



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**SISTEMA HIDROGEOLÓGICO SALAR DE MARICUNGA-QUEBRADA DE PAIPOTE:  
UN APORTE A LA LÍNEA BASE DE LA COMUNIDAD COLLA EL BOLO, REGIÓN  
DE ATACAMA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

ALEJANDRO EDMUNDO BORDEU OSSA

**PROFESORA GUÍA:**  
LINDA DANIELE

**PROFESORA CO-GUÍA:**  
CAROLINA GUZMÁN

**COMISIÓN:**  
MARIANA CERVETTO

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE: Geólogo  
POR: Alejandro Edmundo Bordeu Ossa  
FECHA: Diciembre, 2021  
PROFESORA GUÍA: Linda Daniele  
PROFESORA CO-GUÍA: Carolina Guzmán

## **SISTEMA HIDROGEOLÓGICO SALAR DE MARICUNGA-QUEBRADA DE PAIPOTE: UN APORTE A LA LÍNEA BASE DE LA COMUNIDAD COLLA EL BOLO, REGIÓN DE ATACAMA**

El territorio ancestral colla, y específicamente de la comunidad colla El Bolo, se ubica en los sectores altos de la quebrada de Paipote y el Salar de Maricunga. Debido a la rápida irrupción de proyectos mineros en la zona, la comunidad comienza a elaborar su propia línea base del territorio, con el fin de esclarecer los posibles impactos ambientales que puedan afectarlo. Este trabajo constituye un análisis del sistema hidrogeológico que afecta a la comunidad, desde la perspectiva de un estudio hidrogeoquímico e isotópico de las aguas del territorio ancestral.

El área de estudio se encuentra separada entre 2 cuencas hidrográficas: La cuenca Quebrada de Paipote (CQP), y la cuenca Salar de Maricunga (CSDM). Estas cuencas se encuentran delimitadas entre sí por la Franja de Maricunga, que corresponde a un lineamiento N-S de volcanes inactivos cenozoicos asociados al Sistema de Fallas Domeyko. Esta ha sido considerada como una barrera hidrológica entre las cuencas mencionadas, por lo que se ha considerado a la CSDM hidrológicamente cerrada para cualquier efecto de evaluación ambiental en el sector. Sin embargo, diversos autores han planteado que el no considerar los aportes a cuencas laterales podría traer consecuencias negativas en la gestión hídrica.

Los resultados de este trabajo indican que las aguas de la CSDM se encuentran principalmente enriquecidas en cloruro, sodio, boro y litio, respecto de las aguas de la CQP, debido a que estarían afectadas por los mismos procesos de interacción agua-roca, pero con diferentes intensidades. Por otra parte, la presencia particular de sulfato y nitrato en las aguas de la CQP ha sido asociado a efectos de actividades antrópicas diferentes en ambas cuencas. Sin embargo, la mayor parte de los elementos químicos analizados no muestran diferencias entre las cuencas, y resultados preliminares de estadística multivariante indican que la mayoría de las muestras analizadas se correlacionan entre sí. El análisis de isótopos estables de agua indica que las aguas se ubican en una línea de evaporación que afecta con mayor intensidad a las aguas de la CQP que de la CSDM. Las aguas de la Laguna Santa Rosa muestran mayor evaporación y concentración de componentes químicos que todas las demás muestras analizadas.

A pesar de que el número de muestras analizadas no ha permitido esclarecer la existencia de una conexión entre la CSDM y CQP, esta nueva información, junto a un reanálisis de antecedentes, han permitido elaborar un modelo conceptual que contemple esta posibilidad. La existencia de un sistema hidrogeológico interconectado deberá ser validado por trabajos futuros que contemplen nueva información del área de estudio, los que se detallan en las recomendaciones de este trabajo.

*Dedicado a mi abuela,  
**Carmen Schwarze Tellería,**  
Primera mujer ingeniera en minas de Latinoamérica  
Y una fuente de sabiduría inolvidable  
A quién agradezco mis ganas por estudiar la naturaleza  
E intentar comprenderla*

## Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a la comunidad colla El Bolo por financiar los análisis de este trabajo, y por toda la confianza depositada en mí para contribuir a la prosperidad de su territorio ancestral. Para mí ha sido un honor servirlos en este trabajo que me apasiona. Especialmente a Elena Rivera, presidenta de la comunidad, cuya sabiduría y coraje me dejaron más de una enseñanza para enfrentar la vida en el futuro.

Quiero agradecer a Mariana, por la oportunidad de hacer esta memoria, por apañar con el terreno, y por todas las instancias de aprendizaje en HGA y buena onda que hemos compartido. También a la Caro, por toda esa pega de profe guía y todos los consejos necesarios para llevar a cabo este y varios otros trabajos. A la Amanda, por ser una excelente acompañante de terreno, de pegas, y por sobre todo una muy buena amiga. A mi profesora Linda Daniele, por todo su criterio para acotar todas mis ideas y así acercar este trabajo a la realidad y a la comprensión del medio. Y a todas esas personas que me ayudaron desinteresadamente, especialmente a la Carli, al Mati Taucare, al Jipi y a María Lorca por todos sus comentarios. Les agradezco mucho.

Agradezco a mi familia. A mis padres por todo el apoyo y la confianza en mí, y por todo el camino que ha significado llegar hasta aquí. A mis hermanos, que en nuestros diferentes gustos y caminos siempre encontramos interesantes conversaciones e historias juntos. A la Raquel, por todo su ejemplo, todo su cariño y toda su fuerza. A la Eva, la Rosa y la Alicia, que han sido parte importante de mi vida y a quienes también les debo parte de quien soy. Y a todos quienes estuvieron cerca.

Quiero agradecer muy especialmente a la Kim, con quien entre a la u y desde ahí nos hemos apañado en los carretes, en los estudios y en una gran amistad, y con quién ahora comparto mi vida y mis sueños. Gracias por hacer de todo este proceso una mejor etapa, llena de paseos, de carretes en la silla, de conversaciones poco pretenciosas, de análisis astrales, de los mejores viajes cortos y largos. Kmibi gracias por todo tu amor y por compartir tu tiempo y a tu linda familia conmigo. Por toda tu compañía en este proceso y por toda la que vendrá en nuestro camino.

Agradezco a todos mis amigos que hice en esta etapa, y con los que estoy seguro de que seguiré compartiendo. A la Lore, al Fabio, el Alonso, el Mati y también la Kim, con quienes entré a la universidad y seguimos tomando once juntos, compartiendo nuestras penas y alegrías. Al Abuelo, Carlos, Juanma, Pili, Titi, Keno, aCaro, Simia, Tomi, Arroz, Javi, Migue, Juan, Jefe Rodri, Raviol, Nico, Jasson, Negro, Frani y muchos más, que hicieron de geología una etapa llena de momentos inolvidables: carretes en el patio de los naranjos, terrenos de mucho compañerismo, intensas marchas y discusiones políticas, trabajos juntos, y también paseos y conversaciones que guardo conmigo en lo más profundo de mi espíritu. Quiero agradecer mucho a la Blanca por todo su apoyo, por todo su cariño, conversaciones y buena onda. A todos mis estudiantes que tuve geología, gracias por la oportunidad de enseñar. Agradezco a mis amigos que conservo desde antes de entrar a la u: Matías, Pedro, Trini, Ignacio, con quienes hemos compartido nuestra niñez y ahora la adultez. También a la Coni y a Nelson. Todos son muy importantes para mí, y los que no están en el papel los llevo en mi corazón.

