y vertientes y, en menor medida, las subterráneas se alinean también según la misma pendiente, indicando que el agua de todos estos puntos es de origen meteórica, infiltrada en la zona de recarga y con nula o mínima afección por evaporación.

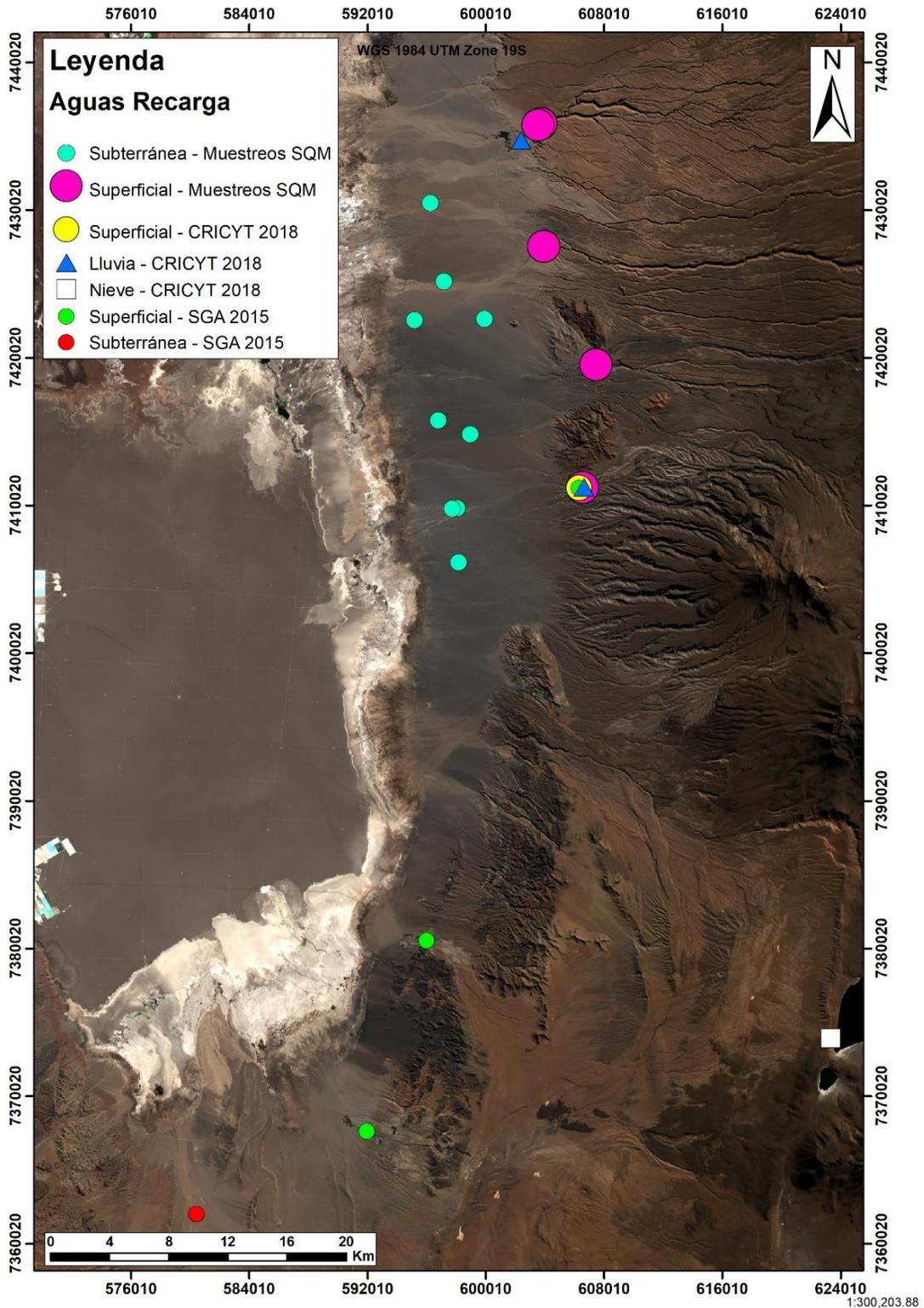


Figura 6-64. Puntos de muestreo para caracterizar el agua de recarga a la cuenca. Fuente: Elaboración propia

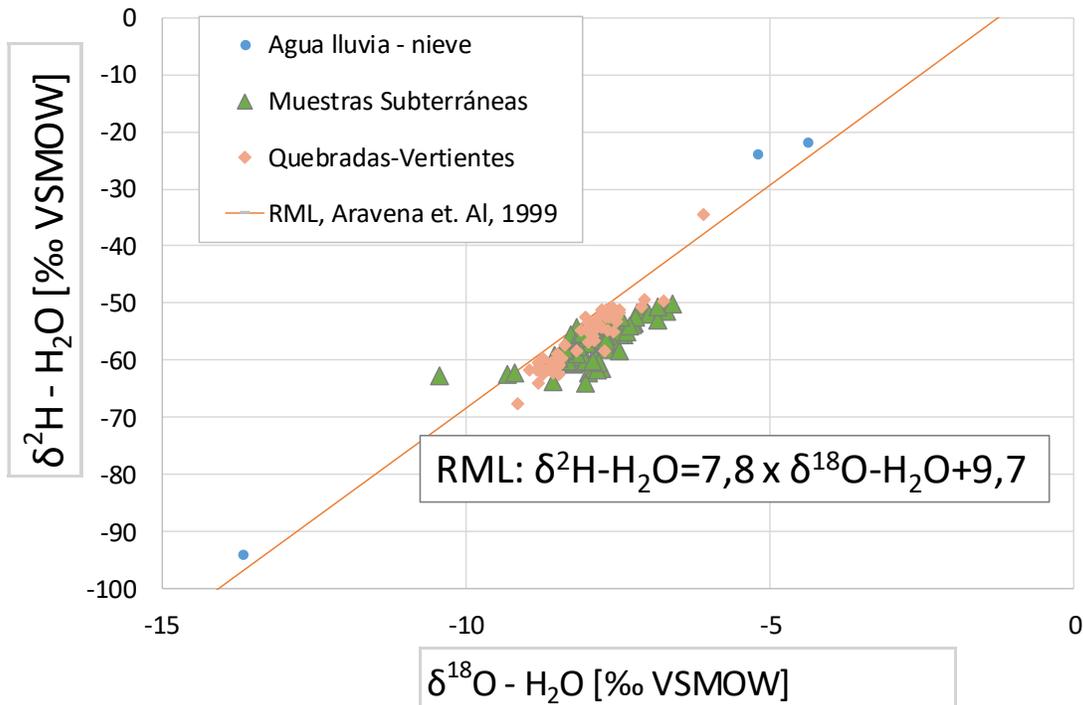


Figura 6-65. Relación $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para muestras de precipitación, quebradas y zona aluvial. Fuente: Elaboración propia con datos propios y de terceros (SGA, 2015) (CRICYT, 2017b).

6.6.2.3 UH Zona Marginal

Los depósitos aluviales del extremo oriental del área de estudio dan paso a la zona marginal, caracterizada por ser una zona de topografía muy plana, con niveles freáticos muy someros y con una secuencia general de precipitados de sales (de este a oeste: carbonatos, sulfatos y cloruros en la zona más cercana al núcleo). Las evaporitas de carbonatos y sulfatos presentan una conductividad hidráulica mucho menor a la halita superficial del núcleo, por lo que la UH Zona Marginal incluye sólo a sulfatos y carbonatos.

En la zona marginal se produce el afloramiento del agua dulce principalmente por la acción de la interfaz salina, además del abrupto cambio de pendiente topográfica y de la baja conductividad hidráulica de la UH Zona Marginal. Luego, la mayor parte de esta agua dulce se evapora, mientras que una pequeña parte se infiltra, fluyendo lentamente por el subsuelo, donde prácticamente se evapora toda el agua antes de llegar al núcleo.

Las aguas descargadas desde la UH Aluvial en las lagunas se ven afectadas por la evaporación a medida que ascienden a la superficie, ocurriendo además procesos de disolución (en invierno) y precipitación (en verano) de sales y mezcla con aguas de la interfaz salina, modificando de este modo sus características químicas e isotópicas en su avance hacia el Oeste.

En la Figura 6-66 se presenta la ubicación de los puntos ubicados en la zona marginal y el núcleo de salmuera escogidos para representar la evolución hidroquímica e isotópica en este sector. En el Anexo MC3 de este informe se muestran los nombres y ubicaciones de los puntos.

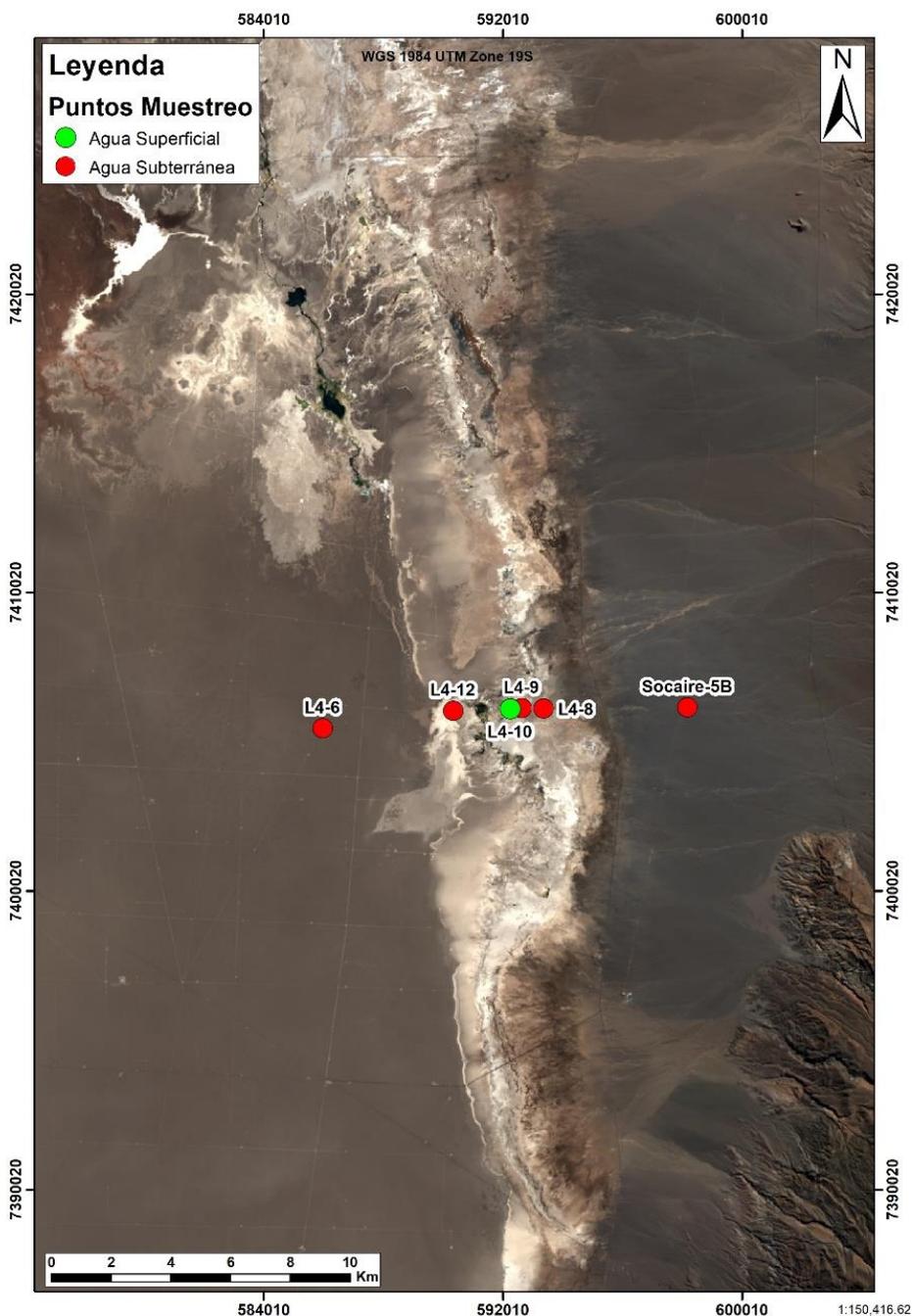


Figura 6-66. Ubicación de puntos escogidos entre la zona marginal y núcleo de salmuera para mostrar la evolución hidroquímica E-W en el margen E del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia

En el caso de la CE, en la Figura 6-67 se aprecia un aumento en los valores de CE a medida que se avanza hacía el núcleo. Mientras las aguas del pozo Socaire-5B (UH Aluvial) muestran muy baja salinidad, las aguas superficiales (L4-10, UH Zona Marginal) presentan una estacionalidad química contraria a los niveles, indicando que su evolución química está fuertemente controlada por la evaporación. Sin embargo, los puntos subterráneos de la UH Zona Marginal muestran una estacionalidad de la CE muy atenuada, lo que sugiere que la química del acuífero está controlada por otros factores además de la evaporación. Estos factores son disolución, precipitación de sales, y mezcla de aguas con la interfaz salina.

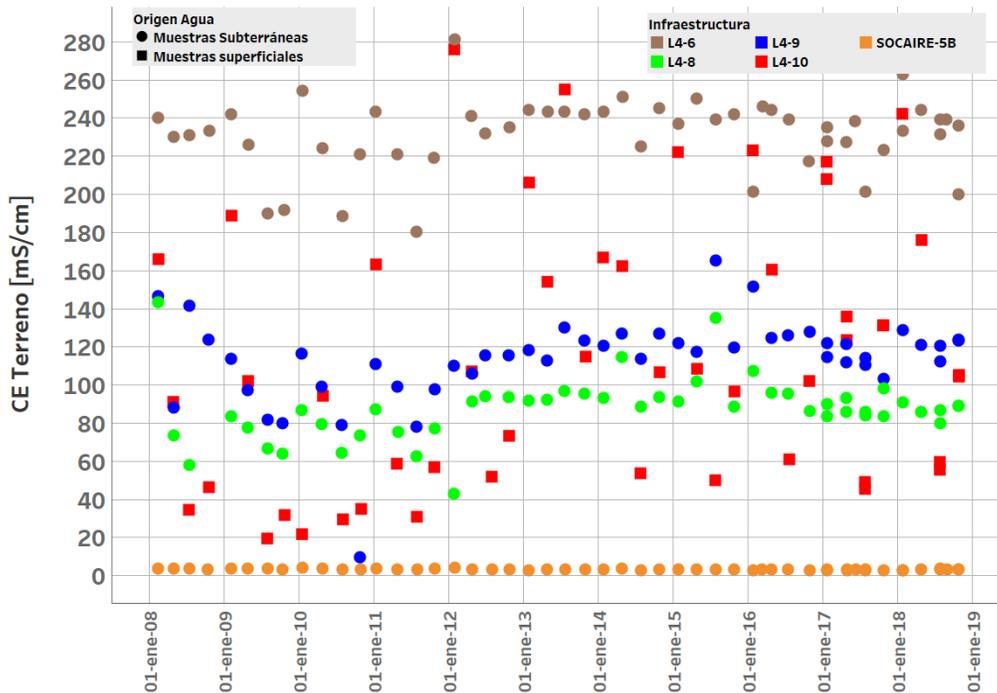


Figura 6-67. Evolución temporal de conductividad eléctrica de terreno [mS/cm] para los puntos L4-6, L4-8, L4-9, L4-10 y Socaire-5B. Fuente: Elaboración propia con datos del PSAH.

Isotópicamente, las aguas subterráneas y superficiales de la UH Zona Marginal están completamente dominadas por procesos de evaporación, que constituye la principal fuente de descarga del sistema de agua dulce. Los valores de isótopos de agua de las últimas campañas de SQM realizadas en la zona marginal del borde este (entre 2017 y diciembre de 2018) se ajustan a una recta de evaporación local (con cierto componente de mezcla de aguas), que se origina a partir de la evaporación del agua de recarga, que se encuentra en la parte inferior de la recta, sobre la recta meteórica local (Figura 6-68). Esta recta de evaporación tiene una pendiente de 3.9, muy similar a la descrita en estudios anteriores para el Salar de Atacama como línea de evaporación local (Amphos 21, 2009b; Geohidrología, 2011a; IDAEA-CSIC, 2017).

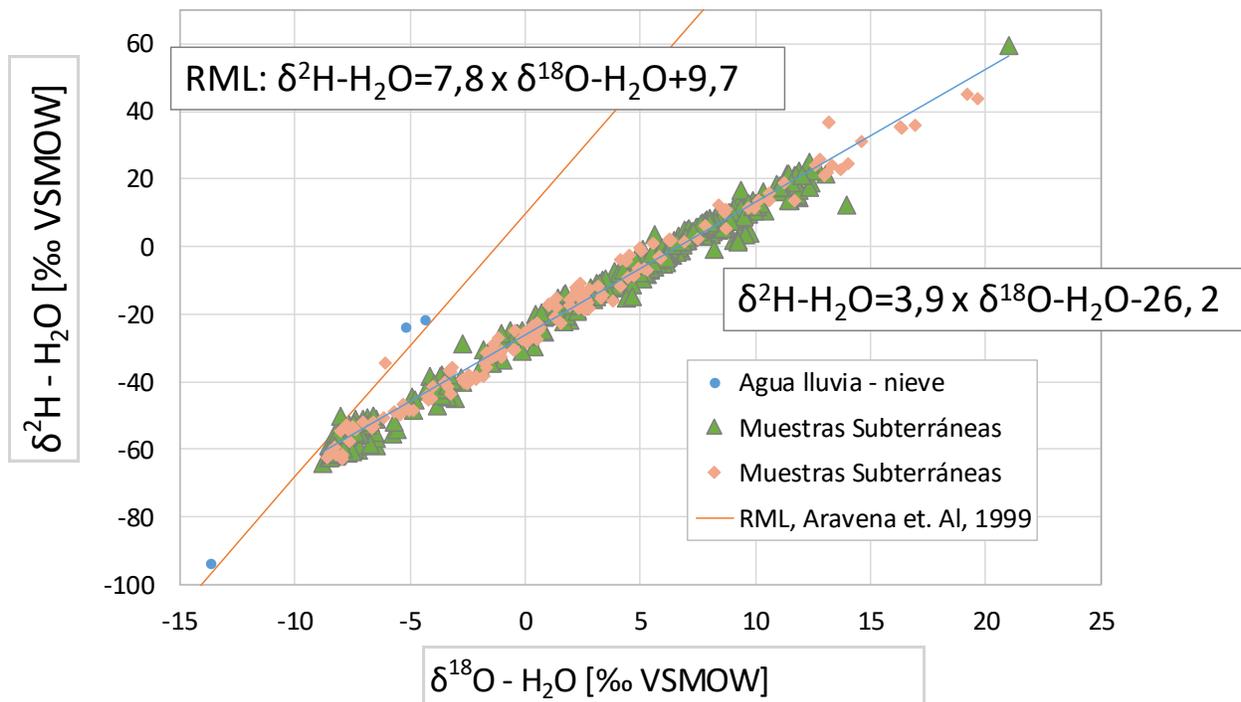


Figura 6-68. Relación $\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$ vs $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ en muestras de agua de lluvia, nieve y muestras de puntos superficiales y subterráneos en Salar de Atacama (Aluvial, zona marginal y sector oriental del Bloque Este) desde 2017. Fuente: Elaboración propia con datos propios y de CRICYT, 2018.

Para evaluar la importancia de la evaporación, disolución de sales y mezcla con aguas de la interfaz salina, se ha representado en la Figura 6-69 el valor de $\delta^{18}\text{O}$ [%] frente a los cloruros [meq/L] para las distintas campañas semestrales realizadas por SQM desde 2017.

En este gráfico se observan dos tendencias en los extremos de la nube de puntos: Una tendencia “A” que representa a puntos que han evolucionado principalmente por evaporación y disolución de sales, no mostrando mezcla con la interfaz y caracterizada por no presentar elevadas concentraciones de cloruros. En esta tendencia “A” se alinean principalmente puntos superficiales de los sectores Peine y Tilopozo, indicando que el agua que da origen a estos sistemas lagunares ha tenido poca interacción con la interfaz salina. Se observan también algunos puntos subterráneos de los mismos sectores, los que serían alimentados en parte, por desbordes desde aguas superficiales.

La otra tendencia extrema, tendencia “B” en la Figura 6-69, presenta concentraciones de cloruros mucho mayores que la tendencia “A”, como consecuencia de la mezcla, en distintas proporciones, con la interfaz salina. Puede verse que la mayoría de los puntos que componen la tendencia “B” corresponden a puntos subterráneos, mientras que los puntos superficiales que se alinean con esta tendencia corresponden a desbordes de agua superficial sobre la interfaz salina. Estos desbordes sobre la interfaz se acumulan en algunas zonas en forma de áreas inundadas de forma temporal, en el contacto entre la zona marginal y el núcleo formando “Open Pools” (SGA, 2015), por ejemplo, en los sectores de Peine y Tilopozo.

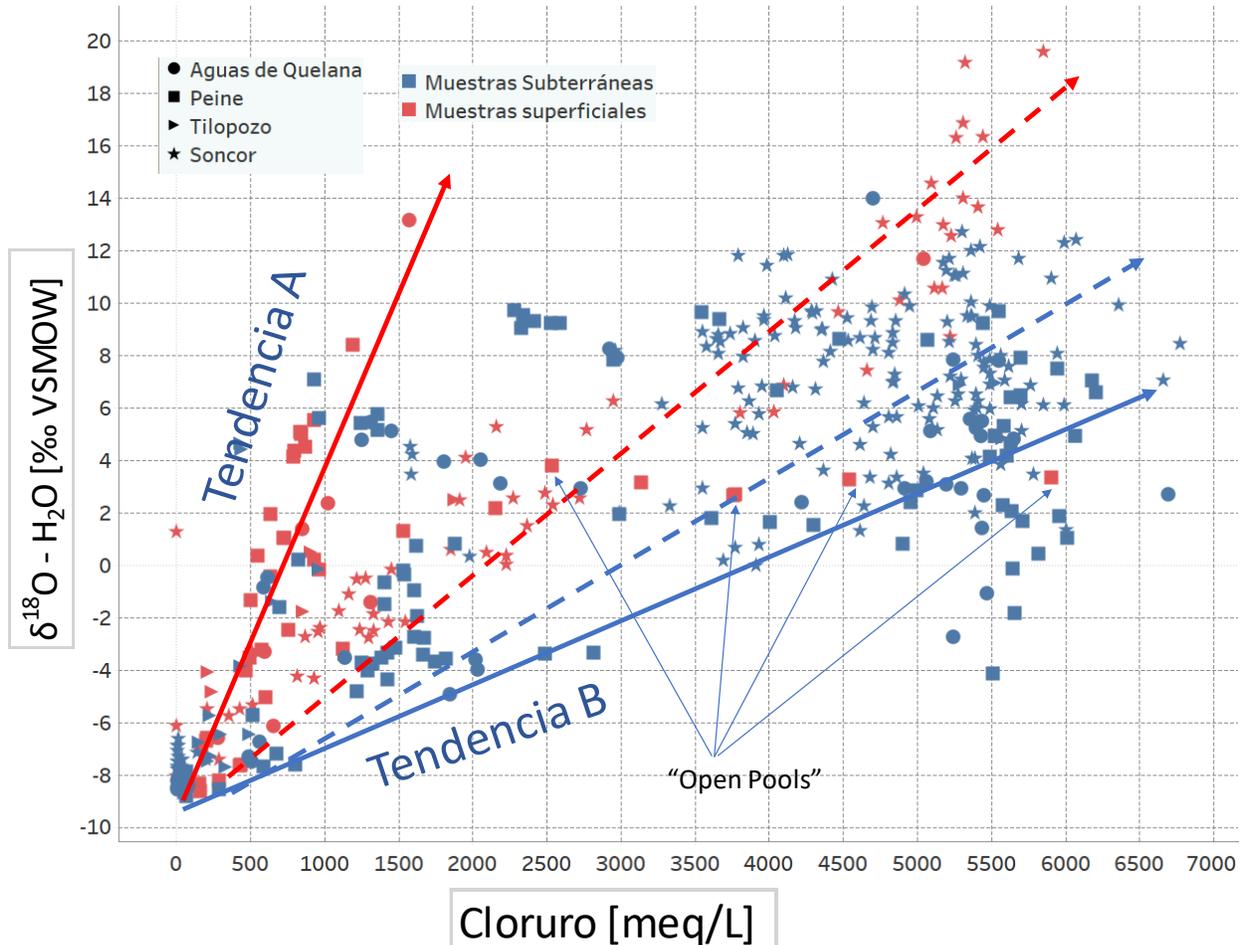


Figura 6-69. Relación cloruros [meq/L] vs $\delta^{18}\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ [%o VSMOW] en muestras de puntos superficiales y subterráneos en los muestreos semestrales realizados por SQM desde 2017 en Salar de Atacama (Muestras de Aluvial, Zona marginal y sector Oriental del Bloque Este, Núcleo). Fuente: Elaboración propia.

Entre ambas tendencias extremas se reconocen abundantes puntos, los cuales presentan distinta importancia de los procesos que explican su evolución. Por esta razón, se ha marcado con una línea roja de trazo discontinuo una segunda tendencia "A". Esta línea se encuentra representada fundamentalmente por la evolución de las aguas superficiales en el sistema Soncor. Las aguas superficiales de este sector presentan una mayor influencia de aguas cloruradas debido a que el canal del Burro Muerto y las lagunas que lo componen son alimentados por aguas de descarga del aluvial que ya han sufrido interacción con la interfaz salina en su tránsito hacia el oeste (Geohidrología, 2011a; Ortiz C. , y otros, 2014; Aravena R. , 2017a). Otros puntos subterráneos que se alinean con esta pendiente corresponden a puntos que reciben agua de desborde superficial con mezcla de aguas de la interfaz salina.

Por último, la línea en azul con trazo discontinuo representa una evolución de aguas con menor predominancia de mezcla con la interfaz salina, en realización a la evaporación y disolución de sales. Las aguas que se encuentran por debajo de esta línea son todas subterráneas, a excepción de los desbordes sobre la interfaz descritos junto a la tendencia "B".

6.6.3 Sistema de salmuera

En el núcleo del Salar de Atacama se reconocen 3 unidades hidrogeológicas saturadas de salmuera, cuya densidad es notablemente mayor que el agua dulce (1.23 vs 1.0 g/cm³). La dinámica de flujos, al estar siempre en un desbalance hídrico negativo (como se observa en la tendencia al descenso de los niveles aún en período preoperacional, expuesto en capítulo anterior), al tener altos niveles de salinidad (produciendo también gradientes químicos), y el comportamiento tipo karst de algunas zonas de núcleo, hace que el sistema de salmuera sea diferente al sistema de agua. En el presente apartado se caracterizarán las unidades hidrogeológicas reconocidas en el núcleo, según sus características químicas e isotópicas.

6.6.3.1 Caracterización química

Para la caracterización química de las distintas unidades que se distinguen en el núcleo se cuenta con datos actuales (diciembre de 2018) e históricos (Huerta, 2012). Dado que los componentes principales de la salmuera son Cl y Na, el diagrama de Piper convencional no resulta útil para caracterizar las salmueras del Salar de Atacama. Por ello, se ha desarrollado a nivel interno un diagrama de Piper modificado empleando los iones totales Na, Mg y K para el triángulo de la izquierda y Ca, SO₄ y H₃BO₃ para el triángulo de la derecha.

La ubicación de las muestras validadas por balance iónico se muestra en la Figura 6-70. Se ha añadido, en la descripción de los puntos, la unidad hidrogeológica en que se encuentran habilitados: Núcleo Superior o Profundo, según lo descrito en el apartado 6.3.

La Figura 6-71 muestra el diagrama de Piper modificado para los puntos mostrados en la Figura 6-70. Se observa una clara diferenciación entre la UH Núcleo Superior y la UH Núcleo Profundo, determinada por el porcentaje de K, siendo en UH Núcleo Profundo algo mayor al 20% y en la UH Núcleo Superior claramente menor al 20%. El sulfato también permite diferenciar ambas unidades, ya que la UH Profunda presenta menores porcentajes que la UH Superior. Además, la UH Profunda presenta salmueras enriquecidas en sulfatos y otras enriquecidas en calcio, y no se ha observado, con las muestras revisadas, una relación en la horizontal ni en profundidad, por lo que se consideran variaciones locales dentro de la misma unidad hidroquímica.

Respecto a la UH Núcleo Superior, no se observan diferencias composicionales claras entre el Bloque Este y el Bloque Oeste. De manera similar a la UH Profunda, presenta algunas muestras cálcicas y otras sulfatadas, y la mayor evolución en el diagrama de Piper puede verse para el ion sodio.

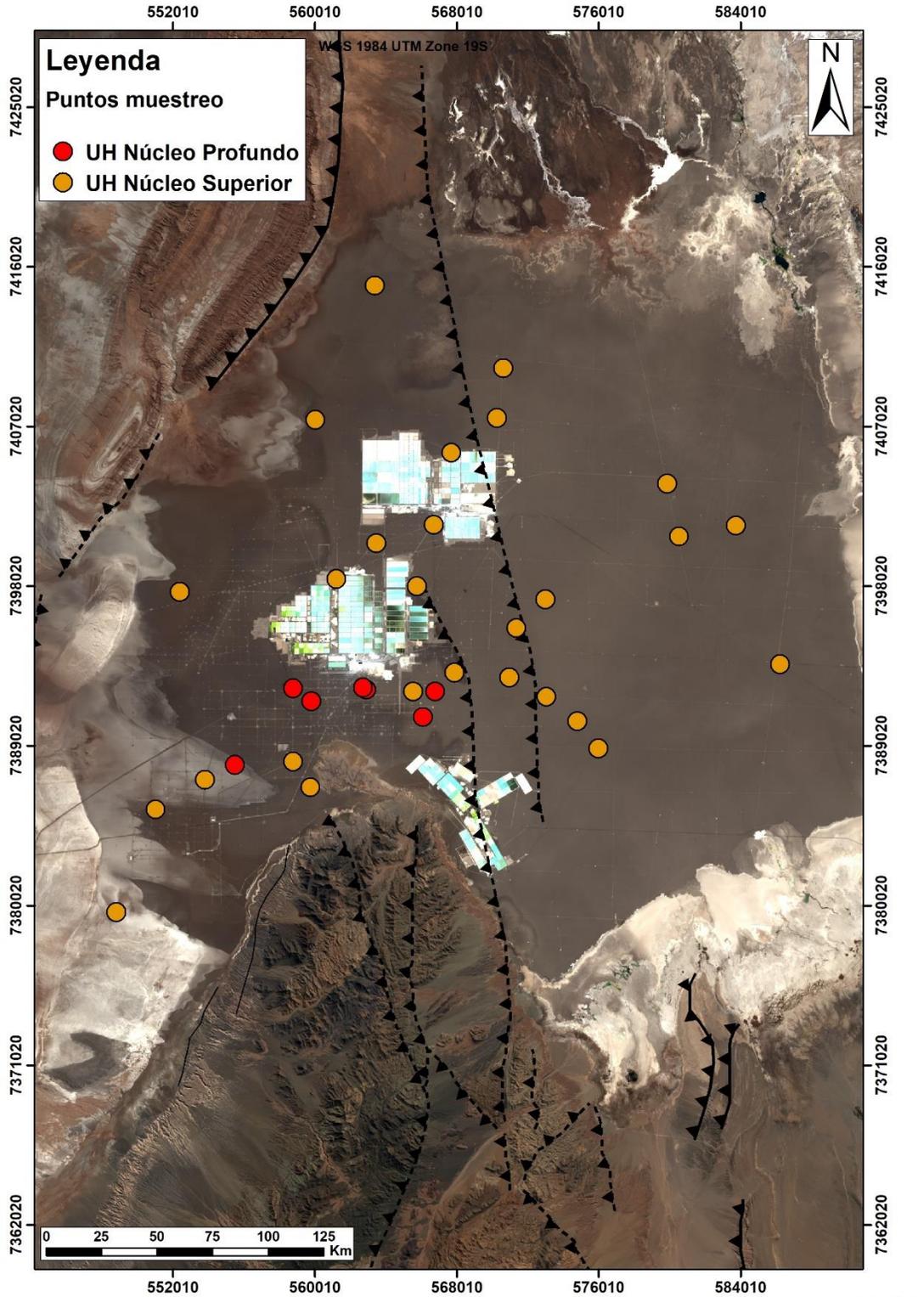


Figura 6-70. Ubicación de los puntos muestreados en el núcleo. Fuente: Elaboración propia

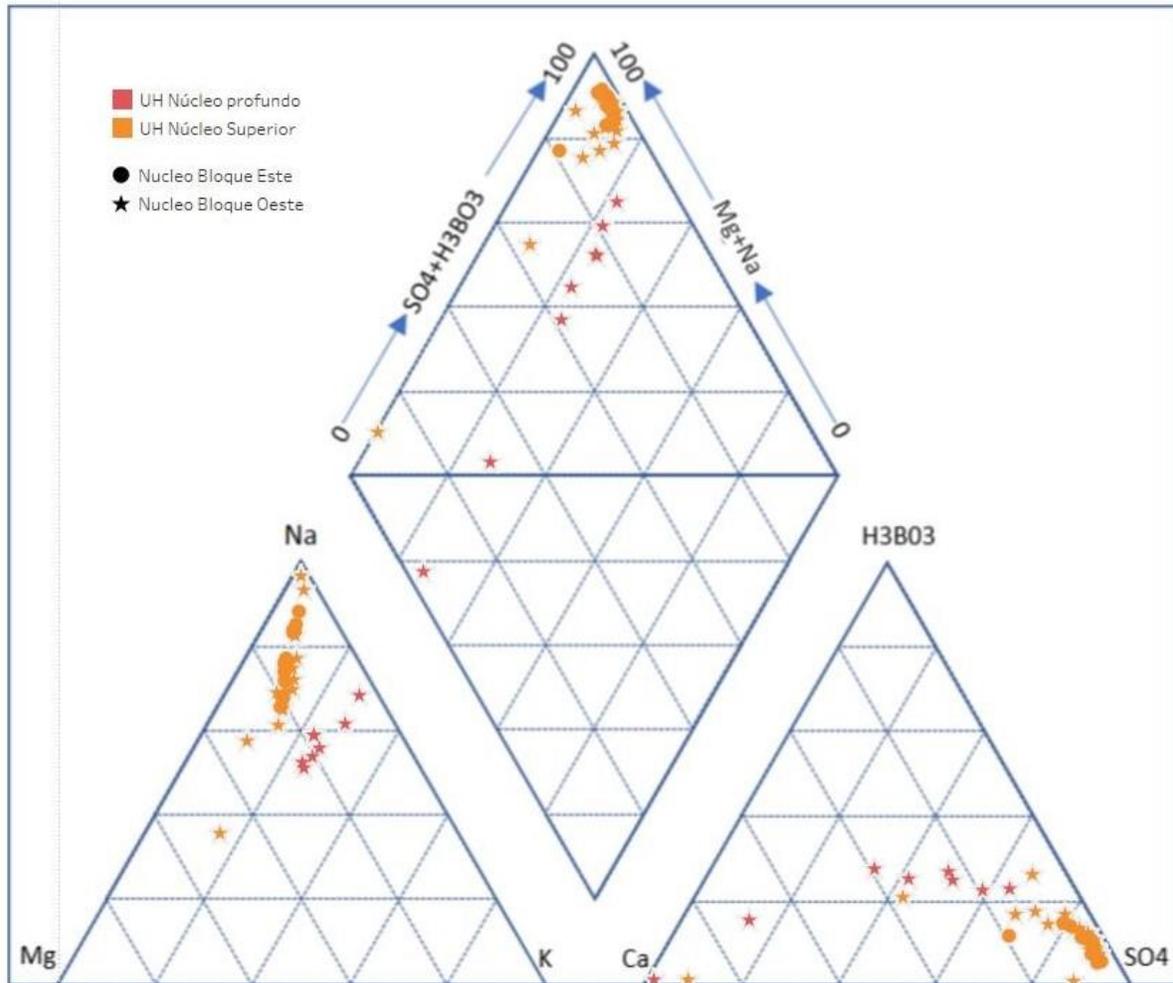


Figura 6-71. Diagrama de Piper modificado para los puntos muestrados en el núcleo del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia con datos de terceros (Huerta , 2012) y propios.

6.6.3.2 Caracterización isotópica

La Figura 6-72 muestra la distribución de los isótopos considerados para el presente estudio. Estos datos han sido obtenidos de (Huerta , 2012).

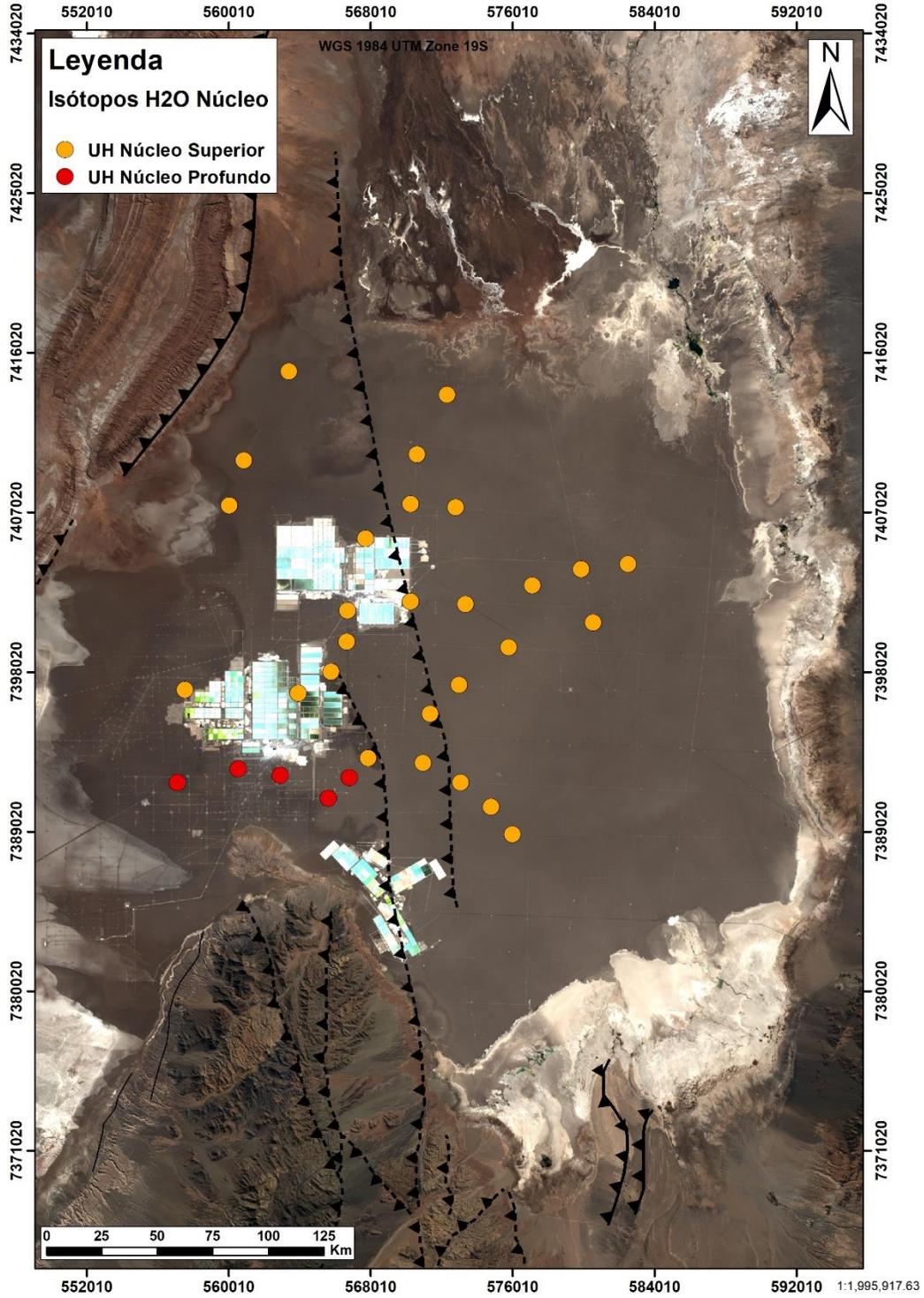


Figura 6-72. Ubicación de puntos del núcleo con isótopos estables de agua. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-73 se muestra la relación $\delta^2H (H_2O)$ vs $\delta^{18}O (H_2O)$ para las muestras colectadas en el Salar de Atacama en la tesis de (Huerta , 2012). Los datos colectados se alinean según una recta muy similar a la descrita en varios estudios como línea de evaporación local para el Salar. Esta línea corresponde a una línea de evaporación, pero también a una línea de mezcla entre aguas más y menos evaporadas. Puede verse que, en general, los puntos correspondientes a la UH Núcleo Superior del Bloque Este se agrupan entre las aguas más evaporadas, con algunos valores mayores que 2 ‰ para $\delta^{18}O$ (Figura 6-74) y -10‰ para δ^2H .

La Figura 6-74, muestra que los isótopos más evaporados del bloque este coinciden con el mínimo piezométrico que se observa en el mapa piezométrico para diciembre de 2018 (Figura 6-43), confirmando que se trata de una zona de mínimo donde se acumulan las aguas más evaporadas. Además, las muestras más empobrecidas al norte y sur del bloque este dan cuenta de posibles recargas al núcleo desde el norte y sur de la cuenca.

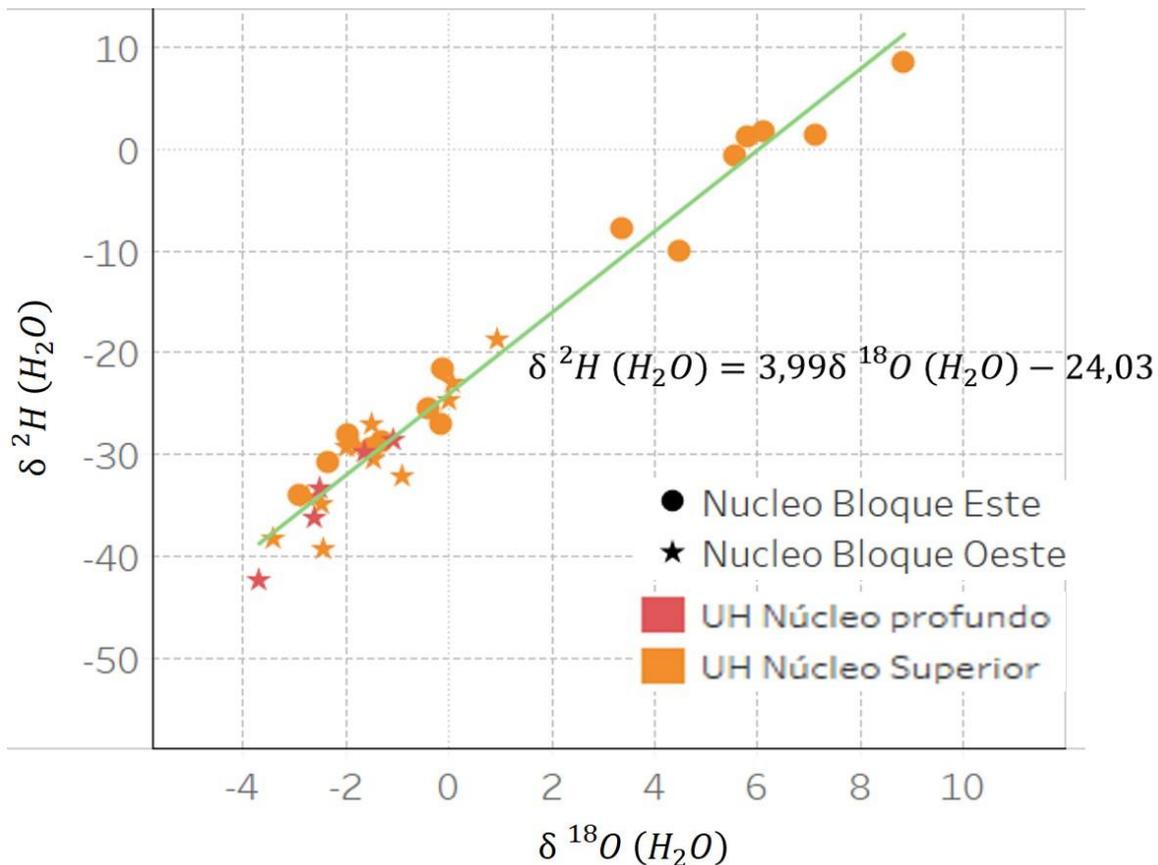


Figura 6-73. Relación $\delta^2H (H_2O)$ vs $\delta^{18}O (H_2O)$ para las muestras colectadas en el núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos de (Huerta , 2012)

Respecto al Bloque Oeste, en general se observa que se trata de salmueras menos evaporadas que las del Bloque Este, pero no se observa una diferenciación clara entre la UH Núcleo Superior y la UH Núcleo

Profundo, ya que ambas muestran rangos muy similares, comprendidos entre -4 a 1‰ y -44 a -18‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente (Figura 6-74).

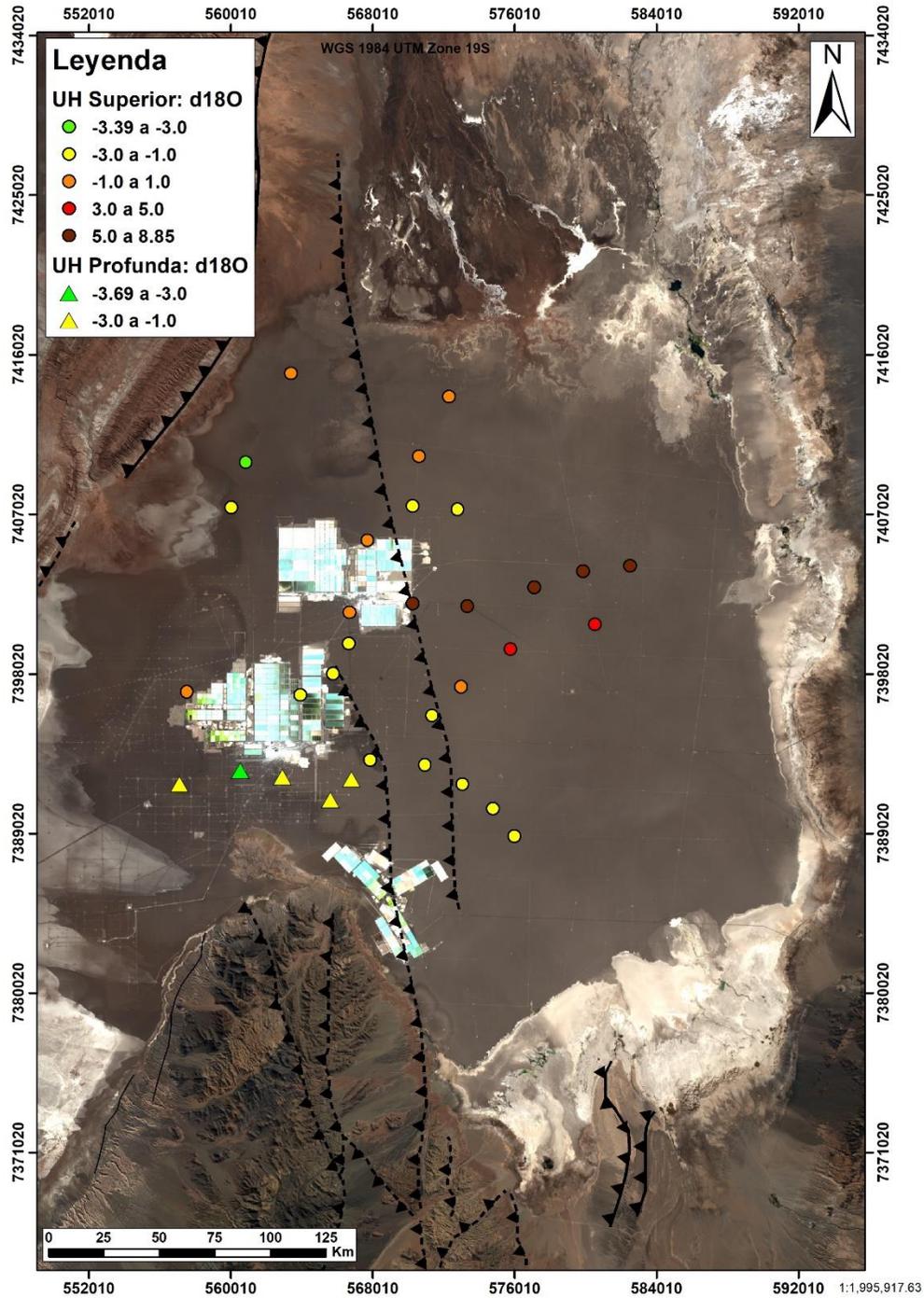


Figura 6-74. Distribución del isótopo $\delta^{18}\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ en el núcleo. Fuente: Elaboración propia

Los isótopos en el núcleo analizados en la molécula SO_4 , mostrados en la Figura 6-75, sí permiten diferenciar claramente entre UH Núcleo Superior y la UH Núcleo Profundo del Bloque Oeste. Puede verse que la UH Núcleo Profundo presenta valores entre 9,3 y 10,8‰ para $\delta^{18}O-SO_4$, mientras que la UH Núcleo Superior presenta valores comprendidos entre 10,3 y 13,7‰, de estos valores el 95% se encuentra entre 11,3 y 13,7‰. Para $\delta^{34}S-SO_4$, los valores oscilan entre 3,4 y 4,8‰ para la UH Profunda y entre 2,8 y 5,8‰ para la UH Superior, encontrándose el 95% entre 4,3 y 5,8.