Agradecemos apoyo y financiamiento del Programa de Pueblos Indígenas, Dirección de Diversidad y Género, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ubicación y accesos del área de estudio .....	2
1.1	Estudios Anteriores .....	4
1.2	Hipótesis del trabajo .....	5
1.3	Objetivos .....	5
<b>2</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>6</b>
2.1	Trabajo en terreno .....	6
2.2	Determinación analítica .....	6
2.3	Controles de calidad de los datos .....	6
2.4	Tratamiento de los datos .....	7
<b>3</b>	<b>Caracterización del área de estudio</b> .....	<b>9</b>
3.1	Geomorfología.....	10
3.2	Hidrología .....	12
3.3	Geología.....	14
3.4	Hidrogeología .....	21
3.5	Geoquímica .....	24
<b>4</b>	<b>Observaciones de Terreno</b> .....	<b>26</b>
4.1	Observaciones generales en terreno .....	35

<b>5</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>37</b>
5.1	Parámetros fisicoquímicos .....	37
5.2	Geoquímica de elementos mayoritarios .....	38
5.3	Geoquímica de elementos minoritarios y trazas.....	46
5.4	Análisis multivariante.....	51
5.5	Isotopos estables de hidrógeno y oxígeno .....	54
5.6	Sistema Hidrogeológico Salar de Maricunga-Quebrada de Paipote .....	55
<b>6</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>68</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Precipitaciones medias mensuales en mm en los últimos 30 años, para estaciones DGA cercanas al área de estudio.....	14
<b>Tabla 2:</b> Detalle 12 puntos de muestreo .....	26
<b>Tabla 3:</b> Resultados de muestras de este estudio y estadísticos descriptivos para parámetros fisicoquímicos. Los valores para temperatura (T°) se encuentran en °C y los valores de conductividad eléctrica (CE) se encuentran en µS/cm. ....	37
<b>Tabla 4:</b> Coeficientes de determinación de Spearman entre elementos mayoritarios. Se muestran también los principales estadísticos para cada componente, y su concentración en cada muestra, en mg/l.....	40
<b>Tabla 5:</b> Ecuaciones correspondientes a procesos de dilución mineral que controlan la concentración de elementos disueltos en agua.....	43
<b>Tabla 6:</b> Coeficientes de determinación de Spearman entre elementos minoritarios y trazas principales y respecto a los elementos mayores. Se muestran también los principales estadísticos para cada componente y su concentración en cada muestra en µg/l. ....	46
<b>Tabla 7:</b> Comparación de concentraciones de elementos obtenidas en este trabajo, respecto de normas chilenas de agua potable y riego (NCh. 409 y NCh. 1333 respectivamente). En azul se destacan aquellos valores que superan los límites de la norma de agua potable, en verde aquellas que superan la norma de agua de riego, y en rojo las que superan ambas normas. Las casillas donde no hay datos corresponden a aquellos resultados bajo el límite de detección o sin información. Las siglas n.a. se refieren a que no aplica esa casilla para el elemento correspondiente. ....	50
<b>Tabla 8:</b> Parámetros utilizados para análisis de conglomerados jerárquicos y análisis factorial en este trabajo. En la última columna se observa el sesgo habiendo aplicado la transformación logarítmica. ....	51
<b>Tabla 9:</b> Cargas factoriales tras rotación de Varimax, y resultado de la prueba KMO...53	

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Detalle acceso a zona de estudio. Se destacan principales ciudades y localidades, además de carreteras y caminos para acceder.....	3
<b>Figura 2:</b> Mapa de Cuencas y Subcuencas Hidrográficas de DGA (2010). Línea negra separa cuencas y líneas rojas separan subcuencas dentro de las anteriores. ....	9
<b>Figura 3:</b> Mapa de Geomorfología local en el área de estudio. Se destacan diferencias topográficas y principales ríos, lagunas, quebradas, pampas, llanos, etc. Elaboración propia. ....	11
<b>Figura 4:</b> Estaciones fluviométricas DGA. ....	12

<b>Figura 5:</b> Datos de caudales medios mensuales en l/s en los últimos 25 años (1995-2020), de cada estación de monitoreo fluviométrico. Los gráficos son de elaboración propia con datos de DGA. ....	13
<b>Figura 6:</b> Vertientes en el sector alto de la quebrada de Paipote en las que la comunidad Colla Comuna de Copiapó tiene derechos de aguas inscritos en la DGA. Caudales descritos son asociados a los derechos de aprovechamiento de aguas.....	13
<b>Figura 7:</b> Unidades morfoestructurales Región de Atacama, Chile (modificado de Riquelme y otros (2008)). ....	15
<b>Figura 8:</b> Mapa Geológico simplificado en el área de estudio. Elaboración propia, en base a Mercado (1982), Cornejo y otros (1998) y Mpodozis y otros, 2012).....	19
<b>Figura 9:</b> Mapa donde se destacan las principales fallas a escala regional del área de estudio. De estas destacan en líneas azules gruesas los dos grandes sistemas de fallas del norte de Chile, Sistema de fallas Atacama (SFA) y Sistemas de Fallas Domeyko (SFD). En rojo se observa el área de estudio aproximada, en donde se aprecian lineamientos NNO-SSE Taltal-Maricunga atravesándola. Extraída y modificada de Espinoza y otros (2021). ....	20
<b>Figura 10:</b> Mapa Hidrogeológico simplificado. Elaboración propia en base a Iriarte (1999).....	23
<b>Figura 11:</b> Afloramiento de Vertiente el Peñón.....	27
<b>Figura 12:</b> Detalle de canalización artificial realizada para el muestreo de la Vertiente Ojo de Vaca.....	27
<b>Figura 13:</b> Quebrada Ojo de Vaca. En la imagen se puede observar el punto más alto en donde se podía observar agua fluir muy lentamente, donde la vegetación se observa color verde.....	28
<b>Figura 14:</b> Lugar de muestreo Vertiente El Chinche. No se pudo llegar al punto exacto de surgencia.....	28
<b>Figura 15:</b> Rocas aledañas a la vertiente El Chinche. En rosado se pueden ver los depósitos volcánicos cenozoicos, sobre las formaciones estratificadas. ....	29
<b>Figura 16:</b> Punto de muestreo vertiente El Obispo. Se distinguen sales sobre la vegetación.....	29
<b>Figura 17:</b> Río Astaburuaga. Se puede observar agua congelada debido a la altura y el frío. ....	30
<b>Figura 18:</b> Muestreo vertiente Villalobos. Se observa bastante vegetación y cercanía al volcán Copiapó.....	31
<b>Figura 19:</b> Quebrada Ciénaga Redonda. Se observa vegetación muy localizada a la orilla del cauce. ....	31
<b>Figura 20:</b> Sector muestreo Laguna Santa Rosa (b), en donde se puede observar vegetación y costras de sal a su alrededor. ....	32
<b>Figura 21:</b> Sector al costado de la Laguna Santa Rosa (a), donde se observa bastante vegetación.....	32
<b>Figura 22:</b> Zona de cambio contacto entre las litologías detalladas. Diferentes características sugieren que esta sea una zona de falla importante que podría ser revisada a detalle. ....	33