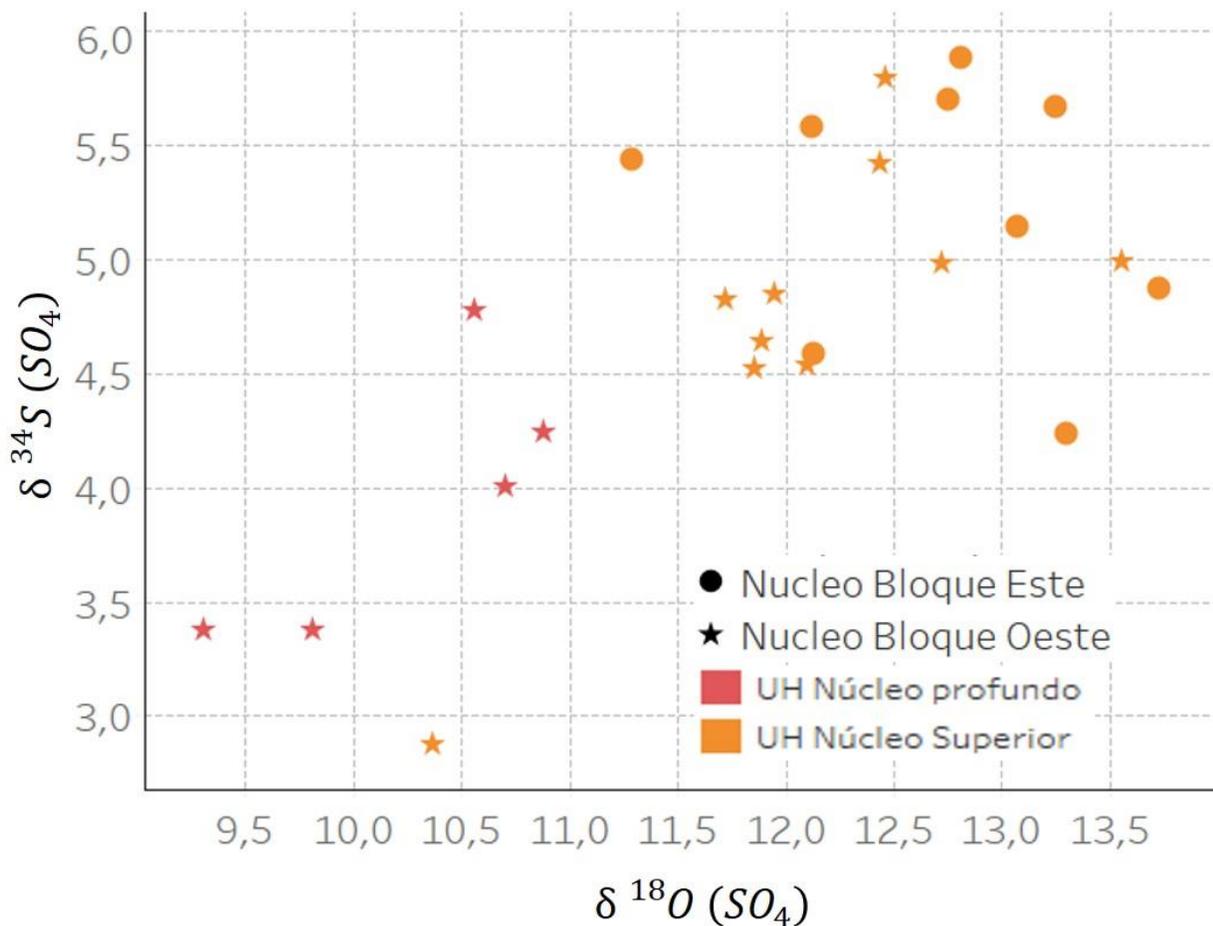


Figura 6-75. Relación isótopo $\delta^{34}S - SO_4$ vs $\delta^{18}O - SO_4$ para las muestras colectadas en el núcleo. Fuente: Elaboración propia con datos de (Huerta, 2012)

6.6.4 Modelo hidroquímico conceptual del Salar de Atacama

Con base en los antecedentes presentados en este capítulo, se integró la información en un modelo hidroquímico conceptual, a escala regional, de la evolución del agua desde su recarga hasta su incorporación al núcleo. La Figura 6-76 muestra un esquema conceptual con los distintos tipos de agua

presentes en la cuenca y los principales procesos que la afectan, desde las zonas de recarga hasta el núcleo del Salar.

La recarga principal a la cuenca se produce por la precipitación en las zonas altas y su posterior infiltración en el macizo rocoso fracturado. Parte del agua infiltrada aflora en las quebradas al este de la zona de estudio, escurriendo e infiltrando posteriormente en la UH Aluvial. Las aguas que circulan por estas quebradas presentan una marca isotópica que responde principalmente a la altura geográfica en donde se origina la recarga, ya que apenas se ha visto afectada por evaporación en su trayecto subterráneo (Figura 6-65). La química de esta agua se ha visto modificada como consecuencia de la disolución de sales, produciendo que las aguas de recarga presenten valores de conductividad desde menos de 1mS/cm a valores cercanos a 10mS/cm en algunos puntos (Figura 6-63).

Hacia el oeste, los depósitos aluviales dan paso a la zona marginal, caracterizada por ser una zona de topografía muy plana y con niveles muy someros como consecuencia del encuentro del agua con la interfaz salina. Debido a esta somerización de los niveles, la zona marginal se constituye como el principal sector en donde ocurre la evaporación.

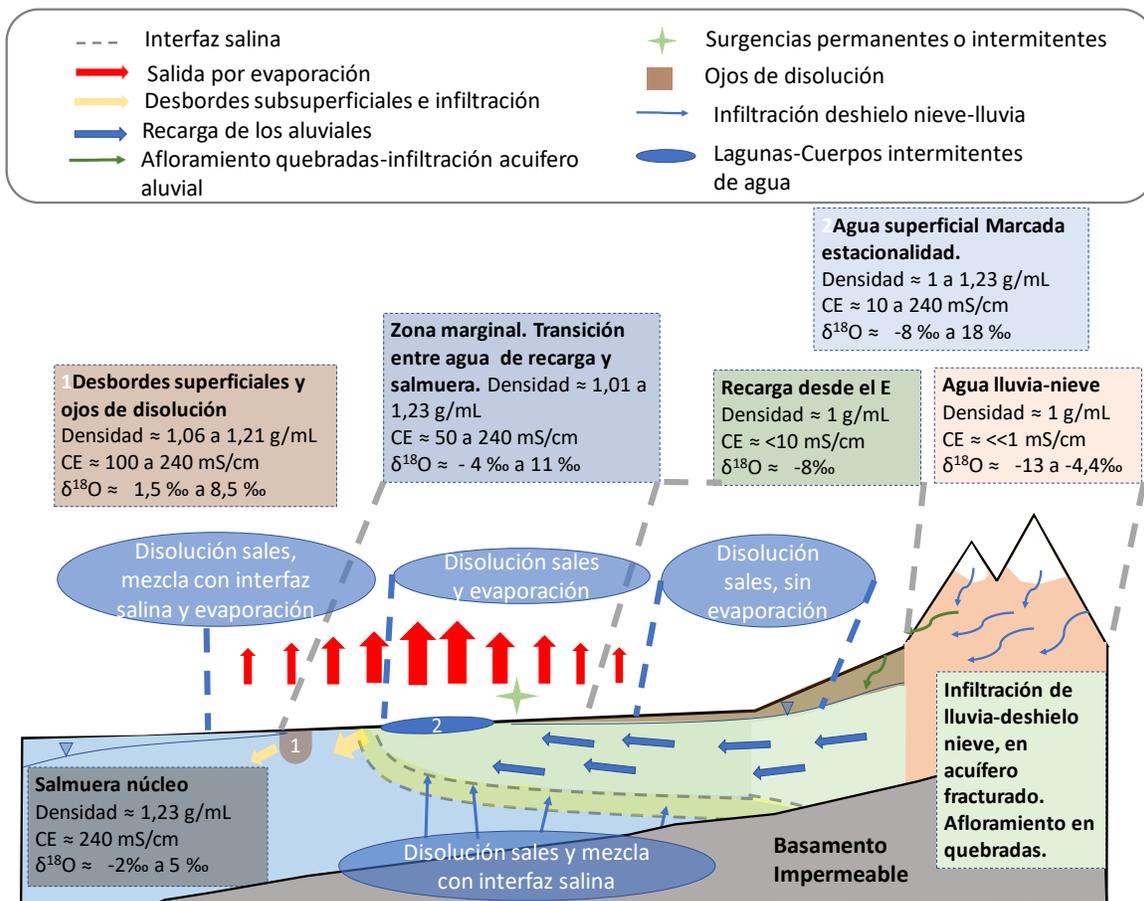


Figura 6-76. Esquema conceptual hidroquímico e isotópico, características de las aguas y procesos que la afectan durante su tránsito desde la zona de recarga hasta el núcleo del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

La interfaz salina define el límite donde se encuentra el sistema de agua y el sistema de salmuera del núcleo. El afloramiento de la interfaz, configurado por diversas surgencias en la UH Zona Marginal, se produce por un ascenso de las aguas de recarga provenientes de la descarga del acuífero aluvial sobre la salmuera de mayor densidad. Estas surgencias dan origen a cuerpos de agua superficial de carácter semipermanente (por ejemplo, en Aguas de Quelana,) o incluso a canalizaciones de estos desbordes que desembocan en lagunas (como por ejemplo Puilar o Lagunas Salada y Saladita en Peine).

En la UH Zona marginal, la evolución del agua dulce está condicionada por evaporación, disolución y precipitación de sales y mezcla con aguas de la interfaz salina, diferenciándose evoluciones extremas por disolución de sales y evaporación (compuesta principalmente por aguas superficiales) y otra por mezcla con la interfaz salina (que presenta un notable enriquecimiento en cloruros respecto a la otra tendencia).

Los procesos antes descritos: disolución, precipitación, evaporación y mezcla con la interfaz salina, son responsables de la salinización del agua, con valores de conductividad próximos a 240 mS/cm y valores enriquecidos para $\delta^{18}\text{O}$, de -2 a 5‰ para el núcleo. En algunas zonas se producen desbordes subsuperficiales sobre la interfaz salina en épocas de máximos (invierno), generando pequeños canales y lagunas (Soncor y Peine) o a concentrarse (*open pools*; SGA (2015)), por ejemplo, en Tilopozo. Estas aguas se presentan enriquecidas en cloruros y afectadas por evaporación, finalmente terminan evaporándose o mezclándose con la salmuera del núcleo (Amphos 21, 2009b; IDAEA-CSIC, 2017).

En el sistema de salmuera, se han caracterizado las unidades hidrogeológicas Núcleo Superior y Núcleo Profundo, diferenciándolas por su química, siendo la unidad profunda más enriquecida en potasio. Se reconocen diferencias en la UH superior entre bloque este y bloque oeste. Los isótopos de H_2O permiten diferenciar al bloque este con salmueras algo más evaporadas, y los isótopos de SO_4 permiten diferenciar entre UH Núcleo Superior y UH Núcleo Profundo en el bloque oeste.

6.6.5 Hidroquímica de Sistemas locales

A lo largo de este apartado se explican aquellos aspectos concretos de cada sistema local que no fueron abordados en detalle en el apartado 6.6.2, referentes a las características intrínsecas de los sistemas lagunares, las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas y una breve caracterización isotópica.

6.6.5.1 Sistema Soncor

6.6.5.1.1 Origen y fuentes de alimentación al sistema Soncor

En el sistema Soncor (específicamente las lagunas Chaxa y Barros Negros) se identifican dos zonas de alimentación, una desde el Norte con carácter superficial, cuya alimentación proviene de la descarga del acuífero aluvial al Noreste del Salar, y que alimenta a las lagunas Chaxa y Barros Negros. La segunda fuente de alimentación es desde el este, proveniente desde los Altos Andinos, y de carácter

subterráneo. Esta última fuente alimenta a la laguna Puilar. A continuación, se caracterizan ambas fuentes de agua.

- **Alimentación desde el norte**

La recarga desde el norte, de carácter superficial, representa los principales aportes de agua al sistema Soncor. Las primeras manifestaciones superficiales se encuentran en la zona conocida como Llano del Tambillo. Desde aquí se diferencian dos canales que aguas abajo van incrementando su caudal. La Figura 6-77 muestra el área conocida como Llano del Tambillo, (muestras N07 y N06), y como se diferencian dos canales de agua superficial que aguas abajo convergen (en el punto APSA 03).

La Figura 6-78 muestra la relación $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ [‰] vs Cl [meq/L] para las muestras de ambos ramales en verano de 2016 (a) e invierno de 2017 (b). Se pueden diferenciar dos tendencias, definidas por las muestras colectadas en el ramal E y el ramal W del canal de Burro Muerto.

El ramal del W (APSA 06, APSA 04 y APSA 04B), representa la tendencia B, que tiene menores salinidades para un mismo valor de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$. Esta tendencia se interpreta como que el ramal E recibe su alimentación principalmente desde la recarga subsuperficial / subterránea proveniente desde el borde este, con aguas influenciadas por mezcla con aguas más salinas y valores similares de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$.

El ramal del E, (N07, APSA 04 y N04), representa la tendencia A, con menores concentraciones de cloruro que el ramal del W. Esta tendencia se interpreta como el afloramiento de aguas desde el norte, que no han sufrido un enriquecimiento en cloruros por el contacto con la interfaz, sino por disolución de sales y evaporación.

Al confluir ambos cauces se produce mezcla entre ambos ramales (APSA 03), predominando la química del ramal E, que a esta altura ha incrementado gradualmente su caudal en comparación con el ramal del W. Aguas abajo de la confluencia continúa habiendo aportes al canal desde el borde este, y las aguas son sometidas también a evaporación y disolución de sales. Estas tendencias fueron también descritas en estudios anteriores (Ortiz C. , y otros, 2014, IDAEA-CSIC, 2017 y Aravena R. , 2017).

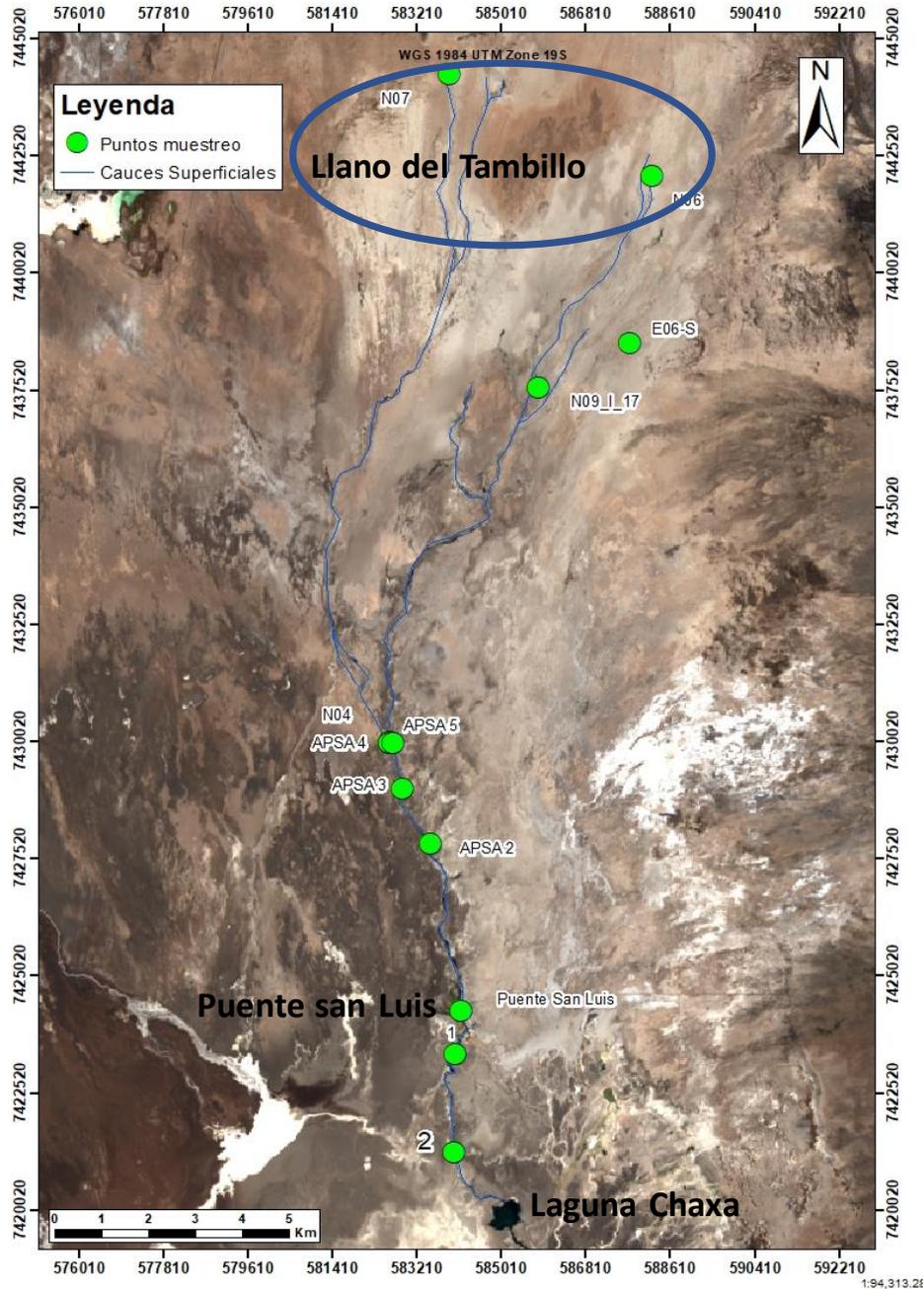


Figura 6-77 Puntos de muestreo para comprender origen y funcionamiento de la alimentación de las lagunas Chaxa y Barros Negros. Fuente: Elaboración propia

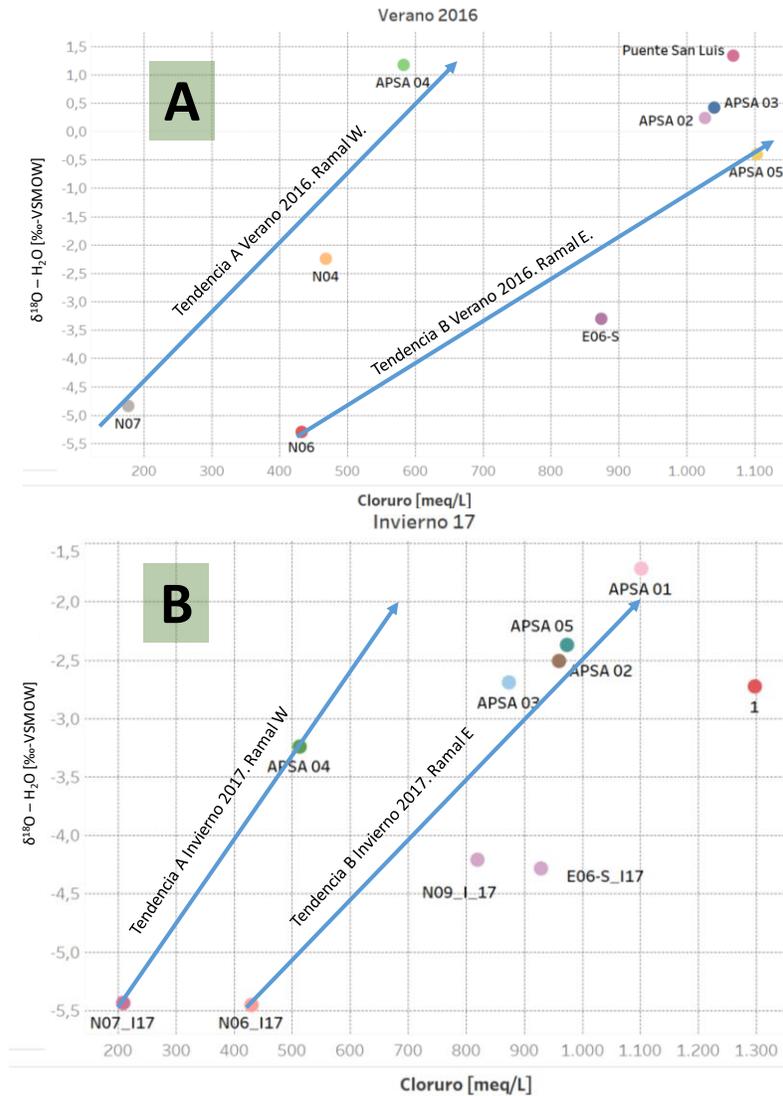


Figura 6-78 Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ y Cl para las muestras de los ramales Este y Oeste para verano de 2016 (a) e invierno de 2017 (b). Fuente: Elaboración propia.

La predominancia de la tendencia B aguas abajo de la confluencia, indica que el incremento de salinidad en el canal de Burro Muerto viene marcado por aportes desde el este, los cuales son predominantes frente a los aportes del oeste tanto en verano como en invierno.

Aguas abajo del puente San Luis se reconoce un aporte de agua subsuperficial al canal de Burro Muerto. Puede verse en la Figura 6-79 como el punto 2 tiene agua más empobrecida en $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ (valores menores) y los cloruros son inferiores o similares a los registrados en Puente San Luis. Ambos hechos se explican por la existencia de un aporte, entre Puente San Luis y Chaxa, de agua proveniente desde el Borde Este, con características isotópicas más empobrecidas (menores valores de $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$) y con contenidos en cloruros similares en torno a 40.000-50.000 mg/L.

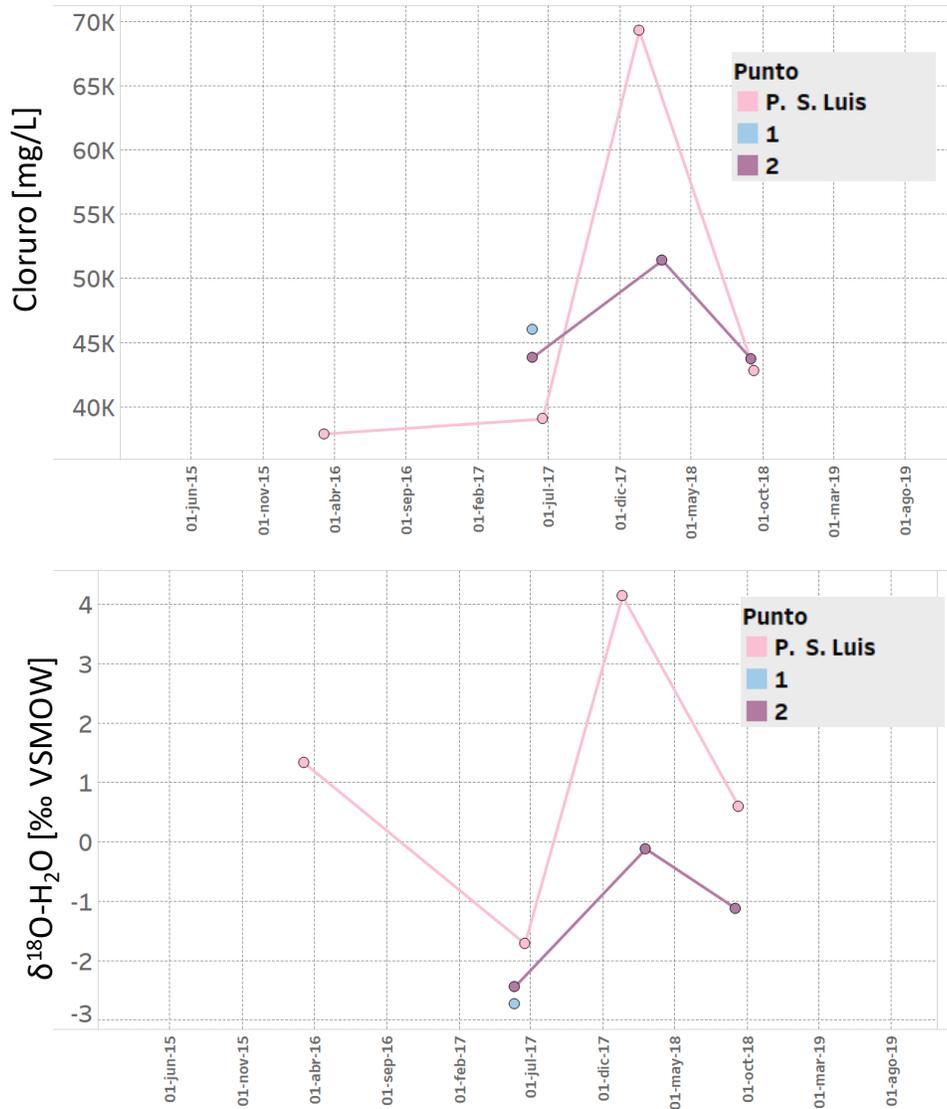


Figura 6-79 Evolución temporal de Cloruros y δ¹⁸O-H₂O desde puente San Luis al Sur. Fuente: Elaboración propia

- Alimentación desde el este

Para caracterizar los procesos que afectan a la recarga proveniente desde el Este a lo largo del sistema de flujo, a modo de ejemplo, se analiza un perfil Este-Oeste con puntos muestreados en este sector (Figura 6-80a). El Perfil está compuesto por agua de una quebrada (Soncor 1), y agua de 5 pozos con profundidades comprendidas entre 147 y 6m. Los pozos de mayor profundidad se encuentran al este debido a la mayor profundidad del nivel freático; al avanzar hacia el oeste, la llana topografía y el encuentro con la interfaz salina provoca que el nivel freático se aproxime a la superficie y las profundidades de los pozos disminuyan. Las muestras corresponden a distintos periodos: verano 2016, invierno 2017, y verano e invierno de 2018.

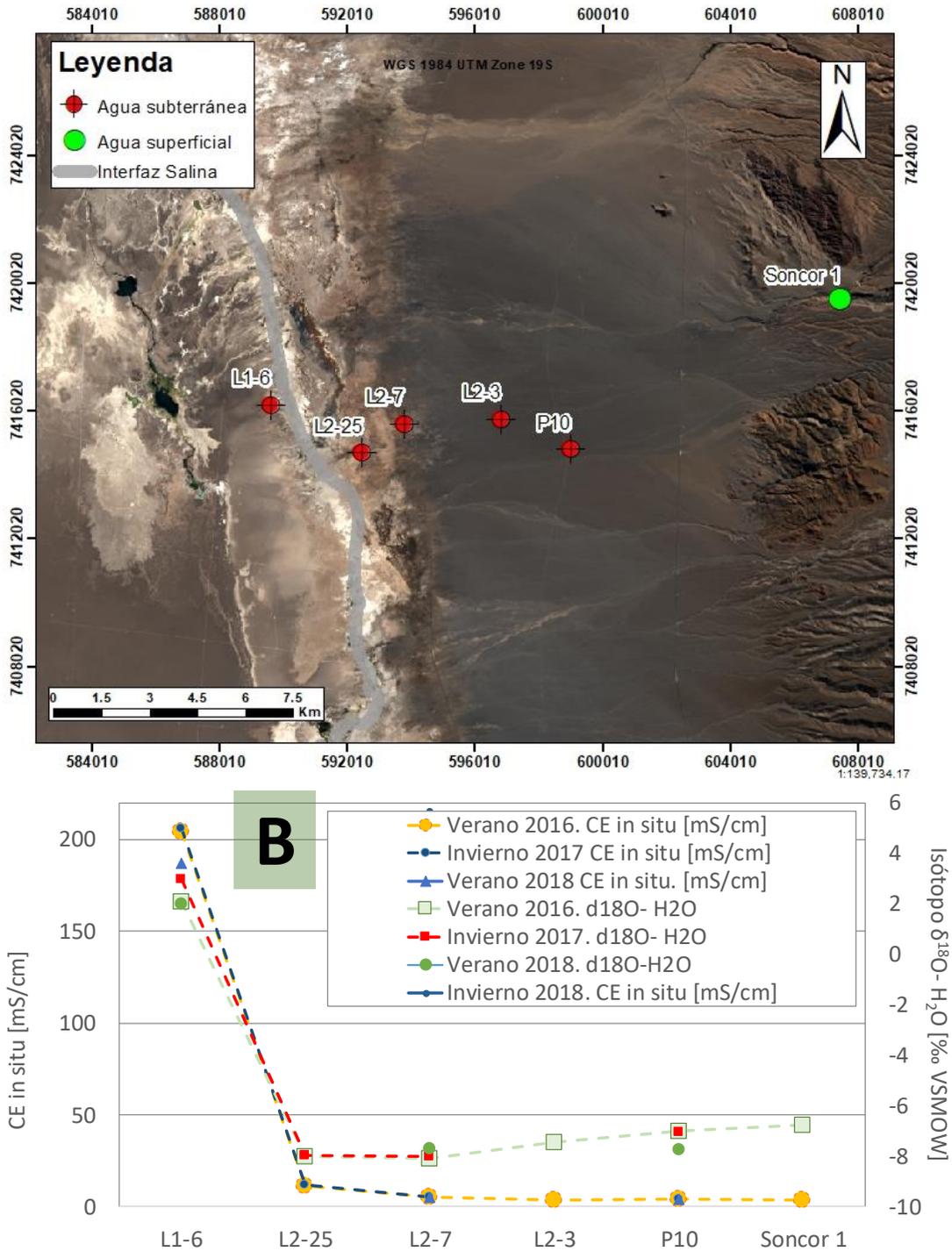


Figura 6-80 Localización perfil W-E y puntos muestreados en verano de 2016, invierno de 2017 y verano e invierno de 2018(a). Perfil W-E de CE [ms/cm] y $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰VSMOW] (b). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6-80b muestra que, al avanzar las aguas por la UH Aluvial hacia el oeste, éstas se enriquecen en sales, aumentando su conductividad, pero sin mostrar aumento en sus valores de $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$. De hecho, en varios muestreos los valores isotópicos disminuyen hasta el punto L2-7, debido al ascenso de aguas de recarga menos evaporadas que las que afloraron en la zona de quebradas del este. En este trayecto las aguas evolucionan por disolución de sales presentes en la formación, en ausencia de evaporación por la profundidad del nivel en este tramo.

Entre el punto L2-7 y L2-25 se nota un cambio de tendencia en los resultados isotópicos, mostrando un leve enriquecimiento, consecuencia de que los niveles se encuentran más someros y han comenzado a verse afectados por la evaporación. Al oeste del pozo L2-25 se produce un aumento importante tanto en conductividad como enriquecimiento isotópico ($\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$), debido a evaporación, disolución de sales y mezcla con aguas de la interfaz salina. El punto L1-6, situado al oeste de la interfaz salina, muestra valores de conductividad e isotópicos ($\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$) asociados a la salmuera. Estos resultados confirman lo descrito en estudios anteriores (Amphos 21, 2009a y Amphos 21, 2009b).

Esporádicamente, en épocas de máximos niveles piezométricos, la recarga desde el este alcanza a rebosar sobre la interfaz salina, pudiendo llegar a aflorar para posteriormente infiltrarse y circular como agua subsuperficial, llegando a aportar al canal de Burro Muerto y al contorno este de la laguna Barros Negros.

La Figura 6-81a presenta un perfil W-E para algunos puntos de la UH Aluvial (P09 de 140m y L7-6 de 50m de profundidad), las muestras en el canal de Puilar (Puilar – Puilar_I17), y una muestra tomada en la laguna Puilar en invierno de 2017 (Puilar-lag_I17). La evolución es similar al perfil mostrado en la Figura 6-80; el hecho de que el canal muestre variaciones pequeñas para su enriquecimiento isotópico ($\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$) entre verano e invierno (Figura 6-81), confirma que su alimentación es exclusivamente a partir de la descarga de agua subterránea de la UH Aluvial. Se observa que en invierno la muestra del canal presentó un mayor valor de conductividad que en verano, lo que puede ser explicado por disolución de sales depositadas en la zona cercana al canal durante el verano anterior (Amphos 21, 2009a y Amphos 21, 2009b). En invierno de 2017 se colectó una muestra en uno de los canales de descarga de la laguna (Puilar-lag_I17), la cual muestra valores más enriquecidos de $\delta^{18}\text{O}$ y mayor conductividad, lo que evidencia que buena parte de la descarga de esta laguna se produce por evaporación.

En caso de existir un caudal mayor que el que puede almacenar la laguna, este rebosa por dos canales, que aguas abajo terminan por infiltrarse en la UH Zona Marginal (ver detalle en imagen de Google Earth, Figura 6-81). Esta agua queda disponible para ser principalmente evaporada o circular subsuperficialmente y recargar lateralmente en el entorno de Chaxa y el Canal de Burro Muerto. (IDAEA-CSIC, 2017).

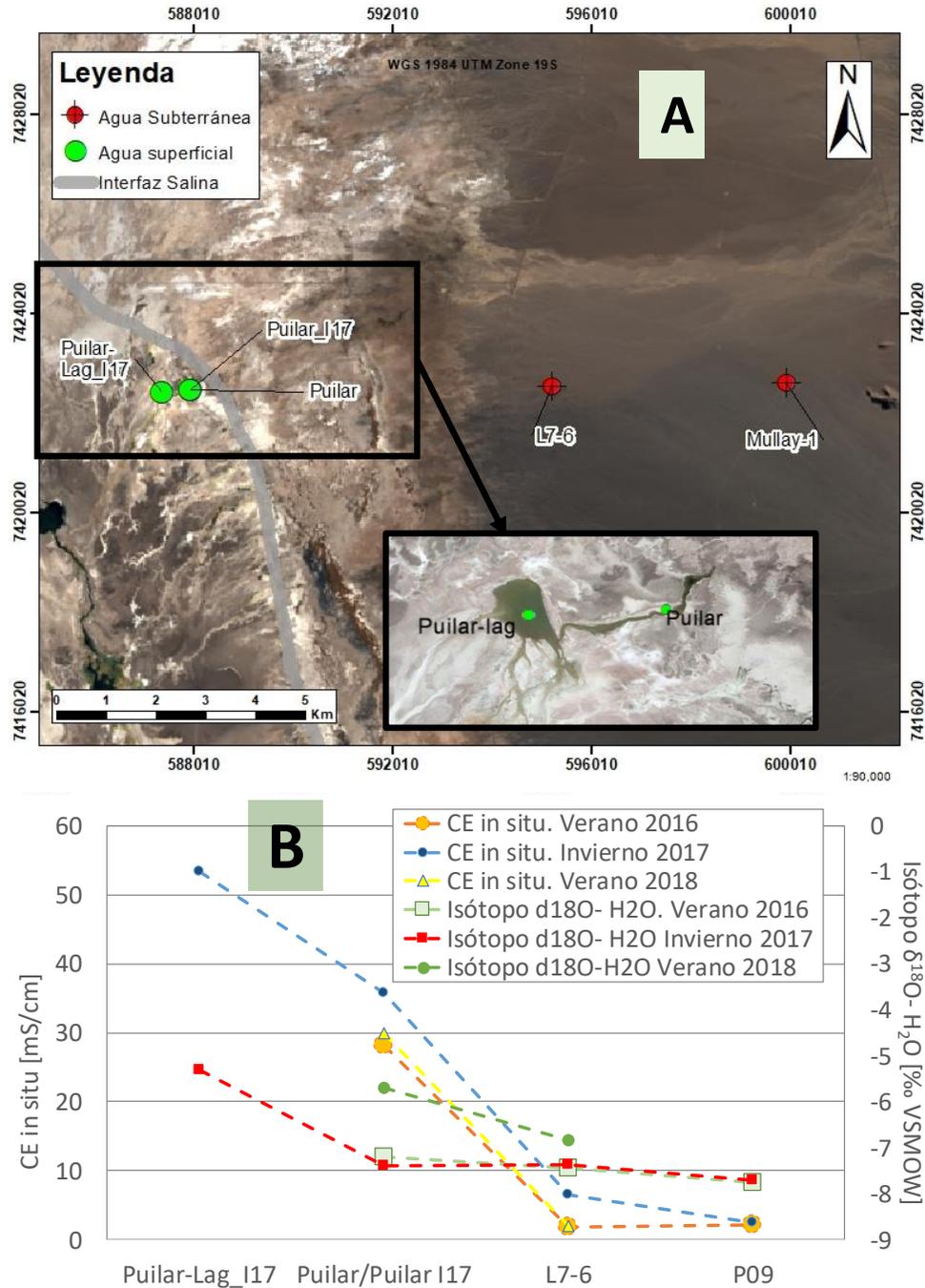


Figura 6-81 Localización perfil W-E y puntos muestreados en verano de 2016, invierno de 2017 y verano e invierno de 2018 (a). Perfil W-E de CE [mS/cm] y $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [%VSMOW] de las muestras tomadas en el aluvial y en el entorno de la laguna Puilar para verano de 2016, invierno de 2017 y verano de 2018 (b). Fuente: Elaboración propia.

6.6.5.1.2 Relación aguas superficiales – subterráneas.

Aguas abajo del Puente San Luis, el canal de Burro Muerto alimenta a las lagunas Chaxa y Barros Negros. La Figura 6-82 muestra la variación isotópica estacional en cinco puntos de agua superficiales, de Norte a Sur: Puente de San Luis, Laguna Chaxa, Reglilla Barros Negros, Barro Negros Sur y zona desborde Sur (este último punto comenzó a ganar importancia desde el año 2012). Los datos empleados en esta figura son de SQM, a excepción del periodo entre 2013 y 2015, que corresponden al EIA de Albemarle (SGA, 2015). Por un lado, se observa un claro aumento del enriquecimiento isotópico hacía el sur, mayor en verano que en invierno, debido a la intensa evaporación y los menores caudales. Por otro lado, puede verse como el máximo enriquecimiento en $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ se da en verano para todos los puntos, coincidente con el periodo de máxima evaporación y mínimos caudales entrantes desde el canal de Burro Muerto. Los mínimos se dan en invierno, coincidiendo con los máximos caudales desde el canal de Burro Muerto y la menor tasa de evaporación.

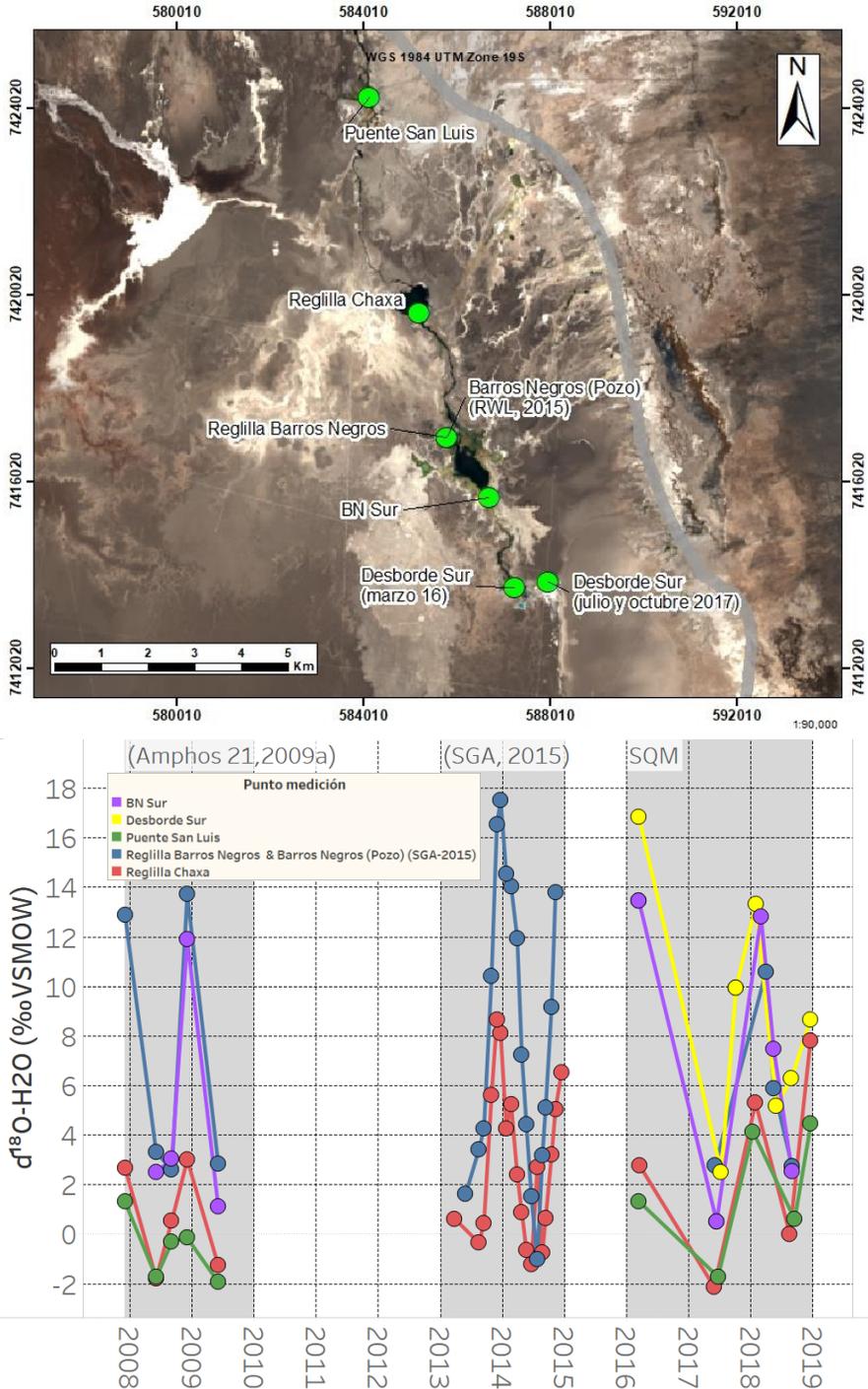


Figura 6-82. Ubicación puntos de muestreo. (a) y evolución temporal de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ en aguas superficiales a lo largo del Sistema Soncor (b). Fuente: Elaboración propia con datos de terceros en el periodo entre 2013 y 2015. (SGA, 2015)

En la Figura 6-83 se presenta la relación entre $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ VSMOW] y cloruro [meq/L] para las muestras del sector Soncor colectadas en los muestreos realizados. Pueden diferenciarse dos tendencias extremas, marcadas en trazo continuo. La línea de trazo continuo roja (tendencia A) está formada por aguas superficiales, las cuales presentan una evolución continua desde la zona de Llano del Tambillo, ubicadas en el extremo inferior izquierdo hasta las aguas del desborde Sur y Cola de Pez, situadas en el extremo superior derecho. Esta línea de evolución representa una evolución fundamentalmente por evaporación y disolución de sales.

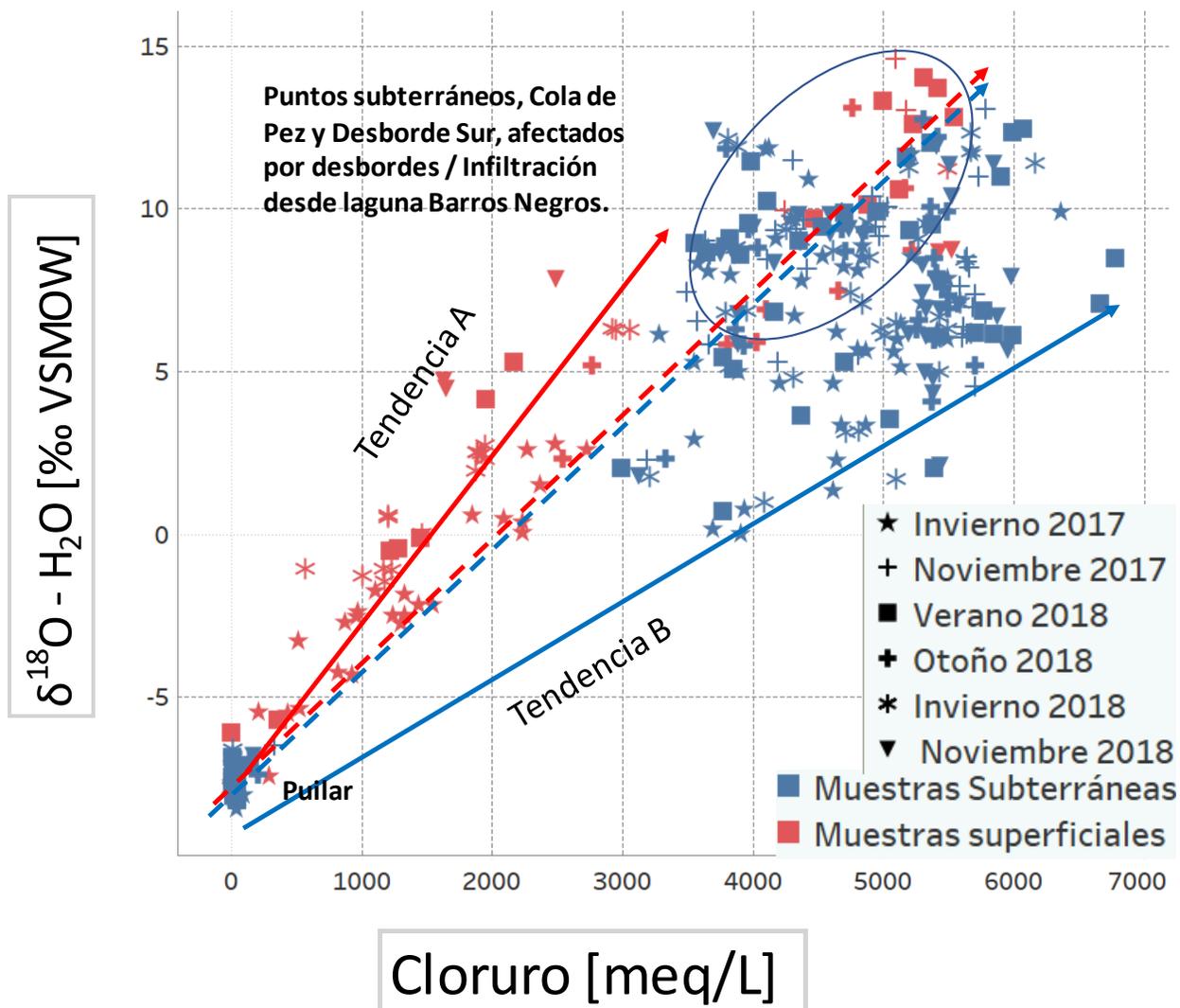


Figura 6-83 Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ VSMOW] y cloruro [meq/L] para las aguas colectadas en las distintas campañas en el sistema Soncor. Fuente: Elaboración propia.

La línea de trazo continuo azul (tendencia B) se encuentra formada por puntos que representan agua de la interfaz salina, con valores muy elevados de cloruro para valores de evaporación más bajos que los que se alcanzan en la tendencia A. Esta línea de evolución representa aguas con mezcla de la interfaz salina, la cual presenta valores muy elevados de cloruros y notablemente menos evaporados (7 – 8 %) comparadas con los alcanzados en los sistemas de agua superficial (hasta 15%). Resulta importante hacer notar que en este sistema se observa un cambio brusco entre las aguas de la UH Aluvial y las aguas de la interfaz salina (UH Zona Marginal y UH Núcleo Superior), no existiendo muestras entre 200 y 3000meq/L, lo que significa que la recarga desde el este queda en su mayoría evaporada en el área de afloramiento, no alcanzando a rebosar sobre la interfaz salina. En periodos puntuales, de importantes episodios de lluvias, pueden producirse desbordes sobre la interfaz salina, que en su mayor parte serán evaporados.

Las aguas superficiales que se encuentran alineadas según la línea roja de traza discontinua (Figura 6-83) pertenecen a la laguna Barros Negros en época de mínimos caudales y máxima evaporación (verano). Existe un grupo de aguas que se ubican por debajo de esta línea roja de trazo discontinuo, las cuales representan los desbordes desde la laguna Barros Negros (Cola de Pez y Desborde Sur). Estos desbordes son principalmente agua de la laguna Barros Negros, pero se encuentran algo mezcladas con agua del acuífero salino (UH Núcleo Superior).

Por último, existen abundantes puntos de agua subterránea que se encuentran en la tendencia de las aguas superficiales o próximos a ella. Estos son puntos que reciben aportes desde los desbordes de la laguna Barros Negros, ubicados en Cola de Pez y Desborde Sur.

Una conclusión importante que se obtiene de la Figura 6-83 es que las aguas superficiales no están recibiendo aportes de salmuera desde la UH Núcleo Superior, situado bajo ellas, siendo su alimentación principal la que llega desde el canal de Burro Muerto, en el caso de Chaxa y Barros Negros, y la descarga de la UH Aluvial en el caso de laguna Puillar. Sin embargo, algunos puntos de la UH Núcleo Superior sí están recibiendo aportes desde el sistema lagunar Barros negros, fundamentalmente los puntos situados en las áreas de desborde de Cola de Pez y Desborde sur.

6.6.5.1.3 Caracterización isotópica del Sistema Soncor

La principal descarga de las aguas en la zona marginal se produce por el efecto de la evaporación desde las aguas superficiales y desde la napa poco profunda. Este hecho queda demostrado por la relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$, expuesto en la Figura 6-84. En esta figura puede verse que las muestras colectadas en las distintas campañas se alinean según una línea de evaporación local (LEL), con una pendiente muy parecida a la descrita por otros actores para el Salar de Atacama (Ortiz y otros (2014); Aravena (2018a)).

Como referencia, se ha añadido la línea meteórica local para el norte de Chile, definida en (Aravena, y otros, 1999). Las muestras correspondientes a aguas de recarga se ubican en los valores más empobrecidos (negativos) para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Las más evaporadas, en el extremo opuesto de la gráfica con los valores más positivos (enriquecidos), corresponden a las aguas superficiales de Barros Negros en

verano, sus desbordes superficiales y algunos puntos subterráneos ubicados en los sectores de desbordes. Los puntos intermedios presentan una línea de evolución por evaporación, pero también una línea de mezcla entre aguas con distinto grado de evaporación. (Aravena R. , 2018a).

En épocas de máximos caudales (episodios fuertes de precipitación) puede producirse el desborde de agua de recarga sobre la interfaz salina desde el este, produciendo escurrimientos subsuperficiales que en su mayor parte son evaporados. El hecho de que no se observe una continuidad en la línea de evaporación para las aguas subterráneas, indica que esta recarga es de carácter residual.

En las zonas de desborde de la laguna Barros Negros sí existen puntos que muestran indicios de recibir aportes desde el sistema lagunar. Estos sectores coinciden con las aguas más evaporadas del sector, lo que sugiere que la recarga efectiva al núcleo no resulta importante, salvo en periodos de máximos asociados a precipitaciones intensas.

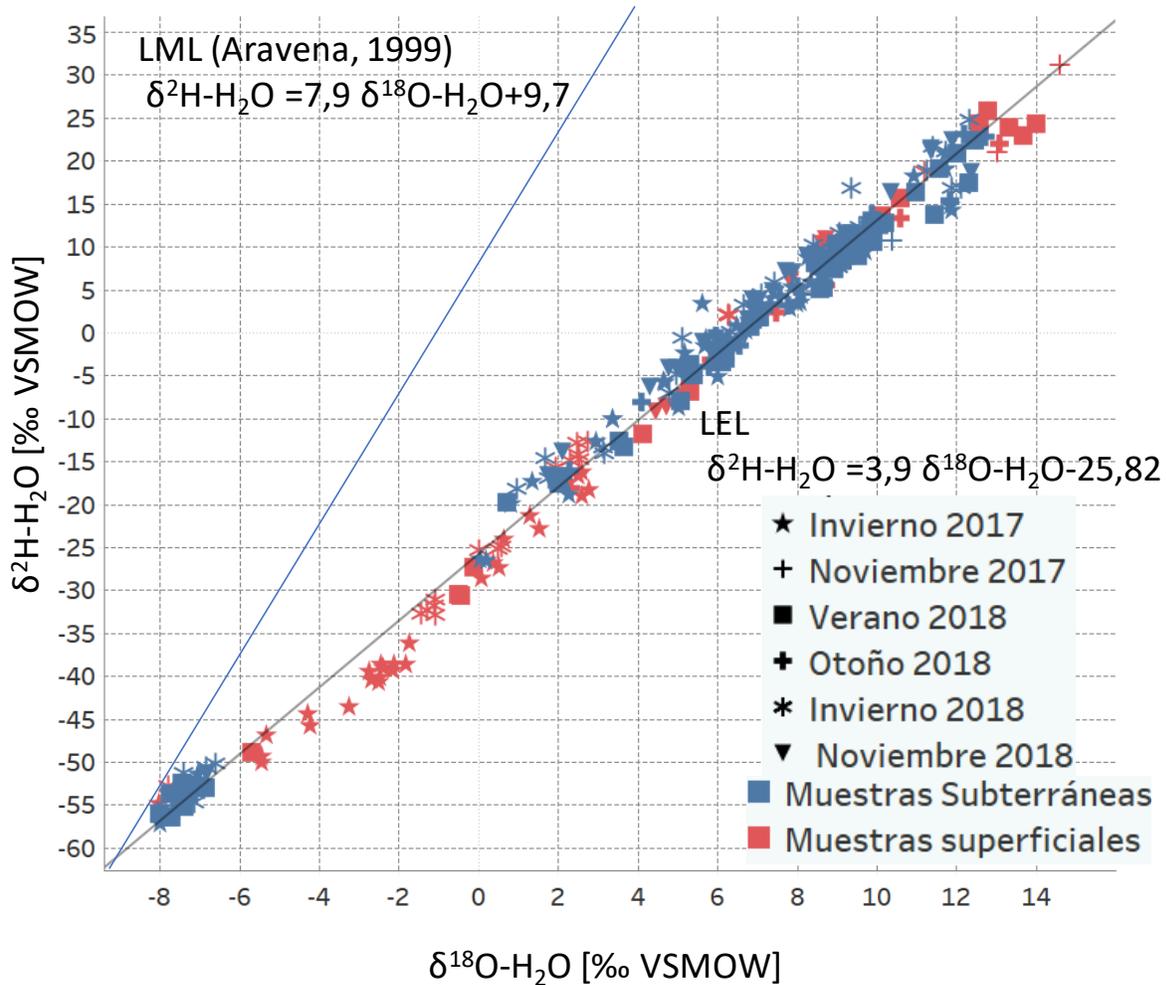


Figura 6-84 Relación $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ vs $\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$ para las aguas del sistema Soncor.
 Fuente: Elaboración propia

6.6.5.2 Sistema Aguas de Quelana

En el sistema Aguas de Quelana, las aguas que alimentan a la UH Aluvial y la evolución que presentan en la zona marginal presentan características similares al resto de los sistemas, por lo que su caracterización puede considerarse similar a la descrita en 6.6.2 en detalle de los puntos muestreados en las distintas campañas y sus características puede verse en la Figura 6-85

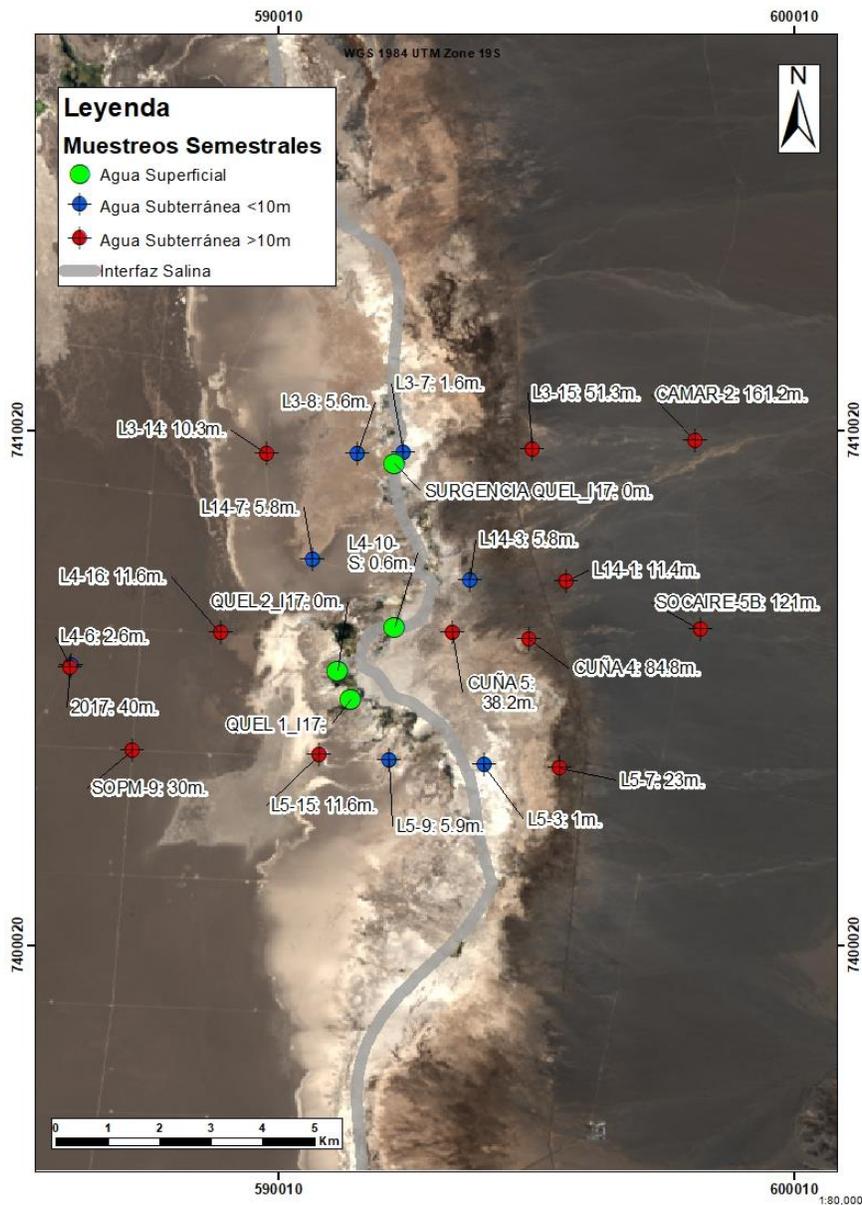


Figura 6-85. Puntos muestreados en las distintas campañas. Fuente Elaboración propia

6.6.5.2.1 Relación aguas superficiales – subterráneas.

Para comprender la dinámica existente entre las aguas superficiales y el acuífero se ha graficado la relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ vs cloruros en la Figura 6-86 para los puntos mostrados en la Figura 6-85.

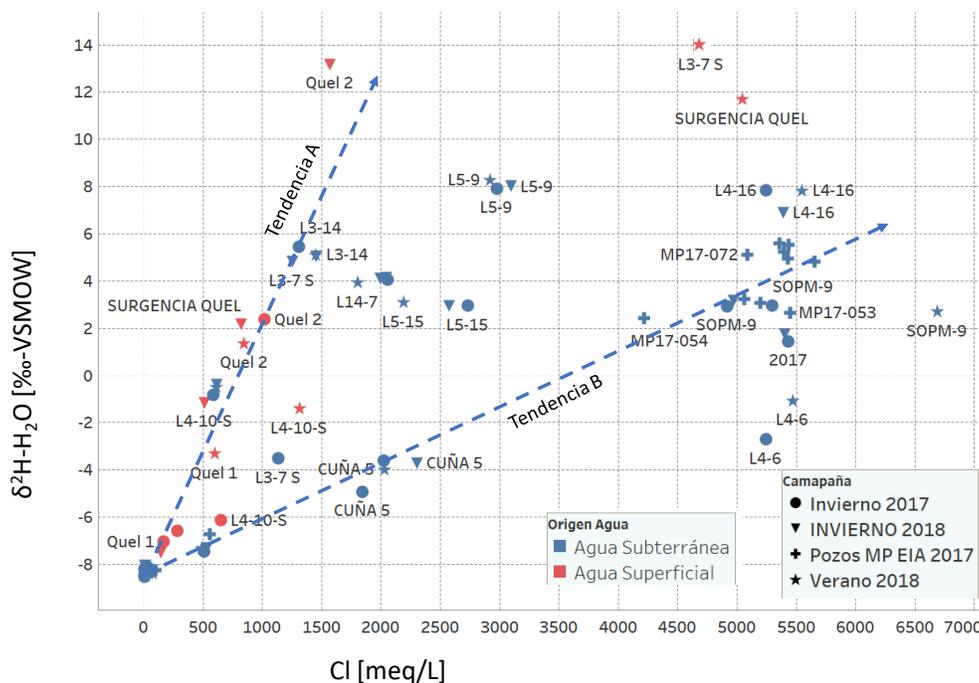


Figura 6-86. Relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰] vs cloruros [meq/L] para las distintas campañas de muestreos (diferenciadas por forma) para las aguas superficiales y subterráneas (diferenciadas por color) en el sistema Aguas de Quelana. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6-86 se encuentran diferenciadas las aguas superficiales de subterráneas según color y las distintas campañas de muestreo según forma. Puede verse como se distinguen dos tendencias, A y B. El origen de ambas tendencias está definido por las aguas de recarga al sistema Aguas de Quelana, con concentraciones muy bajas de cloruros y valores de $\delta^{18}\text{O}$ muy empobrecidos (en torno a -8‰).

La tendencia A está representada fundamentalmente por aguas superficiales que presentan unas concentraciones de cloruros mucho menores que las que se observan en la tendencia B, para un mismo valor de $\delta^{18}\text{O}$. Estas aguas han evolucionado fundamentalmente por evaporación somera y disolución de sales. Contrariamente, las aguas de la tendencia B sufren enriquecimiento en cloruros mucho mayor para un mismo valor de $\delta^{18}\text{O}$. Los puntos que se alinean según la tendencia B presentan mezcla con aguas de la interfaz salina, caracterizada por altas concentraciones de cloruros. Además, se observan algunos puntos entre ambas tendencias, los cuales han sufrido una mezcla de ambos procesos.

Estas evoluciones determinan que el agua que alimenta a los humedales en Aguas de Quelana proviene de la recarga desde la UH Aluvial y que no existen aportes de salmuera (UH Núcleo Superior) al humedal, lo que confirma el modelo conceptual establecido en estudios anteriores (Aravena R. , 2018).

6.6.5.2.2 Caracterización isotópica del Sistema Aguas de Quelana

La principal descarga en el sistema Aguas de Quelana se produce en la zona marginal, por el efecto de la evaporación desde las aguas superficiales y desde la napa poco profunda. Este hecho queda demostrado por la relación $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$, expuesto en la Figura 6-87. En esta figura puede verse que las muestras colectadas en las distintas campañas se alinean según una línea de evaporación local (LEL), con una pendiente muy parecida a la descrita para otros sectores en el Salar de Atacama (Ortiz C. et. al, 2014, Aravena R., 2018).

Se ha añadido como referencia la línea meteórica local definida para el norte de Chile en (Aravena, y otros, 1999). Las muestras correspondientes a aguas de recarga se ubican en los valores más empobrecidos (negativos) para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Las más evaporadas, correspondientes a la zona de afloramiento de aguas por la interfaz salina entre zona marginal y la transición al núcleo, se encuentran en el extremo opuesto de la gráfica, con los valores más positivos (enriquecidos). Los puntos intermedios presentan una línea de evolución por evaporación, pero también una línea de mezcla entre aguas con distinto grado de evaporación.

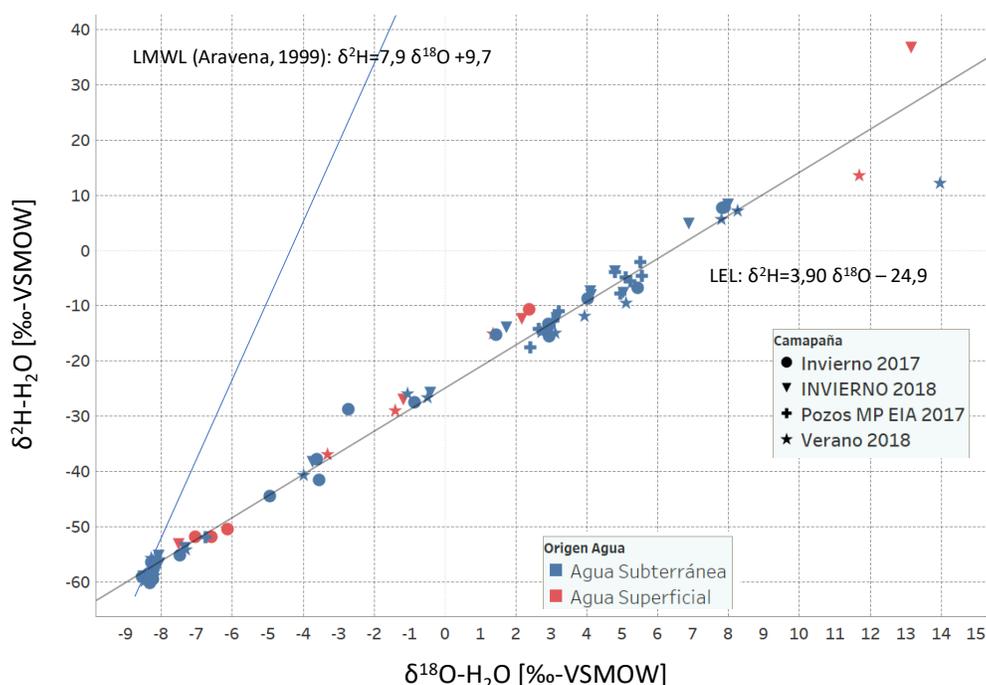


Figura 6-87. Relación isótopos $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}-\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ para las distintas campañas de muestreo realizadas por SQM. Nótese la alineación característica descrita por otros estudios para Salar de Atacama (Salas et al., 2010; Ortiz et al., 2014, Aravena 2018). Fuente: elaboración propia.

Esporádicamente, en épocas de máximos niveles (invierno), puede haber un excedente de agua que no alcanza a evaporarse y rebosa sobre la interfaz salina, comenzando un proceso de mezcla con la interfaz salina y viéndose a su vez afectado por evaporación. El destino final de esta salmuera es evaporarse en una parte importante y otra parte menor infiltrarse en la UH Núcleo Superior.

6.6.5.3 Sistema Peine

6.6.5.3.1 Sector Este del sistema Peine

La alimentación de agua del sistema Peine proviene desde el este, cuya recarga se produce en los Altos Andinos. En general, su funcionamiento coincide con la descripción del apartado 6.6.2, por lo que no se precisa de un mayor detalle. Además, como puede verse en la Figura 6-88, existen algunos puntos surgentes (L10-1, Esfera) y otros de similar profundidad que no son surgentes (Cuña 6), que representan agua de recarga con algo de mezcla de agua de la interfaz salina. El hecho de que existan unos surgentes y otros no surgentes con profundidades y características químicas e isotópicas similares, sugiere que el confinamiento en este sector es de carácter local.

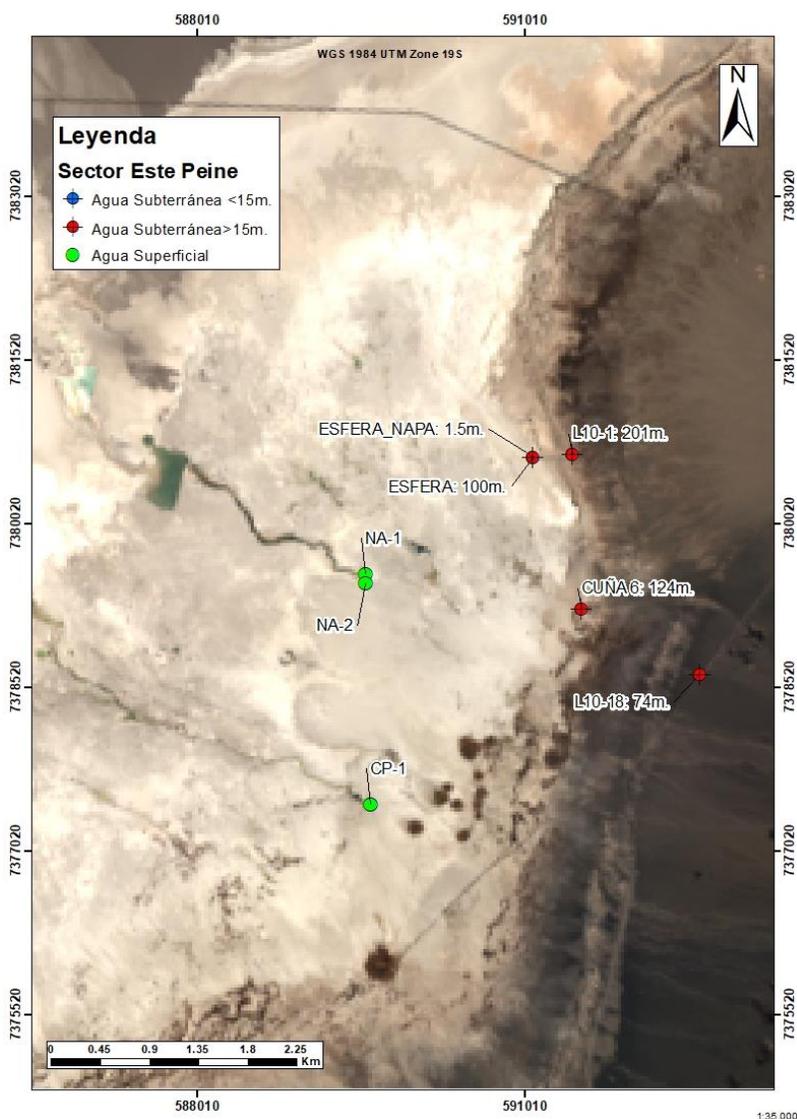


Figura 6-88. Puntos de muestreo en el sector Este de Peine. Fuente: Elaboración propia

Las características químicas (cloruros, mg/L) e isotópicas ($\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$, ‰) para los puntos mostrados en la Figura 6-88, pueden verse en Figura 6-89. En general, las aguas de recarga presentan características estables, con valores menores de 5.000 mg/L de cloruros y valores de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ muy próximos a -7‰. Los puntos Cuña-6 y Esfera presentan mayores concentraciones de cloruros para valores de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ bajos, similares a los del agua de recarga. Esto indica que se trata de puntos que captan, en parte, aguas de la interfaz salina. Los puntos superficiales, como NA-1 NA-2 y CP-1, presentan altas concentraciones de cloruros y valores isotópicos también mayores, lo que indica que han sido afectados por evaporación, aumentando en consecuencia sus concentraciones de cloruros.

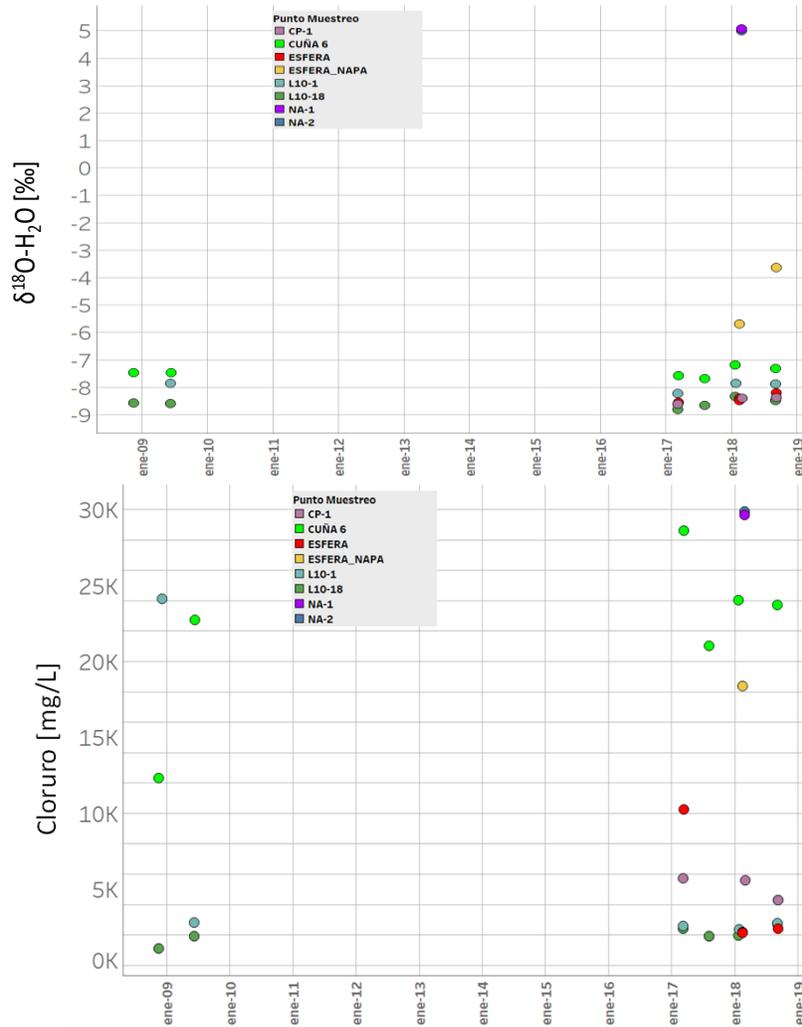


Figura 6-89. Resultados de cloruro [mg/L] y $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ [‰] para las aguas del Sector Este del sistema Peine. Fuente: Elaboración propia

6.6.5.3.2 Descarga del acuífero aluvial al canal de las lagunas.

En la Figura 6-90 se presentan las muestras colectadas en distintas campañas en las distintas unidades hidrogeológicas. El perfil 1, con muestras colectadas en la UH Aluvial, UH Zona Marginal y UH Núcleo Superior, se usa para describir la descarga del acuífero aluvial al canal de agua superficial y la evolución de las aguas a lo largo del canal hasta alcanzar el núcleo o evaporarse completamente.

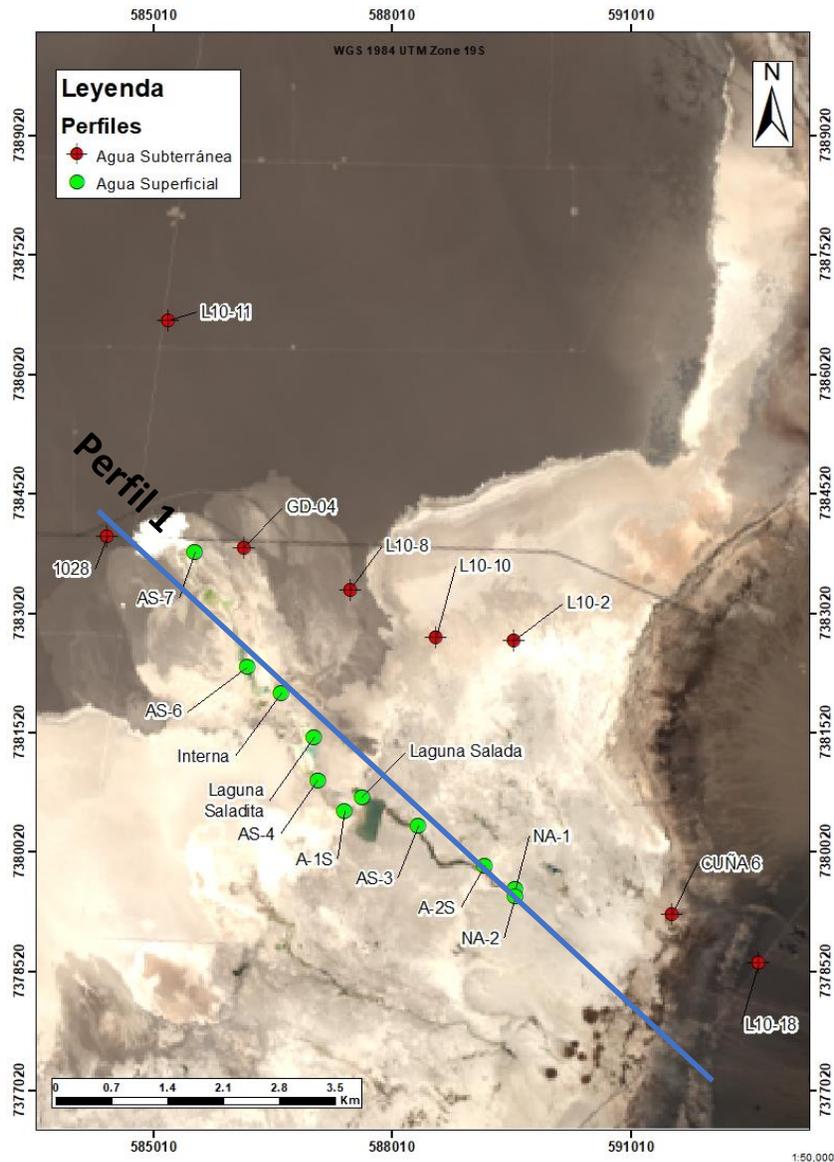


Figura 6-90. Ubicación de perfil 1 con las muestras que se emplean para analizar la evolución de las aguas del acuífero aluvial, la descarga al sistema de agua superficial y su evolución hacia el núcleo.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6-91 se observa la evolución, para distintas campañas de muestreo realizadas por SQM, de las conductividades (CE) e isótopo $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ desde el aluvial hasta el núcleo, a su paso por el canal que da origen a las lagunas Salada y Saladita. En general, los datos muestran una evolución marcada por evaporación, aumentando los valores de isótopos de H_2O y las concentraciones químicas al avanzar hacia el NE.

Puede verse que las nacientes del canal, (NA-1 y NA-2) muestreadas en verano de 2018, representan aguas más concentradas y evaporadas que las situadas aguas abajo. Debido a los menores caudales en la época de verano, esta agua afloró tiempo atrás y se ha visto sometida a evaporación, produciéndose la surgencia de agua representativa del acuífero aluvial más abajo de estos puntos (Aforo Salada, A-1S).

Algunos puntos del canal, como Aforo Saladita (A-2S) o AS-4, muestran una disminución en los valores de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ y de la salinidad con respecto a los puntos aguas arriba. Las características isotópicas y de salinidad de estos puntos son muy similares al agua de recarga. Estos aportes se interpretan como aportes de agua que circula subsuperficialmente por materiales evaporíticos cercanos al propio canal, que a su vez presentan niveles de materiales finos y materia orgánica. Estos niveles de materiales finos y materia orgánica han sido descritos en otros estudios. (RWL,2015, Amphos 21, 2009).

Aguas abajo del punto Interna Reglilla CONAF, los valores de CE aumentan notablemente, como puede verse en la Figura 6-91 con un marcado cambio en la pendiente de las líneas discontinuas, para los puntos AS-6 y AS-7. El punto AS-6 muestra un importante aumento también en sus valores de $\delta^{18}\text{O}$ respecto de Interna, para 8-9/03/2017 y 26/01/2018, indicando que este punto evoluciona por evaporación. El punto AS-7, sin embargo, no presenta un aumento tan marcado en sus valores de $\delta^{18}\text{O}$ como en los de CE, con respecto a AS-6. Esto debe ser explicado a que aguas abajo de AS-6 el agua comienza a mezclarse con agua de la interfaz salina, produciendo importantes procesos de disolución que afectan al área terminal de los desbordes de Interna.

Por último, se encuentra el agua de 1028, que representa la salmuera del núcleo, con valores $\delta^{18}\text{O}$ menores a los que provienen desde el canal y valores de conductividad típicos de salmuera, en torno a 240mS/cm.

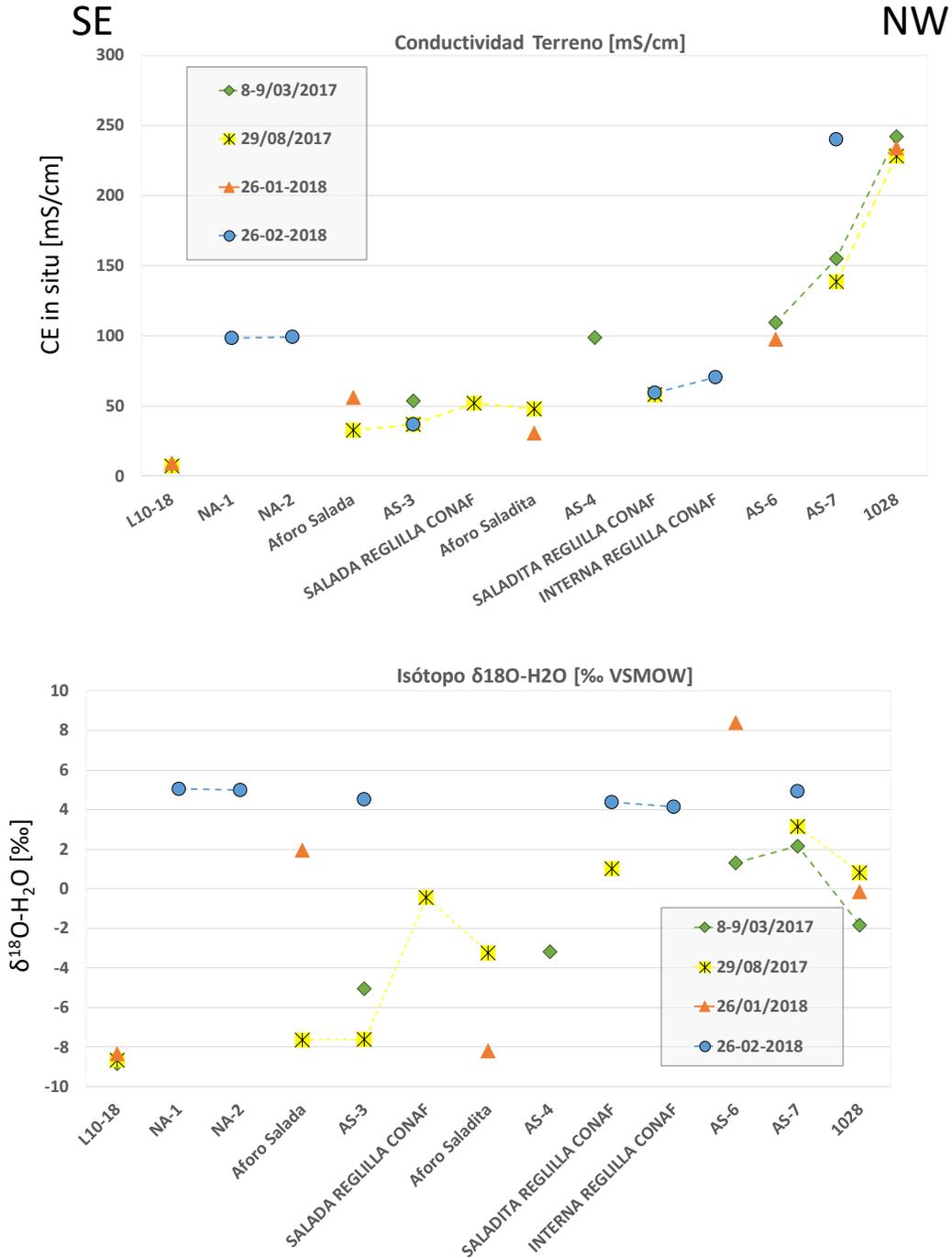


Figura 6-91. Evolución temporal de CE (mS/cm) y los valores de $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ -VSMOW] en perfil 1. Fuente: Modificado de (Aravena, Auría, Henríquez, & Tore, 2019).

6.6.5.3.3 Descarga de la UH aluvial al acuífero de la UH marginal.

La Figura 6-92 muestra el perfil 2, que se emplea para explicar la descarga de la UH Aluvial en la UH Zona Marginal, mientras que la Figura 6-93 muestra la evolución de conductividad y $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ para los puntos expuestos en el perfil 2, de dirección SE-NW. Puede verse que los puntos de la UH Aluvial son más profundos, debido a que el nivel freático se encuentra profundo. Más cercano a la zona marginal los pozos son menos profundos, debido a que el nivel freático se encuentra muy somero.

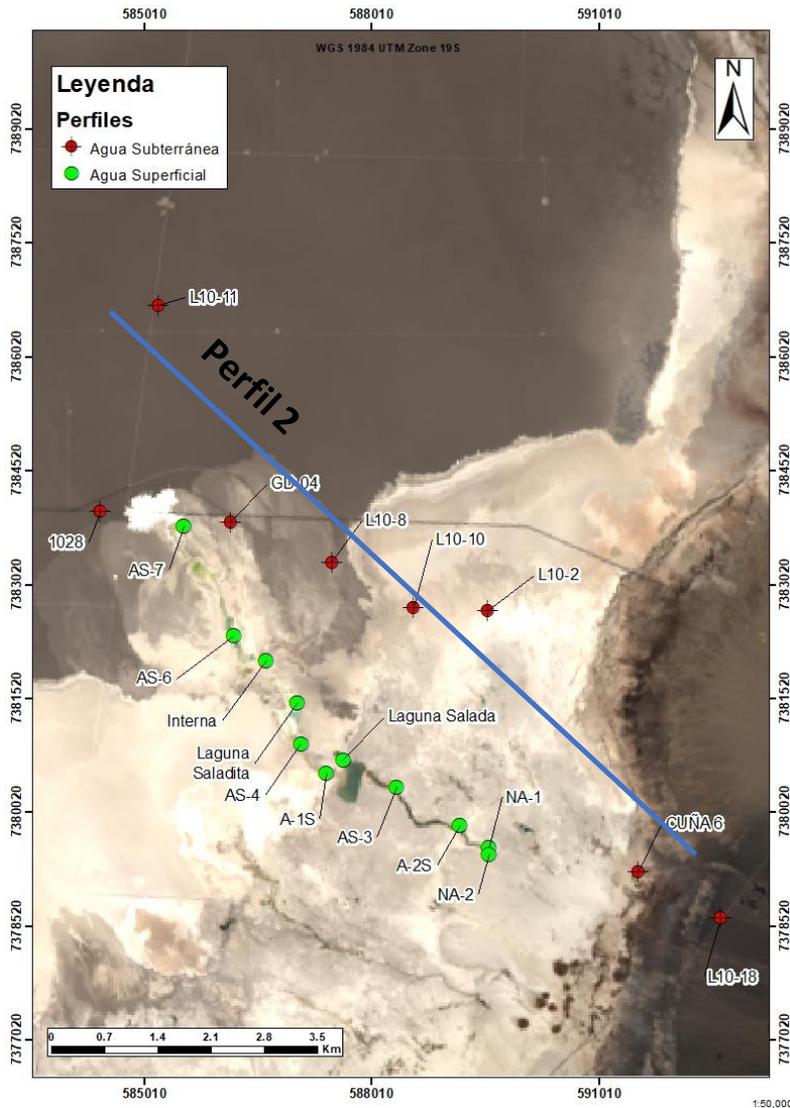


Figura 6-92. Ubicación de perfil 2 con las muestras que se emplean para analizar la evolución de las aguas del acuífero aluvial, la descarga a la UH zona marginal y su evolución hacia el núcleo. Fuente: Elaboración propia

Los perfiles muestran que los valores de CE y $\delta^{18}\text{O}$ aumentan al NW. El punto Cuña 6 presenta valores de CE y $\delta^{18}\text{O}$ notablemente mayores, pese a encontrarse muy cerca de L10-18 (a tan solo 1 Km). Esto puede explicarse por la profundidad de este pozo, que está captando una mezcla entre agua de la UH Aluvial y de la interfaz salina. En el avance hacia el NW, hasta L10-10, los puntos muestran un aumento gradual de sus valores de CE y $\delta^{18}\text{O}$, y se observa que sus características permanecen relativamente estables en las distintas campañas.

Entre L10-10 y L10-8, separados por 1Km de distancia, se produce un aumento elevado de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y CE, aumentando desde -3‰ a 5‰ y de valores cercanos a 100mS/cm hasta valores mayores de 200mS/cm. Esto se debe al afloramiento de la interfaz salina en superficie, que produce niveles muy someros afectados por evaporación y mezcla con aguas de la interfaz salina, de manera que los valores de CE ascienden a valores en torno a 220mS/cm. Por último, los valores del núcleo, representados por L10-11, presentan un valor isotópico en torno a 3‰ y conductividades del orden de 240mS/cm.

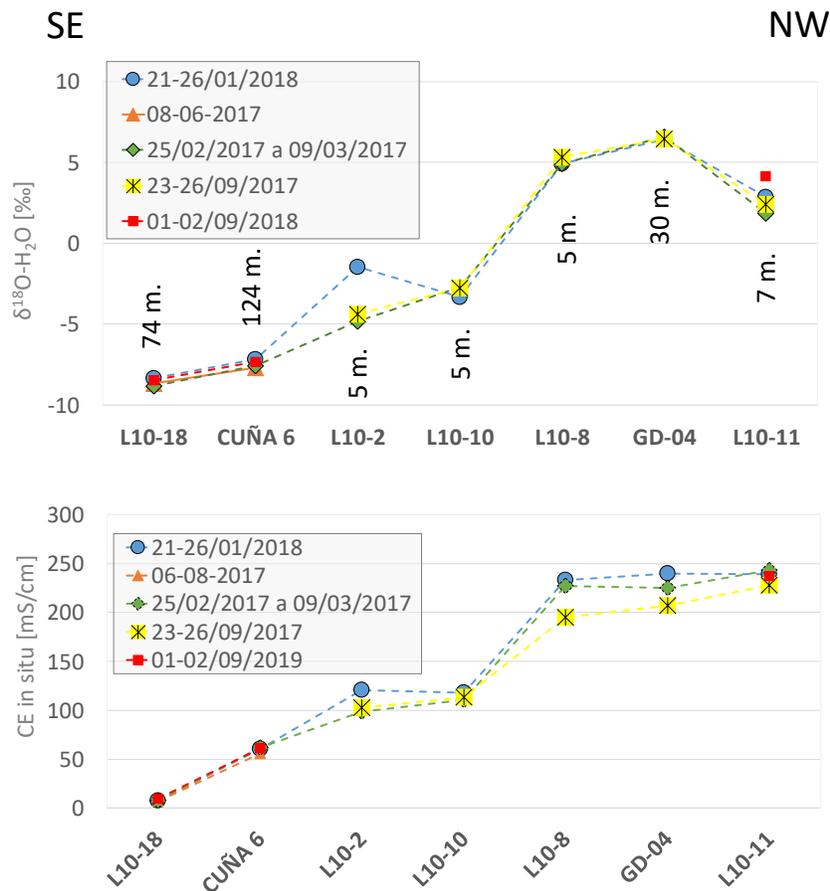


Figura 6-93. Evolución temporal de conductividad, [mS/cm] y enriquecimiento isotópico en $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ [‰ -VSMOW] en perfil 2 de la Figura 6-92. Fuente: Modificado de (Aravena, Auría, Henríquez, & Tore, 2019).

6.6.5.3.4 Relación aguas superficiales – aguas subterráneas

Los puntos muestreados y su profundidad pueden verse en la Figura 6-94. Los pozos y barrenos de profundidades menores de 15 metros están habilitados en todo su espesor, a excepción de L10-14 (5 a 11 metros), L10-11 y L10-12 (3 a 7 metros). Los pozos con profundidades mayores de 15 metros, 1028 y GD-04 se encuentran completamente habilitados, mientras que el pozo Cuña 7, tiene un ranurado entre 6 y 40 m.

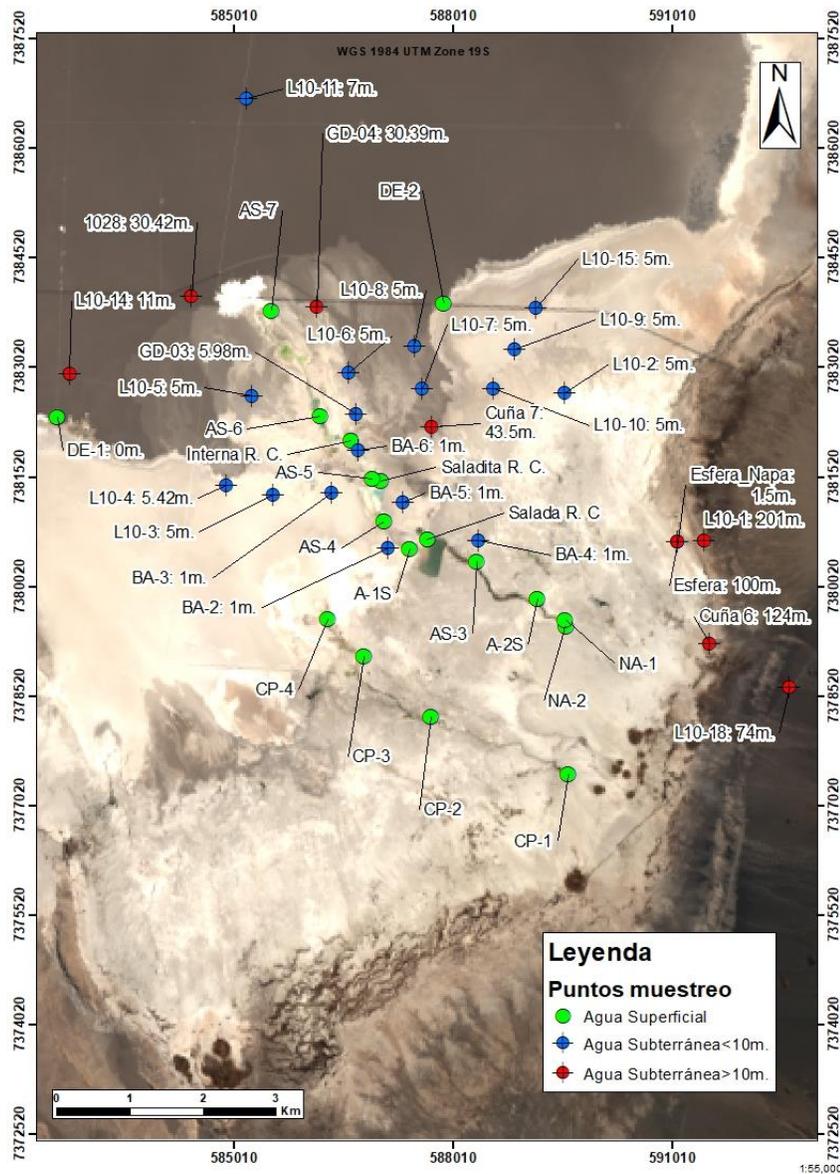


Figura 6-94. Ubicación de puntos de muestreo en la zona marginal y núcleo. Fuente: elaboración propia.

La Figura 6-95 muestra la relación $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ [‰] vs cloruros [meq/L] para los puntos de la Figura 6-94 colectados en las distintas campañas de muestreo (diferenciadas por forma). Esta figura confirma que las aguas de la UH Aluvial, con concentraciones muy bajas de cloruros y valores de $\delta^{18}\text{O}$ muy empobrecidos (en torno a -8‰), corresponden a las aguas de recarga del sistema Peine. Desde estas aguas de recarga se diferencian dos líneas de evolución para las aguas en su avance hacia el núcleo, denominadas Tendencia A y tendencia B.

La tendencia A se encuentra principalmente representada por puntos superficiales, indicando que corresponde a una línea de evaporación y disolución de sales. (Aravena R. , 2018a). La tendencia B, representada principalmente por pozos del núcleo y de la parte más distal de la zona marginal, una puntos que presentan concentraciones de cloruros mucho mayores para enriquecimientos isotópicos similares; luego, no pueden explicarse mediante solo evaporación y disolución de sales. La fuente importante de cloruros en el sector es la interfaz salina, la cual controla la dinámica y la química del sector. (Aravena R. , 2018a). Se ha pintado con trazo discontinuo una tendencia intermedia entre la A y la B. Esta tendencia representa puntos los cuales tienen cierta influencia de la interfaz salina, pero su evolución es principalmente por disolución de sales y evaporación.

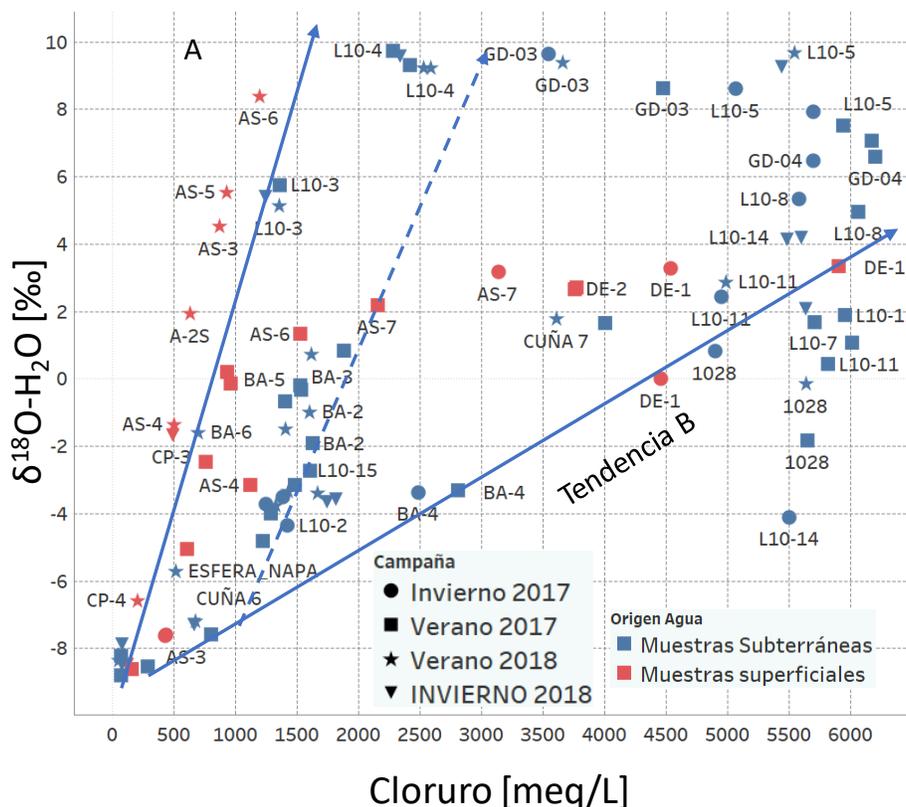


Figura 6-95. Relación $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ [‰- VSMOW] y cloruros [meq/L] para las distintas campañas de muestreos (diferenciadas por forma) realizadas en el Peine. Por colores se han diferenciado los distintos tipos de agua del sector. Fuente: Elaboración propia

En la tendencia A, junto a los puntos superficiales, se encuentran también algunos barrenos: BA-5, BA-6 y el punto L10-3; estos puntos reciben aportes desde los sistemas de aguas superficiales, lo que explica que tengan un agua sin influencia de la interfaz salina. Para evaluar si los puntos BA-5 y BA-6 corresponden al mismo sistema de flujo que el canal de las lagunas, se analizan unos datos de cota piezométrica del EIA SGA, 2015. Estos puntos pueden verse en la Figura 6-96: BA-21 (Barreno perforado en el canal de Peine, de 1,6 m. de profundidad), el multipiezómetro MPS-AA, de 4 m situado a 130 m de BA-5 (barreno de 1m. perforado por SQM). La distancia entre BA-21 y MPS-AA es de 250m aproximadamente.