<b>Figura 23:</b> Punto de muestreo vertiente Vizcachas. Se puede observar una brecha sedimentaria con planos de debilidad en donde aflora el agua.....	34
<b>Figura 24:</b> Se muestra la litología de las rocas cercanas a la surgencia de la vertiente Vizcachas. En a) se observa la brecha polimíctica, la cual tiene planos de debilidad rellenos de arena fina y limo. En b) se observa la lava afanítica.....	34
<b>Figura 25:</b> Sector muestreo Bailahuén.....	35
<b>Figura 26:</b> Sector muestreo vertiente Santa Rosa.....	35
<b>Figura 27:</b> Ubicación de muestras de agua tomadas en este trabajo en mapa Geológico simplificado en el área de estudio. Elaboración propia, en base a Mercado (1982), Cornejo y otros (1998) y Mpodozis y otros, 2012).....	36
<b>Figura 28:</b> Diagramas total sólidos disueltos (TDS) vs cloruro (en mg/l). En la imagen de la derecha se muestra el detalle sin las muestras 4, 8 y 9. ....	38
<b>Figura 29:</b> Diagrama de Piper para muestras tomadas en terreno.....	39
<b>Figura 30:</b> Concentración de elementos mayoritarios (mg/l) vs. concentración de cloruro (mg/l) y sulfato (mg/l). Se detallan coeficientes de determinación de Spearman para cada par. ....	41
<b>Figura 31:</b> Detalle de concentraciones de cationes mayoritarios (mg/l) vs cloruro (mg/l) descartando las muestras 8 y 9.....	42
<b>Figura 32:</b> Gráficos calcio vs sulfato (a), sodio vs cloruro (b) y calcio vs bicarbonato (c) (en mmol/l). Se muestran las líneas de proporción entre los elementos en disolución de sulfato, halita y calcita respectivamente. ....	44
<b>Figura 33:</b> Relaciones en mmol/l correspondientes a la meteorización de plagioclasas albiticas (a), halita (b) y a la participación individual de cada proceso (c y d). ....	45
<b>Figura 34:</b> Concentración de elementos minoritarios y trazas principales ( $\mu\text{g/l}$ ) vs. concentración de cloruro (mg/l). Se detallan coeficientes de determinación de Spearman para cada par. ....	47
<b>Figura 35:</b> Concentración de elementos minoritarios y trazas principales ( $\mu\text{g/l}$ ) vs. concentración de cloruro (mg/l), descartando las muestras 8 y 9. ....	48
<b>Figura 36:</b> Gráficos de relaciones $r_{\text{B}/r_{\text{Li}}}$ (a), $r_{\text{Cl}/r_{\text{As}}}$ (b) y $r_{\text{Cl}/r_{\text{B}}}$ (c) vs. cloruro, ambos en meq/l. ....	49
<b>Figura 37:</b> Dendrogramas obtenidos a partir de todas las muestras de este estudio. ...	52
<b>Figura 38:</b> Proyección de los puntajes factoriales para las muestras de aguas, según los factores F1 y F2. Se pueden observar cómo se agrupan las muestras según sus características. ....	53
<b>Figura 39:</b> Diagrama $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (VSMOW) vs $\delta^2\text{H}$ ‰ (VSMOW) para las muestras obtenidas en este trabajo. Se detallan también las LML (Lorca, 2011) y LMG (Rozanski y otros, 1993). Se muestra también la línea de evaporación seguida por los grupos de muestras obtenidas. ....	54
<b>Figura 40:</b> Mapa Estructural zona de estudio. Se pueden ver en amarillo las fallas reconocidas en Mpodozis y otros (2012). Las fallas reconocidas en el sector sureste de la CSDM se ubican en la traza principal del Lineamiento Taltal-Maricunga (LTM). ....	56
<b>Figura 41:</b> Modelo esquemático sistema hidrogeológico Salar de Maricunga-Quebrada de Paipote .....	58

# 1 Introducción

El Pueblo Colla es un pueblo originario latinoamericano cuyo origen está en los primeros pobladores que habitaron la zona de Jujuy, Argentina, hace unos 12.000 años, que después formó parte del gran estado Inca Tawantinsuyu en el siglo XV. En la actualidad este pueblo habita principalmente las provincias del noroeste de Argentina y, con mayor relevancia desde el siglo XIX, en la precordillera de la Cordillera de los Andes de la Región de Atacama en Chile (Ministerio de Educación y Deportes de la Nación Argentina, 2016). Este pueblo es reconocido oficialmente por el Estado de Chile y representa actualmente el 4.91% de la población de la Región de Atacama (INE, 2018) Desde 1996 los Colla en Chile han formado comunidades para organizarse, y el año 2014 se habían constituido 26 comunidades rurales, en virtud de la Ley Indígena 19.253 (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2016).

Las comunidades del Pueblo Colla Chile conviven en la Región de Atacama con diferentes proyectos mineros, lo cual ha generado diversos conflictos entre ambas partes. Uno de los conflictos más importantes tiene que ver con los recursos hídricos en la zona, ya que la actividad minera provoca incertidumbre sobre el futuro del agua en las comunidades. Además, negativas experiencias han provocado desconfianza en las comunidades sobre los impactos declarados por los proyectos mineros. Un caso emblemático de estos conflictos es el que mantiene la minera aurífera canadiense Kinross Gold con las comunidades, en donde la primera fue declarada responsable de haber secado más de 70 hectáreas de humedales en la Laguna Negro Francisco y Laguna Santa Rosa (Tribunal Ambiental, 2018), y más tarde la minera demandó a las comunidades por una millonaria suma acusándolos de actuar de mala fe (Cárdenas, 2019). Se observa también un escenario similar en Argentina, donde comunidades Colla están en constante enfrentamiento con mineras dedicadas a la extracción de litio en su territorio (Pressly, 2019).

La comunidad Colla El Bolo (en adelante CCEB), de la comuna de Copiapó, se ubica en la zona precordillerana al oeste del Salar de Maricunga en la parte alta de la Quebrada de Paipote, perteneciente a la cuenca hidrográfica homónima (DGA, 2010). El Salar de Maricunga corresponde a una cuenca endorreica en la Puna Chilena, dado que no se ha identificado una conexión superficial con la Cuenca Quebrada de Paipote ni otras cuencas vecinas. En esta última, la comunidad posee derechos de aprovechamiento de agua de vertientes que nacen en las zonas más altas de la cuenca, que son utilizadas con fines agrícolas y actividades ancestrales. El origen del agua de estas vertientes aún no está claro, y los estudios realizados no descartan una posible conexión subterránea entre la cuenca del Salar de Maricunga (CSDM) y la cuenca de la Quebrada Paipote (CQP). Esta conexión podría ser relevante para la sustentabilidad de las vertientes que utiliza la CCEB.

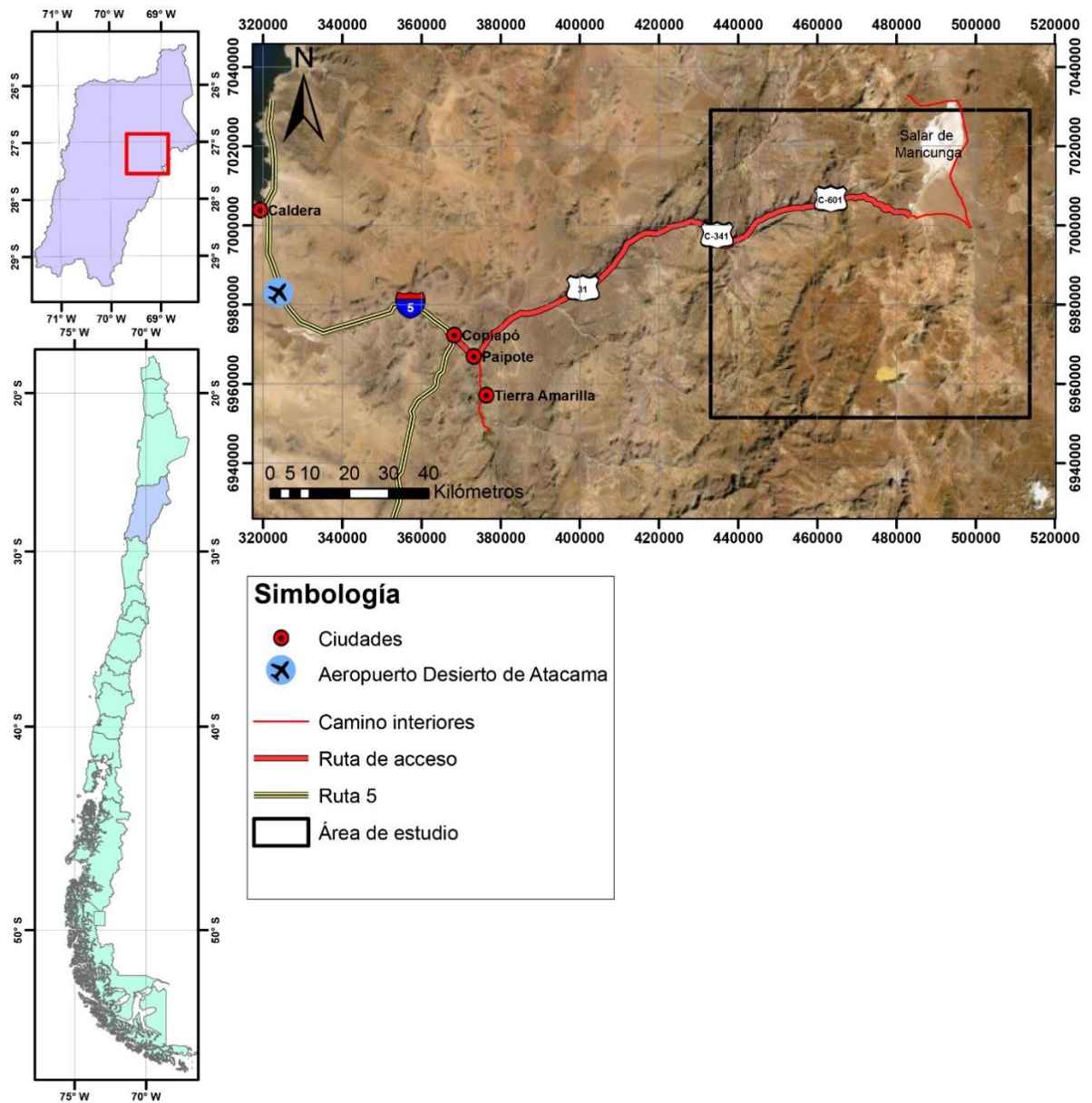
Actualmente se encuentran 2 proyectos aprobados por el Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) para la extracción de litio en el Salar de Maricunga.

Debido a que este elemento es considerado estratégico para las nuevas tecnologías a nivel mundial, resulta atractiva la inversión en operaciones mineras para extraerlo, lo cual se realiza mediante la evaporación de salmueras (COCHILCO, 2020). Esto podría generar impactos en el sistema hidrogeológico local, aún poco conocido en detalle, y podría influir a las vertientes de la parte alta de la CQP si existiera una conexión subterránea entre las cuencas. En las comunidades colla aledañas existe descontento por el éxito de sus observaciones realizadas durante el proceso de participación ciudadana. Debido a esto, la CCEB decide generar su propia línea base, y así poder tener información técnica que permita identificar posibles riesgos ambientales en su territorio. Este trabajo de memoria contribuye interpretando la información de la química de las aguas del sector, y evaluando a través de esta la posible conexión entre cuencas.

### **1.1 Ubicación y accesos del área de estudio**

El área de estudio se localiza en las inmediaciones de la zona alta de la Quebrada de Paipote y en la zona sur del Salar de Maricunga, ubicado en la comuna de Copiapó, Región de Atacama. En la zona sur del salar se encuentra la Laguna Santa Rosa, a 151 km de la ciudad de Copiapó, la cual corresponde la zona más al sur del Salar de Maricunga y se encuentra en el Parque Nacional Nevado Tres Cruces, administrado por CONAF.

Para acceder al área de estudio vía aérea, se debe llegar al Aeropuerto Desierto de Atacama, ubicado a 55 km al norte de Copiapó por la ruta 5. Desde el aeropuerto se utiliza la ruta 5 sur para llegar a Paipote, a 9 km de Copiapó hacia el sur. Desde Paipote se accede a la ruta 31 hacia el este, por la que se debe continuar 69 km completamente pavimentados hasta la intersección con la ruta C-341. Esta última se debe seguir 18 km hasta la intersección con la ruta C-601 y tomar el desvío a la Laguna Santa Rosa en el Salar de Maricunga. Una vez dentro del área de estudio existen diferentes caminos, en su mayoría en muy mal estado, a los cuales se puede acceder en vehículo 4x4 para llegar a los puntos de muestreo. El detalle de las carreteras para acceder al área de estudio se puede ver en la figura 1.



**Figura 1:** Detalle acceso a zona de estudio. Se destacan principales ciudades y localidades, además de carreteras y caminos para acceder.

## 1.1 Estudios Anteriores

En el área de estudio se han realizado diversos estudios, especialmente en el Salar de Maricunga y la CSDM, mientras que en el caso de la parte alta de la CQP son más escasos. Para la obtención de información respecto a la geología de la zona se utilizan los mapas geológicos Salar de Maricunga (Cornejo y otros, 1998) y Laguna del Negro Francisco (Mercado, 1982; Mpodozis y otros, 2012), de escala 1:100.000. Estas cartas corresponden a trabajos realizados por SERNAGEOMIN. Además, se utilizan textos complementarios a los mapas y artículos sobre la geología del área de estudio como Mpodozis y otros (1995), sobre la Franja Oligocena-Miocena de Maricunga, y Espinoza y otros (2021) para complementar con observaciones recientes sobre la geología estructural regional.

El mapa hidrogeológico de la cuenca Salar de Maricunga: sector Salar de Maricunga (Iriarte, 1999), de escala 1:100.000, proporciona antecedentes relevantes sobre el sistema hidrogeológico asociado al área de estudio. Este trabajo, realizado por SERNAGEOMIN, incluye las unidades hidrogeológicas descritas, la química de muestras tomadas en el sector, un mapa y perfil que plasman las características hidrogeológicas principales del sector, entre otras características. En el caso de la parte alta de la quebrada de Paipote se utilizó el trabajo realizado por Lorca (2011) en su tesis para grado de magíster en ciencias mención geología, de la Universidad de Chile. En este trabajo se analiza la hidrogeología e hidrogeoquímica de la CQP, con el objetivo de generar un modelo hidrogeológico conceptual, entregando nuevos datos químicos de aguas y un balance hídrico actualizado de la cuenca.