La Figura 6-97 muestra como entre BA-21 y MPS-AA existe un gradiente importante, el cual no puede ser explicado si no es mediante materiales poco permeables que separan el canal del sistema lagunar del resto del acuífero salino. De este modo, se puede afirmar que se producen aportes desde los canales y el sistema lagunar de Peine al acuífero salino, pero no al revés.

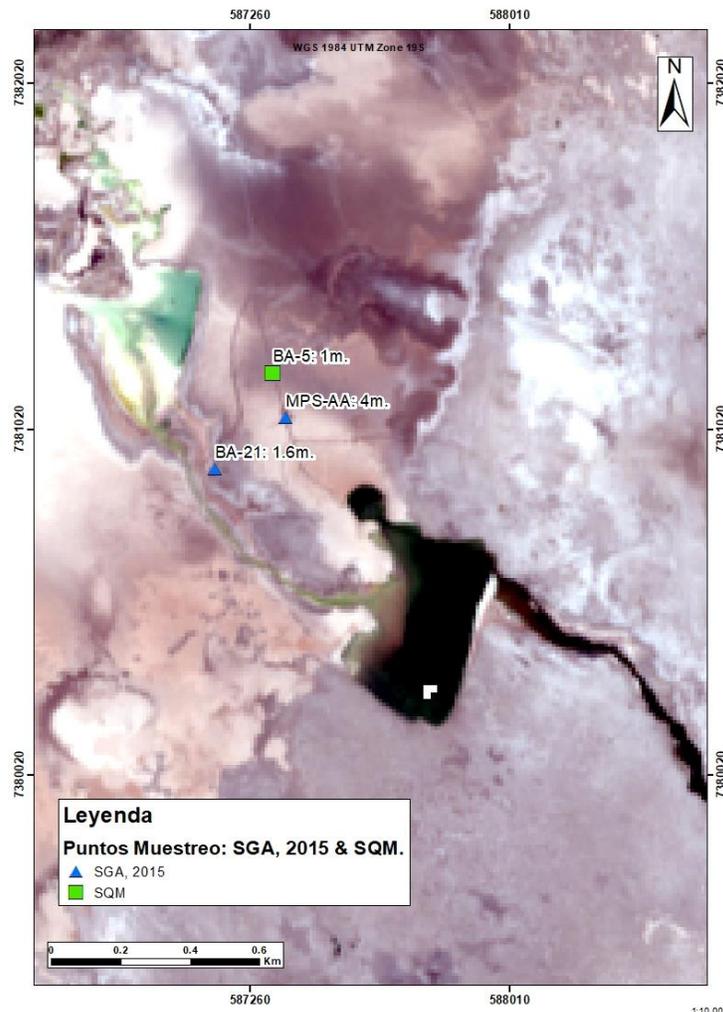


Figura 6-96. Ubicación de los puntos de SGA 2015 y BA-5 (SQM). Fuente: Elaboración propia.

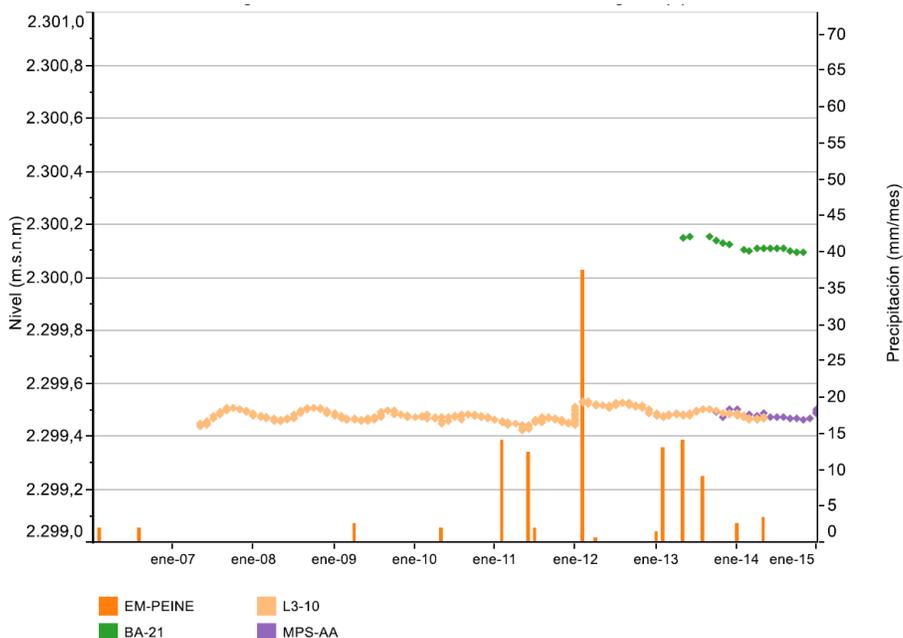


Figura 6-97. Evolución temporal niveles piezométricos en las BA-21 y MPS-AA. Fuente: SGA, 2015.

Hay tres puntos superficiales que se alinean con la tendencia B: el desborde de Interna, AS-7 y los ojos de disolución DE-1 y DE-2. Estos puntos muestran clara influencia por mezcla con agua de la interfaz debido al rebose del agua de recarga sobre la interfaz salina.

Por último, la tendencia intermedia, marcada en la Figura 6-95 con trazado discontinuo, engloba al desborde AS-6, los puntos L10-2, L10-15, L10-9, L10-10 y, además, los puntos BA-2 y BA-3 (del grupo 2), que representan el acuífero al oeste de las lagunas. Hay una serie de puntos, los cuales también se engloban en esta tendencia pese a estar prácticamente en la UH Núcleo Superior (L10-4, GD-03, L10-6). El punto L10-4 parece estar influenciado por infiltración de aguas superficiales desde el punto CP-4, ya que los puntos BA-2 y BA-3 presentan mayores concentraciones de cloruros que L10-3, que se encuentra entre L10-4 y las lagunas. Los puntos GD-03 y L10-6 han de estar influenciados por desbordes e infiltración desde el sector de Interna, de modo que presentan una notable variación en sus concentraciones de Cl. (Aravena R. , 2018a).

Resulta importante destacar que el análisis de la Figura 6-95 se desprende que no hay aportes desde el acuífero salino (UH Núcleo Superior) a las lagunas, siendo la única fuente de alimentación el agua de descarga de la UH Aluvial. Además, se han encontrado indicios de puntos de la UH Núcleo Superior con influencia de aguas de desborde desde los canales.

6.6.5.3.5 Caracterización isotópica del Sistema Peine

La principal descarga de las aguas en la zona marginal se produce por el efecto de la evaporación desde las aguas superficiales y desde la napa poco profunda. Este hecho queda demostrado por la relación

$\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$, expuesto en la Figura 6-98. En esta figura puede verse que las muestras colectadas en las distintas campañas se alinean según una línea de evaporación local (LEL), con una pendiente muy parecida a la descrita para otros sectores en el Salar de Atacama (Ortiz y otros (2014); Aravena (2018a)).

Las muestras correspondientes a aguas de recarga se ubican en los valores más empobrecidos (negativos) para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Las más evaporadas, correspondientes a la zona de afloramiento de aguas por la interfaz salina entre zona marginal y la transición al núcleo, se encuentran en el extremo opuesto de la gráfica, con los valores más positivos (enriquecidos). Los puntos intermedios presentan una línea de evolución por evaporación, pero también una línea de mezcla entre aguas con distinto grado de evaporación. (Aravena R. , 2018a).

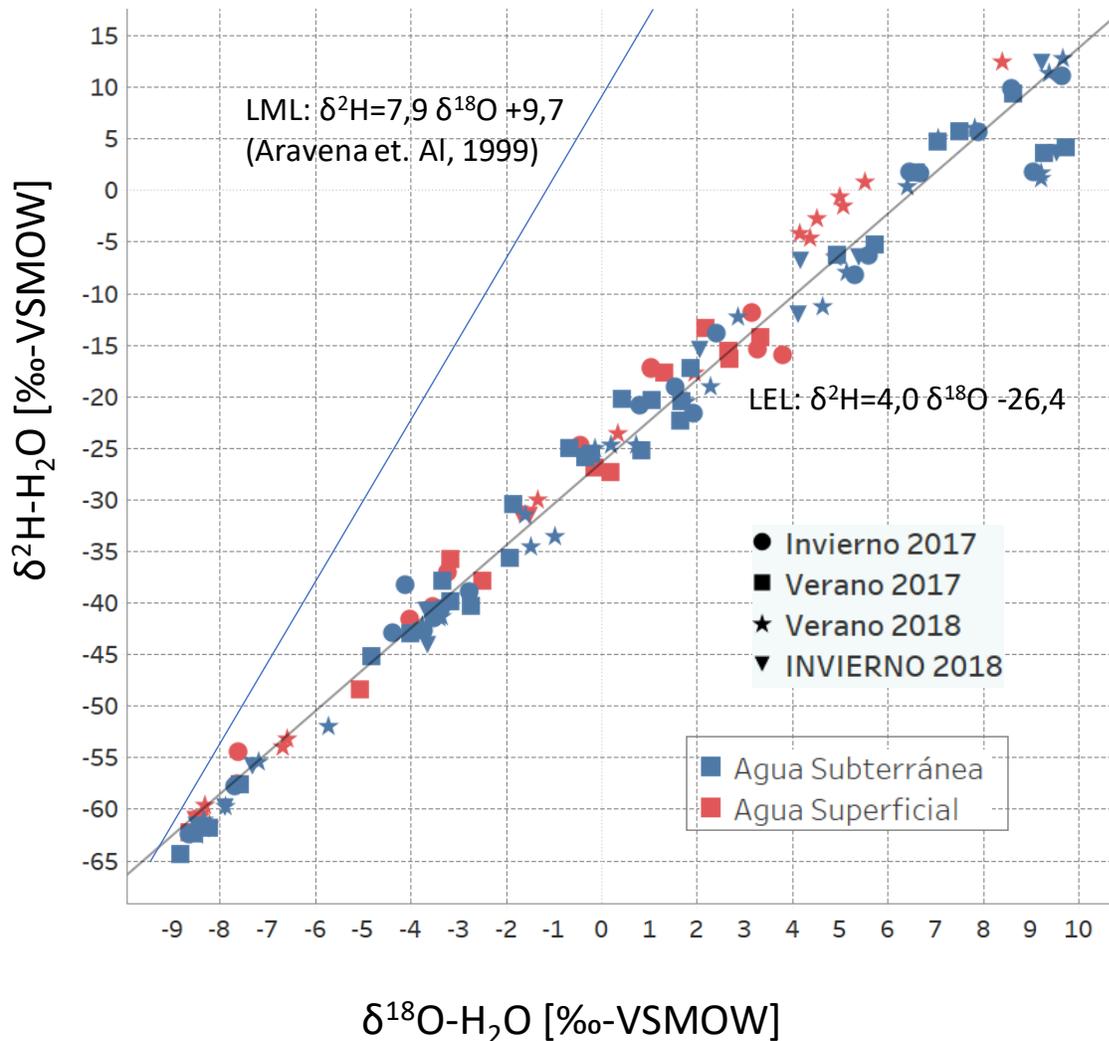


Figura 6-98. Relación isótopos $\delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$ - $\delta^2\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ para las distintas campañas de muestreo realizadas por SQM. Nótese la alineación característica descrita por otros estudios para Salar de Atacama. Fuente: Salas et al., 2010; Ortiz et al., 2011; Aravena, 2018.

En épocas de máximos niveles (invierno y episodios fuertes de precipitación), puede haber un excedente de agua que no alcanza a evaporarse. En el caso de las aguas superficiales, el agua rebosa desde la laguna Saladita hacia el área de desborde de Interna y comienza un proceso de mezcla con aguas de la interfaz salina y disolución de la costra. La zona de desborde de Interna y los puntos afectados por este desborde son variables en el tiempo, tal como pudo verse en el caso de los puntos GD-03, L10-6.

Por otro lado, en épocas de máximos niveles, los excedentes de agua en el acuífero que no alcanzan a evaporarse, rebosan sobre la interfaz salina y pueden circular de manera subsuperficial adentrándose hacia el contacto entre la UH Zona Marginal y la UH Núcleo Superior. En este sector se forman zonas de disolución de la halita en el núcleo, los cuales forman acumulaciones de agua (muestreadas en DE-1 y DE-2). El destino final de esta agua es evaporarse en su mayor parte y otra parte menor infiltrarse en la UH Núcleo Superior.

6.6.5.4 Sistema Tilopozo

En el sistema Tilopozo las aguas que alimentan a la UH Aluvial presentan características similares al resto de los sistemas, por lo que su caracterización puede considerarse similar a la descrita en 6.6.2. Un detalle de los puntos muestreados en las distintas campañas y sus características puede verse en la Figura 6-99.

6.6.5.4.1 Relación aguas superficiales – subterráneas

La Figura 6-100 muestra la relación $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ [‰] vs cloruros [meq/L] para los puntos de la Figura 6-99. Pueden observarse dos tendencias diferenciadas. Por un lado, la tendencia A, con valores $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ de hasta 6, con concentraciones de cloruros relativamente bajas (<2.000 meq/L), representa una línea de evolución fundamentalmente por evaporación y disolución de sales. En el otro extremo se encuentra la tendencia B, con valores de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ de hasta 5‰ pero con resultados de cloruro mayores de 5.000 meq/L. La tendencia B representa una evolución por mezcla con aguas de la interfaz salina, evaporación y disolución de sales. Puede verse que en la tendencia A se encuentran la mayor parte de los puntos subterráneos someros y los superficiales, indicando que la interfaz salina se encuentra aguas abajo de las lagunas y que esta zona presenta una mayor entrada de agua desde la UH Aluvial que las observadas en otros sectores. En la tendencia B se encuentran los pozos más profundos y del núcleo, con clara influencia de aguas de la interfaz salina.

La línea de evolución A demuestra que la alimentación de las lagunas en Tilopozo se produce por la descarga de la UH Aluvial y que no existen evidencias de aportes desde el acuífero salino a las lagunas.

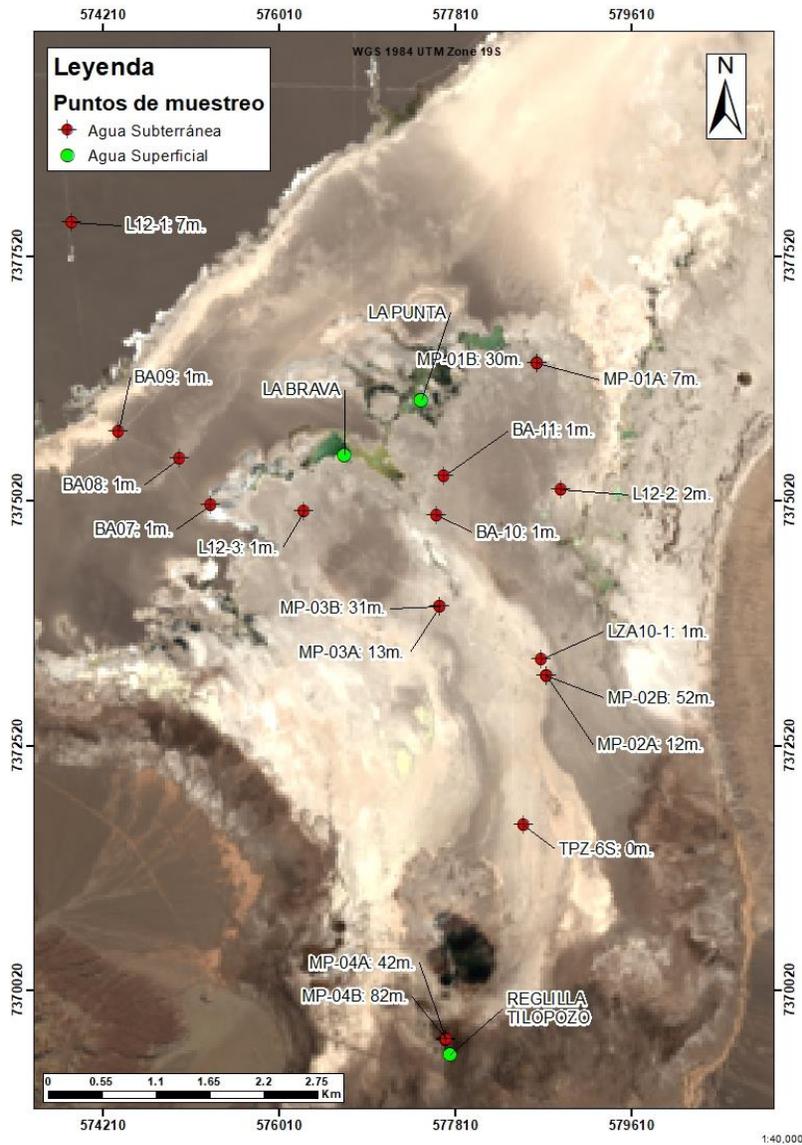


Figura 6-99. Ubicación y características de los puntos de muestreo en el sector de Tilopozo.
Fuente: Elaboración propia

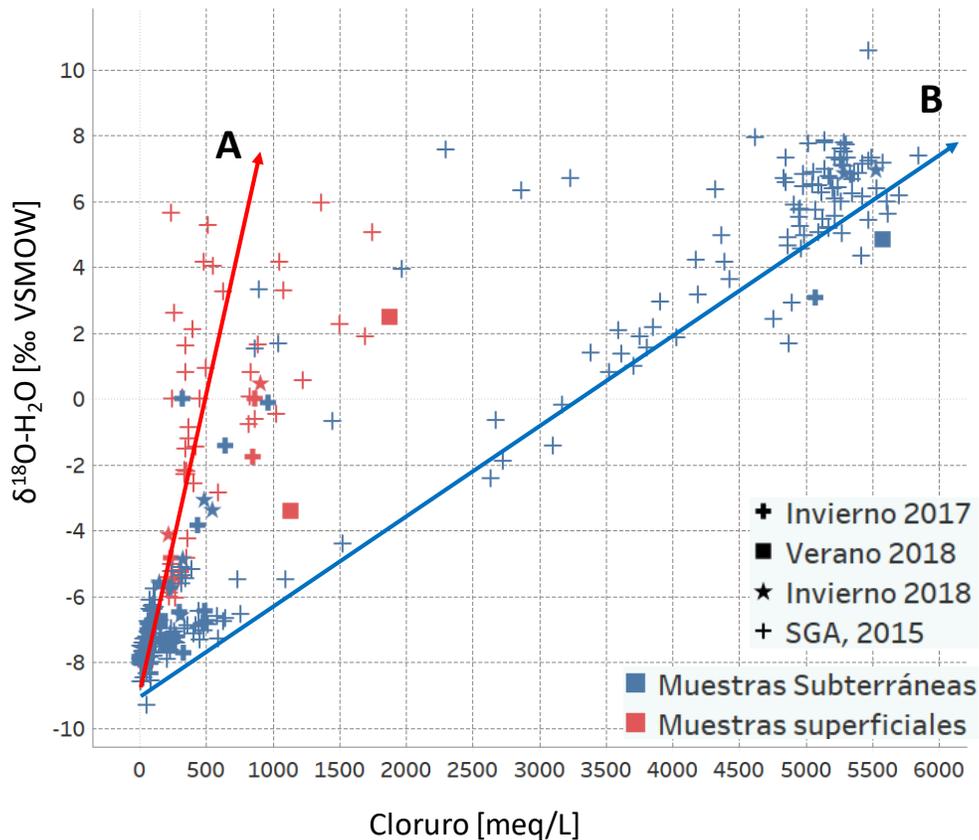


Figura 6-100. Relación $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ [‰- VSMOW] y cloruros [meq/L] para las distintas campañas de muestreos (diferenciadas por forma) realizadas en el sector Tilopozo. Por colores se han diferenciado los distintos tipos de agua del sector.

Fuente: Elaboración propia

6.6.5.4.2 Caracterización isotópica del Sistema Tilopozo

La principal descarga de las aguas en la zona marginal se produce por el efecto de la evaporación desde las aguas superficiales y desde la napa poco profunda. Este hecho queda demostrado por la relación $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ vs $\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$, expuesto en la Figura 6-101. En esta figura puede verse que las muestras colectadas en las distintas campañas se alinean según una línea de evaporación local (LEL), con una pendiente de 4,4, algo mayor que la descrita para otros sectores en el Salar de Atacama de 3,9 (Ortiz y otros (2014); Aravena (2018a)). Esta leve modificación en la pendiente significa que en este sector la evaporación alcanzada por las aguas en su evolución es menor que en otras áreas. Esto puede deberse a un mayor flujo pasante en este sector y un menor tiempo de tránsito del agua en la UH Zona Marginal.

Las muestras correspondientes a aguas de recarga se ubican en los valores más empobrecidos (negativos) para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. Las más evaporadas, correspondientes a la zona de afloramiento de aguas por la interfaz salina en la UH Zona Marginal, se encuentran en el extremo opuesto de la gráfica, con los valores más positivos (enriquecidos). Los puntos intermedios presentan una línea de evolución por

evaporación, pero también una línea de mezcla entre aguas con distinto grado de evaporación. (Aravena R. , 2018a).

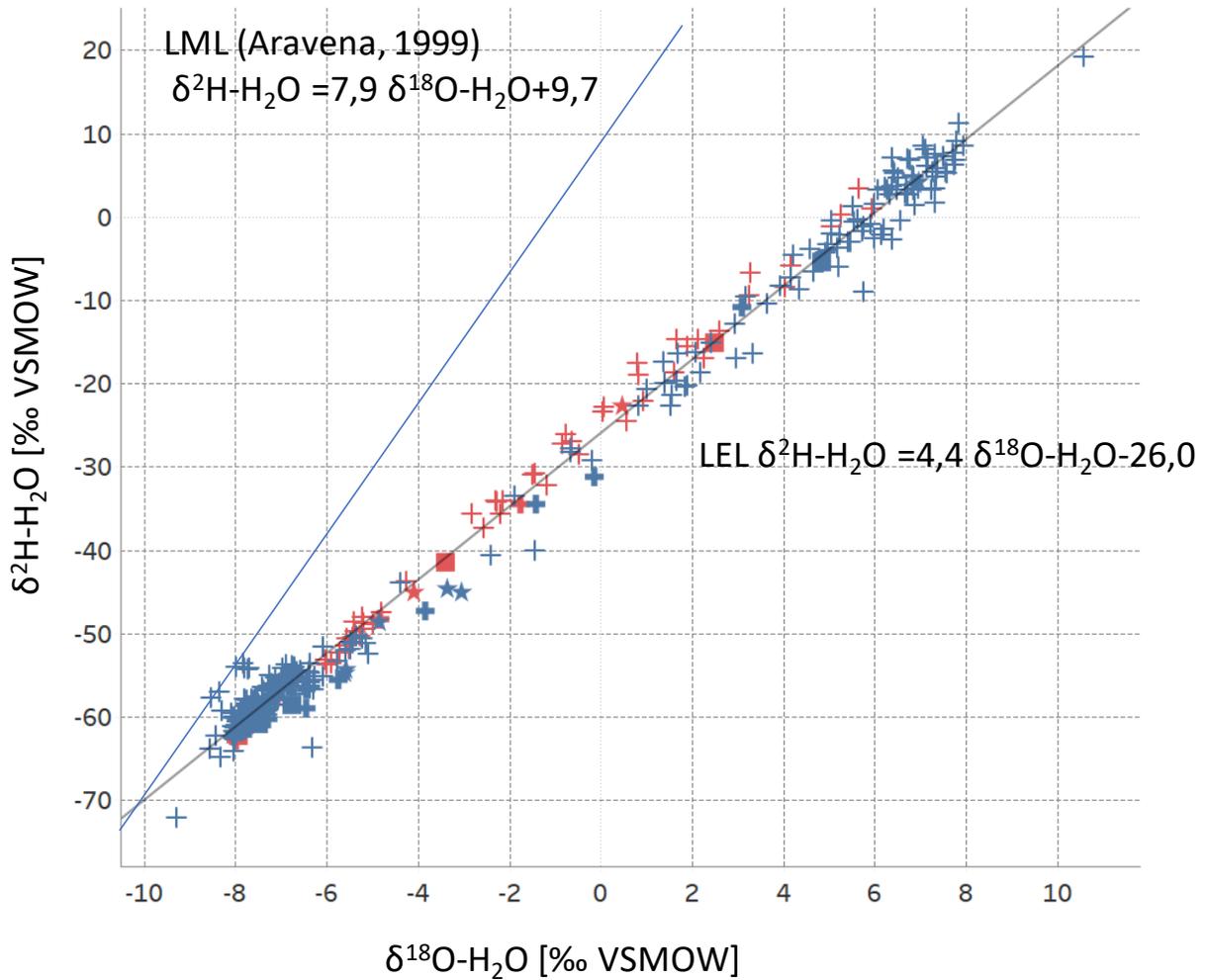


Figura 6-101. Relación isótopos $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ - $\delta^2\text{H-H}_2\text{O}$ para las distintas campañas de muestreo realizadas por SQM

El agua que no alcanza a ser evaporada en el trayecto termina por acumularse en “Open pools” en el contacto entre la UH Zona Marginal y la UH Núcleo Superior, donde evoluciona a salmuera produciendo una recarga al núcleo.

6.7 Balance Hidrogeológico

El balance hidrogeológico conceptual identifica e integra los procesos de flujo de agua que entran (recargas) y salen (descargas) de una determinada zona de estudio. En el caso de la cuenca del Salar de Atacama, es necesario realizar un balance de los dos sistemas de flujo que conviven dentro de la cuenca: sistema salmuera y sistema de agua.

Se han realizado balances hídricos de ambos sistemas tanto en condición preoperacional como operacional, completándose en total cuatro balances: (1) Balance de Agua Pre-operacional, (2) Balance de Agua Operacional, (3) Balance de Salmuera Pre-Operacional y (4) Balance de Salmuera Operacional. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

6.7.1 Consideraciones previas al balance

La ecuación del balance para una cuenca en condición natural o preoperacional es:

$$\text{Recarga (R)} - \text{Descargas (D)} = \text{Variación Almacenamiento } (\Delta S) \pm \text{error (e)}$$

Trabajos previos en la cuenca del Salar de Atacama han asumido que la evaporación del sistema es equivalente a la recarga del sistema en el largo plazo (Mardones, 1986; Muñoz-Pardo, Mardones-Perez, & Vidts-Sabelle, 2004; Golder Associates, 2017a), lo que implicaría que la variación del almacenamiento (ΔS) debería ser nula y deberían verse series de niveles estables en el tiempo. Sin embargo, del análisis de las series de nivel se observa que tanto en el sector de los acuíferos aluviales y en el núcleo los niveles venían descendiendo a una tasa natural de ~ 2 cm por año en la UH Aluvial y entre 2-4 cm por año en la UH Núcleo Superior (capítulo 6.5). Esto implica que la descarga por evapotranspiración no puede ser igual a la recarga y el balance debe reflejar un desbalance, donde las descargas son mayores a la recarga del sistema, evidenciando la inexistencia de un régimen estacionario (donde $\Delta S=0$). Cabe destacar que esto ya había sido observado por diferentes autores (Ramírez E. , 1972; MINSAL, 1989).

Lo anterior es consistente con la formación de un cuerpo salino en el Salar de Atacama. La existencia de secuencias de rocas evaporíticas es producto de un desbalance del sistema, donde el agua es eliminada de la cuenca por altas tasas de evaporación (Warren, 2006).

Otro factor importante para considerar en el Balance Hídrico es la salinidad de las aguas, que se ve reflejado en el contenido de sólidos disueltos y la densidad del agua/salmuera. La existencia de una interfaz entre el agua y la salmuera, referida comúnmente como cuña o interfaz salina, evita la mezcla entre la salmuera y el agua, asociado principalmente a contrastes de densidad. Esto implica que el análisis hidrogeológico debe separarse en dos sistemas: sistema de agua y sistema de salmuera. Cuando ambos sistemas entran contacto, su diferencia de densidad genera la interfaz salina, sector donde el agua tiende a fluir por sobre la salmuera. Esto se observa en toda la zona marginal del Salar de Atacama (capítulo 6.4).

En consideración de lo anterior, se evaluarán dos balances: un balance de agua y un balance de salmuera, dónde:

- Balance de Agua: en el dominio fuera del Núcleo del Salar de Atacama, con énfasis en la Zona Aluvial y Zona Marginal.
- Balance de Salmuera: considera el balance en el dominio del Núcleo del Salar de Atacama.

En la Figura 6-102 se presenta el esquema de subdivisión de cuencas para el balance, donde cuencas y zonas planas se dividieron en 3 sectores principales en función de la recarga por precipitación, evaporación y presencia de agua o salmuera.

En la Figura 6-103 se muestra un mapa con la distribución de zonas. En colores marrones y verdes se presentan cuencas altas, asociadas a las mayores precipitaciones, en colores rosados y fucsias las zonas medias, donde predomina la evaporación, y en color naranja el núcleo.

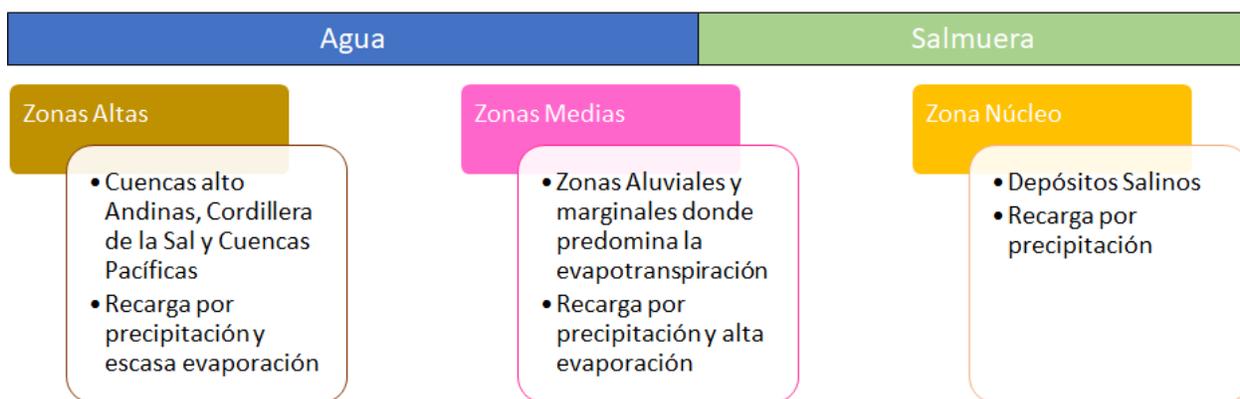


Figura 6-102. Esquema de subdivisión de cuencas utilizados para el balance. Fuente: Elaboración propia

Los balances se calcularon considerando dos grandes períodos de tiempo, definidos de la siguiente forma:

- Período preoperacional, comprendido entre septiembre de 1986 y octubre de 1994 (8.1 años). En este período el único operador de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama correspondía a la Sociedad Chilena del Litio, cuyas operaciones se iniciaron en 1983. Los registros de esta época son escasos en general y corresponden principalmente a la captura de datos hidrogeológicos realizados por Hydrotechnica (1987) para la empresa MINSAL entre 1986 y 1992, además de los datos publicados por Albemarle para su estudio de impacto ambiental (SGA, 2015).
- Período operacional, que se define entre noviembre de 1994 y diciembre de 2018 (24.2 años). El inicio del período lo marca el comienzo de la extracción de salmuera por parte de Minsal (SQM) en el sector MOP y se cierra con el set de datos actualizado hasta diciembre de 2018.

Para el cálculo de los balances se ha considerado la subdivisión de cuencas descrita en el capítulo 4.1, es decir, por subcuencas aportantes, y según la zonificación de recarga y evaporación (capítulos 4.2 y 4.5). Los componentes principales de los balances hídricos se definen como:

$$REC_D - EVS - EVL - ETR - EXT = \Delta S \pm \text{error}$$

Dónde:

REC_D = Recarga Directa por Precipitación

EVS = Evaporación desde el suelo

EVL = Evaporación en lámina libre (superficies lagunares)

ETR = Evapotranspiración

EXT = Extracciones.

ΔS = Cambios en el almacenamiento del sistema

En la ecuación anterior, si bien la única recarga es la recarga directa por precipitación, en la realidad esta recarga genera tanto escorrentías superficiales como infiltraciones al subsuelo. En la cuenca en estudio, las escorrentías superficiales se infiltran en su mayoría en los depósitos aluviales que rodean al núcleo del Salar de Atacama, aumentando el caudal subterráneo que fluye hacia éste. Por tanto, la recarga por precipitaciones genera a su vez un caudal de agua que fluye subterráneamente hacia el núcleo.

En esta conceptualización del sistema hidrogeológico del Salar de Atacama se han considerado como posibles recargas al núcleo del Salar sólo a la recarga directa y al flujo subterráneo que se genera a partir de ésta, ya que ambos son en cierta medida cuantificables y medibles. Sin embargo, otros autores que han trabajado anteriormente en la cuenca han postulado la existencia de otras fuentes de agua, responsables de las grandes concentraciones de litio y potasio en el Salar de Atacama.

En esta línea, una de las teorías más comunes tiene relación con la presencia de posibles flujos profundos, influenciados por actividad geotermal, que ascendería hacia el núcleo del Salar a través de fallas profundas (Sistema de Falla Salar o Falla Caballo) (Ide and Kunasz, 1990; Lowenstein and Risacher, 2009; López, 2017). Por otro lado, el Cordón de Lila también se ha propuesto como una posible vía de flujos preferenciales en dirección S-N, que aportaría una salmuera rica en litio (Lowenstein y Risacher, 2009; Munk et al., 2018). Además, debido a los grandes volúmenes de halita y salmuera en el núcleo, sumado a las extraordinarias concentraciones de litio, Munk et al. (2018) y Corenthal et al. (2016) postulan que la hidrología actual (en términos de recarga) no podría generar dichas condiciones observadas, por lo que serían necesarios flujos enriquecidos que recargaron el núcleo al menos desde el Mioceno (Corenthal et al., 2016).

Si bien estas teorías no son descartables, posibles flujos verticales ascendentes por fallas profundas, ya sea por el centro del núcleo o por el Cordón de Lila, son difíciles de cuantificar y justificar, por lo que no son incluidos en esta conceptualización como posibles fuentes de recarga. Sin embargo, actualmente se están realizando estudios para intentar identificar y cuantificar otras fuentes de recarga del núcleo del Salar de Atacama.

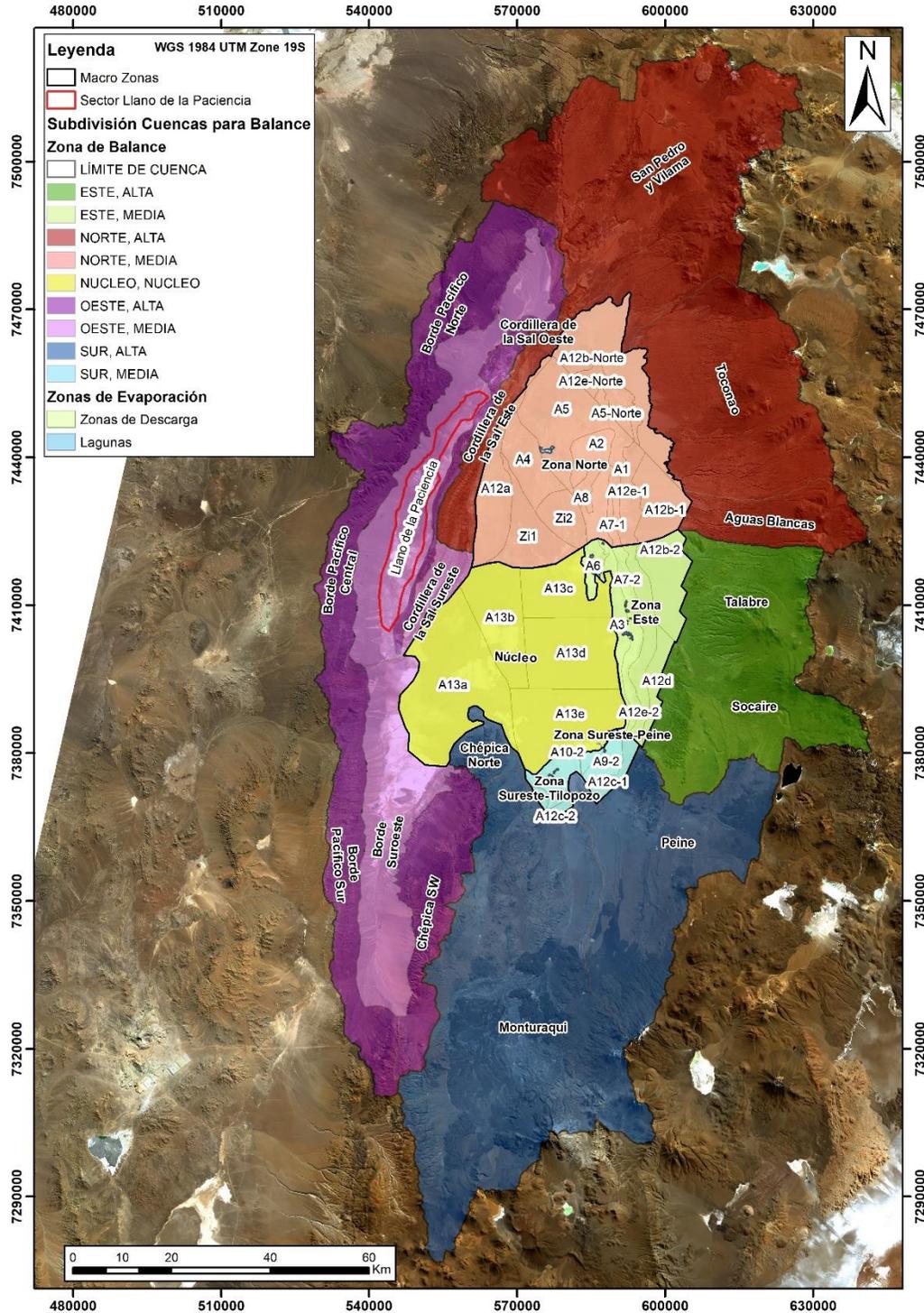


Figura 6-104. Subdivisión del área del Salar de Atacama en sectores de recarga. Se incluyen, además, las áreas de evaporación presentadas en la Figura 4-22. Los sectores Sureste Tilopocho y Sureste Peine se consideran dentro de un único Sector Sur. El área del Llano de la Paciencia considerado para el cálculo de la evaporación desde el suelo se destaca en rojo. Fuente: Elaboración propia.

6.7.1.1 Extracciones de Salmuera y Agua Industrial

Para los balances hídricos operacionales de salmuera y de agua, deben considerarse como descargas tanto las extracciones de salmuera de SQM y Albemarle, como las extracciones de agua industrial de SQM en el acuífero aluvial del borde este.

Extracciones de Salmuera

En el área autorizada de extracción de salmuera de SQM, se ha extraído salmuera a través de pozos que se encuentran habilitados en la UH Núcleo Superior, UH Núcleo Profundo, o ambas, con diseños como los presentados en la Figura 6-105. A lo largo del periodo operacional han operado 809 pozos (Tabla 6-13), los cuales han extraído un caudal equivalente de ~1083 L/s entre noviembre de 1994 y diciembre de 2018. Estos pozos han sido agrupados en 262 puntos de extracción equivalentes para la construcción del modelo numérico de flujos (Figura 6-4). Albemarle, en su área autorizada de extracción de salmuera, tiene pozos de extracción (Figura 6-4) que han bombeado un caudal equivalente de ~136 L/s en el mismo período, lo que totaliza un caudal de extracción de ~ 1219 L/s para el período entre noviembre de 1994 y diciembre de 2018.

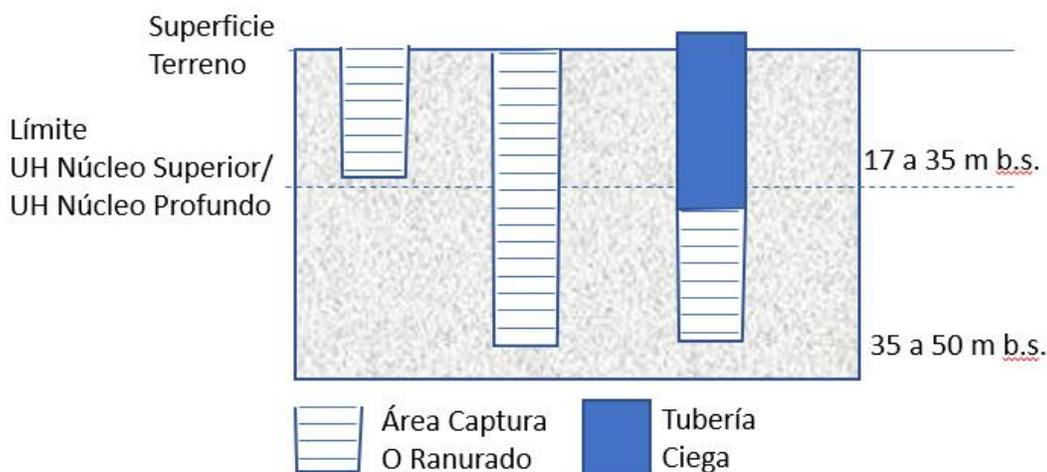


Figura 6-105. Diseño esquemático de captaciones de salmuera de SQM en el Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-13 Relación entre pozos de extracción de salmuera reales con los pozos de extracción equivalentes. Fuente: Elaboración propia.

Unidad	Nº Pozos Salmuera	Nº PEE
UH Núcleo Superior	177	65
Multiacuífero	399	158
UH Núcleo Profundo	233	102
Total	809	262

La Figura 6-106 muestra la serie de extracciones de salmuera considerando lo reportado por SQM y Albemarle en el núcleo del Salar de Atacama. Los valores en negativo corresponden a las reinyecciones de salmuera que SQM ha realizado desde 1996 a 2018. En términos de caudal anual equivalente (extracciones menos reinyecciones en un año calendario), el caudal extraído es alrededor de 50 L/s hasta 1993, alrededor de 700 L/s hasta el año 2009, y alrededor de 1.500 L/s hasta el año 2018. Al presentar los promedios de caudal anual equivalente en año calendario, no son directamente comparables con los reportes anuales de SQM para la autoridad ambiental (asociados a la RCA N°226/2006), los que se presentan entre el 13 de agosto de un año y el 12 de agosto del año siguiente (Figura 6-107).

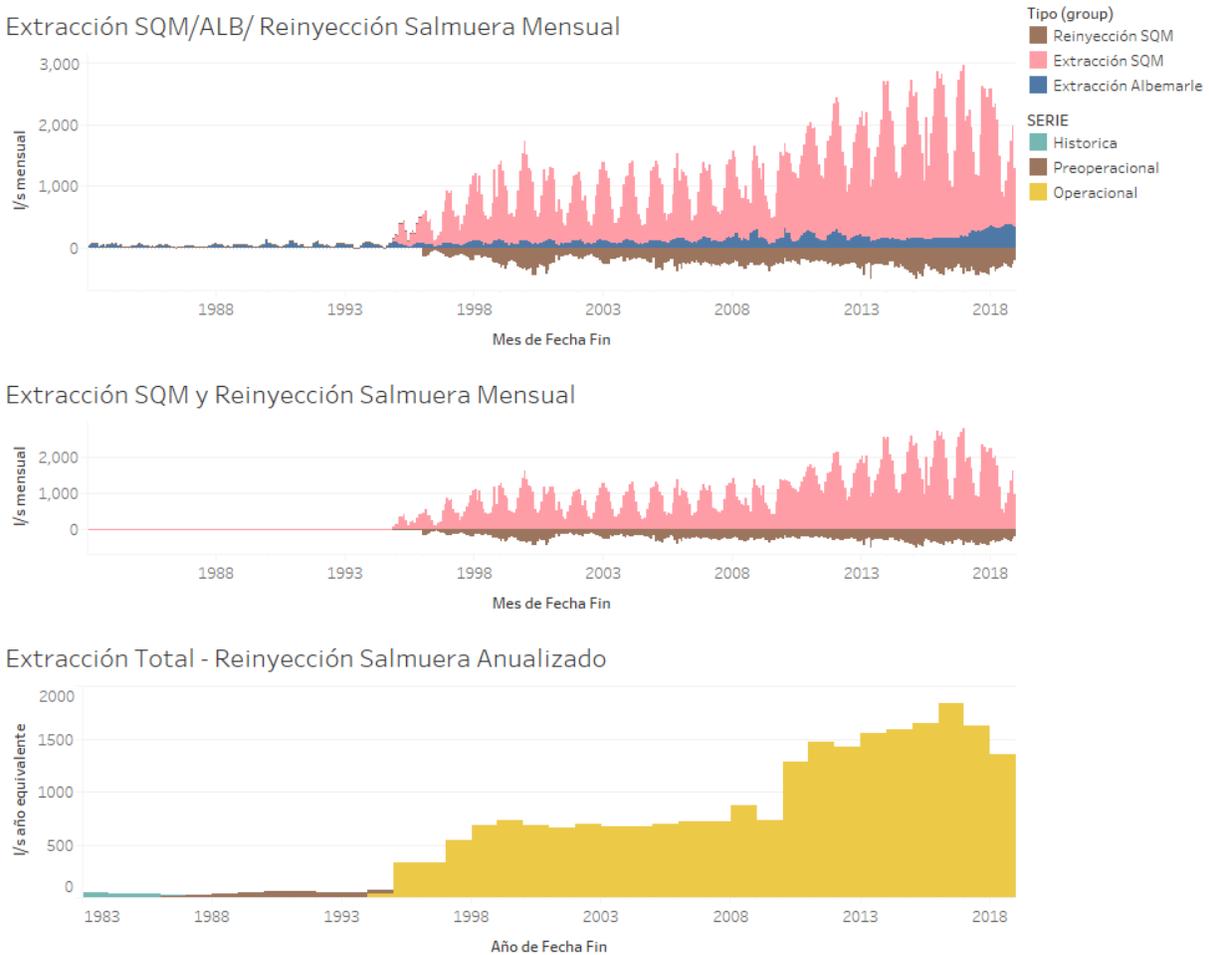


Figura 6-106. Extracción de salmuera por SQM y Albemarle. Caudal en L/s equivalente mensual y L/s equivalente anual
Fuente: Elaboración propia a partir de datos reportados por SQM y Albemarle

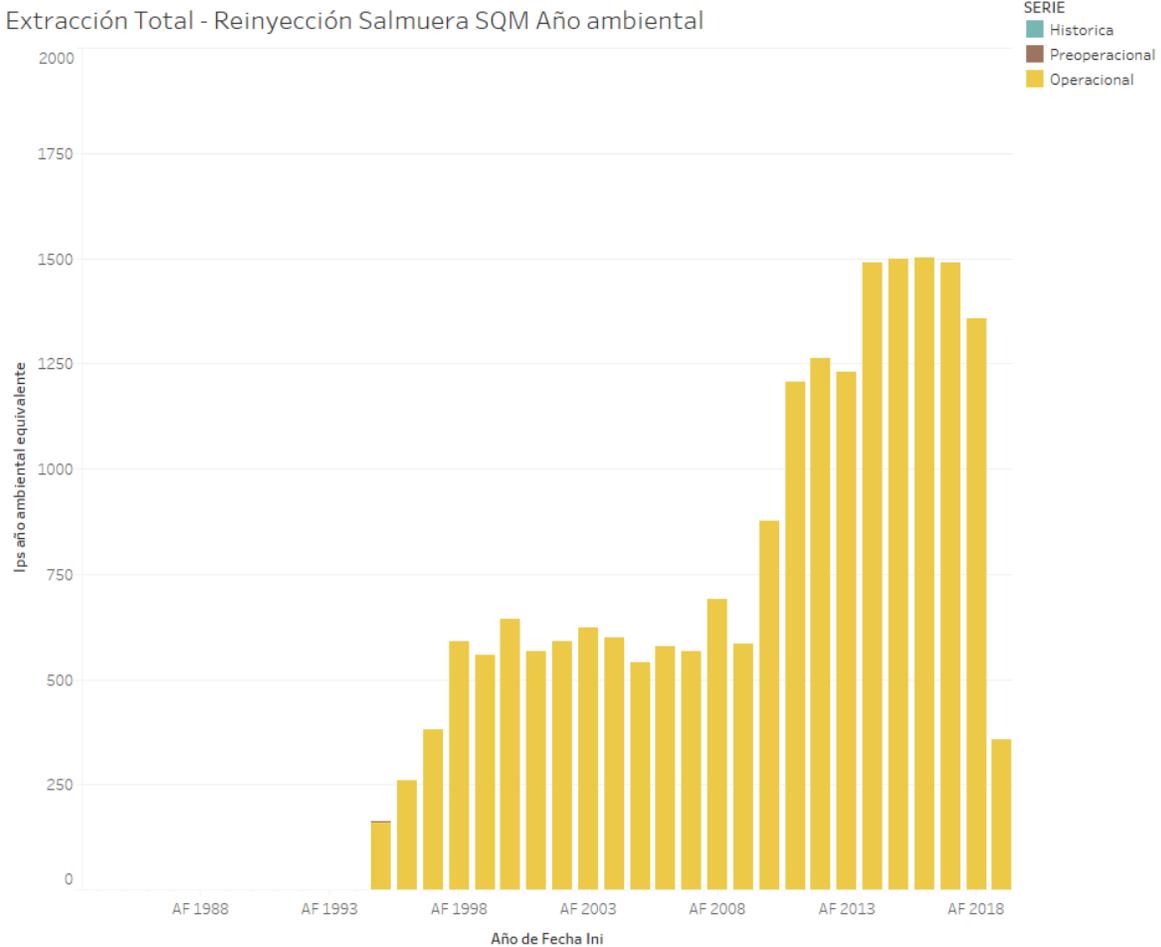


Figura 6-107. Caudal equivalente anualizado por año ambiental (13 de agosto a 12 de agosto del año siguiente). Fuente: Elaboración propia

Extracciones de Agua industrial

Por otro lado, la Figura 6-108 muestra la serie de caudales de extracción de agua industrial de SQM en la UH Aluvial, al este del Salar. A grandes rasgos, entre 1998 y 2008 el caudal de extracción es de entre 60 y 80 L/s, y entre los años 2008 y 2018 el caudal aumenta a más de 220 L/s, excepto los años 2016 y 2018, en los que se detuvo temporalmente la operación del pozo CAMAR-2 (año 2016) y se dejó de operar el pozo P-2 (año 2018).