Otros antecedentes de importancia corresponden a los documentos de líneas bases de Estudios de Impacto Ambiental sometidos al SEIA, en el área de estudio. Estos informes presentan recopilaciones y datos nuevos sobre geología, química de aguas superficiales y subterráneas, geofísica, modelos conceptuales y numéricos, que son utilizados para caracterizar el área de influencia de los proyectos y su impacto en el medio ambiente. En particular 2 proyectos son revisados para este trabajo: Producción Sales de Maricunga, proyecto de extracción de litio ingresado por SIMCO SpA en 2018 y aprobado en 2020, Proyecto Blanco, también de extracción de litio en el Salar de Maricunga ingresado por Minera Salar Blanco S.A. en 2018 y aprobado en 2020. Ambos proyectos corresponden a la CSDM, pero podrían ser fundamentales para entender el funcionamiento de la CQP.

Por otra parte, se utilizaron datos y estudios realizados por la Dirección General de Aguas (DGA) para la caracterización hidrológica del área de estudio. Específicamente son tomados en cuenta los datos de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, para caracterizar las precipitaciones en la cuenca, y también datos de estaciones fluviométricas para analizar el caudal de diferentes cauces en la CSDM y el régimen fluvial en la cuenca. Además, diversos informes técnicos se han realizado con el fin de caracterizar la hidrología en las diferentes cuencas en el norte de Chile (DGA, 2008; DGA, 2009a; 2009b; 2013; 2016), los que se toman en

cuenta con los mismos fines en este trabajo. Finalmente, también se utilizan las delimitaciones de cuencas y subcuencas respectivas del área de estudio (DGA, 2010).

Otros estudios han sido realizados en el área de estudio que son relevantes para el entendimiento del sistema. Uno de estos corresponde al realizado por EDRA (1998), en que se realiza un estudio de la hidrología del Salar de Maricunga. Este se realiza para la Minera Santa Rosa SMC y Minera Mantos de Oro, como parte de la caracterización hidrológica del área de influencia del proyecto Lobo-Marte. Otro de gran relevancia es el realizado por Risacher y *otros* (1999) para la DGA, en el que se revisa la geoquímica de aguas en cuencas cerradas en las regiones I, II y III. Posteriormente el autor presentaría las principales discusiones respecto a estos sistemas en Risacher y *otros* (2003).

## **1.2 Hipótesis del trabajo**

La recarga de las aguas de la CQP proviene de aportes meteóricos y, al menos en parte, de la CSDM, por lo tanto, la sustentabilidad hídrica de la CQP depende de aportes laterales de la CSDM. Esto implicaría que la CSDM no sea hidrológicamente cerrada, al existir una conexión subterránea entre las cuencas.

## **1.3 Objetivos**

Objetivo general

Dilucidar el origen de las aguas utilizadas por la CCEB y su relación con la CSDM, para así contribuir a la generación de una línea base hidroquímica del territorio ancestral perteneciente a la comunidad.

Objetivos específicos

- a) Identificar y caracterizar las manifestaciones de agua y su entorno, tanto en la parte alta de la CQP, como en la zona sur de la CSDM.
- b) Caracterizar químicamente las aguas mencionadas anteriormente.
- c) Elaborar un modelo conceptual esquemático que pueda explicar el funcionamiento del sistema hidrogeológico Quebrada de Paipote-Salar de Maricunga.

## **2 Metodología**

### **2.1 Trabajo en terreno**

Se llevó a cabo una campaña de terreno de 5 días, 8 al 12 de octubre de 2020, con el objetivo de realizar un muestreo de las principales manifestaciones superficiales de aguas que involucran el área de estudio, para obtener datos de elementos mayores, menores y trazas, e isótopos estables de oxígeno e hidrógeno. Para cada uno de los puntos de muestreo se siguió una metodología elaborada en base a trabajos anteriores y recomendaciones de los laboratorios contactados.

El terreno fue realizado en conjunto con miembros de la CCEB, así se determinaron en conjunto las decisiones acerca de los lugares de interés para realizar el muestreo de las aguas. De esta manera se interiorizaron las problemáticas de la comunidad y sus incertidumbres respecto al futuro del territorio indígena.

### **2.2 Determinación analítica**

Las concentraciones de elementos mayores, menores y trazas fueron obtenidas en el laboratorio de Minería y Geoquímica Ambiental de AGQ Labs Chile, mientras que los isótopos estables de la molécula de agua se realizaron en el University of Waterloo-Environmental Isotope Laboratory (UW-EIL), en Canadá. En el caso de AGQ Labs se realizan: análisis de alcalinidad por Titrimetría Automatizada, análisis de aniones mayoritarios y minoritarios por Cromatografía Iónica, análisis de cationes mayoritarios por ICP-OES (Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente) y análisis de elementos traza por ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente). En el caso de las precisiones ( $2\sigma$ ) en AGQ Labs estas varían entre  $\pm 4\%$  y  $\pm 19\%$ , y se pueden observar en el Anexo G. Para el análisis de isótopos estables de  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  en agua, el UW-EIL utiliza dos instrumentos: Los Gatos Research (LGR) y Liquid Water Isotope Analyser (LWIA), modelo T-LWIA-45-EP. Las precisiones ( $2\sigma$ ) correspondientes a estos métodos son  $\pm 0.8\text{‰}$  para  $^2\text{H}$  y de  $\pm 0.2\text{‰}$  para  $^{18}\text{O}$ .

### **2.3 Controles de calidad de los datos**

Con el fin de asegurar la calidad del análisis químico de las muestras se realizaron controles de calidad sobre los datos obtenidos en los laboratorios. El balance iónico verifica que los componentes mayoritarios en la muestra se encuentren en equilibrio. Mediante la fórmula a continuación se obtiene el error asociado al balance iónico de la muestra, el cual indica su desviación respecto al equilibrio electroquímico. Se utilizan valores de cationes y aniones expresados en meq/l, e incluye a los

elementos mayoritarios presentes en las muestras ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ ).

$$\text{Error}(\%) = 100 * \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

En este estudio se consideran mediciones aceptables aquellas que tengan un error de 5% máximo (Hem, 1985), las muestras con errores con valores mayores no se utilizan. Errores mayores podrían implicar la sobreestimación o subestimación de algunos iones, o la falta de una especie por analizar. En los resultados obtenidos en este estudio ninguna muestra supera el 5% de error, llegando a ser la muestra 5 la que obtuvo un mayor valor con 4.93% de error. Por lo tanto, ninguna muestra se descarta por tener un error inaceptable en el balance iónico.

Por otra parte, Cloutier y otros (2008) especifican que parámetros analizados con un elevado número de muestras bajo el límite de detección deben ser descartadas. Para este trabajo se utilizó un criterio tal que se descarta un elemento analizado si un 35% o más de las muestras obtuvieron valores bajo el límite de detección en el elemento en cuestión. Además, para aquellos parámetros con menos de un 35% de muestras bajo el límite de detección, se definió utilizar el 50% del valor del límite para las concentraciones de aquellos elementos. Los elementos disueltos eliminados fueron 16 de 32 (Al, Sb, Be, Bi, Cd, Cr, Sn, Fe, Ag, Pb, Se, Ta, Tl, U, W y Zn), de los que solo Hg, Cu y Co superaron un 10% de mediciones bajo el límite de detección (33%, 25% y 33% respectivamente). La tabla general de los elementos químicos utilizados en este trabajo, posterior a la utilización del filtro por límite de detección anteriormente descrito, se puede encontrar en los Anexos A y B.

## 2.4 Tratamiento de los datos

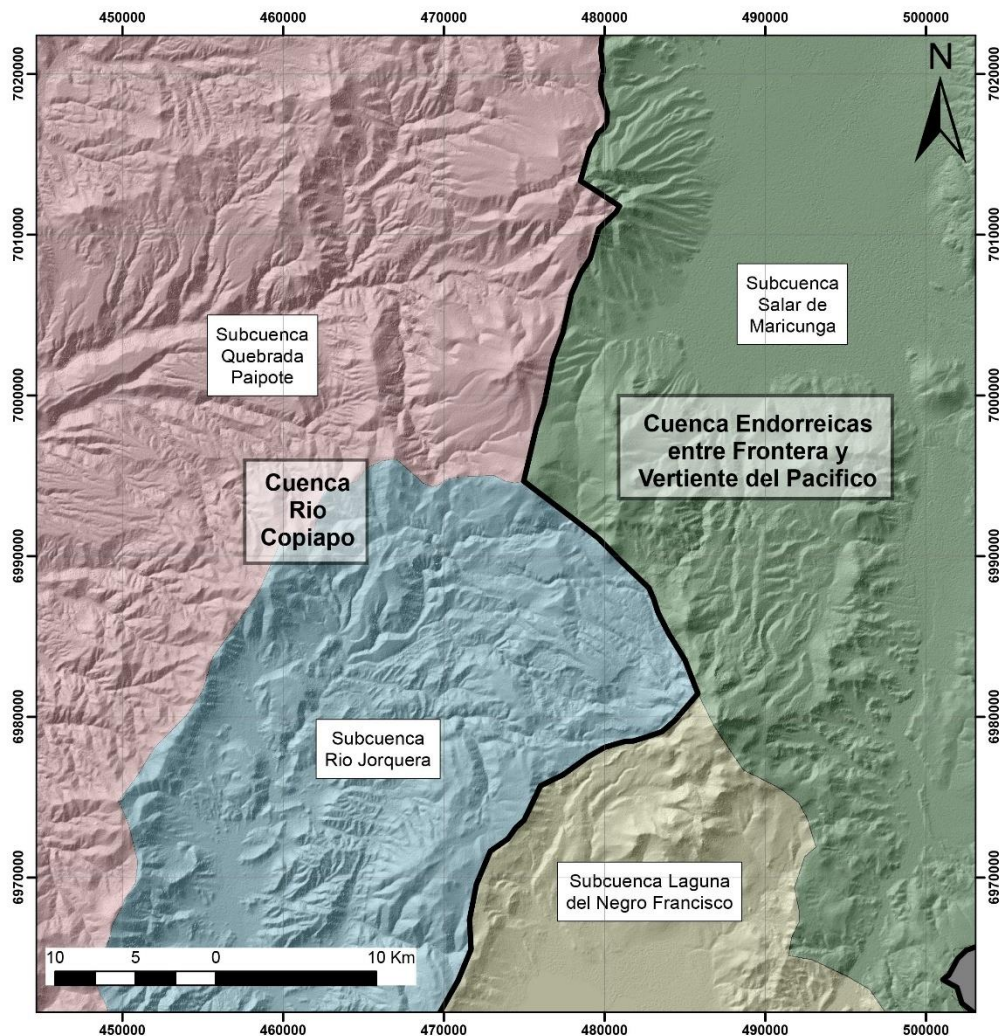
Para la correcta interpretación de los datos se elaboran representaciones gráficas mediante el uso de diferentes softwares. Se utilizó Microsoft Excel 2016 para el manejo de la tabla general de datos, realización de cálculos y elaboración de diferentes diagramas binarios de variables. Los datos recopilados en Excel fueron exportados a la plataforma Geochemist's Workbench Community Edition 15.0 para la generación de representaciones gráficas necesarias para el análisis de los datos de química de aguas, tales como diagramas binarios, multivariados, de Stiff y de Piper. La visualización geográfica de los datos se llevó a cabo en el software ArcMap 10.6.1 de ArcGis, con el fin de mostrar en vista de planta la distribución de muestras, química, unidades geomorfológicas, hidrogeológicas y geológicas del área de estudio.



Se utilizó la extensión de Excel, XLSTAT 2021, para la realización de análisis jerárquico de conglomerados (HCA, por sus siglas en inglés), y análisis de componentes principales (ACP, o análisis factoriales). A través de este software se realizan normalizaciones logarítmicas de los datos para la elaboración de diagramas dendríticos que permiten una mejor visualización de los diferentes grupos de aguas (Guler y otros, 2002). Además, esta extensión se utilizó para calcular coeficientes de correlación y de determinación de Spearman ( $r_s$ ) para los diferentes pares de variables y su posterior análisis (Anexos C a F).

### 3 Caracterización del área de estudio

El área de estudio se ubica hidrográficamente entre las cuencas endorreicas entre Frontera y vertiente del Pacífico y la cuenca Río Copiapó, específicamente en las subcuencas de Salar de Maricunga y Quebrada de Paipote (figura 13). En cuanto a la cuenca del Salar de Maricunga, esta tiene una superficie de 2.205 km<sup>2</sup>, compuesta por las subcuencas sector Salar de Maricunga (1.390 km<sup>2</sup>) y sector Ciénaga Redonda (815 km<sup>2</sup>) inmediatamente al sur (Iriarte, 1999). Se encuentra justo al este de la Franja de Maricunga, y en el centro norte se encuentra el Salar de Maricunga, donde confluyen las aguas superficiales de la cuenca. En el extremo sur del salar se encuentra la Laguna Santa Rosa, dentro del Parque Nacional Nevado Tres Cruces y corresponde también al sitio de protección Ramsar, conocido como Complejo Lacustre Laguna del Negro Francisco-Laguna Santa Rosa. Esta cuenca es considerada endorreica, ya que cualquier tipo de aporte hídrico permanece en este sistema.



**Figura 2:** Mapa de Cuencas y Subcuencas Hidrográficas de DGA (2010). Línea negra separa cuencas y líneas rojas separan subcuencas dentro de las anteriores.

Por otra parte, la CQP posee un área de 6.700 km<sup>2</sup>, siendo la subcuenca de mayor superficie en la cuenca Río Copiapó, a la cual no aporta agua superficialmente. Esta cuenca presenta solo cursos intermitentes de agua superficial, principalmente en las quebradas de Paipote (dentro del área de estudio) y de San Andrés más al norte. Delimita al este dentro del área de estudio con la subcuenca Salar de Maricunga, cuyo límite natural corresponde a la Franja de Maricunga. Esta cuenca fue estudiada en detalle por Lorca (2011), en el que se realizaron caracterizaciones hidrológicas e hidroquímicas, que dieron como resultado que las aguas de la CQP son de origen meteórico, sin descartar posibles aportes subterráneos de la cuenca Salar de Maricunga.