Extracción Agua Industrial SQM

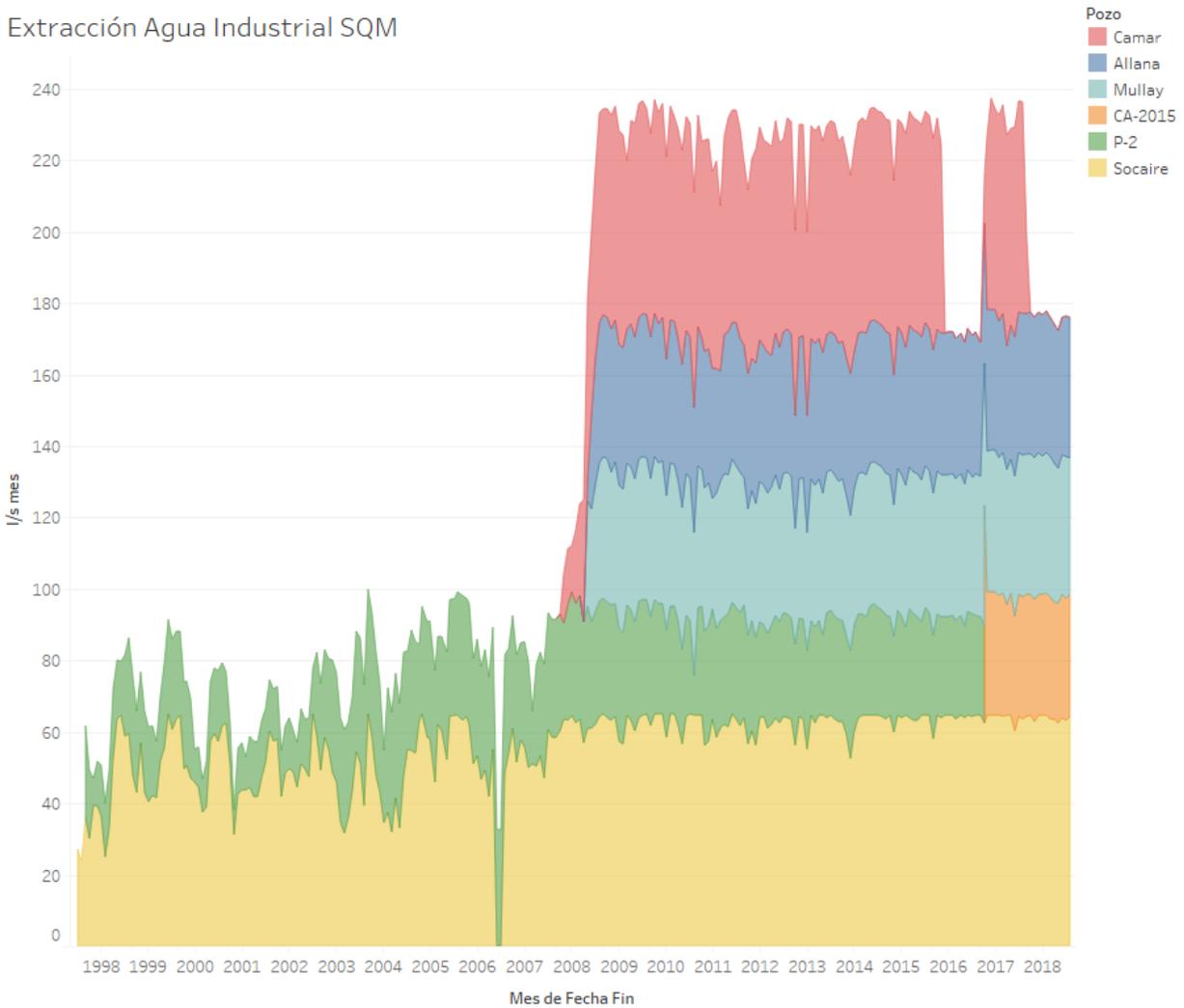


Figura 6-108. Extracción de agua industrial por parte de SQM en a UH Aluvial. Fuente: Elaboración propia

6.7.2 Balance de Agua

Para realizar el balance de agua dulce se consideran las zonas altas y medias de la cuenca del Salar de Atacama. El balance se expresa de esta forma:

$$REC_D - EVS - EVL - ETR - EXT_{ad} - Q_n = \Delta S \pm \text{error}$$

Dónde:

Item	Descripción	Fuente
REC_d	Recarga Directa por Precipitación	Capítulo 4.2 y 4.8; Anexo MC8
EVS	Evaporación desde el Suelo	Capítulo 4.5.2
EVL	Evaporación Lámina Libre	Capítulo 4.5.1
ETR	Evapotranspiración	Capítulo 4.6
EXT_{ad}	Extracciones Agua Dulce	Extracción de SCL en Tilopozo
Qn	Caudal disponible para ingresar al núcleo	Calculado por Balance
ΔS	Cambios en Almacenamiento	Calculado por Balance

El balance de agua se realizó aguas arriba de la cuña salina, segmentándose la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo con los criterios presentados en el apartado 6.7.1. Se consideraron las subcuencas de la Figura 6-103, las cuales se clasificaron por zonas de acuerdo con lo indicado en la Tabla 6-14, lo cual se resume en la Figura 6-104. El balance se calculó de la siguiente forma:

1. Balance en las zonas altas: se calcula el caudal disponible a ser traspasado a la zona media a partir de las siguientes entradas y salidas:
 - a. Entrada por recarga directa por precipitación
 - b. Salidas por evapotranspiración asociadas a vegas.
2. Balance en zonas medias:
 - a. Entrada por recarga directa
 - b. Descarga por evapotranspiración, evaporación desde el suelo y lámina libre,
 - c. Recarga lateral proveniente de las zonas altas. Se considera que la recarga lateral puede ser en forma de escorrentía o subterránea.
3. El resultado del balance de las zonas medias entrega cuánto caudal de agua está disponible para ingresar al núcleo, evaluándose la potencial entrada por los cuatro sectores definidos del núcleo: Norte, Este, Sur y Oeste (Figura 6-103 y Figura 6-104). Esto, a su vez, es apoyado con la construcción de secciones de paso, en las cuales se estima el caudal de agua que fluye desde la zona aguas arriba de la interfaz salina hacia el núcleo del Salar.

La recarga directa por precipitación se calculó para cada una de las subcuencas y sectores definidos en el estudio morfométrico (ver apartado 4.8, Figura 4-2 y Anexo MC1), según los distintos tipos y usos de suelo, las pendientes del terreno y los eventos de precipitación combinados. Posteriormente, los resultados fueron agrupados de acuerdo con la zonificación presentada en la Figura 6-103 y Figura 6-104. La metodología se detalla en el Anexo MC8 y sus resultados principales se presentan en la Tabla 6-14. El cálculo de la evaporación desde el suelo, lámina libre y evapotranspiración se presenta en los capítulos 4.5 y 4.6.

Al agrupar la precipitación por zonas de balance, se obtienen los números presentados en la Tabla 6-14. Cabe destacar que en la cuenca de Monturaqui la recarga calculada es del orden de 1.220 L/s, valor que se considera alto cuando se compara con la evaporación calculada, y las secciones de paso realizadas

por distintos actores en esa cuenca (Golder Associates, 2017a; SGA, 2015) Lo mismo ocurre para el caso de Peine, donde se calcula una recarga del orden de 667 L/s.

Tabla 6-14. Recarga directa por zonas en la Cuenca del Salar de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

Subcuencas	Zona Balance	Zona	PP (mm/a)	UMBRAL (mm/a)	Recarga PP (L/s)
San Pedro y Vilama			65,6	10,5	1.786
Toconao		Alta	46,8	10,2	603
Aguas Blancas	Norte		67,5	9,7	297
Cordillera de la Sal Este			27,0	6,1	43
Zona Norte		Media	27,1	10,2	274
TOTAL RECARGA NORTE					3.003
Talabre		Alta	45,3	7,9	286
Socaire	Este		33,2	6,6	400
Zona Este		Media	25,1	8,7	115
TOTAL RECARGA ESTE					801
Chépica SW			28,2	5,3	140
Borde Pacífico Sur			20,0	4,9	122
Borde Pacífico Central		Alta	10,1	4,6	20
Borde Pacífico Norte			36,9	5,8	207
Cordillera de la Sal Oeste		Oeste	30,1	5,8	66
Borde Suroeste			18,9	5,9	122
Llano de la Paciencia		Media	23,3	7,2	153
Cordillera de la Sal Sureste			10,1	4,8	7
TOTAL RECARGA OESTE					837
Peine		Alta	38,2	7,1	667
Monturaqui			29,2	6,2	1.220
Chépica Norte		Sur	15,1	4,8	26
Zona Sureste-Peine		Media	19,6	9,7	13
Zona Sureste-Tilopozo			21,9	10,9	12
TOTAL RECARGA SUR					1.939
Zona Núcleo	Núcleo	Baja	16,9	6,9	156
TOTAL			29,8	7,3	6.736

PP: Precipitación

PP Total: Precipitación promedio

6.7.2.1 Cálculo de caudal pasante

Se ha realizado un cálculo del caudal de agua subterránea pasante por el norte, este y sur del Salar de Atacama (Figura 6-109), cuyo objetivo es tener una estimación del caudal pasante lateral que fluye en dirección hacia el núcleo. El cálculo del caudal se realizó utilizando la ecuación de flujo de Darcy:

$$Q = K \times i \times A$$

Donde Q es el caudal que fluye por una sección de área A, por una o más unidades hidrogeológicas de conductividad hidráulica K, y un gradiente hidráulico i. Esta ecuación se aplica a cada unidad hidrogeológica que esté contenida en la sección considerada, de manera que el caudal total será el caudal que fluye por cada unidad hidrogeológica.

El gradiente hidráulico fue calculado utilizando la piezometría construida en estado preoperacional, complementada con valores de niveles piezométricos proyectados en caso de zonas donde no se cuenta con información primaria de niveles. Así, para cada sección se consideró un gradiente hidráulico promedio estimado en varias zonas de cada sección. El área considerada para cada sección corresponde a la porción saturada de agua, es decir, el área bajo el nivel piezométrico y sobre la interfaz salina, para cada sección.

La Tabla 6-15, la Tabla 6-16, y la Tabla 6-17 muestran un resumen del rango de caudales obtenidos a partir de las estimaciones, los que varían según el rango de conductividad hidráulica (K) de cada unidad hidrogeológica, obtenido a su vez de la recopilación de parámetros hidráulicos por sector (ver capítulo 6.2.1). Así, los caudales mínimos y máximos representan los casos en que se considera el menor y mayor valor de K, respectivamente, de cada UH por sector de la cuenca. A continuación, se detalla la construcción de cada sección.

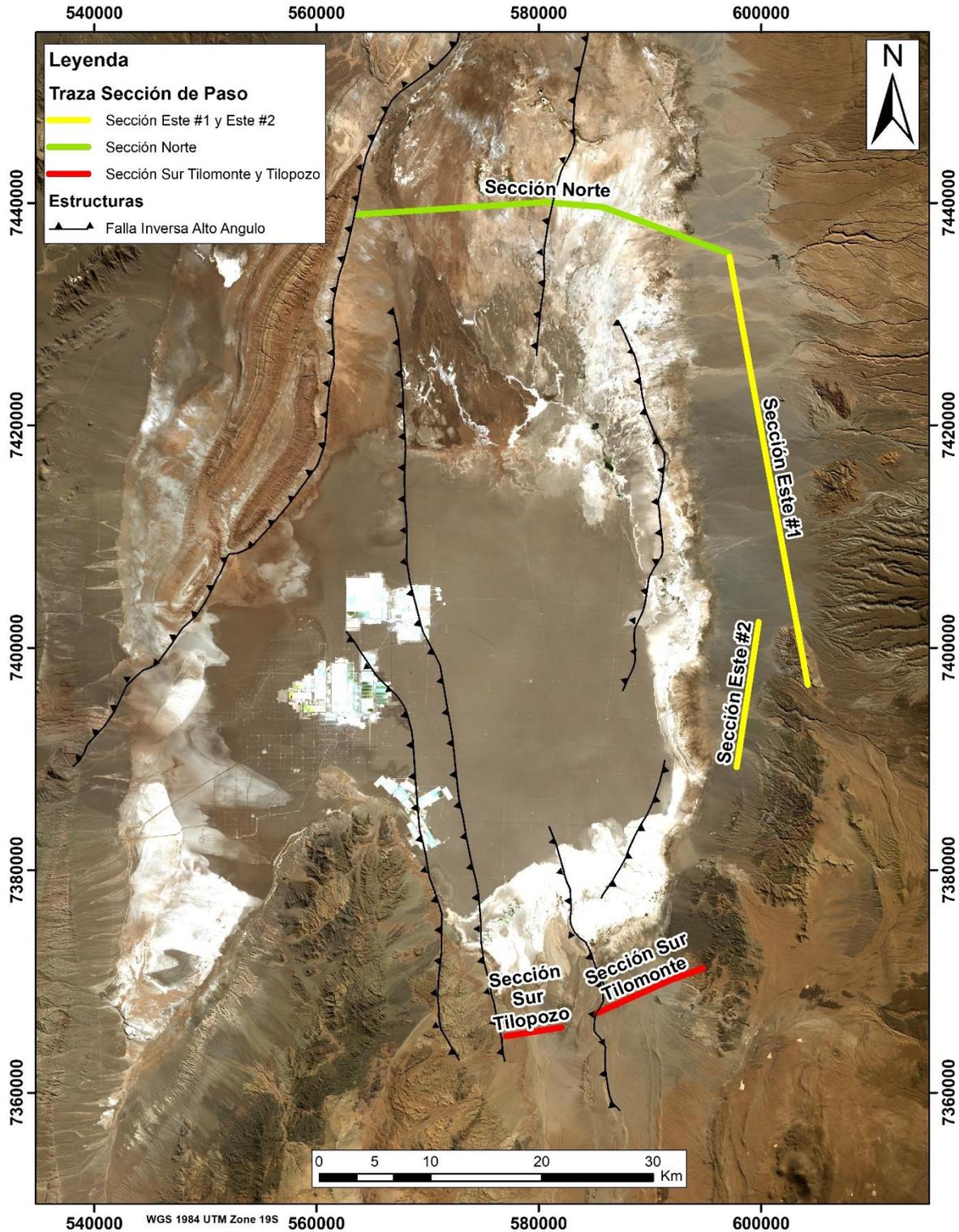


Figura 6-109. Trazas de secciones de paso norte, sur y este. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6-15 Rango estimado de caudal pasante por la zona norte del Salar. Fuente: Elaboración propia.

Sección Norte						
Unidad	A (m2)	i	Kmin	Kmax	Q min (L/s)	Q max (L/s)
Zona Marginal	2295280	0.002	0.001	5	0	219
Aluvial (oeste)	125204	0.001	1	30	2	49
Delta	21111	0.001	0.0001	0.0001	3E-05	3E-05
Total					2	268

Zona Este

Para esta zona se han construido dos secciones, cuyas trazas se muestran en la Figura 6-109. Ellas se disponen perpendiculares al flujo de agua, que en esta zona fluye en dirección E-W. En ambas secciones el agua fluye sólo por la UH Aluvial, por lo que el rango de caudal obtenido depende sólo del rango estimado de K de esta UH (Figura 6-111).

De manera de acotar el amplio rango de K de la UH Aluvial (Tabla 6-4), se han considerado las pruebas de bombeo realizadas en esta zona, según se muestra en la Figura 6-8. En ella se observa que la UH Aluvial en la sección 1 presenta valores de K superiores que los observados en la sección 2. El rango de K para cada sección se muestra en la Tabla 6-16.

La posición de la interfaz salina se ha obtenido a partir de numerosos perfiles TEM y de pozos de monitoreo (pozos Cuña), según lo detallado en el capítulo 6.4. Los niveles piezométricos, en tanto, fueron obtenidos de la piezometría preoperacional (Figura 6-44).

El caudal pasante lateral se encuentra en el rango entre 381 y 1117 L/s (promedio 749 L/s), como se muestra en la Tabla 6-16. Este caudal representa al caudal lateral que llega a la Zona Marginal, lugar donde es sometido a procesos de evaporación.

Tabla 6-16 Rango estimado de caudal pasante por la zona este del Salar. Fuente: Elaboración propia.

Zona Este						
Unidad	A (m2)	i	Kmin	Kmax	Q min (L/s)	Q max (L/s)
Aluvial (sección 1)	3544740	0.001	12	32	367	978
Aluvial (sección 2)	1117927	0.001	1	10	14	138
Total					381	1117

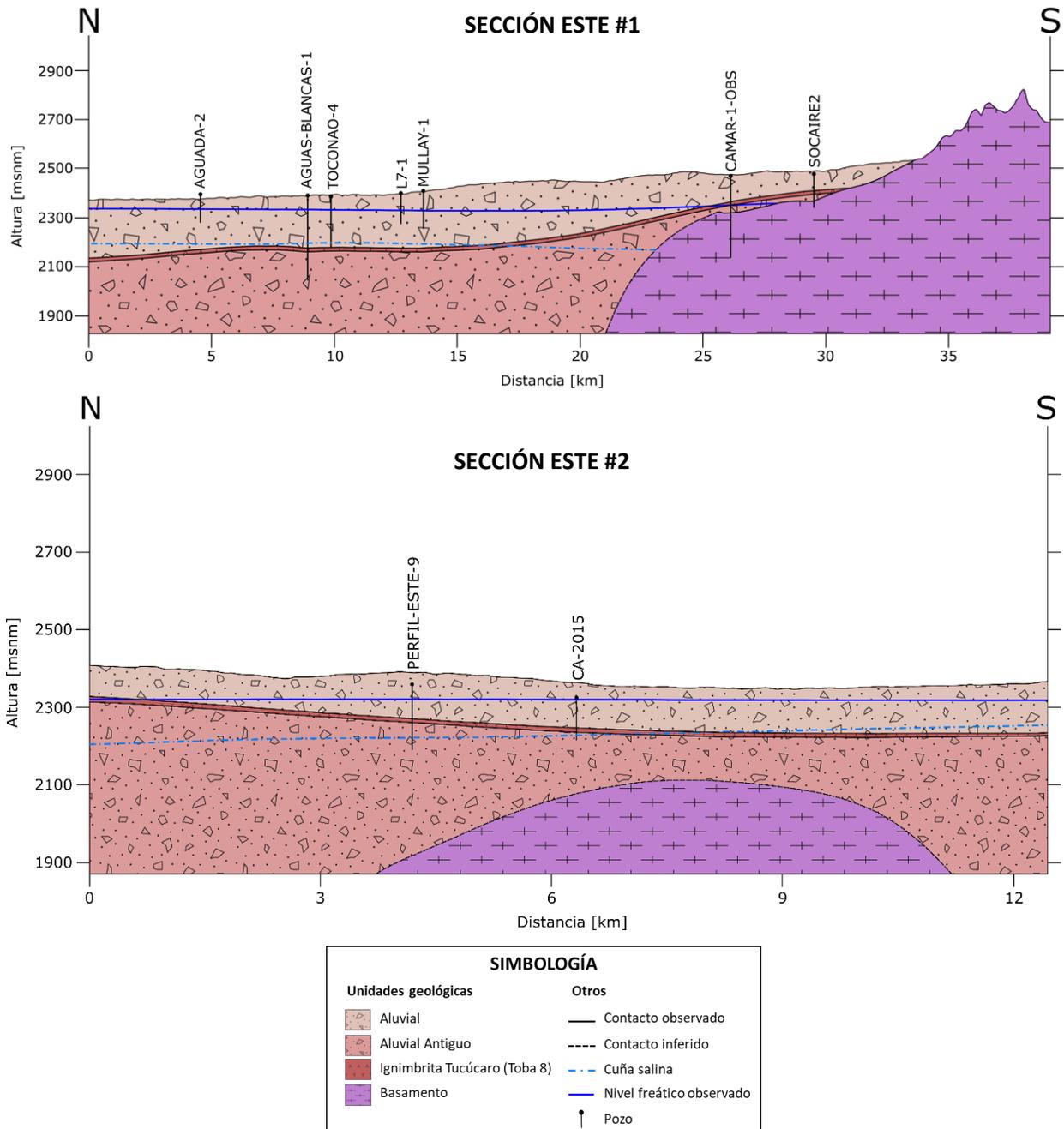


Figura 6-111. Secciones construidas en Zona Este para el cálculo de caudal pasante

Zona Sur

La sección para el cálculo de caudal pasante de esta zona comprende las áreas de Tilopozo y Tilomonte (Figura 6-112). No se ha incluido la porción de roca entre ambas áreas, debido a que no se cuenta con información hidráulica de ésta y, por ende, no es posible cuantificar un posible caudal que fluya a través de la roca.

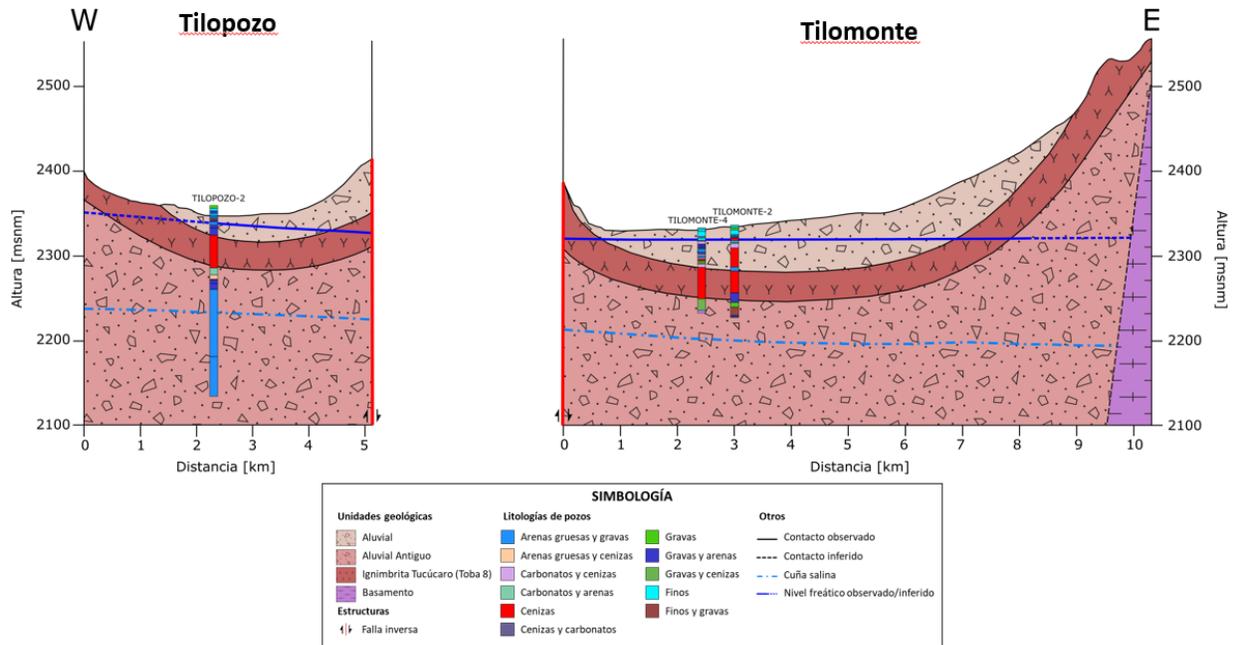


Figura 6-112. Sección construida en Zona Sur para el cálculo de caudal pasante

La principal unidad que está representada en la sección corresponde a la UH Aluvial, cortada por una unidad de ignimbritas o tobas. Los parámetros hidráulicos de estas unidades han sido acotados según el informe presentado por MEL (Golder Associates, 2017a). Las unidades Aluvial y Aluvial Antiguo se correlacionan con los Estratos de Tilocalar de MEL (Golder Associates, 2017a). Ambas unidades (incluyendo la unidad de ignimbritas) poseen estimaciones de parámetros hidráulicos que son los finalmente utilizados para la estimación de caudal pasante.

La Tabla 6-17 muestra la estimación de caudal pasante lateral de agua desde la zona sur del Salar. El rango de caudales se encuentra entre 386 y 1557 L/s (promedio de 972 L/s). Este flujo representa el caudal subterráneo de agua antes de llegar a la Zona Marginal, donde es sometido a procesos de evaporación.

Tabla 6-17 Rango estimado de caudal pasante por la zona sur del Salar. Fuente: Elaboración propia.

Zona Sur (Tilopozo)						
Unidad	A (m2)	i	Kmin	Kmax	Q min (L/s)	Q max (L/s)
Aluvial superior	36932	0.01	10	30	44	132
Ignimbrita	157534	0.01	0.1	3	2	56
Aluvial antiguo	365071	0.01	1	5	43	217

Zona Sur (Tilomonte)						
Unidad	A (m2)	i	Kmin	Kmax	Q min (L/s)	Q max (L/s)
Aluvial superior	171552	0.01	10	30	204	612
Ignimbrita	263449	0.01	0.1	3	3	94
Aluvial antiguo	747800	0.01	1	5	89	445
Total Zona Sur					386	1557

6.7.2.2 Balance de Agua Preoperacional

Los resultados del balance se presentan en la Tabla 6-19, cuyos colores son análogos a la Figura 6-103. Para las zonas altas, la recarga por precipitación se calcula en 5.858 L/s, la que se produce principalmente en las cuencas del norte y sur del Salar.

Para el cálculo del balance, la recarga directa se considera igual a la recarga por precipitación de cada una de las zonas (Tabla 6-14). Sin embargo, teniendo en cuenta que la zona este es donde existen mayor cantidad de datos propios, de confianza, se estima conveniente considerar el promedio del caudal pasante calculado (749 L/s) como el valor de recarga lateral desde la zona alta a la zona media (Tabla 6-19). Esto, consecuentemente, requiere ajustar el valor de la recarga directa de la zona este-alta. Dicho valor, para efectos del balance, es igual a 952 L/s, lo que equivale a 686 L/s de recarga por precipitación ya calculados más 266 L/s adicionales que corresponden, potencialmente, a procesos no contabilizados en el método de cálculo de la recarga por precipitación, o simplemente a precipitación adicional considerando el rango de sensibilidad del método utilizado para el cálculo.

En el sector sur, por su parte, el caudal pasante calculado es de 1831 L/s, valor por sobre el rango estimado con la sección de paso (entre 386 y 1557 L/s). Esto sugiere una probable sobreestimación de la recarga directa por precipitación en estas subcuencas, o bien una subestimación de la conductividad hidráulica de las unidades aluviales por las cuales fluye el agua subterránea hacia el núcleo.

Por otro lado, para la zona norte, la sección de paso construida se localiza en una zona donde el agua ya ha pasado por procesos de evaporación y, por tanto, el rango de caudales estimados (entre 2 y 268 L/s) debe compararse con el caudal disponible desde la Zona Media hacia el núcleo del Salar. En particular, el caudal calculado que queda disponible para ingreso hacia el núcleo desde la Zona Norte es de 148 L/s, consistente con el rango estimado por la sección de paso construida para esta zona (2 y 268 L/s).

Por lo tanto, de los 6.124 L/s de recarga a la zona alta (5.585 L/s estimados con precipitación directa sumado a los 266 L/s extras estimados con la sección de paso de la zona este), tras descontar la evapotranspiración de vegas, 5.567 L/s quedan como excedente disponible para ser traspasados hacia las zonas medias.

En las zonas medias, en tanto, predominan las descargas por evaporación desde el suelo y lámina libre, además de la evapotranspiración asociadas a vegas y bofedales. Existe, además, una extracción menor de 5 l/s en este periodo, la cual se ubica en el sector sur. Con todo lo anterior, se genera un total de descargas de 5.685 L/s. Éstas exceden a los 722 L/s de recarga por precipitación en la zona media, pero se compensan con los 5.567 L/s de recarga desde las cuencas altas, generándose un desbalance global de +604 L/s.

Del balance de agua preoperacional se concluye lo siguiente:

1. El balance hídrico neto de agua es positivo, consistente con ingresos de agua muy evaporada (salobre) hacia el núcleo principalmente por el sur (670 L/s), y en menor medida por el norte y oeste (148 y 44 L/s, respectivamente). Que la componente principal corresponda al ingreso por el sur es consistente con lo observado en la piezometría preoperacional construida con niveles observados de salmuera (ver Figura 6-41).
2. Los niveles de la UH Aluvial del este presentan un descenso de 1 a 2 cm/año previo a la operación, que puede asociarse a una pérdida natural de almacenamiento del sistema. Esto es consistente con el déficit de 258 L/s generado en ese sector.

Luego, el balance hídrico de agua preoperacional en la cuenca del Salar de Atacama se puede resumir como se muestra en la Tabla 6-18 y Tabla 6-19.

Tabla 6-18. Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de agua preoperacional. Fuente: elaboración propia.

Balance	Parámetro del Balance	Metodología de cálculo	Caudal (L/s)
ENTRADAS	Recarga directa	Precipitación	6846
SALIDAS	Evaporación desde el suelo	Profundidades continuas preoperacional	3405
	Evaporación de Lámina Libre	Áreas de lagunas permanentes o con presencia de agua reconocida en una imagen satelital	530
	Evapotranspiración	Áreas de vegetación y tasas de evaporación	2302
	Extracción Agua	Datos SCL	5
Variación Almacenamiento de Agua			604

Tabla 6-19. Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de agua preoperacional. Valores en L/s. Fuente: elaboración propia.

Zona	Borde Núcleo	RECARGA	DESCARGA				RECARGA		DISPONIBLE		Zona Alta	Zona Media
		1. Recarga Directa	2. Evaporación desde el Suelo	3. Evaporación Lámina Libre	4. Evapotranspiración	5. Extracciones	6. Recarga Lateral desde Zona Alta	7. Recarga Lateral desde Zona Media	Descarga Lateral hacia Zona Media	Descarga Lateral hacia Núcleo		
Alta	Norte	2729	0	0	298	0	0	0	2431		0	
	Este	*952	0	0	203	0	0	0	749		0	
	Sur	1887	0	0	56	0	0	0	1831		0	
	Oeste	556	0	0	0	0	0	0	556		0	
	Total	6124	0	0	557				5567		0	
Media	Norte	274	886	157	1514	0	2431	0		148		0
	Este	115	680	309	133	0	749	0		0		-258
	Sur	52	1046	64	98	5	1831	0		670		0
	Oeste	282	793	0	0	0	556	0		44		0
	Total	722	3405	530	1745	5	5567			862		-258
Balance Agua		6846	3405	530	2302	5						604

* Recarga considera resultado del análisis de secciones de paso.

6.7.2.3 Balance de Agua Operacional

Se asume que para el período operacional las recargas se mantienen relativamente constantes, por lo que los mayores cambios pueden venir asociados a extracciones de agua para uso industrial, regadío o consumo. Dentro de los actores que reportan el agua para uso industrial destacan Minera Escondida Limitada (MEL), Compañía Minera Zaldívar (CMZ), Albemarle (ALB) y SQM.

Las series anuales de extracción se presentan en la Tabla 6-20. Como no se cuenta con toda la serie de caudales, se ha rellenado la serie considerando el primer valor reportado para MEL y CMZ en el tramo 1994 – 1999; análogamente, se han rellenado las series de MEL y CMZ considerando el último valor reportado para el tramo entre los años 2016 y 2018, según lo reportado por (Amphos 21, 2018b).

De la Tabla 6-20 se desprende que:

- Albemarle extrae agua del sector sur de la cuenca en Tilopozo, con un caudal medio de 8 L/s desde 1994. El caudal fue mínimo en los primeros años (6 L/s) y alcanza los 17 L/s desde el 2015.
- CMZ cuenta con una aprobación ambiental de 500 L/s, y ha extraído del sector Negrillar (sur del Salar de Atacama) un caudal que ha variado entre 132 y 219 L/s desde 1994 (Amphos 21, 2018b).
- MEL cuenta con una aprobación ambiental de 1400 L/s desde el sector Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. Su caudal de extracción ha variado entre 568 y 1395 L/s desde 1998 a la fecha.
- SQM tiene derechos otorgados por 547 L/s, de los cuales tiene autorización ambiental para extraer 240 L/s. Desde 1997 a 2018 ha extraído entre 26 y 230 L/s.

Por lo tanto, el caudal medio de extracción en el sur corresponde a 1142 L/s, de los cuales 1134 L/s se extraen de la Zona Alta y 8 L/s desde la Zona Media. Sin embargo, de acuerdo con lo indicado por el balance aguas-abajo de MEL (Golder Associates, 2017a), al final de su operación habría una disminución de un 6% del caudal total disponible en el sistema. Esto, respecto del total obtenido luego de calcular entradas (Recarga directa = 1887 L/s) y salidas (Evapotranspiración = 56 L/s) de la Zona Sur-Alta.

Para representar el efecto descrito, por lo tanto, se debe considerar que la extracción desde la Zona Alta afecta únicamente al almacenamiento del sistema en dicha zona o subcuenca (Monturaqui y Negrillar), pero no al caudal que es traspasado hacia la zona media. Es decir, para efectos del balance, se considera que, aunque existe una extracción en la Zona Sur-Alta, dicho caudal queda prácticamente casi todo disponible para recargar la Zona Sur-Media (ya que todo lo extraído corresponde a almacenamiento). Luego, para ser consistentes con lo indicado por Golder Associates (2017a), del total disponible en la Zona Sur-Alta (Recarga directa – Evapotranspiración = 1831 L/s), un 94% es el que quedará disponible de manera efectiva en la Zona Media.

Consecuentemente, como se resume en la Tabla 6-23, de los 1831 L/s descargados desde la Zona Alta a la Zona Media, 1721 L/s quedan efectivamente disponibles para competir contra los procesos de descarga que permiten calcular el balance entre la Zona Media y el Núcleo. Se considera, por tanto, que la diferencia (6% ~ 110 L/s) representa una extracción efectiva desde la Zona Sur-Media, totalizando 118 L/s efectivos en este sector.

En el este, en tanto, la extracción es de 124 L/s en promedio, mientras que en la zona norte de la cuenca existen más de 813 L/s otorgados que no son reportados y no fueron considerados en este balance.

Tabla 6-20 Caudales de agua extraídos. Fuente: (1) Amphos 21 (2018b), (2) SQM.

Año	SECTOR SUR			ESTE
	MEL ¹	CMZ ¹	ALB ¹	SQM ²
1994	0*	146*	6	0
1995	0*	146*	6	0
1996	0*	146*	6	0
1997	0*	146*	6	26
1998	568*	146*	6	63
1999	568*	146*	6	74
2000	568	146	5	69
2001	629	141	6	60
2002	866	132	7	67
2003	1175	134	7	75
2004	1360	144	7	80
2005	1318	136	4	90
2006	1328	174	7	78
2007	1320	169	7	83
2008	1388	172	9	146
2009	1338	192	8	232
2010	1238	178	8	229
2011	1060	217	8	226
2012	1200	219	8	225
2013	1303	216	6	224
2014	1309	188	6	229
2015	1399	195	17	230
2016	1400*	195*	17	186
2017	1400*	195*	17	226
2018	1400*	195*	17	180
PROMEDIO	965	169	8	124
CAUDAL MEDIO		1142		124

*: Datos rellenados

En consecuencia, considerando lo expuesto en los párrafos precedentes, del total de extracciones efectivas que ocurren en la cuenca y son contempladas en el presente balance operacional (1266 L/s), una parte del total corresponde únicamente a consumo de almacenamiento, sin afectar el balance neto final. Esto ocurre en la Zona Sur (Monturaqui y Negrillar), y equivale a 1024 L/s totales. Dicho valor se obtiene restando al total extraído en el sur (1134 L/s) el 6% del caudal que incide efectivamente en el balance de esta zona (6% de 1831 L/s = 110 L/s). Con ello, la extracción de agua neta que debe contemplarse para efectos del balance es de 242 L/s (Tabla 6-21).

Tabla 6-21 . Resumen del caudal total extraído, proporción de extracción que afecta únicamente el almacenamiento y caudal neto real que incide en el balance.

Parámetro	Fuente	Total (L/s)
Extracción Agua Total	Datos SCL	1266
Extracción Agua que sólo consume almacenamiento	Datos SCL y Golder Associates (2017a)	1024
Extracción Agua Neta		242

De este modo, los valores del balance hídrico operacional del agua, considerando las extracciones de agua industrial que se reportan, se presenta en la Tabla 6-23.

Tabla 6-22 Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de Agua operacional. Fuente: elaboración propia.

Balance	Parámetro del Balance	Metodología de cálculo	Caudal (L/s)
ENTRADAS	Recarga directa	Precipitación	6846
SALIDAS	Evaporación desde el suelo	Profundidades continuas preoperacional	3405
	Evaporación de Lámina Libre	Áreas de lagunas permanentes o con presencia de agua reconocida en una imagen satelital	530
	Evapotranspiración	Áreas de vegetación y tasas de evaporación	2302
	Extracción neta de Agua	Datos SQM, SCL y Golder Associates (2017a)	242
Variación Neta Almacenamiento de Agua			367

6.7.2.4 Comparación resultados balance de Agua preoperacional y operacional.

Durante el período preoperacional, el balance hídrico neto de agua es positivo (604 L/s) y existiría un caudal aproximado de 862 L/s disponibles para ingresar al núcleo, la mayor parte haciéndolo por el sur (sectores Peine y Tilopozo). A su vez, el leve déficit generado en la zona este (-258 L/s) es consistente con la pérdida de almacenamiento observada en los piezómetros de la zona aluvial durante este periodo (ver capítulo 6.5). Además, este desbalance observado en la zona este podría traducirse en una disminución en el tiempo de la cantidad de evaporación (de suelo y por lámina libre) y evapotranspiración en la Zona Marginal.

La explotación de agua en el periodo operacional, tanto en las partes medias y altas de la cuenca, tiene como consecuencia un mayor consumo del agua almacenada en las unidades acuíferas (UH Aluvial), y un aumento en la tasa de descenso de los niveles. Es relevante considerar que, en caso de que se produzca una disminución de los niveles, esto puede traer consigo una menor evaporación en las partes bajas de la cuenca.

Similarmente, el balance hídrico neto de agua del periodo operacional resulta en 367 L/s, quedando 749 L/s disponibles para ingresar al núcleo. Cabe recordar que este balance considera el escenario expuesto por MEL (Golder Associates, 2017a), en el cual se calcula que, al final de su operación, un 94% del caudal total queda disponible aguas-abajo en la Zona Sur (subcuencas Monturaqui y Negrillar).

Tabla 6-23. Resumen de los cálculos y valores realizados para el balance de agua operacional. Valores en L/s. Fuente: elaboración propia.

Zona	Borde Núcleo	RECARGA	DESCARGA				DISPONIBLE		BALANCE		Zona Alta	Zona Media
		1. Recarga Directa	2. Evaporación desde el Suelo	3. Evaporación Lámina Libre	4. Evapotranspiración	5. Extracciones	6. Recarga Lateral desde Zona Alta	7. Recarga Lateral desde Zona Media	Descarga Lateral hacia Zona Media	Descarga Lateral hacia Núcleo		
Alta	Norte	2729	0	0	298	0	0	0	2431		0	
	Este	^(*a) 952	0	0	203	0	0	0	^(*a) 749		0	
	Sur	1887	0	0	56	^(*b) 0	0	0	^(*b) 1831		0	
	Oeste	556	0	0	0	0	0	0	556		0	
	Total	5858	0	0	557	^(*b)0			5567		0	0
Media	Norte	274	886	157	1514	0	2431	0		148	0	0
	Este	115	680	309	133	124	749	0		0	0	-382
	Sur	52	1046	64	98	^(*c) 118	^(*b) 1831	0		557	0	0
	Oeste	282	793	0	0	0	556	0		44	0	0
	Total	722	3405	530	1745	242	5567			749		-382
Balance Agua		6846	3405	530	2302	242						^(*d)367

^(*a) La Recarga lateral representa el promedio del caudal pasante calculado en la Zona Este (749 L/s) mientras que la Recarga Directa equivale a 686 L/s de recarga por precipitación más 266 L/s adicionales a los contabilizados en el método de cálculo de la recarga por precipitación.

^(*b) Se asume una extracción 0 desde la zona Sur-Alta para representar el efecto del balance calculado por MEL (Golder Associates, 2017a). Dicho balance estima que, al final de la operación, un 6% del caudal total de la Zona Alta se habrá perdido por la operación, quedando disponible aguas-abajo un 94% del total.

^(*c) Considera los 8 L/s de la operación de ALB en el sector más los 110 L/s (6% de 1831 L/s) asociados a la extracción neta de MEL aguas-arriba, de acuerdo con lo estimado en su balance (Golder Associates, 2017a).

^(*d) Balance neto final considerando el total de Recarga y Descarga.

6.7.3 Balance de Salmuera

El balance de salmuera se realizó en el dominio presentado en la Figura 6-103, que corresponde al sector del núcleo principalmente (UH Núcleo Superior). Para la estimación del balance hídrico de salmuera se consideraron las siguientes variables:

$$REC_D - EVS - EVL - ETR - EXT_{ad} - Q_n = \Delta S \pm \text{error}$$

Donde:

Ítem	Descripción	Fuente
REC_D	Recarga Directa por Precipitación en el núcleo	Capítulo 4.2; Capítulo 6.5.1.2
EVS	Evaporación de Salmuera desde el Suelo	Capítulo 4.5.2
EVL	Evaporación Lámina Libre	Capítulo 4.5.1
ETR	Evapotranspiración	No existe vegetación en el núcleo
EXT_{ad}	Extracciones Salmuera	Solo la extracción de SCL en el período preoperacional con un caudal promedio entre 1986 y 1994 de ~46 L/s.
Q_n	Caudal disponible para ingresar al núcleo	Calculado por Balance de Agua
ΔS	Cambios en Almacenamiento	Calculado por Balance

La recarga por precipitación se calculó por dos métodos distintos: a partir de la estimación de la recarga por precipitación directa (ver Capítulos 4.8 y 6.7.2.1, y Anexo MC8), y por la respuesta de los niveles en el núcleo a eventos de precipitación importantes (ver Capítulo 6.5.1.2). Ambos métodos entregan los resultados de la Tabla 6-24:

Tabla 6-24. Estimación de la recarga a partir (1) del dato de precipitación directa y (2) de la respuesta de los niveles en el núcleo a los eventos de precipitación. Fuente: Elaboración propia.

Método	Período	Mínimo (L/s)	Máximo (L/s)	Promedio (L/s)
Respuesta de Niveles a Precipitación Capítulo 6.5.1.2	Ago 1986 – Dic 2018	149	448	299
Recarga por Precipitación Directa Capítulo 6.7.2.1	Ago 1986 – Dic 2018	117	195	156

De acuerdo con los marcados ascensos que se registran en los niveles de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama, el rango de recarga por precipitación en todo el período varía entre 149 y 448 L/s. Por su parte, con el cálculo por precipitación directa, el rango para el mismo período varía entre 117 y 195 L/s, equivalente al rango inferior del caudal calculado a partir de la respuesta de los niveles. Dado que la

respuesta de niveles es similar en todo el núcleo, y se cuenta con un buen registro de niveles medidos en los períodos preoperacional y operacional, se considera más adecuado para el balance hídrico del núcleo el cálculo de la recarga a partir de la respuesta de niveles.

Según el balance hídrico de agua, las recargas laterales hacia el núcleo provienen principalmente desde el norte y sur. Se considera que los 862 L/s calculados a partir del balance de agua preoperacional representarían el valor promedio que podría entrar al núcleo. Como se explicó anteriormente, no existiría recarga por el borde este dado que la evaporación total del sector es mayor que la recarga (capítulo 6.7.2.1), lo cual es consistente con los datos de nivel tanto del núcleo como del aluvial (ver capítulo 6.5). Para analizar la sensibilidad de la recarga lateral (862 L/s preoperacional), se considera que el escenario “máximo” y “mínimo” representan un valor de un 25% más y un 25% menos del promedio de recarga, respectivamente (Tabla 6-25; 1078 y 647 L/s, respectivamente).

Por otro lado, se considera como descarga de salmuera a la evaporación de salmuera generada en donde aflora la cuña salina, principalmente debido a su efecto convectivo. Esto se ve reflejado en las piezometrías presentadas en el Capítulo 6.5.4 (Figura 6-50). Para estimar el valor de la salida lateral se toma como referencia el caudal medio que se podría evaporar desde toda la zona marginal; esto corresponde a la suma de la evaporación media desde suelo de las zonas A2, A3, A6, A7, A8, A9-1, A9-2, A-10 y Zi (Figura 4-22, Figura 6-104 y Tabla 4-9), lo que resulta en un valor aproximado de 2.065 L/s en los 700 km² de zona marginal.

De los 2.065 L/s que se evaporan de la zona marginal, una parte podría representar evaporación de salmuera. Dado que se desconoce cuánto de lo que se evapora es salmuera y cuánto es agua, se realiza una ponderación por área de la zona donde aflora la interfaz salina (Figura 6-21), considerando para esto sólo los primeros 10 y 20 m de interfaz (primeras 2 bandas de la Figura 6-21), que es donde ocurren los mayores procesos de mezcla con agua y evaporación. El rango obtenido varía entre un 17% y 24% del área total de la zona marginal, lo que se traduce en una posible evaporación de salmuera entre 350 L/s y 495 L/s (423 L/s promedio). Dado que los niveles en la zona marginal se mantienen relativamente estables, se asume que estos caudales se mantienen tanto en el período operacional como preoperacional.

Respecto de la evaporación desde el suelo en el núcleo, para la UH Núcleo Superior se ha estimado un valor de entre 939 y 83 L/s (Zona A13; Tabla 4-9). Debido al ajuste de la curva de Philip para este sector y al impacto que tiene la profundidad del nivel freático en la magnitud de la evaporación, se considera necesario evaluar de manera separada el período pre-operacional y el operacional.

En el período pre-operacional el efecto de la evaporación debiera ser mayor debido a que los niveles se encuentran más someros (ver capítulo 6.5.4), por lo que se estima que el rango se encuentre entre el máximo y un 50% de dicho valor; esto es, entre 939 y 470 L/s. Para el período operacional, por su parte, el descenso de los niveles genera que un volumen importante de salmuera se ubique bajo la profundidad de extinción de la evaporación, por lo que se estima un rango de evaporación desde el suelo debiera ser más bajo (UH Núcleo Superior). Se evalúa el que dicho valor se ubique entre el mínimo y un 50% del máximo estimado: 83 y 470 L/s, respectivamente.

6.7.3.1 Balance de salmuera preoperacional

El balance preoperacional de salmuera se presenta resumido en la Tabla 6-25. Éste considera los supuestos descritos previamente, además de las extracciones de ~46 L/s por parte de SCL (actual Albemarle) en el período preoperacional.

La evaluación de los distintos escenarios extremos entre los valores mínimos y máximos considerados se presenta en la Figura 6-113, en la que el caso 1A “Recarga Máxima-Descarga Mínima” representa el extremo de máximo balance global, mientras que el caso 2B “Recarga Mínima-Descarga Máxima” corresponde al caso de mínimo balance global.

Tabla 6-25. Resumen de los cálculos y valores utilizados para el balance de salmuera pre-operacional. Fuente: elaboración propia.