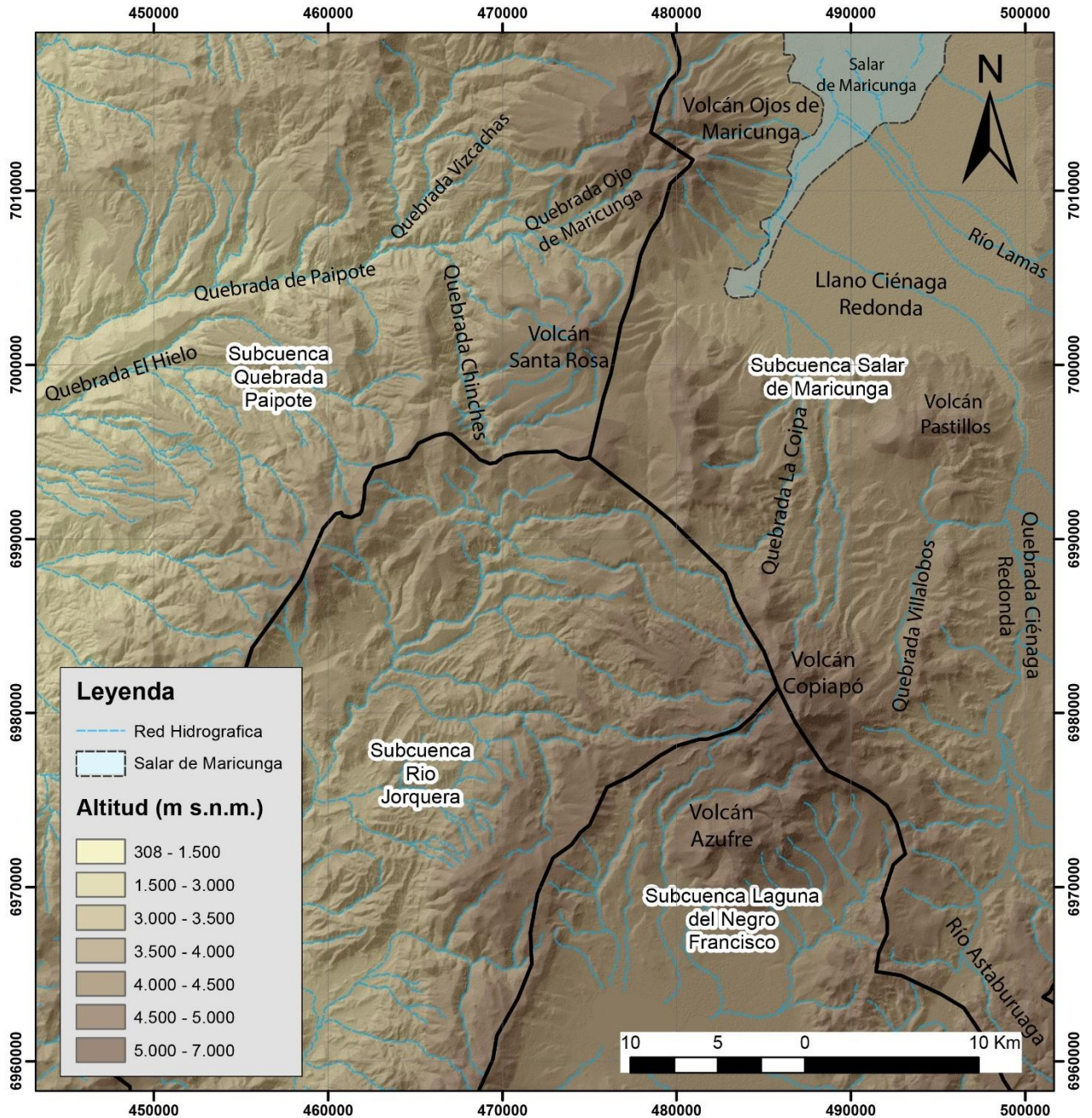
### **3.1 Geomorfología**

El área de estudio se encuentra en el extremo occidental del Altiplano chileno en la Región de Atacama. Incluye las áreas de Quebrada de Paipote sector alto, Salar de Maricunga sur y Laguna Santa Rosa, Llano Ciénaga Redonda y quebrada Ciénaga Redonda hasta el Río Astaburuaga al sur. Además, se incluye la cadena de edificios volcánicos miocenos inactivos de la Franja de Maricunga. El Salar de Maricunga se encuentra a unos 7 km de la divisoria que la separa de la cuenca de Copiapó, en la parte más alta de la Franja de Maricunga. En cuanto a la forma del salar, esta es alargada con orientación norte-sur, y se angosta desde la mitad hacia el sur (DGA, 2008), ubicándose en lo que corresponde a una depresión volcano-tectónica.

Los rasgos geomorfológicos de importancia corresponden a quebradas modeladas por cursos fluviales. Las quebradas afluentes más importantes de la Laguna Santa Rosa y el sector sur del Salar de Maricunga corresponden a, Quebradas La Coipa, Pastillos, Ciénaga Redonda, Villalobos y Santa Rosa. Estas en su mayoría infiltran en el Llano de Ciénaga Redonda y alimentan de manera subterránea el Salar y la Laguna Santa Rosa (DGA, 2008). En el caso del sector alto de la cuenca Quebrada de Paipote se pueden identificar quebradas con vegas y cursos ocasionales. Las principales quebradas, en donde se pueden identificar este tipo de manifestaciones corresponden a las quebradas (de este a oeste), El Peñón, Ojo de Maricunga, Chinchas, Vizcachas, Larga, además de la quebrada de Paipote misma, de la cual son afluentes las anteriormente mencionadas. Hacia el oeste aparecen cada vez más manifestaciones de agua, en donde destaca la quebrada El Obispo, en el sector más occidental del área de estudio. Todas estas observaciones pueden verse en el mapa geomorfológico de la figura 3.

Por otra parte, se pueden observar en toda el área de estudio humedales altoandinos, denominados localmente como “aguadas”, que corresponden a sectores donde el agua subterránea aflora formando ambientes aptos para la flora y fauna local (Zeler y otros, 2014). Debido a la aridez del área de estudio, estas manifestaciones son vitales para la conservación de flora y fauna local, en la que destacan nueve especies vulnerables; cinco en peligro de extinción; tres especies catalogadas como raras y

cuatro en categoría de preocupación menor (Garcés, 2019). Estos humedales se pueden observar en la quebrada Ciénega Redonda y sus afluentes, y en diferentes quebradas en torno a los volcanes de la Franja de Maricunga, y la parte alta de la quebrada de Paipote.



**Figura 3:** Mapa de Geomorfología local en el área de estudio. Se destacan diferencias topográficas y principales ríos, lagunas, quebradas, pampas, llanos, etc. Elaboración propia.

### 3.2 Hidrología

Los principales cursos de agua se pueden observar en la CSDM donde destacan el río Villalobos en la quebrada homónima, río Lamas por el este del Llano Ciénaga Redonda, manifestaciones superficiales en la quebrada Ciénaga Redonda (o río Valle Ancho), y río Astaburuaga en la cuenca Laguna del Negro Francisco. Se puede observar que existen 6 estaciones fluviométricas de la DGA que aportan información de estos cauces (figura 4).