Balance	Parámetro del Balance	Metodología de cálculo	Mínimo	Máximo	Promedio
ENTRADAS	Recarga directa	Respuesta Niveles	149	448	299
	Recarga Lateral	Balance de Agua	647	1078	862
	Total Entradas		796	1526	1161
SALIDAS	Evaporación desde el suelo	Profundidades continuas preoperacional	470	939	704
	Descarga Lateral	Salida de Salmuera en la parte Oriental del Núcleo por convección	350	495	423
	Extracción de Salmuera	Extracción Media SCL entre 1986 y 1993	46	46	46
	Total Salidas		866	1480	1173
Variación Almacenamiento de Salmuera			-70	46	-12

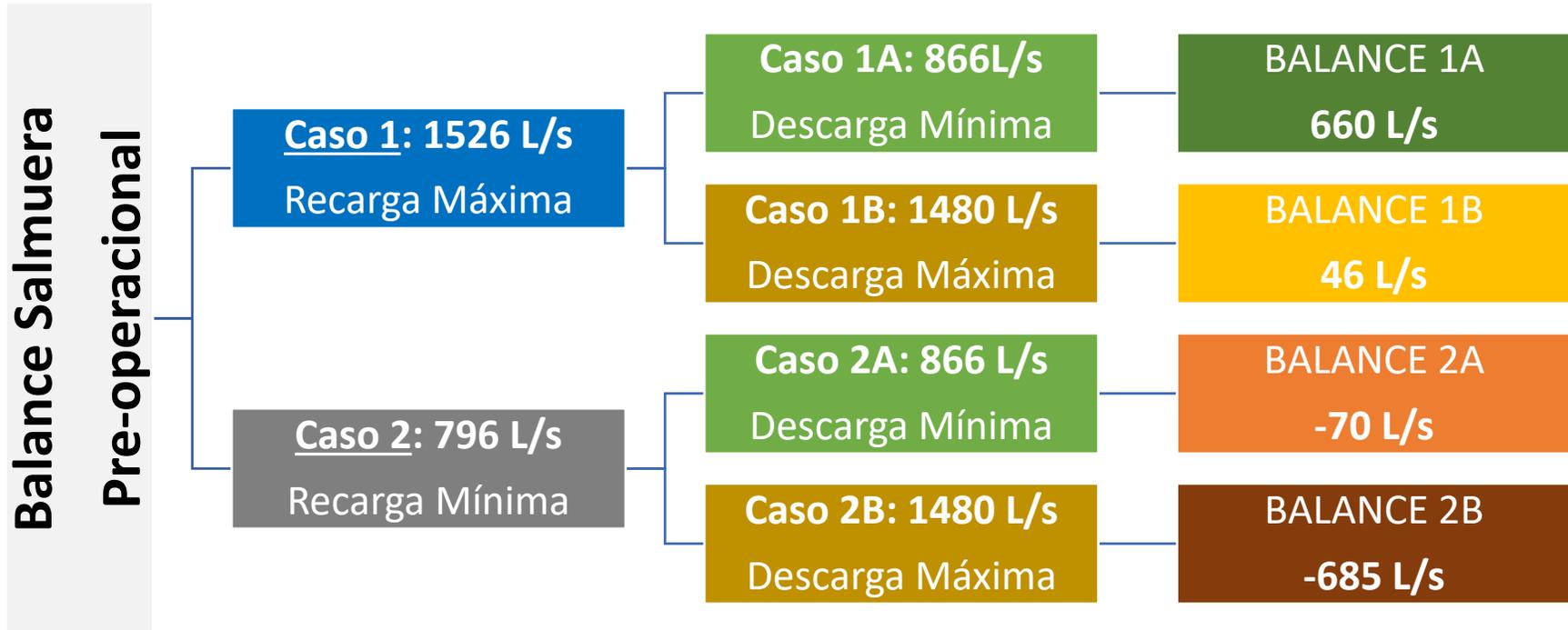


Figura 6-113. Resumen del balance de salmuera pre-operacional considerando los distintos escenarios extremos en que se combinen valores mínimos y máximos de Recarga y Descarga.

Entre los años 1989 y 1993, los niveles de salmuera del núcleo presentan un descenso que varía entre 2 a 3 cm/año, el que estaría asociado a una pérdida de almacenamiento provocado principalmente por la evaporación de salmuera desde el núcleo (Figura 6-114). Como ejemplo, en la Tabla 6-26 se presentan los descensos mínimos registrados para cuatro puntos de la Figura 6-114, calculándose el descenso (Delta) acumulado de los mínimos en un período aproximado de 3 años.

Tabla 6-26 Tasa de Descenso del núcleo en período preoperacional. Fuente: Elaboración propia.

Punto	Fecha 1	Desc. Min 1	Fecha 2	Desc. Min 2	Fecha 3	Desc. Min 3	Fecha 4	Desc. Min 4	Delta Nivel (cm)	Período (años)	Tasa (cm/ año)
2003	Jul 1989	0,144	Jul 1990	0,186	Jul 1991	0,190	Jul 1992	0,207	0,063	3,0	2,1
2004	Ago. 1989	0,116	Jul 1990	0,172	Jul 1991	0,190	Jul 1992	0,206	0,090	2,9	3,1
2006	Jul 1989	0,123	Jul 1990	0,160	Ago, 1991	0,183	Jul 1992	0,188	0,065	3,0	2,2
2018	Ago. 1989	0,107	Jul 1990	0,155	Jul 1991	0,168	Jul 1992	0,180	0,073	2,9	2,5
									Prom.		2,5

Considerando que el área del núcleo es de 1.450 km², y que almacenamiento en la UH Núcleo Superior varía entre un 1 y 15%, el caudal asociado a la pérdida de almacenamiento por evaporación se puede calcular como:

$$V_{\Delta S} = A \cdot \Delta h \cdot S$$

Dónde

$V_{\Delta S}$ = Pérdida de volumen almacenado, expresado en m³/año

A = Área del Salar de Atacama en m²

Δh = Tasa de descenso en m/año

S = Porosidad media de los primeros 100 cm del Salar de Atacama (adimensional)

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de la pérdida del almacenamiento, se analizaron 3 casos de tasas de descenso variables entre 2 y 3 cm por año, considerando cinco casos de almacenamientos, entre 1 y 15%. El volumen de almacenamiento perdido, expresado en L/s, se presenta en Tabla 6-27; se observa que los valores obtenidos de pérdida de almacenamiento varían entre -9 y -207 L/s. Como son sólo valores negativos, se asume que los valores obtenidos para el balance de salmuera (Figura 6-113 y Tabla 6-25) deben ser más cercanos a la recarga mínima, con una descarga ligeramente superior a los valores mínimos calculados. Esto sugiere una posible sobrestimación de los valores de recarga lateral de agua desde la zona sur, como se indicó en el capítulo anterior.



Figura 6-114. Descenso normalizado de piezómetros en el núcleo desde febrero 1989 hasta julio de 1994. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6-27 Rango de caudal de pérdida de almacenamiento de salmuera, expresado en L/s. Fuente: elaboración propia.

Descensos (cm/año)	Rango de almacenamiento					
	1%	5%	8%	10%	12%	15%
2,0	-9	-46	-74	-92	-110	-138
2,5	-11	-57	-92	-115	-138	-172
3,0	-14	-69	-110	-138	-166	-207

Considerando lo anterior, los rangos aceptados para el balance hídrico de salmuera preoperacional son consistentes con los escenarios E.2A y E.2B. Los casos con recarga máxima (E1A y E1B; balance > 0; Figura 6-113), no serían consistentes con el leve pero progresivo descenso de los niveles en este periodo.

6.7.3.2 Balance de salmuera operacional

El balance operacional de salmuera (Tabla 6-28), considera los supuestos descritos previamente, además de las extracciones de ~1.219 L/s por parte de SQM y Albemarle, y de las reinyecciones de SQM en este período (~249 L/s). Además, se ha considerado como recarga directa por precipitación al resultado del análisis de respuesta de niveles a las precipitaciones (ver Capítulo 6.5.1.2), el que en el período operacional arroja un rango entre 194 y 583 L/s.

La evaluación de los distintos escenarios extremos entre los valores mínimos y máximos considerados se presenta en la Figura 6-115. En ella, el caso 1A “Recarga Máxima-Descarga Mínima” representa el extremo de máximo balance global, mientras que el caso 2B “Recarga Mínima-Descarga Máxima” corresponde al caso de mínimo balance global.

Tabla 6-28. Tabla resumen del Balance de Salmuera Operacional (L/s). Fuente: elaboración propia.

Balance	Parámetro del Balance	Metodología de cálculo	Caso Mínimos	Caso Máximos	Caso Promedio
ENTRADAS	Recarga directa	Respuesta Niveles	194	583	389
	Recarga Lateral	Balance de Agua	562	936	749
	Recarga	Reinyección SQM entre 1994 y 2018	249	249	249
	Total Entradas		1.005	1.768	1.387
SALIDAS	Evaporación desde el suelo	Rango Cálculo Evaporación desde el Suelo	83	470	276
	Evaporación desde el Suelo	Rango a partir de Evaporación en Zona Oriental del Núcleo	350	495	423
	Extracción de Salmuera	Extracción Media SQM y Albemarle entre 1994 y 2018	1.219	1.219	1.219
	Total Salidas		1.652	2.184	1.918
Variación Almacenamiento de Salmuera			-647	-415	-531

Con el objetivo de estimar y comparar la variación del almacenamiento de salmuera en el núcleo, se compararon los descensos entre los años 1994 y 2018. De la Figura 6-47 se observa que los mayores descensos se han producido al oeste de la Falla Caballo, mientras que al este de esta falla son relativamente parejos (Figura 6-26). Luego, el núcleo (1.450 Km²) se divide en dos sectores: un sector al oeste de la Falla Cabeza de Caballo (~464 Km²) y otro al este de esta falla (~986 Km²). De la comparación de superficies piezométricas se observa que los descensos medios al oeste de la Falla Caballo varían entre 4,75 y 5,25 m (promedio 5 m), mientras que al este de la falla varían entre 0,8 y 1,2 m (promedio 1 m), entre noviembre de 1994 y diciembre de 2018.

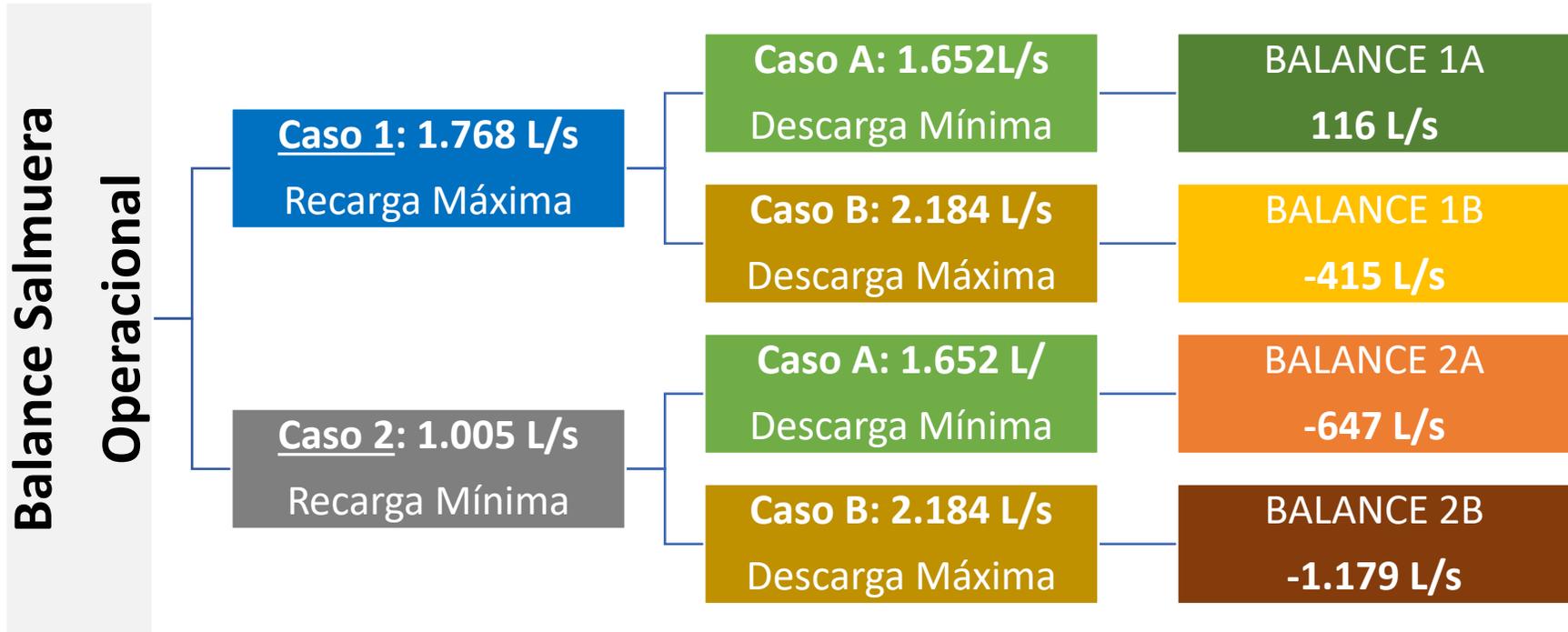


Figura 6-115. Resumen del balance de salmuera operacional considerando los distintos escenarios extremos en que se combinen valores mínimos y máximos de Recarga y Descarga

Equivalente al ejercicio realizado en el caso pre-operación, si se tiene en consideración que el área del núcleo es de 1.450 km² y su almacenamiento varía entre un 1 y 15% en la UH Núcleo Superior, se puede calcular la variación de volumen asociada a la pérdida de almacenamiento por evaporación y extracción para comparar este resultado con el del balance hídrico:

$$V_{\Delta S} = A \cdot \Delta h \cdot S / t$$

Dónde

- V_{ΔS} = Pérdida de volumen almacenado, expresado en m³/año
- A = Área del Salar de Atacama en m².
- Δh = Descenso en metros
- S = Porosidad media de los primeros 100 cm del Salar de Atacama. (Adimensional)
- T = Período de tiempo evaluado en años

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de la estimación se analizaron 2 casos de descenso en el núcleo, tanto para el oeste como para el este de la Falla Caballo, y se consideraron seis casos de almacenamiento, entre 5 y 15%. El volumen de almacenamiento perdido, expresado en L/s se presenta en Tabla 6-27. Se observa que los valores de pérdida de almacenamiento obtenidos varían entre -196 y -711 L/s (entre 5% y 15% de almacenamiento), con un caso promedio con una variación entre -217 y -650 L/s. El detalle por sector al este u oeste del Sistema de Falla Caballo se presenta en la Tabla 6-29.

Tabla 6-29 Rango de caudal de pérdida de almacenamiento de salmuera, expresado en L/s. Fuente: elaboración propia.

Caso	Sector	Descenso (m)	Almacenamiento				
			5%	8%	10%	12%	15%
Descensos Medios Mínimo	Oeste Caballo	4,75	-144	-231	-289	-347	-433
	Este Caballo	0,80	-52	-83	-103	-124	-155
	Ponderado	2,06	-196	-314	-392	-471	-588
Descensos Medios Máximo	Oeste Caballo	5,25	-160	-255	-319	-383	-479
	Este Caballo	1,20	-78	-124	-155	-186	-233
	Ponderado	2,50	-237	-379	-474	-569	-711
Promedio	Oeste Caballo	5,00	-152	-243	-304	-365	-456
	Este Caballo	1,00	-65	-103	-129	-155	-194
	Ponderado	2,28	-217	-347	-433	-520	-650

En esta situación, los rangos aceptados para el balance hídrico de salmuera operacional corresponden al rango entre el caso de mínima recarga y descarga (E.2A; Figura 6-115) y algún punto entre los escenarios E.1A y E.1B (Figura 6-115). El caso promedio (-531 L/s, Tabla 6-28), en tanto, es similar al obtenido para un escenario promedio con un 12% de almacenamiento. Los casos extremos de máximo y mínimo balance global (E1A y E.2B; Figura 6-115) no serían consistentes con el balance mediante pérdida de almacenamiento, e implicaría niveles freáticos fuera de lo observado realmente.

7 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO

7.1 Sistema Regional

Las unidades geológicas de la Cuenca del Salar de Atacama registran una compleja historia de sobreimposición de eventos debido a su extensión y al amplio rango de tiempo que documentan sus depósitos. Esta cuenca está formada por rocas que datan del Paleozoico medio hasta depósitos sedimentarios y evaporíticos recientes.

Los depósitos aluviales y coluviales que ocurren en los alrededores del salar muestran una tendencia granodecreciente representada por gravas y arenas gruesas cerca de los ápices de estos conos sedimentarios, que gradan a arenas finas, limos y arcillas en las partes más distales, hacia el núcleo del salar. En los bordes este y sur, estos depósitos cubren y provienen directamente de rocas antiguas del basamento geológico y de los edificios volcánicos de la Cordillera Occidental. En el margen oeste del salar, los depósitos aluviales provenientes de la Cordillera de Domeyko chocan con la Cordillera de la Sal antes de ingresar por estrechas quebradas hacia el núcleo del Salar. Los deltas de los ríos San Pedro y Vilama controlan los depósitos sedimentarios que se disponen al norte del salar, cuyas zonas distales se conforman por depósitos detríticos de grano fino interdigitados con las evaporitas propias del núcleo y de la zona marginal.

El Sistema de Falla Salar, de rumbo norte-sur, corresponde al rasgo estructural más relevante de la cuenca del Salar de Atacama, y divide al salar en dos bloques: el bloque este y el bloque oeste. En profundidad, asociado a este sistema, el registro stratigráfico indica la presencia de un paleorelieve similar a lo que hoy se conoce como la Cordillera de la Sal. Esta sierra habría comenzado a alzarse hace aproximadamente 3,2 Ma (edad dada por la correlación de un nivel tobáceo en profundidad con la Ignimbrita Tucúcaro; Ramírez y Gardeweg, 1982) y habría persistido hasta el Pleistoceno.

El bloque este, separado del bloque oeste por este alto topográfico, habría correspondido al depocentro principal de esta cuenca, acumulando más de 500 m de depósitos evaporíticos en este período. El bloque oeste, en tanto, habría recibido aportes provenientes del norte de este paleorelieve (por el norte del salar moderno), producto de la colmatación del bloque este en períodos de mayor humedad. Las diferencias de las configuraciones estructurales y sedimentarias en ambos bloques explican la gran diferencia en la potencia de las evaporitas observadas tanto al este como al oeste del Sistema de Falla Salar, y son consistentes con la posición stratigráfica del nivel tobáceo anteriormente mencionado, ubicado a ca. 500 m de profundidad en el Bloque Este y a ca. 50 m desde la superficie en el Bloque Oeste.

El núcleo actual del Salar de Atacama corresponde entonces a una sucesión de depósitos evaporíticos intercalados en sus bordes con depósitos detríticos de grano fino (limos y arcillas), que a su vez son producto de eventos esporádicos de grandes precipitaciones capaces de transportar sedimentos hasta el núcleo del Salar. En planta, el actual núcleo del Salar tiene la zonación clásica de salares maduros, especialmente en el borde este y sureste: núcleo de halita rodeado por depósitos de sulfatos, que a su

vez están rodeados de depósitos de carbonatos, antes de interdigitarse con los depósitos aluviales. Esta zona (sulfatos + carbonatos) se conoce como “zona de transición” o “zona marginal”. En el norte, esta zona marginal es geológicamente difusa, debido a la presencia de los deltas de los ríos San Pedro y Vilama, mientras que, en el oeste, la zona marginal no ha sido observada.

Debido a la complejidad de este contexto geológico, el análisis hidrogeológico debe separarse en dos sistemas: sistema de agua y sistema de salmuera. Cuando ambos sistemas entran contacto, su diferencia de densidad genera una cuña o interfaz salina, donde el agua tiende a fluir por sobre la salmuera (flujo laminar), que se observa en toda la zona marginal del Salar de Atacama.

7.1.1 Sistema de agua

El sistema de agua tiene un comportamiento similar al que se observa en cualquier cuenca: recibe precipitaciones en las zonas altas, parte de ellas se infiltra y otra parte escurre superficialmente; sin embargo, la mayor parte se infiltra o evapora antes de llegar al núcleo del Salar de Atacama. Según el balance realizado para el agua en las zonas consideradas en la Figura 6-104, de los 6.846 L/s que se infiltran (recarga directa), la mayor parte (3.003 L/s) ocurre en la zona norte (ríos San Pedro y Vilama), seguido por la zona sur (1.939 L/s), y finalmente las zona este (1.067 L/s) y oeste (838 L/s).

Zona Norte

La zona norte de la cuenca del Salar de Atacama, que es donde se encuentra la mayor parte de la población humana del área, se caracteriza por ser la zona de descarga de los ríos Vilama y San Pedro; este último es el más importante, y es distinguible por el gran delta de más de 14 km de ancho que desarrolla en el borde noroeste del núcleo del Salar. Este delta distal está conformado por arcillas y limos, con una potencia cercana a los 200 m de espesor, y con una conductividad hidráulica medida de 1×10^{-4} m/día. La zona norte del Salar de Atacama es distinguible también por presentar una amplia zona marginal, que es el resultado de la dinámica de los flujos que descargan desde el norte y desde el borde oriental. Ambos sistemas de flujo tienen su manifestación superficial en las Lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros, estas dos últimas comunicadas entre sí por el Canal del Burro Muerto. Este sistema lagunar es conocido como Sistema Soncor, y corresponde a uno de los sistemas locales descritos a fondo en el presente informe.

De los 3.003 L/s de recarga total en el sector norte, se descargan 157 L/s por evaporación en lámina libre (diversas lagunas presentes en esta zona), 1.812 L/s por evapotranspiración (bofedales y zonas de cultivo), y, en promedio, 886 L/s por evaporación directa desde el suelo debido a la baja profundidad del nivel freático. Esto implica que prácticamente toda el agua que precipita y se recarga por esta zona, se descarga antes de llegar al núcleo del Salar de Atacama, resultando un balance positivo de 148 L/s. Este caudal es consistente con lo estimado en la sección de paso construida para esta zona, y es consistente, además, con los resultados isotópicos del núcleo que muestran una posible fuente de recarga por el borde norte del núcleo.

El mecanismo de ingreso de estos 148 L/s hacia el núcleo es principalmente como un flujo laminar, por sobre la salmuera y, por ende, cercano a la superficie. Por tanto, parte de este flujo se mezcla con la salmuera y otra parte se evapora al ingresar al núcleo.

Zona Este

Al este del núcleo del Salar, el agua que precipita en las zonas altas fluye por sedimentos no consolidados (UH Aluvial), cuya alta conductividad hidráulica en las partes altas permite que el agua fluya con relativamente alta velocidad; sin embargo, al aproximarse a la zona marginal, el brusco cambio de pendiente de la topografía coincide con una disminución en el tamaño de grano de los depósitos no consolidados, rebajando abruptamente su conductividad hidráulica (se estima que disminuye desde más de 15 m/día a valores cercanos o menores a 1 m/día). Esto provoca que el agua dulce que fluye por esta UH reduzca su velocidad y su gradiente hidráulico, disminuyendo así la profundidad del freático. Este hecho, sumado a la presencia en este sector de la interfaz salina, hace que el agua subterránea aflore en superficie en el borde este, fluyendo muy lentamente por la parte somera de la UH Zona Marginal (rango de conductividad hidráulica entre 0,01 y 1 m/día). El sistema de Aguas de Quelana y la Vega de Carvajal, entre otras, son el resultado de esta dinámica de flujos.

En esta zona se ha estimado que, de los 1.067 L/s de recarga directa, que incluyen los 952 L/s de recarga en la Zona Alta, calculados a partir de los 749 L/s promedio de caudal pasante desde la Zona Alta a la Zona Media, y los 115 L/s de recarga directa por precipitación en la Zona Media, 336 L/s son evapotranspiradas por vegas y bofedales, y, en promedio, 680 L/s son evaporadas directamente desde el suelo en la zona marginal. Estos valores implican que toda el agua subterránea fluyendo hacia el núcleo del Salar de Atacama, en el borde este, es descargada antes de ingresar al Salar, lo que resulta en un balance negativo de 258 L/s.

Por otro lado, los niveles freáticos medidos en pozos y punteras de la zona aluvial están dominados por el efecto de diversos pozos de extracción de agua industrial, con una marcada tendencia al descenso. Sin embargo, los niveles medidos en pozos localizados en la zona marginal (zona de descarga de agua subterránea), se mantienen en equilibrio y estables, sólo dominados por el efecto estacional de la evaporación. Esto implica que el agua subterránea de este sector se mantiene inalterable respecto a los efectos del bombeo en la UH Aluvial y en las UH del núcleo del Salar.

Zona Sur

La zona sureste de la cuenca en estudio es distinta a la zona este. Si bien el mecanismo de recarga y flujo de agua subterránea a través de la UH Aluvial es el mismo que en la zona este, al momento de llegar al borde del Salar, el agua subterránea, además de formar los sistemas lagunares de Peine y Tilopozo (tanto por el cambio de pendiente topográfica como por la presencia de la UH Zona Marginal e interfaz salina), posee un caudal suficiente para recargar el núcleo del Salar de Atacama. En ese sentido, se asemeja más a la zona norte, aunque la zona marginal de esta última tiene una superficie mucho mayor (y con mayor cantidad de vegetación) y por tanto genera mayor cantidad de evaporación.

Según el balance realizado, de los 1.939 L/s de agua de recarga, 64 L/s se evaporan por lámina libre (sistemas lagunares), 154 L/s se evapotranspiran (vegas y bofedales), y 1.046 L/s se evaporan desde el

suelo. Por lo tanto, y sólo considerando el efecto de la extracción de agua dulce del periodo pre-operacional (5 L/s), se obtiene un balance positivo de 670 L/s que estaría disponible para fluir hacia el núcleo. Esta entrada es consistente con los valores isotópicos de la salmuera del núcleo, que muestran una posible recarga por el sur.

Al igual que la zona norte, debido a la diferencia de densidad, esta agua de recarga fluye por sobre la salmuera, al mismo tiempo que ocurren procesos de mezcla y evaporación desde el núcleo del Salar (Sistema de Salmuera).

Zona Oeste

Las zonas oeste y suroeste corresponden a las zonas donde se tiene la menor cantidad de información respecto a las recargas y descargas de flujo subterráneo. En este sector, además, la Cordillera de la Sal representa una barrera hidráulica natural para los flujos subterráneos que tienden a fluir hacia el núcleo del Salar.

Según el balance realizado, de los 837 L/s de agua de recarga, casi la totalidad (793 L/s) se evaporan desde el suelo, lo que resulta en un balance positivo de 44 L/s que quedarían disponibles para fluir hacia el núcleo del Salar. Si bien es un valor menor, se estima que dicha entrada podría ser por el sector suroeste o por alguna de las quebradas que conecta el Llano de la Paciencia con el Núcleo del Salar por el borde oeste.

En síntesis, según la conceptualización realizada, los ingresos de agua subterránea al núcleo del Salar de Atacama tienen su origen en los márgenes norte, sureste y oeste. En el borde este, en tanto, toda el agua que fluye hacia el centro del Salar es descargada antes de su ingreso al núcleo.

7.1.2 Sistema de salmuera

El funcionamiento hidrogeológico del núcleo del Salar de Atacama es complejo en cuanto a las variables que inciden en él. A la presencia de flujos con densidad altísima (salmueras), se suma un complejo sistema geológico y estructural, además de una topografía muy llana y de extensión kilométrica, que condiciona unos gradientes hidráulicos muy bajos y sensibles a cualquier variación en el sistema debido a una elevada difusividad hidráulica.

El núcleo del Salar está conformado por las UH Núcleo Superior (principalmente halita, con K entre 0,1 y 5.000 m/día), Núcleo Intermedio (evaporitas con materia orgánica y en parte con sedimentos clásticos, K entre 0,01 y 1 m/día) y Núcleo Profundo (halitas poco fracturadas, con K entre 0,01 y 50 m/día). La UH Núcleo Intermedio se considera un acuitardo que separa las unidades superior e inferior, confinando parcialmente a esta última. Mientras la UH Núcleo Superior presenta espesores relativamente estables (30 m), las otras dos presentan un espesor mucho mayor en el bloque este que en el oeste. La UH Núcleo Profundo, por ejemplo, tiene un espesor de hasta 400 m en el bloque este, mientras que en el oeste presenta no más de 30 m. Tanto la UH Núcleo Intermedio como la UH Núcleo Profundo se encuentran completamente saturadas de salmuera.

La unidad más importante corresponde a la UH Núcleo Superior, ya que ha sido la más explotada y en la que se reflejan todos los cambios observados en la dinámica hidrogeológica de la historia reciente del Salar de Atacama. Hidráulicamente, esta unidad presenta grandes diferencias entre sus bloques este y oeste: mientras en el bloque este se han estimado (mediante pruebas hidráulicas) valores de conductividad hidráulica de más de 2.500 m/día, en el bloque oeste tienden a ser notablemente más bajos, aun cuando sus valores absolutos muestran valores entre 10 y 500 m/día. Los menores valores han sido reportados en el extremo suroeste del núcleo.

La información de niveles freáticos y piezométricos del período preoperacional (previo a 1994) muestran un descenso sostenido en el tiempo, el que se ha estimado en 2 a 3 cm por año. Esto implica que el sistema de salmuera, aun estando en un período sin extracciones (las extracciones de otras empresas en ese período se consideran despreciables) se encontraba naturalmente en desbalance. Es decir, la evaporación era mayor que la precipitación, provocando una disminución natural de los niveles.

El registro histórico de niveles freáticos en todo el núcleo da cuenta de una respuesta instantánea a los eventos de precipitación importantes que ocurren dentro del Salar. Así, los niveles que descendían naturalmente a una escala de 2 a 3 cm por año responden con un ascenso abrupto cada vez que caen precipitaciones dentro del núcleo; luego de estos eventos, se vuelve al estado inicial de descenso continuo. De este modo, se ha determinado que las principales fuentes de recarga en el sistema de salmuera para el período preoperacional corresponden a la precipitación (299 L/s promedio) y potencial recarga lateral (862 L/s promedio); el promedio de estas recargas se estima en alrededor de 1.161 L/s. En tanto, las descargas corresponden a la evaporación desde el suelo y extracciones de terceros (en un balance preoperacional), estimándose un promedio de -1.173 L/s. El balance negativo resultante (utilizando los valores promedio) es consistente con los descensos observados de salmuera en el núcleo durante el período preoperacional.

Las fuentes de recarga analizadas en esta conceptualización corresponden a las relacionadas con la hidrología moderna (recarga directa por precipitación y flujo subterráneo generado a partir de ésta), que son cuantificables y en cierto modo medibles. Sin embargo, otros autores que han trabajado anteriormente en la cuenca (Ide and Kunasz, 1990; Lowenstein and Risacher, 2009; López, 2017; Munk et al., 2018) han postulado la existencia de otras fuentes de agua, responsables de las grandes concentraciones de litio y potasio en el Salar de Atacama. Los mecanismos alternativos más comunes son: (1) posibles flujos profundos, influenciados por actividad geotermal, que ascendería hacia el núcleo del Salar a través de fallas profundas (Sistema de Falla Salar o Falla Caballo); (2) el Cordón de Lila también se ha propuesto como una posible vía de flujos preferenciales en dirección S-N, que aportaría una salmuera rica en litio. Si bien estas teorías no son descartables, posibles flujos verticales ascendentes por fallas profundas, ya sea por el centro del núcleo o por el Cordón de Lila, son difíciles de cuantificar y justificar, por lo que no son incluidos en esta conceptualización como posibles fuentes de recarga.

Cabe destacar, además, que los valores estimados de recarga y descarga corresponden al estado actual del sistema (en escala geológica), ya que la gran potencia observada de depósitos evaporíticos, especialmente en el bloque este del Salar, permite el almacenamiento de un gran volumen de salmuera subterránea. Debido a que el contexto climático actual en la zona de estudio no permite el

almacenamiento de agua subterránea (hiperaridez), se cree que la salmuera que se encuentra almacenada en el Salar de Atacama corresponde a precipitaciones ocurridas en un contexto climático de mayor humedad (Corenthal et al., 2016; Munk et al., 2018). El almacenamiento de salmuera en las UH del núcleo se da principalmente por porosidad secundaria; además, se tienen evidencias de la presencia de cavernas (karst) dentro de la UH Núcleo Superior, las que poseen una capacidad de almacenamiento y conductividad hidráulica muy altas. Estas cavernas han sido descubiertas mediante exploraciones geofísicas (caliper), y se localizan principalmente en los alrededores de los sistemas de fallas Salar y Caballo, en el centro del núcleo.

El gradiente hidráulico dentro del Salar de Atacama es muy bajo, con diferencias centimétricas entre los niveles más altos y los más bajos. Al comenzar la operación, se observa una profundización de los niveles en el sector suroeste del bloque oeste, principalmente debido a la extracción de salmuera. La extracción, no obstante, sólo afecta parcialmente al bloque este, disminuyendo los niveles alrededor de 1 m en más de 25 años de operación. Los efectos del bombeo en el núcleo son observables prácticamente en toda su extensión, aun cuando en su mayoría corresponden a descensos menores (menor a 1 m), especialmente en los bordes del Salar.

Durante el período operacional, la dirección de flujos dentro del núcleo cambia ligeramente respecto de su caso sin proyecto. Según los niveles observados en pozos del núcleo, se ha identificado que en el bloque este la salmuera tiende a fluir desde el sur (zona Tilopozo) hacia el noreste del núcleo, donde probablemente exista una nueva zona de descarga por evaporación desde el suelo. Esta zona se localiza al sur del sistema Soncor.

7.2 Sistemas Locales

Dentro de la cuenca del Salar de Atacama se han identificado algunas zonas ambientalmente sensibles, cuya importancia recae en que corresponden a ecosistemas particulares en las que conviven especies vegetales y animales propios de esta zona. Además, estos sistemas representan una de las escasas fuentes de agua dulces en una zona hiperárida. Debido a la importancia de estos sistemas, se han analizado 4 sistemas locales con el fin de exponer en detalle el conocimiento que se tiene acerca de las características hidrogeológicas de cada uno de ellos. Los 4 sistemas analizados a una escala local corresponden a: Soncor, Borde Este, Peine y Tilopozo.

7.2.1 Sistema Soncor

Este sistema está localizado en el margen noreste del núcleo del Salar de Atacama, en la intersección de las zonas marginales del borde norte y borde oriental, creando un marco hidrogeológico complejo de analizar. El estudio de este sistema se ha focalizado principalmente en la dinámica hidrogeológica de la laguna Barros Negros, aunque el sistema completo está compuesto, además de ésta, por la laguna Puilar, la laguna Chaxa, el canal del Burro Muerto (que conecta ambas lagunas), y por algunos cuerpos de agua periódicos originados por desbordes desde la laguna Barros Negros.

El sistema hidrogeológico de Soncor es el resultado de la combinación de efectos producidos por los flujos provenientes desde el norte del Salar (recuadro azul en la Figura 7-1) y el sistema hidrogeológico del borde oriental del Salar (polígono verde en la Figura 7-1). Un detalle de los principales cuerpos de agua y las zonas de recarga se muestra en la Figura 7-1, mientras que un modelo conceptual hidroquímico y de procesos puede verse en la Figura 7-2.

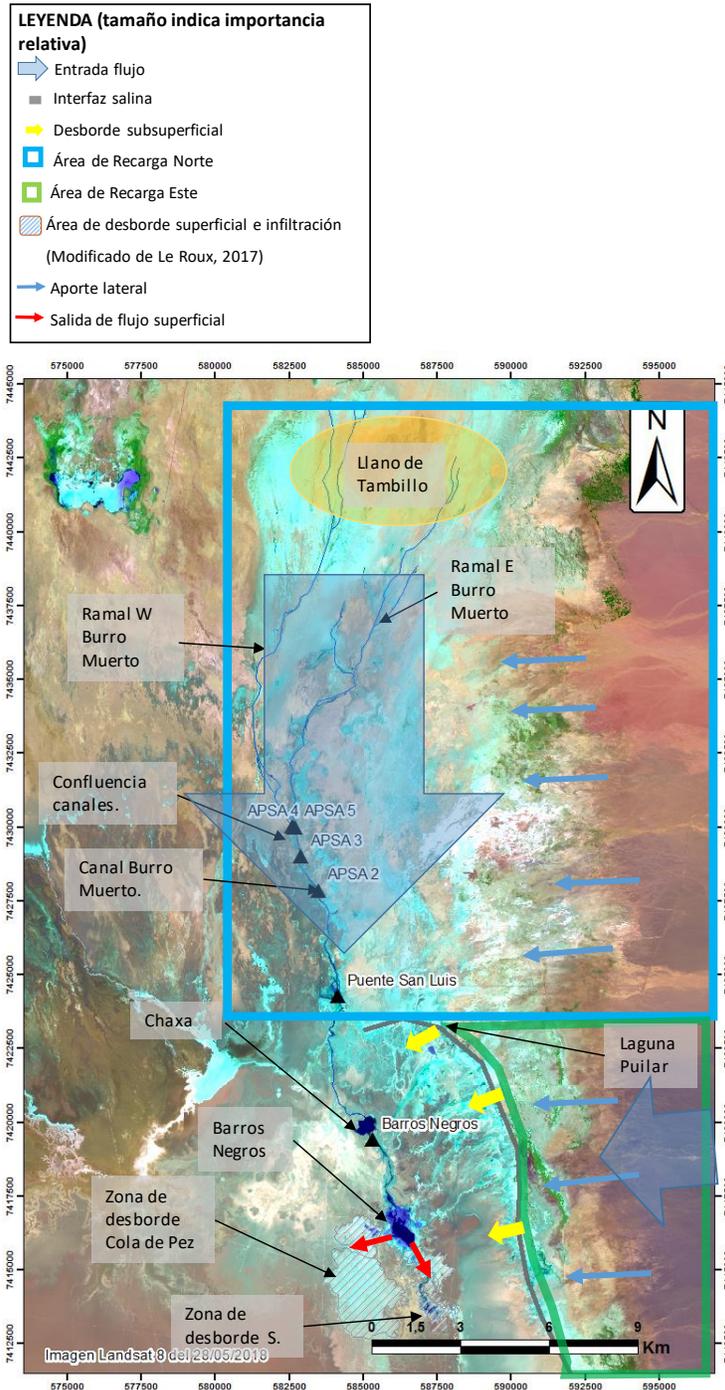
El agua superficial del Sistema Soncor es el resultado de la confluencia de numerosas manifestaciones de agua subterránea que originalmente precipitan en las zonas altas de la cuenca (al norte y noreste de ésta), se infiltran, y afloran nuevamente al norte y noreste del Salar de Atacama. Las primeras manifestaciones de agua superficial se producen en el sector conocido como Llano del Tambillo (Figura 7-1). Las surgencias de esta zona dan origen a dos canales que aguas abajo confluyen formando en canal de Burro Muerto, que representa la alimentación principal del Sistema Soncor. Esta agua fluye superficialmente hacia Puente San Luis, incrementando su caudal por aportes subsuperficiales desde el borde este. Aguas abajo del Puente San Luis se producen aportes desde el borde este, aumentando el caudal del canal de Burro Muerto (capítulos 4.3.1 y 6.6.5.1) entre Puente San Luis y la laguna Chaxa, ubicada en el borde noreste del núcleo. Desde la laguna Chaxa continúa el canal de Burro Muerto, conduciendo agua por aproximadamente 2,5 km, hasta acumularse en la laguna Barros Negros (Figura 7-1). Además, el sistema posee una recarga menor proveniente de desbordes subsuperficiales desde el borde este, los que forman la laguna Puilar y eventualmente pueden recargar al entorno de Chaxa y Barros Negros en épocas de grandes precipitaciones (Figura 7-1 y Figura 7-2).

Las lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros tienen un área relativamente estable. Puilar no muestra conexión directa con el canal de Burro Muerto y su única alimentación proviene de la descarga del acuífero aluvial del este. El canal de Burro Muerto, por su parte, termina en la laguna Barros Negros, siendo ésta la laguna terminal del sistema.

En épocas de abundancia hídrica (invierno austral e invierno altiplánico, asociado a altas precipitaciones) se producen desbordes de agua superficial desde la laguna Barros Negros hacia zonas fuera de ésta, generando lagunas no permanentes. Al menos desde la década de 1990 hasta el año 2012, la principal área de desborde se encontraba al oeste de la laguna Barros Negros, en la zona denominada como “Cola de Pez”. Luego de esta fecha, se produjo un cambio en la dinámica de Barros Negros y el desborde principal comenzó a darse hacia el sur de Barros Negros, en detrimento de los desbordes hacia Cola de Pez, por el sector conocido actualmente como “Desborde Sur” (Figura 7-1). (IDAEA-CSIC, 2018). Este cambio en la dinámica de los desbordes de la laguna Barros Negros tuvo como consecuencia cambios en el comportamiento de algunos pozos ubicados en los sectores noroeste y sur, algunos de los cuales son considerados como indicadores de estado de la laguna (IDAEA-CSIC, 2018).

Un esquema geológico – hidrogeológico se muestra en las Figura 7-3 y Figura 7-4. La Laguna Barros Negros se sitúa sobre la UH Núcleo Intermedio, que está conformada por evaporitas con materia orgánica y sedimentos clásticos de grano fino. En particular, información de numerosos sondeos localizados en los alrededores de la laguna Barros Negros dan cuenta de la presencia de niveles de arcillas, limos y materia orgánica, algunos de ellos con continuidad lateral y otros en forma lenticular, al menos en los primeros 60 m bajo el nivel actual de terreno. Esta interdigitación de sedimentos clásticos de grano fino con otros niveles evaporíticos sugiere un ambiente lacustre de baja energía intercalado

con episodios más secos, lo que permite la formación de depósitos evaporíticos. Sin embargo, el gran espesor de estos depósitos bajo la laguna Barros Negros permite inferir la estabilidad de este sistema por centenares o miles de años. Pruebas hidráulicas (pruebas de bombeo, slug test y pruebas de infiltración) de estos sedimentos finos arrojan una conductividad hidráulica de estos materiales entre 1×10^{-5} y 1×10^{-2} m/d. Esta permeabilidad es muy baja en comparación con las permeabilidades observadas en el núcleo del Salar de Atacama (50-2.500 m/d).



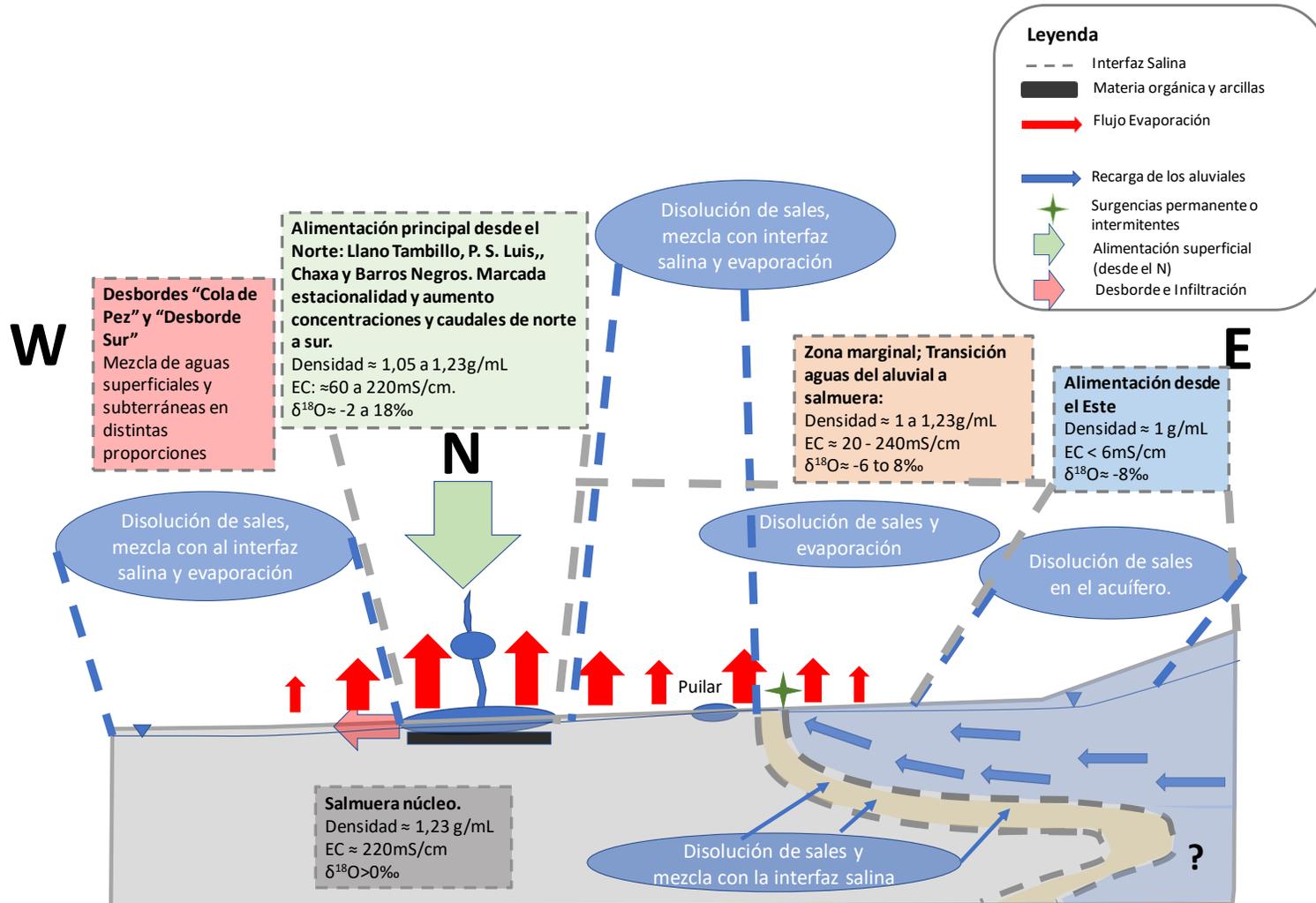


Figura 7-2 Esquema conceptual hidroquímico y de procesos para el sistema Soncor.
 Fuente: Elaboración propia

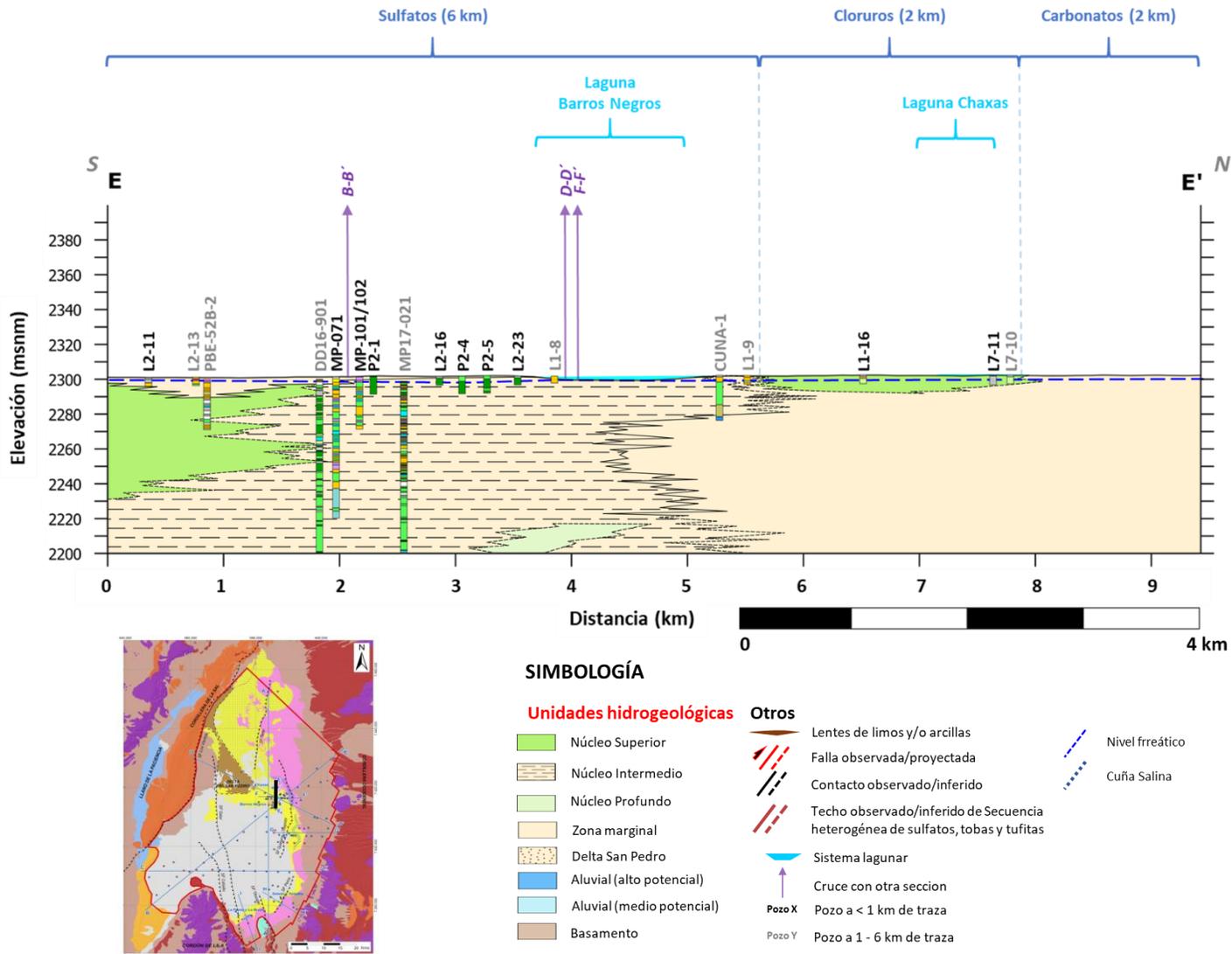
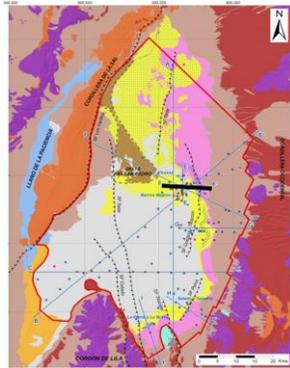
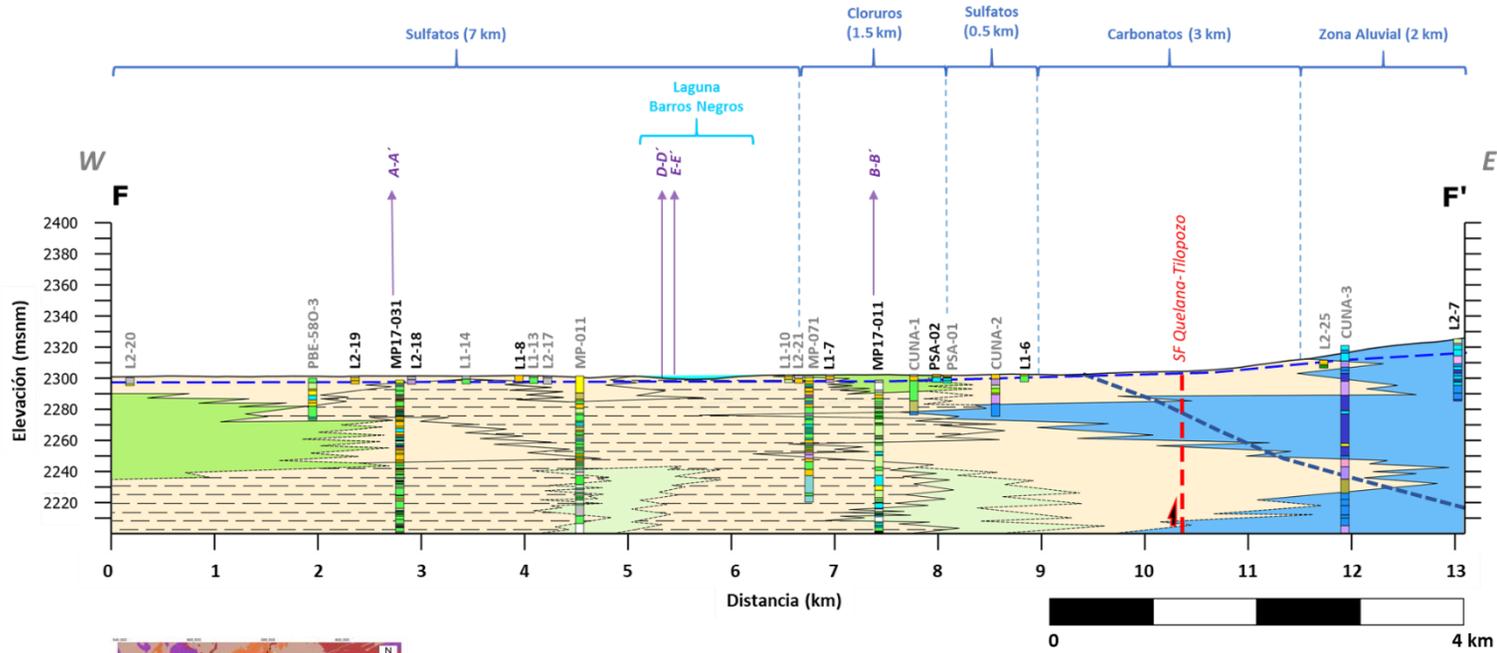


Figura 7-3. Sección hidrogeológica local S-N, Laguna Barros Negros. Fuente: Elaboración propia.



SIMBOLOGÍA

Unidades hidrogeológicas

- Núcleo Superior
- Núcleo Intermedio
- Núcleo Profundo
- Zona marginal
- Delta San Pedro
- Aluvial (alto potencial)
- Aluvial (medio potencial)
- Basamento

Otros

- Lentas de limos y/o arcillas
- Falla observada/proyectada
- Contacto observado/inferido
- Techo observado/inferido de Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas
- Sistema lagunar
- Cruce con otra seccion
- Pozo X Pozo a < 1 km de traza
- Pozo Y Pozo a 1 - 6 km de traza
- Nivel freático
- Cuña Salina

Figura 7-4. Sección hidrogeológica local W-E, Laguna Barros Negros. Fuente: Elaboración propia.

Se cuenta con información de afloros permanentes aguas arriba de la laguna Chaxa (Puente San Luis desde 2007) e intermitentes aguas abajo de ésta (Aforo Barros Negros, en el canal de Burro Muerto, al sur de Chaxa, desde 2007). También existen afloros intermitentes en los puntos de desborde de Barros Negros (Cola de Pez y Desborde Sur, desde 2011, con importantes gaps en su información).

La Figura 7-5 muestra un esquema en perfil y planta para los principales cuerpos de agua superficial conectados entre sí en el sistema Soncor y las relaciones existentes entre río y acuífero. En el Anexo MC-11 se presenta un balance hidrogeológico realizado para la laguna Barros Negros. Para obtener la mayor discretización temporal posible, se ha empleado el aforo de medición continua en Puente San Luis, con paso de tiempo diario. Este ejercicio resulta conservador, ya que tal y como se mostró en el capítulo 4.3.1, los caudales medidos a la salida de la laguna Chaxa son, en términos promedio anuales, aproximadamente 50 L/s, mayores que en los medidos en Puente San Luis.

Los resultados del balance muestran que la laguna Barros Negros tiene un caudal de recarga de 150,9 L/s en promedio anual, mientras que las descargas se han cuantificado en valores promedio anual de 59,2 L/s por evaporación, 87,4 L/s por desbordes (hacia Cola de Pez y Desborde Sur), y 4,2 L/s por infiltración. Se ha estimado un valor de infiltración máxima posible desde el fondo de la laguna, considerando que se alcanzase la desconexión del acuífero de salmuera respecto al lecho arcilloso de la laguna, de 22 L/s. Aun considerando el peor escenario posible (abatimiento del nivel freático por debajo del lecho de la laguna Barros Negros y situación de desconexión), continuarían quedando alrededor de 70 L/s de excedentes disponibles para alimentar las áreas de desborde.

Estos valores sugieren que la dinámica de la Laguna Barros Negros depende casi en su totalidad por el aporte de agua superficial y subterránea desde el norte, las que en último término dependen del agua precipitada en las zonas altas de la cuenca. A su vez, la altísima evaporación en la zona de estudio es un mecanismo de descarga importante, por sobre la infiltración en subsuperficie; esto es consistente con los materiales de baja permeabilidad observados en subsuperficie (arcillas, limos y materia orgánica).

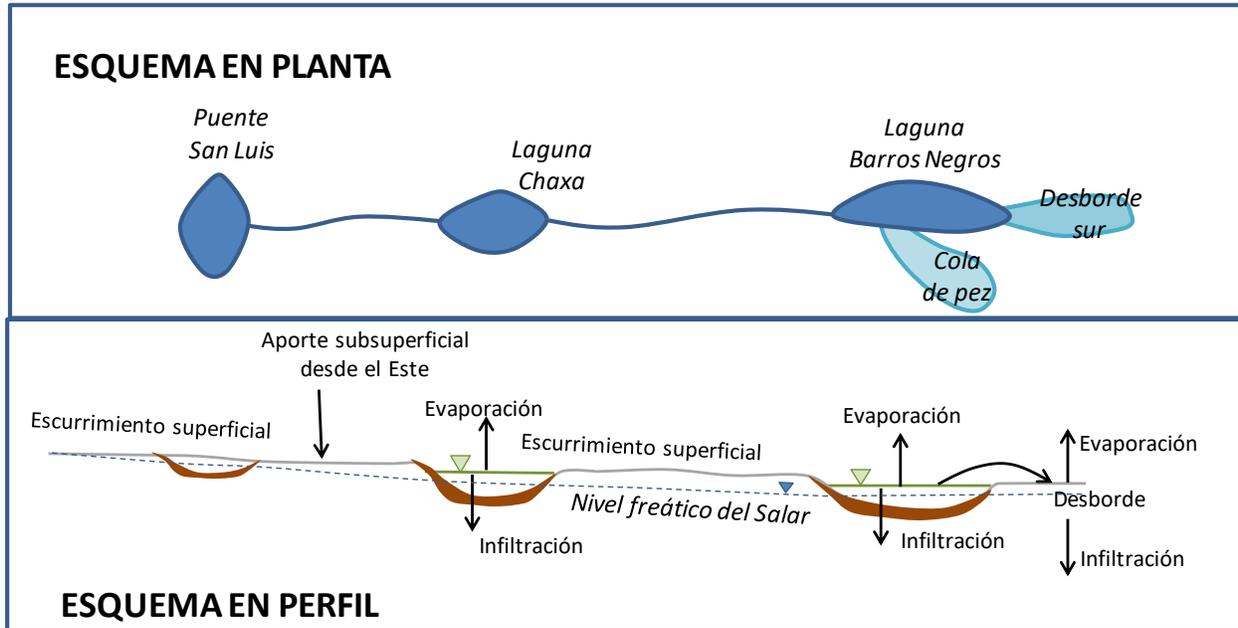


Figura 7-5. Esquema del balance hídrico del Sistema Suncor y sus relaciones río acuífero. Fuente: Elaboración propia.

7.2.1 Sistema Borde Este

Este sistema está localizado en el margen oriental del núcleo del Salar de Atacama, y en sus 30 km de largo (dirección N-S) abarca las áreas conocidas como Vega de Carvajal y Aguas de Quelana. Este sistema se caracteriza por presentar numerosas vegas, bofedales y lagunas de pequeña extensión, en su mayoría no permanentes. El agua que alimenta este sistema es el resultado del afloramiento del agua dulce que fluye desde las partes altas de la cuenca hacia el centro de ésta, debido a la presencia de la interfaz salina, al cambio en la pendiente topográfica, y a la presencia de una zona de baja conductividad hidráulica en la zona marginal del Salar (Figura 7-6).

Geológicamente, el Sistema Borde Este se encuentra sobre la UH Zona Marginal, la que, además de los depósitos evaporíticos carbonatos y sulfatos, presenta intercalaciones con niveles de sedimentos clásticos de grano fino (arcillas y limos) y material orgánico (Figura 7-6). Información litológica de sondajes realizados en esta área muestran al menos un espesor de 200 m para esta UH. Esto implica que, a pesar de identificarse períodos de mayor humedad (la presencia de arcillas implica la presencia de lagunas), la configuración de un salar “clásico”, siguiendo la secuencia de precipitación de evaporitas de carbonatos, sulfatos y cloruros en dirección hacia el núcleo, ha sido relativamente estable en el tiempo.

En general, los ensayos hidráulicos realizados en estos materiales arrojan una conductividad hidráulica entre 0,1 y 1 m/d, muy bajos en comparación a las estimadas tanto en la UH Aluvial (10-30 m/d) como en la UH Núcleo Superior (50-2500 m/d).

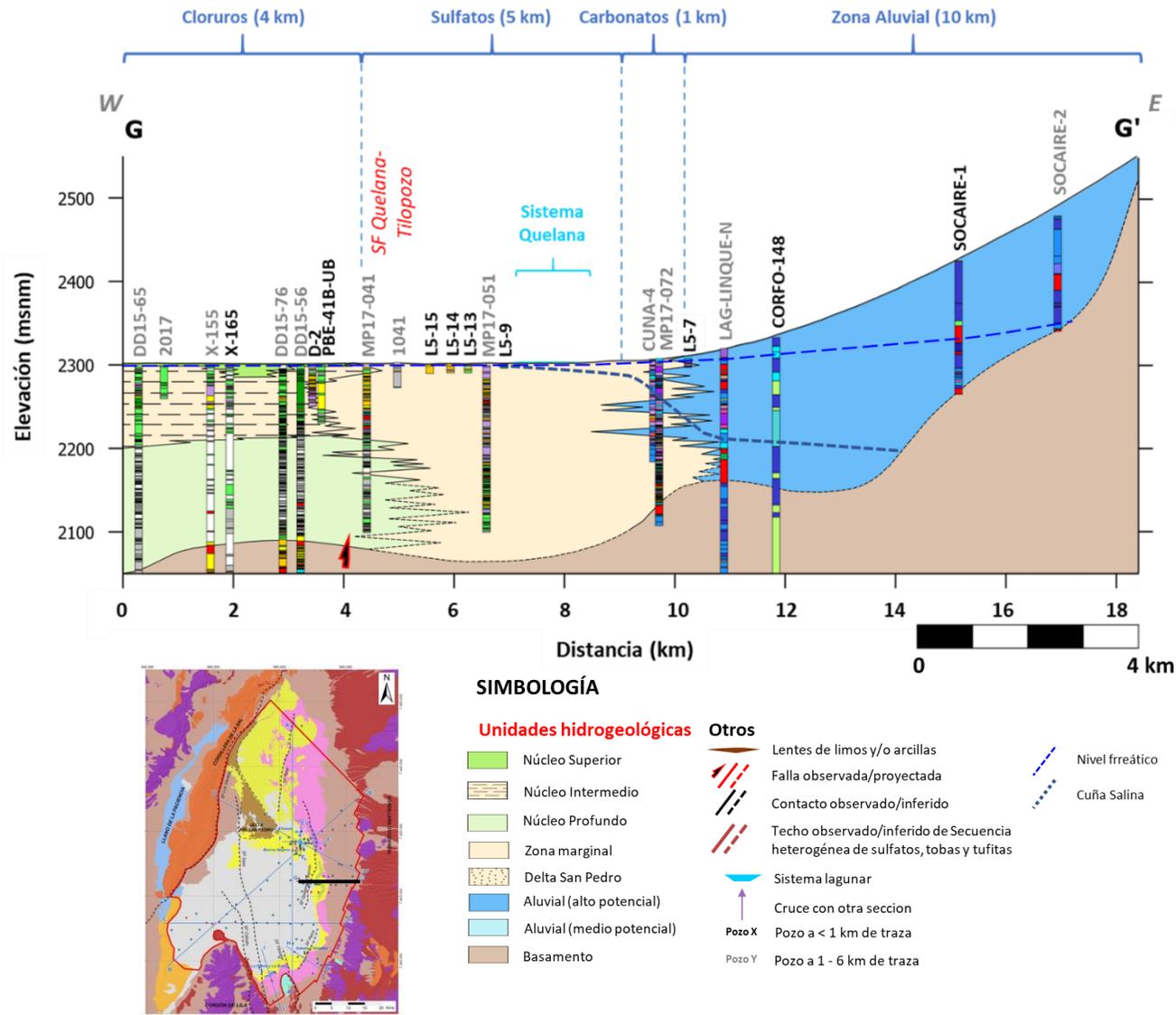


Figura 7-6. Sección hidrogeológica local W-E, Sistema Borde Este (Aguas de Quelana). Fuente: Elaboración propia.

La recarga de este sistema tiene su origen en la precipitación en las partes altas, la que se infiltra y circula hasta alcanzar la UH Aluvial. En algunas quebradas aflora como agua superficial, para posteriormente volver a infiltrarse en esta UH. Estas aguas están representadas por la salinidad más baja del sector, con conductividades menores de 10 mS/cm y con los menores valores de enriquecimiento isotópico $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$, del orden de -8 ‰ VSMOW (Figura 7-7). La UH Aluvial alimenta la UH Zona Marginal ubicada al oeste. En su avance hacia el oeste, las aguas de la UH Aluvial aumentan su salinidad debido a disolución de sales, mientras que sus características isotópicas apenas cambian.

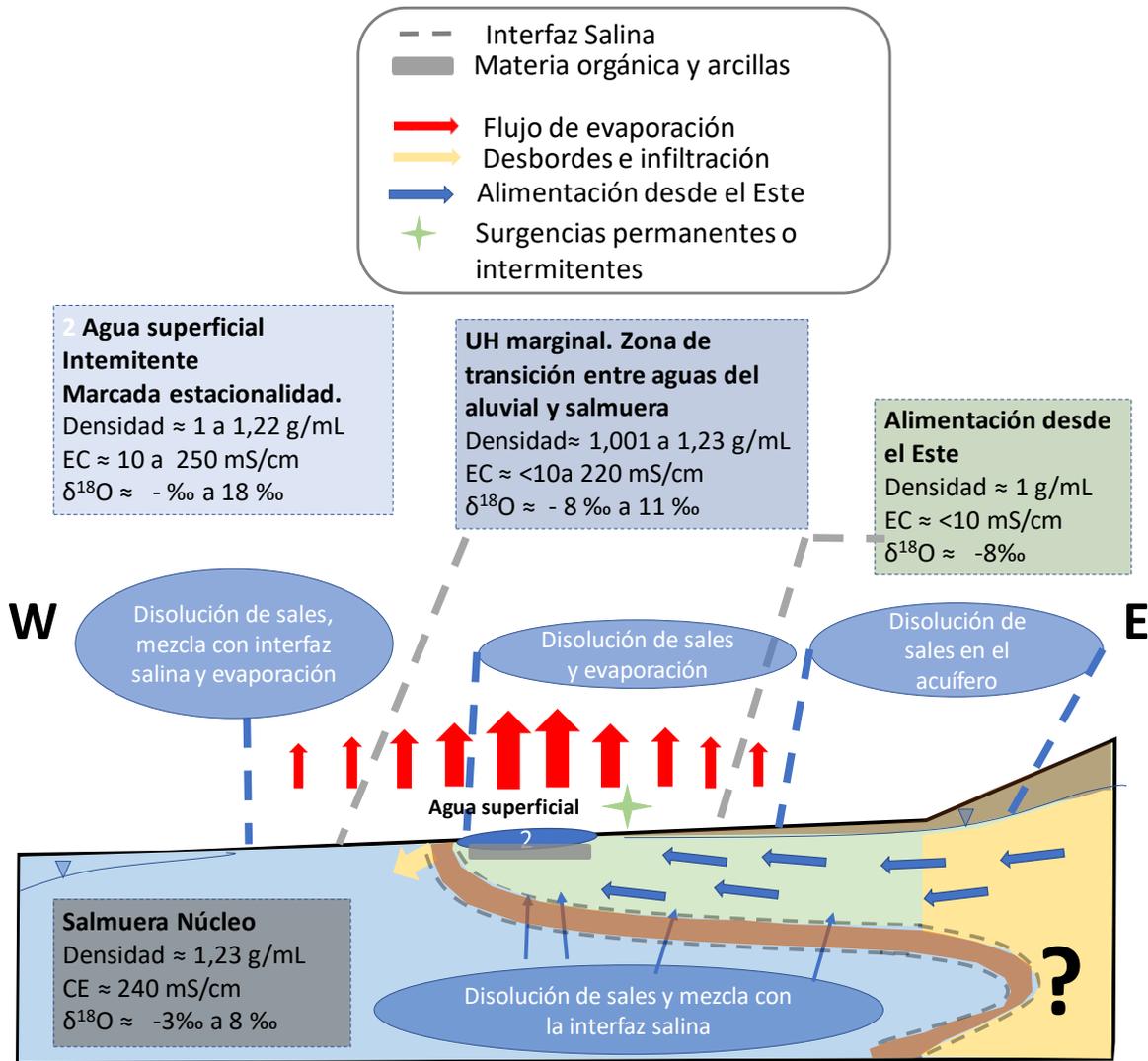


Figura 7-7. Modelo conceptual hidroquímico y principales procesos para el sistema Borde Este.

Fuente: Elaboración propia

En la UH Zona Marginal se encuentra, además, la interfaz salina, que se adentra hacia el este en profundidad y causa que las aguas menos densas de los aluviales se vean forzadas a ascender en su avance hacia el oeste, actuando como una barrera hidráulica. Este ascenso, unido a la baja

conductividad hidráulica y la llana topografía, conlleva a que la zona marginal presente unos niveles muy someros, llegando a formarse algunas surgencias que dan origen al afloramiento de cuerpos superficiales de agua con una extensión muy variable en el tiempo. En este sector no se reconocen canales ni lagunas permanentes, a diferencia de los otros sectores del Salar de Atacama.

Las aguas superficiales presentan menores concentraciones de cloruros y valores de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ más empobrecidos isotópicamente en el invierno (valores más negativos) y mayores concentraciones de cloruros y valores más enriquecidos isotópicamente en el verano. Este comportamiento está ligado a que en el invierno hay mayor descarga del agua desde la UH Aluvial y hay menor evaporación que en el verano, cuando hay mayor evaporación y la descarga de la UH Aluvial es menor (Aravena R. , 2018).

La baja conductividad hidráulica de la UH Zona Marginal podría producir una baja conectividad entre las zonas de afloramiento de agua superficial y el resto del acuífero salino. La alimentación de los cuerpos superficiales es exclusivamente la descarga de la UH Aluvial; sin embargo, sí se han encontrado indicios de puntos del acuífero salino que reciben aportes desde los cuerpos superficiales.

En los sectores que no aflora el agua, el flujo continúa diferenciándose por disolución de sales, evaporación y mezcla con aguas de la interfaz salina, lo que aporta un enriquecimiento en cloruros respecto de las aguas que no se han mezclado (aguas superficiales y aguas al este de la interfaz salina). La descarga principal en el sector es la evaporación, produciéndose mayoritariamente en la UH Zona Marginal en torno al afloramiento de la interfaz salina y en la transición al núcleo. En épocas de máximos niveles, puede haber un excedente de agua que no alcanza a evaporarse y rebosar sobre la interfaz salina, comenzando un proceso de mezcla con la salmuera y viéndose a su vez afectado por evaporación. El destino final de esta salmuera es evaporarse en una parte importante y otra parte infiltrarse a las UH del núcleo.

Del análisis de niveles freáticos/piezométricos realizado se desprende que los niveles en las lagunas aparentemente permanentes son indiferentes a los efectos producidos tanto por los bombeos de agua industrial (UH Aluvial) como por los bombeos de salmuera en el núcleo del Salar; por ende, los niveles se mantienen estables en todo el período de análisis, sólo afectados por las variaciones estacionales de evaporación. Sin embargo, los niveles de los piezómetros localizados aguas arriba de las lagunas sí están siendo afectados por las extracciones de agua dulce, provocando un ligero descenso permanente desde el año 2011.

Por otro lado, aguas abajo de las lagunas (ya en el núcleo del Salar), los piezómetros muestran una variabilidad de niveles que dependen exclusivamente de las extracciones de salmuera del núcleo, sin afectarle lo que ocurre con el agua industrial. Por tanto, la UH Zona Marginal corresponde a la zona de descarga natural del sistema de agua dulce, marcando el fin de este sistema y el comienzo para el sistema de salmuera.

7.2.2 Sistema Peine

Este sistema está localizado en el borde sureste del núcleo del Salar de Atacama. Es un sistema acotado espacialmente y que, por su comportamiento hidrogeológico, se le considera un símil del sistema Soncor: un sistema producto de afloramientos de agua subterránea que se canalizan y fluyen superficialmente. Este flujo forma un sistema compuesto por las lagunas Salada y Saladita, conectadas ambas por un canal principal, seguidas por un área de desborde en el límite entre el núcleo y la zona marginal, llamada Laguna Interna (Figura 7-8).

Las lagunas Salada y Saladita tienen una extensión relativamente estable, mientras que la laguna Interna cambia su extensión de manera más errática. Además, cuando hay abundancia hídrica, desde la Laguna Interna se genera otra zona de desborde que se adentra hacia el núcleo. Este sistema ocurre entre las UH Zona Marginal y UH Núcleo Superior, en una dirección SE-NW. (Figura 7-8).

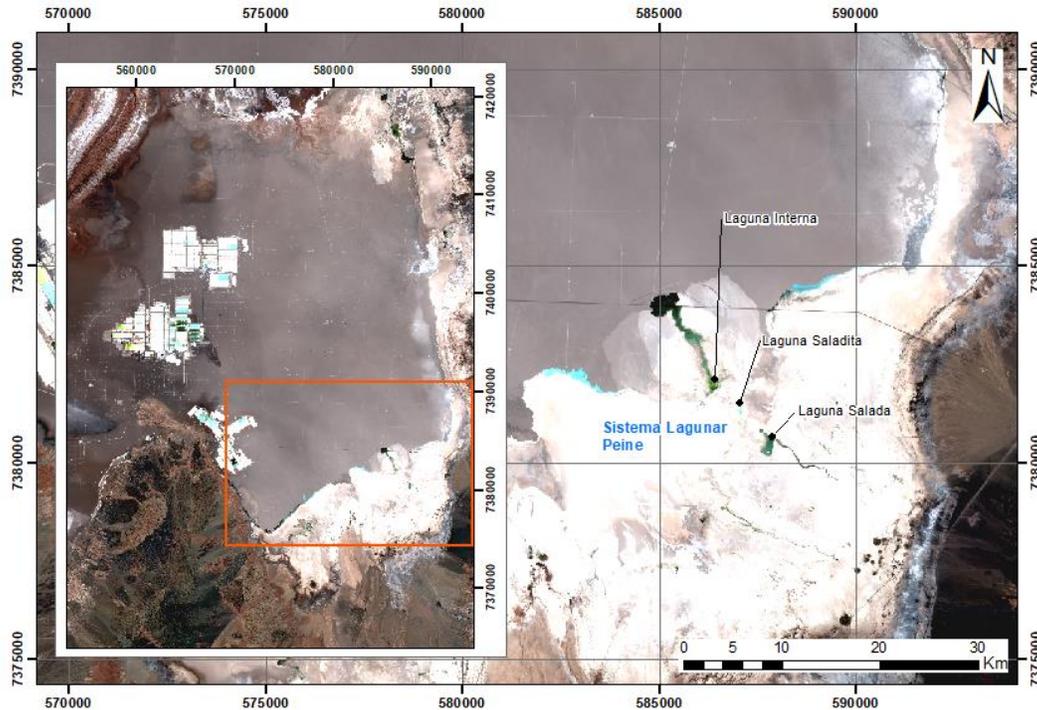


Figura 7-8. Configuración Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia.

La conceptualización geológica - hidrogeológica del sistema Peine se muestra en una sección NW-SE (Figura 7-10). Este sistema se encuentra casi completamente en la UH Zona Marginal. Como se ha mencionado anteriormente, esta unidad corresponde a evaporitas con materia orgánica, con intercalaciones de sedimentos clásticos de grano fino (arcillas y limos), las que le otorgan una relativamente baja conductividad hidráulica a esa zona. En la base de las lagunas se han identificado niveles de materiales clásticos de grano fino y materia orgánica, con un notable espesor, lo que dificulta la conexión entre las lagunas y la salmuera.

Pruebas hidráulicas (pruebas de bombeo, slug test y pruebas de infiltración) de estos sedimentos finos arrojan una conductividad hidráulica entre 1×10^{-5} y 1×10^{-2} m/d. Esta conductividad es muy baja en comparación con las observadas en el núcleo del Salar de Atacama (50-2.500 m/d). (Apéndice MC11)

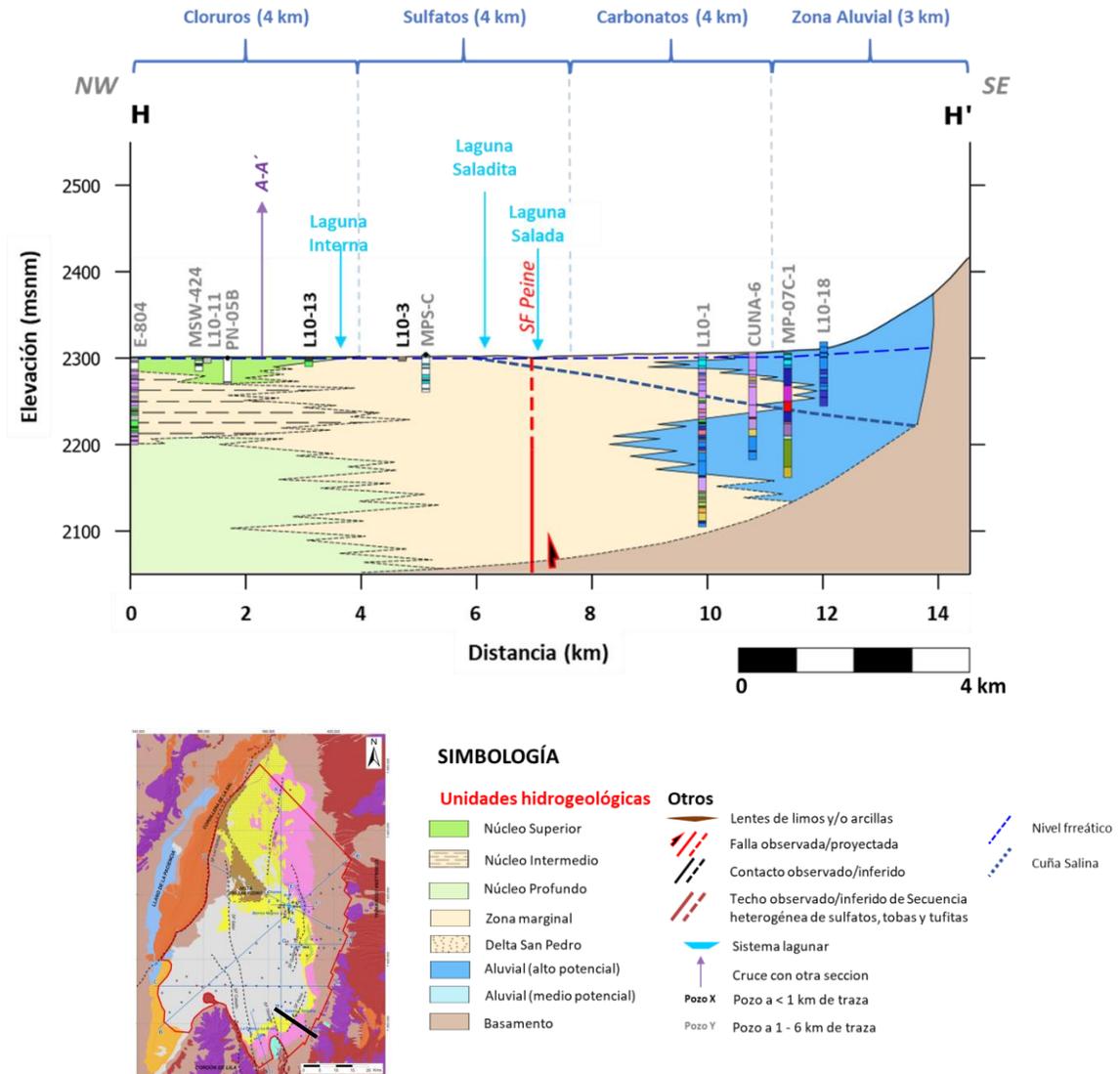


Figura 7-9. Sección hidrogeológica local NW-SE, Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia.

Las aguas que alimentan al sistema Peine están representadas por el acuífero de la UH Aluvial, por el que fluyen aguas con las salinidades más bajas del sector - menores de 10 mS/cm - y los menores valores de enriquecimiento isotópico $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$, del orden de -8 ‰ VSMOW (Figura 7-10). En el proceso de avance por la UH Aluvial, las aguas se enriquecen en sales por disolución, pero no se ven afectadas por evaporación. El agua subterránea termina por descargar en la UH Zona Marginal.

En la zona marginal se encuentra, además, la interfaz salina, que se adentra hacia el este en profundidad y causa que las aguas menos densas de los aluviales se vean forzadas a ascender en su avance hacia el oeste, actuando como una barrera hidráulica. Este ascenso, unido a la menor conductividad hidráulica y la llana topografía, conlleva a que la zona marginal presente unos niveles muy someros llegando a formarse algunas surgencias que en el sector de Peine dan lugar a dos canales de agua superficial diferenciados del resto del sistema acuífero. El canal situado al norte alimenta a las lagunas Salada y Saladita, desembocando finalmente en laguna Interna (zona de desborde), la cual presenta un área muy variable en función de los caudales aportantes desde el este.

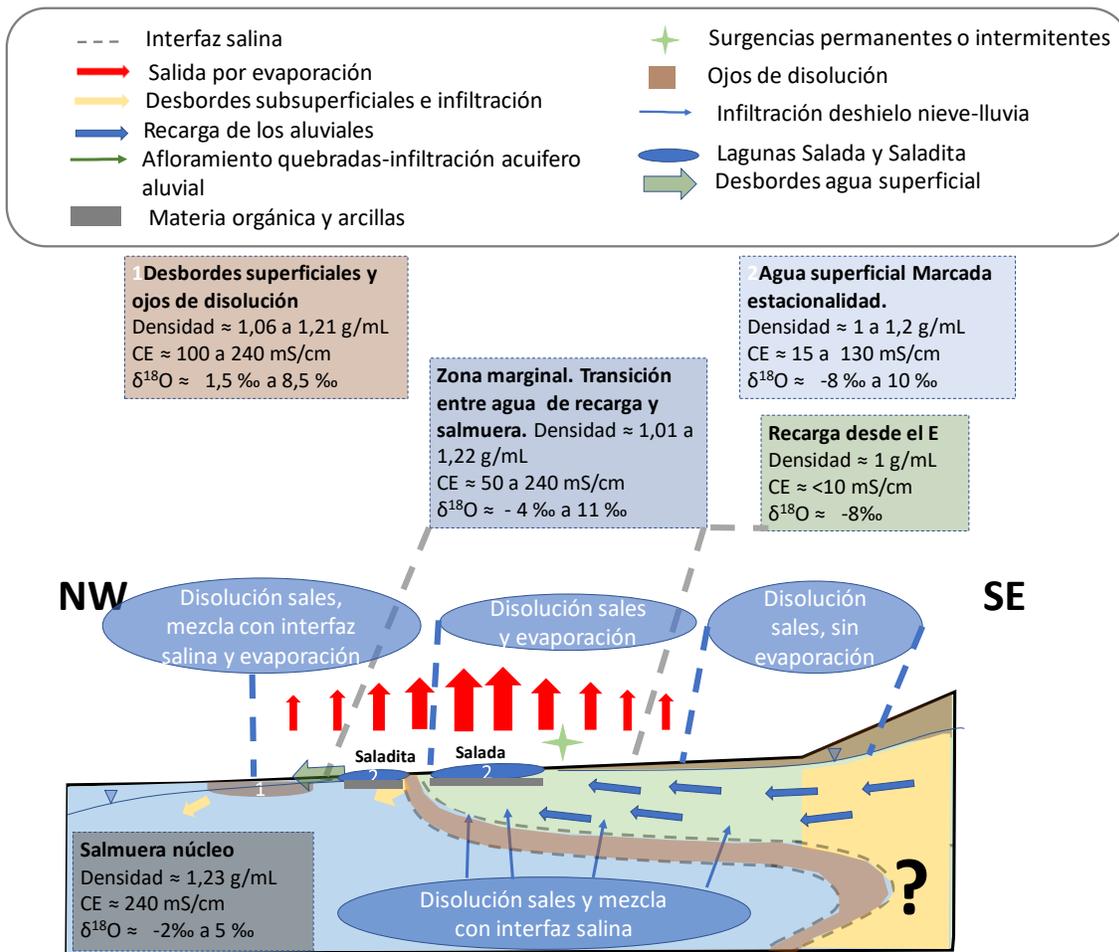


Figura 7-10. Modelo conceptual de funcionamiento para el Sistema Peine.
 Fuente: Modificado de (Aravena, Auría, Henríquez, & Tore, 2019).

Se han realizado varios muestreos a lo largo del canal de las lagunas y se ha comprobado la entrada de flujos con menor enriquecimiento isotópico que puntos situados aguas arriba y salinidades distintas. Estos aportes se interpretan como aportes de agua de recarga que circula en subsuperficie, cercanos al propio canal, que a su vez presentan niveles de materiales finos y materia orgánica (Amphos 21, 2009,

SGA, 2015). Estos sedimentos de baja permeabilidad producen una baja conexión entre el canal de las lagunas y el acuífero salino. Esta baja conexión queda evidenciada por la diferencia en los niveles entre el agua superficial y los puntos cercanos a las lagunas, no existiendo aportes desde el acuífero salino al canal o las lagunas, pero sí se han observado algunos puntos de agua subterránea influenciados por agua superficial.

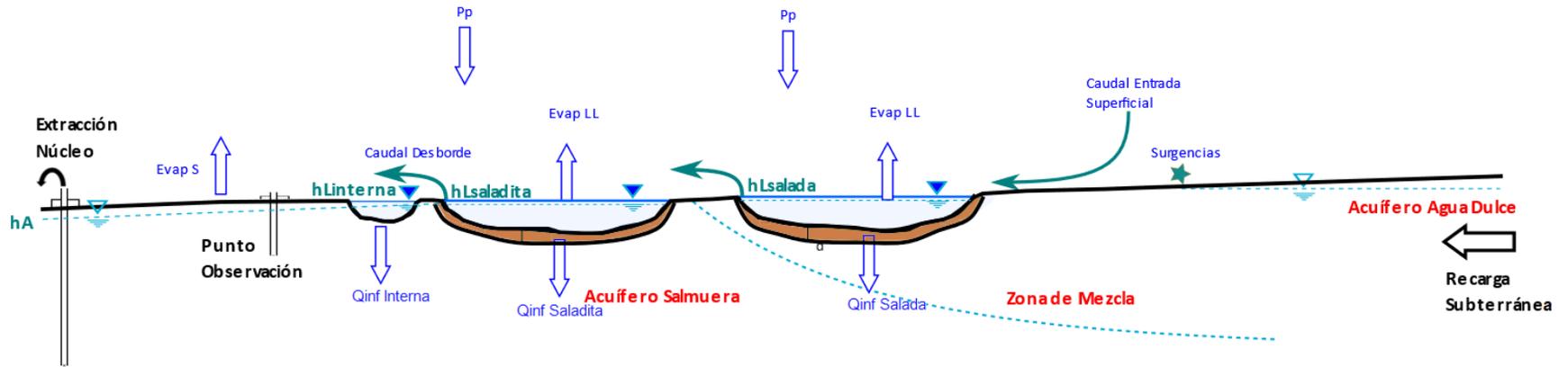
Las aguas que no afloran en los canales superficiales continúan su tránsito por la UH Zona Marginal, donde la disolución y precipitación de sales y la evaporación debido a los niveles someros de la napa controlan su evolución. La descarga principal en el sector es la evaporación; isotópicamente, todos los puntos muestreados se alinean dentro de una línea que es muy característica de la zona del Salar de Atacama (Salas et al., 2010; Ortiz et al., 2011).

Por otro lado, en épocas de máximos niveles, los excedentes de agua que no alcanzan a evaporarse, rebosan sobre la interfaz salina y pueden circular de manera subsuperficial, adentrándose hacia el contacto entre la zona marginal y el núcleo. En este sector se forman zonas de disolución de la halita en el núcleo, los cuales forman acumulaciones de agua. El destino final de esta agua es evaporarse en parte, y otra parte mezclarse e infiltrarse en la UH Núcleo Superior. Este es el caso del desborde producido aguas abajo de la laguna Saladita (Laguna Interna).

En el Anexo MC-11 se presenta un balance hidrogeológico realizado para la laguna Saladita. Se ha considerado la laguna Saladita por ser el último cuerpo de agua estable antes del núcleo, lo que lo convierte en el cuerpo que puede generar una recarga hacia la UH Núcleo Superior, en el caso de tener excedentes, y en el primer cuerpo que podría verse afectado por la explotación del núcleo. Para este balance se cuenta con información de aforos con periodicidad mensual (presentando algunos gaps) aguas arriba de la laguna Salada, y entre las lagunas Salada y Saladita, desde 2007. La Figura 7-11 muestra un esquema en perfil para los principales cuerpos de agua superficial conectados entre sí en el sistema Peine, y las relaciones existentes entre río y acuífero.

Los resultados del balance muestran que la laguna Saladita tiene un caudal de recarga promedio anual de 50,1 L/s, mientras que las descargas se han cuantificado en valores promedio anual de 7,4 L/s por evaporación, 42,4 L/s por desbordes, y 0,3 L/s por infiltraciones. Se ha estimado una infiltración máxima posible desde el fondo de la laguna, considerando que se alcanzase la desconexión del acuífero respecto al lecho de la laguna, de 2,1 L/s. Aun considerando el peor escenario posible (abatimiento del nivel freático por debajo del lecho de la laguna Saladita y situación de desconexión), continuarían quedando 40,6 L/s de excedentes disponibles para alimentar los desbordes hacia Interna y la UH Núcleo Superior.

Estos valores sugieren que la dinámica de la Laguna Saladita depende casi en su totalidad por el aporte de agua desde el sureste, la que en último término depende del agua precipitada en las zonas altas de la cuenca. A su vez, la evaporación es un mecanismo de descarga muy importante, por sobre la infiltración en subsuperficie; esto es consistente con los materiales de baja permeabilidad observados en subsuperficie (arcillas, limos y materia orgánica).



A = Área mojada en la cubeta de la laguna
 hL = Nivel de agua en la laguna
 hA = Nivel de agua en el acuífero
 Evap LL = Evaporación desde lámina libre
 Evap S = Evaporación desde el suelo
 d = espesor lecho cuerpos de agua
 L = Longitud

Figura 7-11. Esquema de funcionamiento hidrogeológico, Sistema Peine. Fuente: Elaboración propia.

7.2.3 Sistema Tilopozo

El sistema Tilopozo se localiza al sur del área de estudio, entre el cordón de Lila y el sistema Peine. Si bien la cercanía con este último podría sugerir una similitud en su comportamiento hidrogeológico, todas las evidencias analizadas indican que este sistema es más bien similar al Sistema del Borde Este. Como éste, el Sistema Tilopozo corresponde al afloramiento de agua subterránea en la UH Zona Marginal, que define un sistema lagunar sin la presencia de canales alimentadores de agua superficial. Las dos lagunas principales que componen este sistema son las lagunas La Punta y La Brava.

Geológicamente, estas lagunas se sitúan sobre la UH Zona Marginal, compuesta por evaporitas de sulfato y carbonatos, intercaladas con sedimentos clásticos de grano fino a muy fino (limos y arcillas) (Figura 7-12). Estas litologías permiten que esta unidad sea hidráulicamente poco conductiva, en comparación con la UH Aluvial y la UH Núcleo Superior.

La alimentación del sistema Tilopozo proviene desde la UH Aluvial al sur de éste, cuya agua proviene desde precipitación en las zonas altas, la que se infiltra y circula por la UH Aluvial. Estas aguas están representadas por las salinidades más bajas del sector, con conductividad eléctrica menor a 10 mS/cm, y con los menores valores de enriquecimiento isotópico en $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$, del orden de -8 ‰ VSMOW (Figura 7-13). Los pozos más profundos de esta zona interceptan la interfaz salina, por lo que sus características químicas e isotópicas son una mezcla entre el agua aluvial y la interfaz salina. La UH Aluvial alimenta la UH Zona Marginal hacia el norte. Los depósitos de sales causan que, en su avance hacia el norte, las aguas del aluvial aumenten su salinidad, mientras que sus características isotópicas apenas cambian.

En la UH Zona Marginal se encuentra, además, la interfaz salina, que se adentra hacia el sur-sureste en profundidad y causa que las aguas menos densas de los aluviales se vean forzadas a ascender en su avance hacia el norte, actuando como una barrera hidráulica. Este ascenso, unido a la llana topografía y la baja conductividad hidráulica conlleva a que la zona marginal presente unos niveles muy someros, llegando a formarse algunas surgencias que dan origen al afloramiento de cuerpos superficiales de agua estables como son las lagunas La Brava y La Punta. Estudios hidroquímicos e isotópicos han demostrado que la alimentación de las lagunas de Tilopozo corresponde únicamente a la descarga de la UH aluvial, no mostrando ningún indicio de recibir salmuera del acuífero salino (Aravena, Auría, & Tore, 2019).

Las aguas superficiales presentan un comportamiento estacional, con menores concentraciones de cloruros y valores de $\delta^{18}\text{O-H}_2\text{O}$ más empobrecidos isotópicamente en el invierno (valores más negativos) mayores concentraciones de cloruros y valores más enriquecidos isotópicamente en el verano. Este comportamiento está ligado a que en el invierno hay mayor descarga del agua del acuífero aluvial y hay menor evaporación que en el verano donde hay mayor evaporación y la descarga del acuífero aluvial es mucho menor (Aravena, Auría, & Tore, 2019)

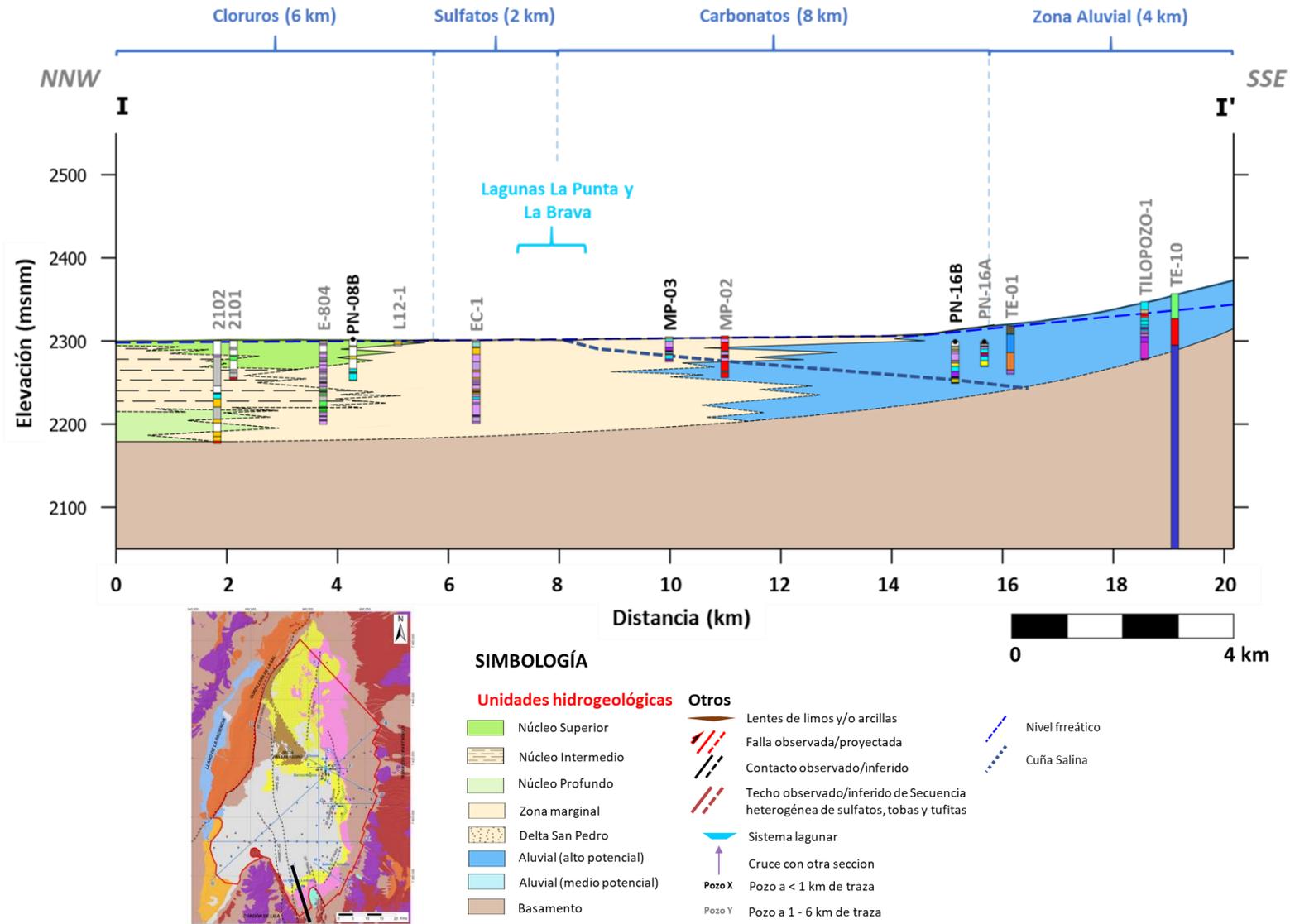


Figura 7-12. Sección hidrogeológica local NNW-SSE, Sistema Tilopozo. Fuente: Elaboración propia.

En los sectores que no aflora el agua, el flujo continúa diferenciándose por disolución de sales, evaporación y mezcla con aguas de la interfaz salina, lo que aporta un enriquecimiento en cloruros respecto a las aguas que no se han mezclado (aguas superficiales y aguas al sur de la interfaz salina). En épocas de máximos niveles, existe un excedente de agua que no alcanza a evaporarse y rebosa sobre la interfaz salina, acumulándose en el contacto entre la zona marginal y el núcleo (SGA, 2015), donde termina de evolucionar a salmuera por evaporación y mezcla. Finalmente, una parte de esa salmuera se infiltra a la UH Núcleo superior.

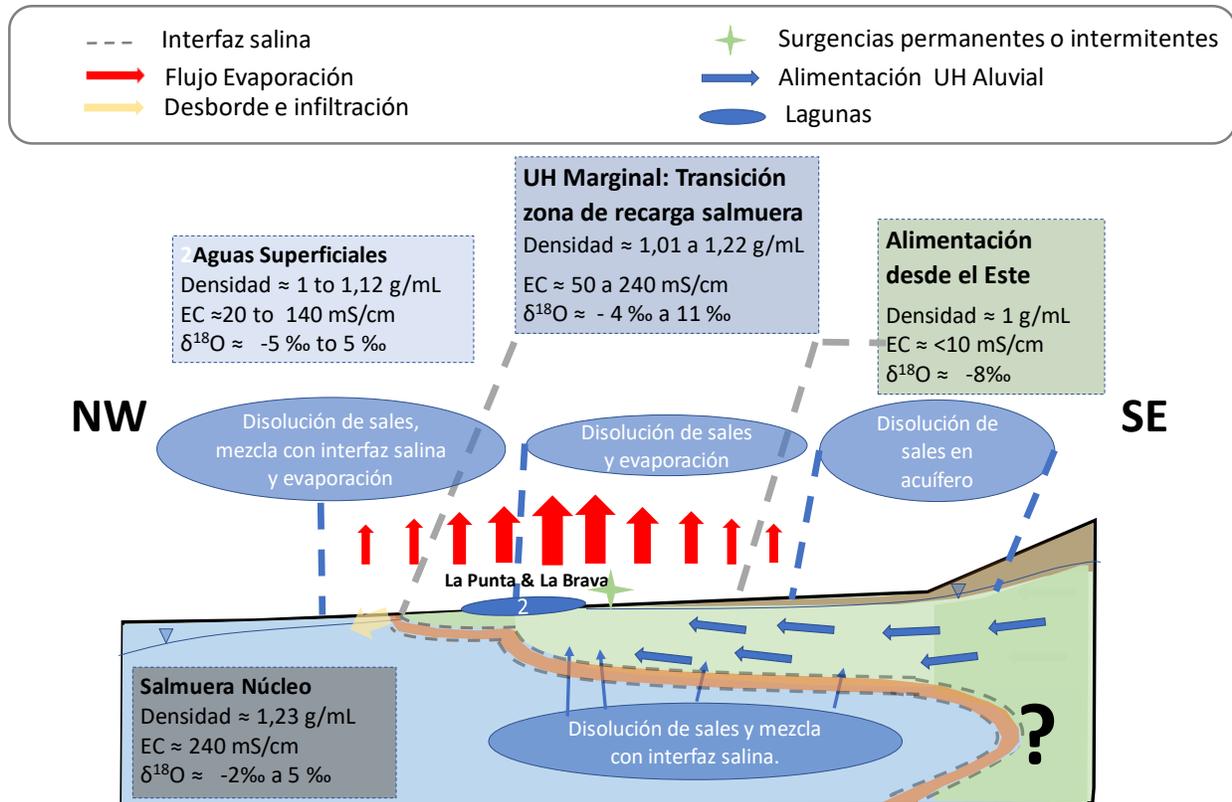


Figura 7-13. Modelo conceptual hidroquímico y de procesos para el sistema Tilopozo. Fuente: Elaboración propia

8 BIBLIOGRAFÍA

- AC Ingenieros Consultores. (1995). *Radio de protección zanja sector Tucúcaro. San Pedro de Atacama, II Región, Chile.*
- Acevedo, E., Ortiz, M., N., F., & Sanguinetti, P. (2007). *Relaciones hídricas de Prosopis tamarugo Phil, Uso de isótopos estables, Santiago: Universidad de Chile.*
- Albemarle. (2019). *Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto "Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama". Informe Anual N° 3. Período Enero – Diciembre 2018.*
- Alpers, C., & Whittemore, D. (1990). *Hydrogeochemistry and stable isotopes of ground and surface waters from two adjacent closed basins, Atacama Desert, northern Chile, Applied Geochemistry.*
- Álvarez, E. (1984). Exploración del Salar de Pedernales (Atacama) mediante imágenes Landsat procesadas por computador. *Revista Geológica de Chile, N21, 77-97.*
- Amilibia, A., Sàbat, F., McClay, K. R., Muñoz, J. A., Roca, E., & Chong, G. (2008). The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology(30), 1520-1539.*
- Amphos 21. (2009a). *Actualización del modelo conceptual del sector Soncor, Informe para SQM. Santiago.*
- Amphos 21. (2009b). *Hidrología del sector oriental del Salar de Atacama, Informe para SQM. Santiago.*
- Amphos 21. (2009c). *Análisis sistemático de la información hidrológica del PSA. Santiago de Chile.*
- Amphos 21. (2010). *Interpetación y contexto hidrogeológico de los puntos del Plan de Contingencia del Sistema Soncor. Análisis de su representatividad. Informe para SQM. Santiago.*
- Amphos 21. (2018a). *Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para el Salar de Atacam. Preparado para el Comité de Minería no Metálica de CORFO.*
- Amphos 21. (2018b). *Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca del Salar de Atacama. Santiago: Para Comité Minería no Metálica CORFO. Estudio de Modelos Hidrogeológicos Conceptuales Integrados para los Salares de Atacama, Maricunga y Pedernales.*
- Aravena R., S. J. (2010). *Evaluation of sources of water to lagoons, Salar de Atacama Basin: An isotope and geochemical approach.*
- Aravena, R. (2017). *Estudio isotópico en las zonas de Soncor y Aguas de Quelana. Informe interno para SQM.*
- Aravena, R. (2017a). *Informe Interno: Estudio isotópico en las zonas de Soncor y Aguas de Quelana. Santiago de Chile.*
- Aravena, R. (2017b). *Informe Interno: Estudio isotópico en aguas de la región de Peine.*
- Aravena, R. (2017c). *Informe de datos isotópicos en la zona de Peine, campaña de verano del 2017. Santiago de Chile.*
- Aravena, R. (2018). *Estudio isotópico Aguas de quelana. (Estudio interno para SQM). Santiago de Chile.*
- Aravena, R. (2018a). *Informe Interno: Estudio isotópico en aguas de la región de Peine. Santiago de Chile.*
- Aravena, R. (2018b). *Informe interno: Estudio isotópico Aguas de quelana. (Estudio interno para SQM). Santiago de Chile.*
- Aravena, R., Auría, G., & Tore, C. (2019). *Water Cycle Study in the Tilopozo Lagoon Ecosystem, Salar de Atacama, Chile. Sustainable Mining.*

- Aravena, R., Auría, G., Henríquez, A., & Tore, C. (2019). Use of geochemical tools for evaluation of sources of water for wetlands in the Peine area, Salar de Atacama, northern Chile. *Water Congress 2019*. 7. Santiago de Chile: GECAMIN Digital Publications.
- Aravena, R., Suzuki, O., Pena, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H., & Grilli, A. (1999). Isotopic composition and origin of the precipitation on Northern Chile. *Applied Geochemistry*, 14(4), 411-422.
- Arcadis. (2015). *Informe n°17 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. Informe de Monitoreo semestral actualizado a junio de 2015*. Informe para SQM .
- Arcadis. (2015a). *Informe n°17 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. Informe de Monitoreo semestral actualizado a junio de 2015*. Informe para SQM .
- Arcadis. (2015b). *Línea Base hidrogeológica proyecto Aguas Blancas (Informe interno para SQM)*.
- Aron, F., González, G., Veloso, E., & Cembrano, J. (2008). Architecture and style of compressive Neogene deformation in the eastern-southeastern border of the Salar de Atacama Basin (22° 30'-24° 15's): A structural setting for the active volcanic arc of the Central Andes. *7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG)*, 52-55.
- Arriagada, C. (2003). *Rotaciones tectónicas y deformación del antearco en los Andes Centrales durante el Cenozoico. Tesis*. 317 p.
- Arriagada, C. (2009). *Estudio geológico-estructural de la cuenca del Salar de Atacama*. Informe Inédito para SQM Salar S.A.
- Arriagada, C., Cobbold, P. R., & Roperch, P. (2006). Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous. *Tectonics*, 25(1).
- Arriagada, C., Mpodozis, C., Basso, M., Roperch, P., Cobbold, P., & Reich, M. (2005). Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: Implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics Volume 399. Issues 1-4*, 125-154.
- Ayala y Cabrera Ltda. (1985). *Salar de Atacama-Northern Clay y Area Experiment on Movement of Pond Leakage, Final Report - Stage I. Sociedad Chilena del Litio Ltda*.
- Baker, M. (1977). *Geochronology of upper Tertiary volcanic activity in the Andes of North Chile. Geol. Rundsch*, vol. 66, n° 2, pp. 455-465.
- Barrera, A. (2004). *Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España. Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA)*.
- Basso, & Mpodozis. (2012). *Carta Cerro Químal, Región de Antofagasta. Santiago*.
- Becerra, J., Henríquez, S., & Arriagada, C. (2014). *Geología del área Salar de Atacama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 166, 1 mapa escala 1:100.000*.
- Bevacqua, P. (1987). *Geological Aspects of the Salar de Atacama's Nucleus. Estudio preparado para Minsal*. Santiago, Chile.
- Bevacqua, P. (1988). Descripción de las unidades geológicas de superficie del Salar de Atacama. Santiago: Minsal Ltda.

- Bevacqua, P. (1992). *Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Antofagasta, 284 p.*
- Bevacqua, P. (1993). *Geología del salar de Atacama y estratigrafía, de su núcleo y delta, II Región de Antofagasta, Chile. Tesis de la Universidad Católica del Norte.*
- Bevacqua, P. (1994). Descripción geológica y evolución del delta del Río San Pedro, Salar de Atacama, Chile. *Congreso Geológico Chileno, Actas I., 235-239.*
- Blanco, N., Mpodozis, C., Gardeweg, M., & Jordan, T. (2000). *Sedimentación del Mioceno Superior - Plioceno en la Cuenca del Salar de Atacama: Estratigrafía de la Formación Vilama, II Región de Antofagasta. Puerto Varas.*
- Boschetti, T., Cortecchi, G., Barbieri, M., & Mussi, M. (2007). *New and past geochemical data on fresh to brine waters of the Salar de Atacama and Andean Altiplano, northern Chile. Geofluids 7, 33-50.*
- Breitkreuz, C. (1995). *The Late Permian Peine and Cas Formation at the eastern margin of the Salar de Atacama, Northern Chile: stratigraphy, volcanic facies, and tectonics. Revista Geológica de Chile 22 (1), 3-23.*
- Breitkreuz, C., Helmdach, F., Kohring, R., & Mosbrugger. (1994). *Late Carboniferous Intra-arc sediments in the North Chilean Andes: Stratigraphy, Paleogeography and Paleoclimate. Facies, v. 26, p. 67-80.*
- Brüggen, J. (1943). *Geología de la Puna de San Pedro de Atacama y sus formaciones de areniscas y arcillas rojas. Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología, Anales, v.2, p 342-367, Santiago.*
- Brüggen, J. (1959). *Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar, p. 1-374, Santiago.*
- Carmona, V. (2002). *Gènesi i funcionament hidroquímico del Salar d'Atacama (n. de Xile).*
- Carmona, V., Pueyo, J., Taberner, C., Chong, G., & Thirlwall, M. (2000). Solute inputs in the Salar de Atacama (N. Chile). *Journal of Geochemical Exploration, 69, 449-452.*
- Cembrano, J., Lavenu, A., & Yañez, G. (2007). The geology of Chile. *Neotectonics, 231-261.*
- Chaffaut, I. (1998). *Precipitations d'altitude, eaux souterraines et changements climatiques de l'Altiplano nord-Chilien. Université Paris Xi Orsay.*
- Charrier, R., & Reutter, K. (1988). *La Formación Purilactis en el borde occidental del Salar de Atacama, 23°-23°45' de latitud sur, Chile. Comunicaciones 39: 211 (Abstr.).*
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada, 13ª Edición. Bogotá: McGraw-Hill.*
- CONAF. (2016). *Catastro de Uso de Suelo y Vegetación. Santiago.*
- CONAF-SQM. (1995). *Hábitat y poblaciones de avifauna del Salar de Atacama.*
- Conama. (2006). *Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI. Realizado por Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias, Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.*
- CORFO. (1977). *Investigación de recursos hidráulicos del Norte Grande. CHI/69/535. Mapa geológico con ubicación de pozos. Salar de Atacama. Escala 1:250.000.*
- CORFO, DGA, ONU. (1976). Precipitación y Evaporación en el Balance Hidrológico. En D. O. CORFO, *Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande (CHI/69/535). Santiago.*
- Cortés. (2012). *Carta Sierra Mariposa, Región de Antofagasta.*
- Craig, H. (1961). *Isotopic Variations in Meteoric Waters. Am. Assoc. Adv. Sci. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3788-4_2.*

- CRICYT. (2017a). *Segundo informe de avance sobre estudios e investigaciones que intentan explicar el estado actual de ejemplares de algarrobo, en una población ubicada en las proximidades del pozo CAMAR 2 de SQM, en el Salar de Atacama, Chile.*
- CRICYT. (2017b). *Tercer informe de avance sobre estado de algarrobos.* Santiago de Chile.
- Criollo, R., Velasco, V., Vázquez-Suñé, E., Serrano-Juan, A., Alcaraz, M., & García-Gil, A. (2016). An integrated GIS-based tool for aquifer test analysis. *Environmental Earth Sciences.*
- CSIC. (2016). *Modelación de flujo y transporte para la evaluación de la influencia de las actividades de recarga indirecta en el sector SOP.*
- Custodio Gimena, E. (2017). *Informe relativo al funcionamiento de la cuenca del Salar de Atacama como apoyo a la respuesta a los cargos de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) por las actuaciones de SQM en el Salar.* Santiago.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea, segunda edición.*
- Dalannais, L. (1979). *Hidrogeología del borde oriental del Salar de Atacama. Memoria de Tesis Universidad de Antofagasta.*
- Dansgaard, W. (1964). *Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, 436–468.* <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>.
- De Silva, S. (1989). *The Altiplano-Puna volcanic complex of the Central Andes. Geology 17, 1102-1106.*
- DGA. (1986). *Informe hidrogeológico: evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca Salar de Atacama, II región. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (1987). *Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (1999). *Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región. Minuta técnica N°60. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídric.*
- DGA. (2007). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I norte. Regiones I a IV. SIT N°122.*
- DGA. (2008). *Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Informe Final Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano de Chile. (S.I.T N° 157). Ministerio de Obras Públicas. Realizado por DICTUC.*
- DGA. (2010). *Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama.S.I.T. 210, pp 277). Ministerio de Obras Públicas. realizado por GCF.*
- DGA. (2012). *Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama: informe técnico. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (2013). *Análisis de la oferta hídrica del salar de Atacama. Santiago, Chile. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Estudios y Planificación.*
- DGA. (2014). *Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final S.I.T N° 357. Ministerio de Obras Públicas. Realizado por ICASS.*
- DGA. (2014b). *Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel nacional (Informe Final) (SDT N°356). Santiago: Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).*

- DGA. (2016). *SDT N° 392: Sistematización de información de los recursos hídricos del Salar de Atacama para un futuro Plan de Gestión*. Santiago: División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas.
- Díaz del Río, G., Bonilla, R., & Peralta, F. (1972). *Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del Salar de Atacama*. Informe para CORFO, Departamento de Recursos Hidráulicos, Santiago.
- DICTUC. (1999). *Recalibración del modelo Hidrogeológico del Salar de Atacama considerando curvas de evaporación. Versión corregida*. Informe para SQM.
- DICTUC. (2000). *Estimación de Aportes Superficiales y Subterráneas del Salar de Atacama, Mediante el Modelo Estacional SEAMOD*. Informe para SQM.
- DICTUC. (2001). *Estimación de las reservas del Salar de Atacama mediante el uso de los programas Modflow y MT3D. Recalibración y validación del modelo*. Informe para SQM.
- DICTUC. (2002a). *Informe ejecutivo Pozo producción SP-1: Habilitación, Ejecución y análisis de Pruebas de Bombeo*. Informe para SQM.
- DICTUC. (2002b). *Informe ejecutivo Pozo producción SP-4: Habilitación, Ejecución y análisis de Pruebas de Bombeo*. Informe para SQM.
- DICTUC. (2004). *Modelo hidrogeológico del acuífero de salmuera del núcleo del Salar de Atacama. Descripción del modelo y simulaciones*. Santiago, Chile.
- DICTUC. (2006). *Análisis estocástico de series de tiempo del monitoreo hidrogeológico del sistema lacustre soncor. Salar de Atacama*. Santiago de Chile.
- DICTUC. (Agosto de 2006). *Fundamentos técnicos del plan de contingencias*. Santiago, Chile.
- DICTUC. (Febrero de 2007). *Informe N°1. Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico. Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama*. Santiago, Chile.
- DICTUC. (2009). *PSAH. Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 5*. Santiago de Chile.
- DICTUC. (2010). *Estudio de la demanda de recursos hídricos en el Salar de Atacama. Informe n°866501 (15 de abril de 2010) Etapa 2, "Medición de la evaporación mediante el método del Domo", SIT N° 195*. Informe para SQM, Santiago, Chile.
- Dingman, R. (1963). *Cuadrángulo Tular, Provincia de Antofagasta, Escala 1:50.000. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile N° 11, 35 p, Santiago, Chile, 1963*.
- Dingman, R. (1965). *Cuadrángulo San Pedro de Atacama: Provincia de Antofagasta, escala 1:50.000. IIG, Carta Geológica de Chile (n.14): 29 p., ils., 1 mapa, Santiago. Coordenadas: 22°45' – 23°00' / 68°15' – 68°00'. Escala: 1:50.000*.
- Dooley, T., & Schreurs, G. (2012). *Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. Tectonophysics, 574, 1-71*.
- Duffy, C., & Al-Hassan, S. (1988). *Groundwater circulation in a closed desert basin: topographic scaling and climatic forcing. Water Resour. Res. 24, 1675-1688*.
- EDRA. (1997). *Evaluación Hidrogeológica Acuífero Sector Norte Salar de Atacama. Compañía Minera RioChilex*. Santiago, Chile.
- Escondida, B. (2019). *Plan de Alerta Temprana para Acuífero Monturaqui-Negrillar- Tilopozo. Datos Monitoreo, Informe N° 18: Revisión hasta fines de 2018*.

- Escondida, M. (2016). . *Minera Escondida LTDA. Informe "Plan de Alerta Temprana para el Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo". Revisión de los datos de monitoreo, Informe N° 16: Revisión hasta fines de 2016.*
- Evans, R. (2008a). *An abundance of lithium. Santiago. World Lithium.*
- Evans, R. (2008b). *An abundance of lithium. Part two.*
- FAO. (2006). *Evapotranspiración de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación.*
- Faulds, J., Hinz, N., Coolbaugh, M., Cashman, P., Kratt, C., Dering, G., . . . McLachlan, H. (2011). Assessment of favorable structural settings of geothermal systems in the Great Basin, western USA. *GRC Transactions, Vol. 35, 777-783.*
- Feflow. (s.f.). *Feflow 7.1 Documentation.* Obtenido de Fluid- Transfer BC: http://www.feflow.info/html/help71/feflow/mainpage.htm#t=09_Parameters%2FBoundary_Conditions%2FFlow%2Ffluid_transfer_bc.html
- Fernández, F. G. (1995). Manual de Climatología Aplicada. Clima, Medio Ambiente y Planificación. *Colección espacios y sociedades, serie mayor nº2., 288.*
- Fernández, F. G., & Galán, E. (1994). Las precipitaciones en el valle del Tiétar. Aspectos Metodológicos. *Aplicaciones en homenaje al profesor Luis Miguel Albentosa, 75-89.*
- Ferrér, M., Rodríguez, J., & Estrela, T. (1995). Generación automática del número de curva con Sistemas de Información Geográfica. 16.
- Fiorella, R., Poulsen, C., Zolá, R., Barnes, J., Tabor, C., & Ehlers, T. (2015). *Spatiotemporal variability of modern precipitation $\delta^{18}O$ in the central Andes and implications for paleoclimate and paleoaltimetry estimates. J. Geophys. Res. Atmos. 120, 4630–4656. <https://doi.org/10.1002/2014JD022893>.Received.*
- Flint, S. T. (1993). Extensional tectonics in convergent margin basins: An example from the Salar de Atacama, Chilean Andes. *Geological Society of America. Bulletin 105 , 603-617.*
- Flint, S., Turner, P., Jolley, E., & Hartley, A. (1993). Extensional tectonics in convergent margin basins: An example from the Salar de Atacama, Chilean Andes. *Geological Society of America. Bulletin 105, 603-617.*
- Fock, A. (2009). *Estudio del Acuífero Aluvial del Borde Este del Salar de Atacama, entre Quebradas Camar y Socaire, Comuna San Pedro de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile.* Tesis de la Fundación del Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCHIS), Barcelona.
- Fortt, M. (1981). *Geología general de los cuadrángulos Cerro Quimal, Laguna Tebinquinche, Llano de la Paciencia y Salar de Atacama, II región Escala 1:100.000. Instituto de Investigaciones Geológicas, informe inédito, p. 1-48, Santiago.*
- Francis, P., Moor bath, S., & Thorpe, R. (1977). *Strontium isotope date in andesites from Ecuador and north Chile. Earth Planet Sci. Lett., 37: 197-202, Amsterdam.*
- Fuenzalida, H., & Rutllant, J. (1986). *Estudio sobre el origen del vapor de agua que precipita en el invierno altiplánico.*
- GAC. (2009). *Estudio de Impacto Ambiental Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama Región de Antofagasta, Chile. para SCL Sociedad Chilena del Litio. Santiago, Chile.*

- Garces, I., López, P. L., Auqué, L. F., Chong, G., Vallés, V., & Gimeno, M. J. (1996). CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS GENERALES DEL SISTEMA SALINO DEL SALAR DE LLAMARA (CHILE). *Estudios Geológicos* 52, 23-35.
- Gardeweg, M., & Ramírez, C. F. (1987). *La Pacana caldera and The Atana ignimbrite: a major ash-flow and resurgent caldera complex in the Andes of Northern Chile*. *Bulletin of Volcanology* Vol.49 N°3: pp. 547-566.
- Garreaud, R., & Battisti, D. (1999). *Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation*. *J. Clim.* 12, 2113–2123. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2113:IEAIEL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2113:IEAIEL>2.0.CO;2).
- Garreaud, R., Vuille, M., & Clement, A. (2003). *The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes*. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 194, 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4).
- GCF Ingenieros Consultores. (2010). *Anexo 7, Adenda 2 Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama*. Antofagasta: Sociedad Chilena del Litio LTDA.
- Geobiota. (2017). *Plan de seguimiento ambiental. Campaña de monitoreo N° 11- abril de 2017*.
- Geodatos. (2000). *Estudio geofísico mediante trasiente electromagnético (TEM) y nano-TEM. Proyecto borde este Salar de Atacama*.
- Geodatos. (2011). *Estudio geofísico de Transiente Electromagnético TEM y nanoTEM. Proyecto: Soncor-Toconao, Salar de Atacama*. SLM-NX-1 de Peine.
- Geodatos. (2013). *Toconao-Este Salar de Atacama*. SQM SALAR S.A.
- Geodatos. (2013a). *Apéndice A: Estudio Geofísico NantoTEM y TEM. Proyecto Sector Sur Salar de Atacama. [Informe]. - Región de Antofagasta, Chile. Informe para Rockwood Lithium*.
- Geodatos. (2013b). *Toconao-Este Salar de Atacama*. SQM SALAR S.A.
- Geodatos. (2014). *Estudio geofísico mediante MT y TEM. Proyecto borde oriental cuenca Salar de Atacama*. para ICASS LTDA - Dirección General de Aguas.
- Geodatos. (2017). *Estudio geofísico de Resistividad Métodos TEM y NanoTEM. Borde Este Salar de Atacama, Sectores de Quelana y Soncor, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta, Chile*. SQM Salar S.A.
- Geohidrología. (2009). *Primera Actualización del Modelo de Flujo de Agua Subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006*. Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Informe realizado por ICASS LTDA, Santiago, Chile.
- Geohidrología. (2011a). *Origen de las aguas del sistema Soncor*. Santiago de Chile.
- Geohidrología. (2011b). *Implementación de un Modelo de Gestión Minera en el Núcleo del Salar de Atacama utilizando un modelo Modflow*. Informe para SQM.
- Geohidrología. (2013). *Segunda Actualización del Modelo de Flujo de Agua Subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006*. Santiago, Chile.
- Geohidrología. (2014). *Tercera Actualización del Modelo de Flujo de Agua Subterránea en el Salar de Atacama según RCA 226/2006*. Santiago, Chile.
- Godfrey, L. V., & Jordan, T. E. (2003). *Geochemistry of freshwaters and brines around and within the Salar de Atacama*. Dept. of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, NY.

- Golder Associates. (2017a). *Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. Informe preparado para Minera Escondida Ltda. Número de Informe: 179 215 3075-IT001_Rev.3. 940 p.*
- Golder Associates. (2017b). *Informe n°16 Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, para Minera Escondida.*
- González, G., Cembrano, J., Aron, F., Veloso, E., & Shyu, J. (2009). Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile (23_s–24_s) [Publicación periódica]. *Tectonics. Vol 28.*
- González, H., De Luis, M., Stepánek, P., Raventós, J., & Cuadrat, J. (2002). Reconstrucción, estabilidad y proceso de homogeneizado de series de precipitación en ambientes de elevada variabilidad pluvial. En: Cuadrat J.M., Vicente S.M., Saz A.(eds). *Vii Reunión Nacional de Climatología: La información climática como herramienta de gestión ambiental*, 47-57.
- Grilli, A. (1985). Una aproximación al estudio de la evaporación desde salares. *VII Congreso Nacional De Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena De Ingeniería Hidráulica*, 495-514.
- Grilli, A., & Vidal, F. (1986). *Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las regiones I y II. DGA.*
- Guzmán, E., Fock, A., Tore, C., & Moraga, J. (2016). Hydrogeology and Active Management Applied to protect ecosystems in Salares: From Atacama experience to the ew Caucharí-Olaroz Project.
- Hammer, O. (2001). PAST: Paleontological Statistics software Package for Education and Data Analysis. *Paleontological Association.*
- Hartley, A., Flint, S., Turner, P., & Jolley, E. (1992). *Tectonic control on the development of a semi-arid, alluvial basin as reflected in the stratigraphy of the Purilactis Group (Upper Cretaceous-Eocene), northern Chile. J South Am Earth Sci, v. 5(3/4), p. 275-296.*
- HARZA. (1978). *Desarrollo de los recursos de agua en el norte grande, Chile. Con el Proyecto CHI- 69/535 CORFO-D.G.A-CCC-P.N.U.D. para las Naciones Unidas.*
- Henríquez, S., Becerra, J., & Arriagada, C. (2014). *Geología del área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta.*
- Herrera, C., Custodio, E., Chong, G., Lambán, L., Riquelme, R., Wilke, H., . . . Lictevout, E. (2016). *Groundwater flow in a closed basin with a saline shallow lake in a volcanic area: Laguna Tu. Urqueta, H., Sarmiento, A., Gamboa, C., Lictevout, E.*
- Hidroterra. (1988). *Evaluación de la Evaporación de Salares. Salar de Atacama.*
- Houston, J. (2006). *Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact. Int. J. Climatol. 26, 2181–2198. https://doi.org/10.1002/joc.1359.*
- Huerta, G. (2012). *Northern Chile: A Chemical and Isotopic Approach University of Waterloo.* Tesis for degree of Master of Science in Earth and Environmental Sciences, Waterloo.
- Huerta, G. (2012). *Use of Isotopes and Chemical Tools for Understanding the Processes that control the Chemical Composition of Brines in the Salar de Atacama, Northern Chile. University of Waterloo.* Tesis for degree of Master of Science in Earth and Environmental Sciences, Waterloo.
- Hydrotechnica. (1987). *Evaluation of Brine Reserves in the Salar de Atacama.*
- IDAEA-CSIC. (2017). *Cuarta Actualización del Modelo de Flujo del Salar de Atacama.* Santiago.
- IDAEA-CSIC. (2017). *Cuarta Actualización del Modelo de Flujo del Salar de Atacama.* Santiago.
- IDAEA-CSIC. (2018). *Informe de efectividad de acción.* Barcelona.

- IDAEA-CSIC. (2018). *Informe de investigación producto de la activación del plan de contingencia en los puntos L1-5 y Reglilla L1-G4*. Barcelona.
- IDAEA-CSIC. (2019). *Quinta Actualización del Modelo de Flujo Regional*. Barcelona.
- Ide, F. (1978). *Cubicación del yacimiento salar de Atacam. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Minas, 144 p. Santiago*.
- Johnson, A. (1967). Specific Yield: Compilation of specific yields for various materials: Hydrologic Properties of Earth Materials. *Geological Survey Water Supply Paper 1662-D*.
- Johnson, E., Yanez, J., Ortiz, C., & Muñoz, J. (2010). Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hydrological Science Journal*, 624-635.
- Jordan, T. E. (2002). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile. *Geological Society of America. Bulletin 114*, 1406-1421.
- Jordan, T., Mpodozis, C., Muñoz, N., Blanco, N., & Pananont, P. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(2), 122-146.
- Jordan, T., Muñoz, N., Hein, M., Lowenstein, T., Godfrey, L., & Yu, J. (2002). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile. *Geological Society of America. Bulletin 114*, 1406-1421.
- Kampf, K., Tyler, S., Ortiz, A., Muñoz, J., & Adkins, P. (2005). Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Journal of Hydrology 310*, 236-252.
- Karl, T., & Williams, C. (1987). An approach to adjusting climatological time series for discontinuous inhomogeneities. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, n°26, 1744-1763.
- Kuhn, D. (2002). Fold and thrust belt structures and strike-slip faulting at the SE margin of the Salar de Atacama basin, Chilean Andes. *Tectonics*, 21(4).
- Lagos, L. (2016). *Hidrogeoquímica de fuentes termales en ambientes salinos relacionados con salares en los Andes del norte de Chile. Universidad de Chile*.
- Layto, E., & Dalannais, G. (1979). *Hidrogeología del borde oriental del Salar de Atacama. Tesis de grado para optar al título de Geólogo. Universidad del Norte. Departamento de Geología, Antofagasta*.
- Le Roux, J. (2017). *Pleistocene-Holocene paleoclimatic and sedimentological changes in the Salar de Atacama [Informe]: Informe para SQM Salar S.A. - Santiago: [s.n.]*.
- Le Roux, J. P. (2018). *Pleistocene-Holocene paleoclimatic and sedimentological changes in the Salar de Atacama. Unedited Research Report for SQM. Updated 2018*.
- Lin, Y., Chuang, Y., Shyu, J., González, G., Shen, C., Lo, C., & Liou, Y. (2016). Structural characteristics of an active fold-and-thrust system in the southeastern Atacama Basin, northern Chile. *Tectonophysics. Volume 685*, p. 44-59.
- Lindsay, J., de Silva, S., Trumbull, R., Emmermann, R., & Wemmer, K. (2001). *La Pacana caldera, n. Chile: a reevaluation of the stratigraphy and volcanology of one of the world's largest resurgent calderas. Journal of Volcanology and Geothermal Research 10*.
- Macellari, C., Su, M., & Townsend, F. (1991). *Structure and seismic stratigraphy of the Atacama Basin, Northern Chile. Congreso Geológico Chileno N°6, Actas, v. 1, p. 133-137, Viña del Mar*.
- Machiwal, D., & Jha, M. (2012). *Hydrologic Time Series Analysis*. Springer.

- Maksaev, V., & Zentilli, M. (1999). *Fission Track Thermochronology of the Domeyko Cordillera, Chile: Metallogenic Implications for Andean Porphyry Copper Metallogenesis. Exploration and Mining Geology, Special Issue on Latin American Mineral Deposits, Vol.*
- Marazuela, M., Vásquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019). *Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. Science of the Total Environment. 651, 668-683.*
- Marazuela, M., Vásquez-Suñé, E., Custodio, E., Palma, T., García-Gil, A., & Ayora, C. (2018). *3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). J. Hydrol. 561, 223-235.*
- Mardones, L. (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. En G. Lagos, *El litio, un nuevo recurso para Chile* (págs. 181-216).
- Mardones, L. (1997). *Estudio de evaporación en el salar de Atacama. Tesis Doctorado.*
- Mardones, L. (1998). *Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d'ascotan et d'atacama.*
- Marinovic, N., & Lahsen, A. (1984). *Cartografía Hoja de Calama.* SERNAGEOMIN.
- Matraz. (2014). *Estudio de la Evaporación y Balance Hídrico del Salar de Atacama.* Informe preparado para SQM Salar S.A.
- McCartney, J. (2001). *Hydraulic and Hydrochemical interactions in the Tilopozo groundwater zone Salar de Atacama Region II, Chile. Thesis for Master of Science in hydrogeology and groundwater management, National Centre for Groundwater Management, University of Technology.* Sidney, Australia.
- McClay, K. (1999). Thrust systems II -- A review of thrust terminology. In McClay, K.R., 1999. Tectonic regimes and fault systems: structural geology for petroleum exploration. *Short Course. Professor of Royal Holloway, University of London, 293-307.*
- McDonald, M., & Harbaugh, A. (1988). *TECHNIQUES OF WATER-RESOURCES INVESTIGATION OF THE UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY.* Estados Unidos.
- Minera Escondida S.A. (1996). *Estudio de Impacto Ambiental "Lixiviación de óxido de Cobre y aumento de Capacidad de Tratamiento del Mineral sulfurado". II Región. Antofagasta.*
- Minsal. (1987). *Geological Aspects of the Salar de Atacama's Nucleus.* Santiago, Chile.
- MINSAL. (1988). *Hydrology. Appendix V: Evaporation Study.* Toconao: MINSAL.
- MINSAL. (1989). *Hydrogeology. Apendix II: Water Levels.* Toconao: MINSAL. Reporte Interno.
- Mockus, V. (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Chapter 21. Design Hydrographs.* Washington, DC.: Soil Conservation Service (SCS), USDA.
- Moraga, A., Chong, G., & Henríquez, H. (1974). *Estudio geológico del Salar de Atacama, provincia Antofagasta.* Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG).
- Morgan, K., Jankowski, J., & Taylor, G. (2006). Structural controls on groundwater flow and groundwater salinity in the Spicers Creek catchment, Central West region, New South Wales. *Hydrological Processes. Vol. 20, 2857-2871.*
- Mpodozis, C., Basso, M., Roperch, P., Cobbold, P., & Reich, M. (2005). Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics, 399(1), 125-154.*

- Mpodozis, C., Blanco, N., Jordan, T., & Gardeweg, M. (2000). *Estratigrafía y deformación del Cenozoico tardío en la región norte de la cuenca del Salar de Atacama: La zona de Vilama-Pampa Vizcachitas. Puerto Varas.*
- Mpodozis, C., Hervé, F., Davidson, J., & Rivano, S. (1983). *Los granitoides de Cerros de Lila, Manifestaciones de un episodio intrusivo y termal del Paleozoico inferior en los Andes del Norte de Chile. Revista Geológica de Chile, vol. 18, pp. 3-14.*
- Mpodozis, C., Marinovic, N., Smoje, I., & Cuitiño, L. (1993). *MpodEstudio geológico-estructural de la Cordillera de Domeyko entre Cerro Limón Verde y Sierra Mariposas, Región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería Informe Registrado IR-93-04, 28.*
- Muñoz, N., Charrier, R., & Jordan, T. (2002). Interactions between basement and cover during the evolution of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Revista Geológica de Chile, 29(1), 55-80.*
- Muñoz, N., Charrier, R., & Reutter, J. (1997). *Evolución de la Cuenca del Salar de Atacama: Inversión tectónica y relleno de una cuenca de antepaís de retroarco. Proc. VIII Congreso Geológico Chileno, 1: pp. 195-199.*
- Muñoz-Pardo, J., Mardones-Perez, L., & Vidts-Sabelle, P. (2004). Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile. *Ingeniería hidráulica en México, vol. XIX, núm. 3, pp. 69-81. julio-septiembre de 2004.*
- Naranjo J., R. C. (1994). Morphostratigraphic evolution of the northwestern margin of the Salar de Atacama basin (23°s-68°w). *Revista geológica de Chile. Volumen 21, 91-103.*
- Naranjo, J., Ramírez, C., & Paskoff, R. (1994). Morphostratigraphic evolution of the northwestern margin of the Salar de Atacama basin (23°s-68°w). *Revista geológica de Chile. Volumen 21, 91-103.*
- Niemeyer, H. (2013). *Geología del área Cerro Lila-Peine, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 147, 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.*
- NRCS. (2004). *National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology, chapter 10.* National Resources Conservation Service.
- NRCS. (2009). *Small Watershed Hydrology. WinTR-55 User Guide.* National Resources Conservation Service.
- Orphanopoulos, D. (1988). *Informe Hidrogeológico: Evaluación de la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas. Cuenca Salar de Atacama, II Región. DGA.*
- Ortiz, C., Aravena, R., Briones, E., Suárez, F., Tore, C., & Muñoz, J. (2014). Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile. *Hydrological Sciences Journal, 59, 336-350.*
- Ortiz, C., Aravena, R., Briones, E., Suárez, F., Tore, C., & Muñoz, J. F. (2014). Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, Northern Chile. *Hidrological Sciences Journal, 59, 336-350.*
- Pananont, P. M. (2004). Tectonic Evolution of the Northwest Salar de Atacama Basin, Northern Chile. *Tectonics.*
- Pananont, P., Mpodozis, C., Blanco, N., & Jordan, T. (2004). Tectonic Evolution of the Northwest Salar de Atacama Basin, Northern Chile. *Tectonics.*

- Parkhurst, D., & Appelo, C. (1999). *User's guide to phreeqc (version 2)—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. U.S. Geological Survey (USGS).
- Peterson, T., & Easterling, D. (1994). Creation of homogenous composite climatological reference series. *International Journal of Climatology*, n°14, 671-679.
- Pfahl, S., & Sodemann, H. (2014). *What controls deuterium excess in global precipitation?* *Clim. Past* 10, 771–781. <https://doi.org/10.5194/cp-10-771-2014>.
- Philip, J. (1957). Evaporation and moisture and heat fields in the soil. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 14, 354-366.
- Philip, J. (1957). *Theory of infiltration*. *Soil Science* 83 (5): 345-357.
- Post, V., Kooi, H., & Simmons, C. (2007). *Using hydraulic Head Measurements in Variable-Density Ground Water Flow Analyses*. *Groundwater (NGWA)*, 45: 664-671. doi:10.1111/j.1745-6584.2007.00339.x.
- PRAMAR. (2005). *Adenda I Estudio de Impacto Ambiental Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama., para SQM Salar S.A.*
- PRAMAR. (2006a). *Adenda II Estudio de Impacto Ambiental Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama., para SQM Salar S.A.*
- PRAMAR. (2006b). *Adenda III Estudio de Impacto Ambiental Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama., para SQM Salar S.A.*
- PRAMAR. (2007). *Estudio de Superficies Lacustres en el Salar de Atacama (1961-2007)*. Santiago.
- Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., & Flannery, B. (1992). *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing, 2nd Edition*. Victoria: Cambridge University Press.
- Pueyo, J., Chong, G., & Ayora, C. (2017). *Lithium saltworks of the Salar de Atacama: a model for MgSO₄-free ancient potash deposits*. *Chem. Geol.* 466, 173-186.
- Ramírez. (1988). *Evidencias de glaciación en el macizo de los volcanes Pular y Pajonales, Región de Antofagasta*. V Congreso Geológico Chileno. Santiago.
- Ramírez, C. (1979). *Geología del Cuadrángulo Río Grande y sector suroriental del Cuadrángulo Barros Arana, Provincia El Loa, II Región, Santiago, Chile*. Memoria para optar al título de geólogo, Dpto. de Geología, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile,.
- Ramírez, C., & Gardeweg, M. (1982). *Hoja Toconao*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 54, 1 mapa escala 1:250.000.
- Ramírez, E. (1972). *Caracterización climatológica e hidrológica del Salar de Atacama*. Santiago: Corporación de Fomento de la Producción, Departamento Recursos Hidráulicos. 85 p.
- Reijs, J., & McClay, K. (2003). The Salina del Fraile pull-apart basin, northwest Argentina. *Geological Society of London, Special Publications*(210), 197-209.
- Riochilex. (1999a). *Modelo de flujo de aguas subterráneas sector norte Salar de Atacama*.
- Riochilex. (1999b). *Evaluación hidrogeológica acuífero sector norte Salar de Atacama*.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile*. Síntesis.
- Rissmann, C., Leybourne, M., Benn, C., & Christenson, B. (2015). *The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer*. *Chem. Geol.* 396, 164–181.

- Rockwood. (2016). *Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Informe de cierre etapa 3: Implementación red de monitoreo PSA según RCA 21/2016.*
- Rodríguez, R., & Wheeler, D. (1999). Analysis of the Barcelona precipitation series. *International Journal of Climatology*, n°19, 787-801.
- Rubilar, C., & Sebastián, J. F. (2015). *Arquitectura interna y desarrollo oligoceno-neógeno de la cuenca del Salar de Atacama, Andes Centrales del Norte de Chile.* Tesis de la Universidad de Chile.
- Rubilar, J., Martínez, F., Arriagada, C., Becerra, J., & Bascuñán, S. (2017). *Structure of the Cordillera de la Sal: A key tectonic element for the Oligocene-Neogene evolution of the Salar de Atacama basin, Central Andes, northern Chile.* *Journal of South Ame.*
- Rutland, R., Guest, J., & Grasty, R. (1965). *Isotopic age and Andean uplift.* *Nature*, n° 208, pp. 667-678.
- RWL, R. (2017). *Informe Anual n°1 del PSAH.* Santiago de Chile.
- Salas J., G. J. (2010). *Hidrogeología del sistema lagunas del margen Este del Salar de Atacama. (Chile).*
- Salas, J., Guimerá, J., Cornellá, O., Aravena, R., Guzmán, E., Tore, C., . . . Moreno, R. (2010). Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 121, 357-372.
- Salas, J., Guimerà, J., Cornellà, O., Aravena, R., Guzmán, E., Tore, C., . . . Moreno, R. (2010). *Hidrogeología del sistema lagunas del margen Este del Salar de Atacama. (Chile).*
- Salazar, C., Rojas, L., Lillo, A., & Aguirre, E. (1999). *Análisis de requerimientos hídricos de vegas y Bofedales en el norte de Chile, Revista Vertiente.*
- Salisbury, M., Jicha, B., de Silva, S., Singer, B., & Jiménez, N. (2011). *⁴⁰Ar/³⁹Ar chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex ignimbrites reveals the development of a major magmatic province.* *Geological Society of America Bul.*
- Sánchez, F. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Salamanca: Createspace Independent pub.
- Schenk, O., & Gärtner, K. (2004). Solving unsymmetric sparse systems of linear equations with PARDISO. *Journal of Future Generation Computer Systems*, 20(3), 475-487.
- Schlumberger Water Services. (2015). *Informe n°14 Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, para Minera Escondida.*
- Schmitt, A., Lindsay, J., de Silva, S., & S.L. y Trumbull, R. (2002). *U-Pb zircon chronostratigraphy of early-Pliocene ignimbrites from the La Pacana, north Chile: implications for the formation of stratified magma chambers.* *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 120, pp. 43-53.
- SEA. (2012). *Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA.* Chile: Ministerio del Medio Ambiente.
- SEA. (2016). *Calificación ambiental de EIA Modificaciones y mejoramiento del sistema de Ppozas de evaporación en el Salar de Atacama.*
- Sepúlveda, I., Molina, R., Delgado-Serrano, M., & Guerrero, J. (2015). Aguas, riego y cultivo: cambios y permanencia en los Ayllus de San Pedro de Atacama. *Estudios Atacameños. Arqueología y Antropología Surandinas*(51), 185-206.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa Geológico de Chile.
- SGA. (2015). *Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama (Anexo 1). Para Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium.* Santiago, Chile.

- SGA. (2015). *Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama (Anexo 1). Para Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium*. Santiago, Chile.
- SGA, S. e. (2015). *Estudio hidrogeológico y modelo numérico Sector Sur del Salar de Atacama (Anexo 1). Estudio de Impacto Ambiental proyecto "Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium"*. Santiago.
- Singh, V. (1992). *Elementary Hydrology*. Prentice Hall.
- Skrzypek, G., Mydłowski, A., Dogramaci, S., Hedley, P., Gibson, J., & Grierson, P. (2015). *Estimation of evaporative loss based on the stable isotope composition of water using Hydrocalculator*. *Journal of Hydrology*. Volume 523, April 2015, Pages 781-789.
- Solari, M., Venegas, C., Montecino, D., Astudillo, N., Cortés, J., Bahamondes, B., . . . Espinoza, F. (s.f.). *Geología del área de Imilac-Quebrada Guanaqueros, Región de Antofagasta*. Santiago.
- Sproles, E., Orrego, C., & Juliá, C. (2016). *Análisis de indicadores de clima extremo para la región de Tarapacá*. Informe de proyecto FPA-Ministerio de Medio Ambiente.
- SQM. (2009). *Reporte Borde Oriental [Informe Interno]*.- Santiago: [s.n].
- SQM. (2014). *Modelo numérico SP-3. Informe interno*.
- SQM. (2015). *Reanálisis de información hidrogeológica en el sector del Borde Este*. Gerencia de Hidrogeología.
- SQM. (2016). *Informe interno sistema lagunar Soncor, Aguas de Quelana y Peine*. Superintendencia de Geología.
- SQM. (2018). *Modelamiento Geológico del Núcleo del Salar de Atacama [Informe interno]*.- Santiago: [s.n].
- SQM Salar S.A. (Febrero de 2007). Informe N°19. Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico. Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. Santiago, Chile.
- SQM Salar S.A. (Diciembre de 2016). Informe N°20 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico. Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama. Santiago.
- SRGIS. (2018). *Generación de Índices de los Sistemas Lagunares Soncor, Aguas de Quelana, Peine y Tilopozo mediante procesamiento de imágenes satelitales Landsat*. Santiago: SRGIS Geología y Geomática LTDA. Informe para SQM.
- Storti, F., Holdsworth, R. E., & Salvini, F. (2003). Intraplate Strike-Slip Deformation Belts. *Geological Society of London, Special Publications*(210), 197-209.
- Tejeda, I., Cienfuegos, R., Muñoz, J., & Durán, M. (2003). *Numerical modeling of saline intrusion in Salar de Atacama*. *J. Hydrol. Eng.* 8, 25-34.
- Temez, J. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales de Avenida en Pequeñas Cuencas Naturales*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas de España.
- TerraTherma, I. (1986). *Salar de Atacama Brine Reserve Evaluation Phase 1: Recommended Geohydrology Investigation Program*. Amax Exploration Inc.
- Toro, J. (1967). *Evaporación de distintos tipos de suelo de la pampa del tamarugal*. CORFO.
- Travisany. (1978). *Mineralización cuprífera en areniscas de la Formación San Pedro en el Distrito San Bartolo*. Tesis Universidad de Chile, Santiago.
- Turner, D., Cohen, W., Kennedy, R., Fassnacht, J., & Briggs, J. (1999). *Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites*.

- Universidad de Chile. (2016). *Estudio estructural Zona Marginal, sector oriente del Salar de Atacama*. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Informe realizado para SQM Salar S.A.
- USDA. (20 de December de 2018). *Chapter 10*. Obtenido de USDA Natural Resources Conservation Service:
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=stelprdb1043063>
- USGS. (2018). *Landsat missions. SLC-off Products: Background*. U.S. Department of the Interior / U.S Geological Survey.
- Vásquez, C., Ortiz, C., Suárez, F., & Muñoz, J. (2013). *Modeling flow and reactive transport to explain mineral zoning in the Atacama salt flat aquifer, Chile*. *J. Hydrol.* 490, 114-125.
- Velasco, V. (2013). *GIS-based hydrogeologica platform for sedimentary media [Informe]*. - Barcelona : [s.n.].
- Velasco, V., Gogu, G., Vázquez-Suñè, E., Ramos, E., & Alcaraz, M. (2013). The use of GIS-based 3D geological tools to improve hydrogeological models of sedimentary media in an urban environment [Publicación periódica]. *Environmental Earth Sciences*. Volume 68, 2145 - 2162.
- Vuille, M., & Ammann, C. (1997). *Regional Snowfall Patterns in the High, Arid Andes*. *Clim. Chang. High Elev. Sites* 36, 181–191. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8905-5_10.
- W.M.C. (2007). *Informes técnicos para primera adenda EIA Pampa Colorada*. Santiago.
- Warren, J. (2006). *Evaporites, Sediments, Resources and Hydrocarbons* (1st. Edition ed.). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Waterloo Hydrogeologic Latino-America. (1999). *Modelo de Flujo de Aguas Subterráneas del Sector Norte del Salar de Atacama*. Informe final para compañía minera RioChilex.
- Wilkes, E. (1991). *Die Geologie der Cordillera de la Sal, Nordchile*. *BerGeowiss Abh (A)* pp:128- 145.
- Wilkes, E., & Görler, K. (1994). *Sedimentary and Structural Evolution of the Salar de Atacama Depression*. *Congreso Geológico Chileno N°5, Actas, v.1, p. A117-A118, Santiago*.
- Xterrae. (2011). *Modelo Geológico del Salar de Atacama*. SQM Salar S.A.
- Xterrae. (2015). *Soporte a la Exploración y Caracterización de Recursos y Reservas de Salmuera en el Salar de Atacama*. SQM Salar S.A.
- Xterrae. (2018). *Línea de Base de Geología y Geomorfología. Proyecto actualización plan de seguimiento y contingencia ambiental Salar de Atacama. Informe para SQM Salar S.A.*
- Xterrae. (2019). *Proyecto actualización plan de seguimiento y contingencia ambiental. Salar de Atacama, Estudio de Impacto Ambiental. Sección 3.0 – Línea de Base de Geología y Geomorfología. APÉNDICE 3-F. Informe preparado para SQM.* .

9 ANEXOS

9.1 ANEXO MC1 - HIDROLOGÍA

9.2 ANEXO MC2 - CUANTIFICACIÓN DE LA EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

9.3 ANEXO MC3 - INVENTARIO DE PUNTOS DE MEDICIÓN

9.4 ANEXO MC4 - DISEÑO DE INFRAESTRUCTURAS Y GEOLOGÍA

9.5 ANEXO MC5 - PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

9.6 ANEXO MC6 - SERIES DE NIVEL Y PIEZOMETRÍA

9.7 ANEXO MC7 - HIDROQUÍMICA

9.8 ANEXO MC8 - CÁLCULO DE RECARGA Y DESCARGA

9.9 ANEXO MC9 - INTERFAZ SALINA

9.10 ANEXO MC10 – RESOLUCIÓN 296 DE 2016 DE LA DGA

9.11 ANEXO MC11 – BALANCES HÍDRICOS EN SISTEMAS LAGUNARES