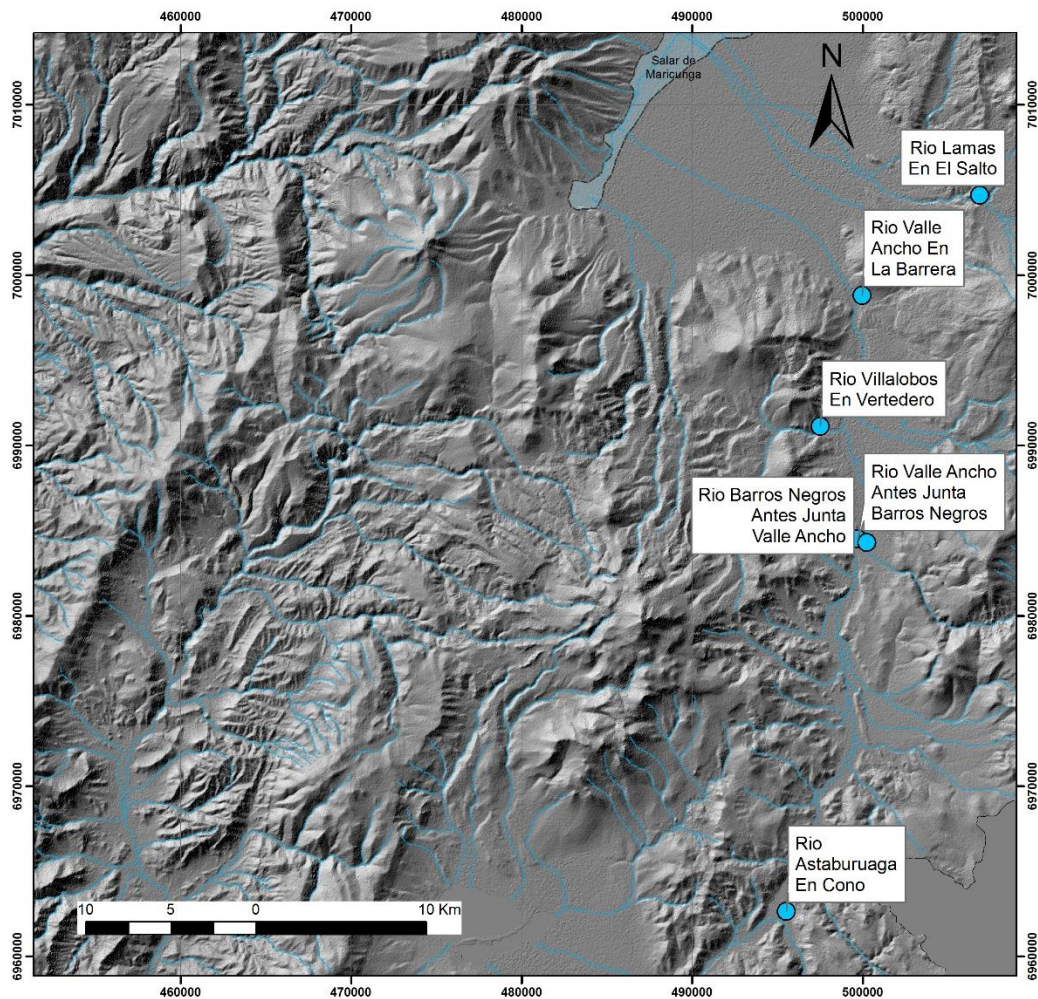
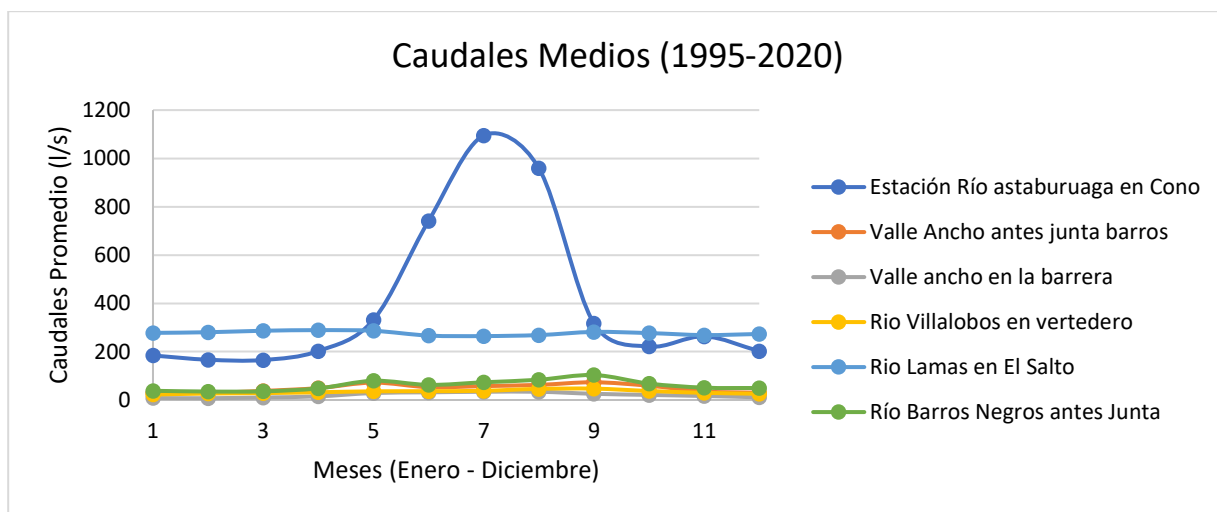


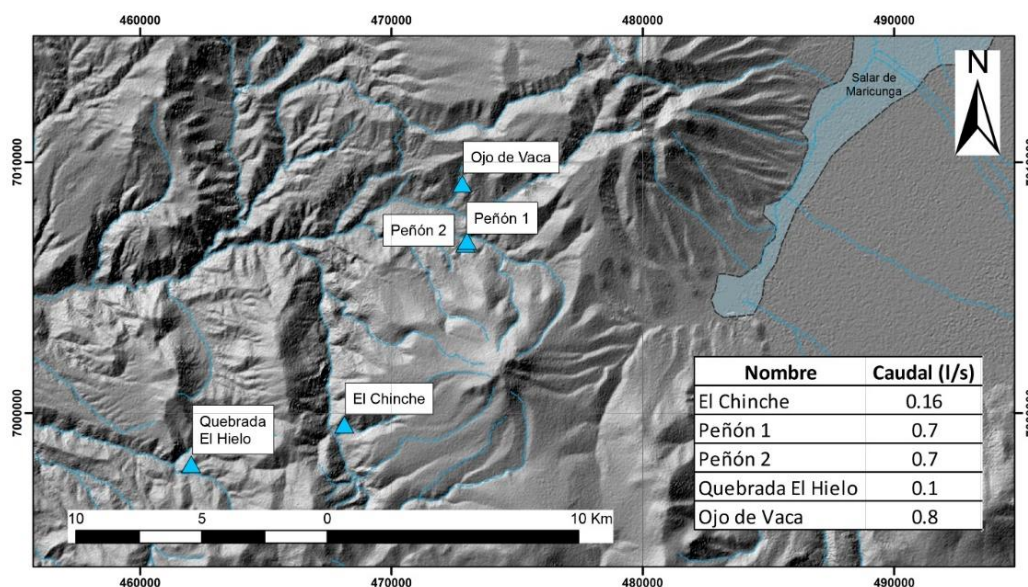
Figura 4: Estaciones fluviométricas DGA.

De las estaciones revisadas, se utilizaron los datos relativos a los últimos 25 años del caudal mensual para calcular un caudal medio mensual en cada una de estas. Con estos datos se llevaron a cabo representaciones gráficas con la variación de los caudales medios mensuales en el año (figura 5). Se puede observar que en general los valores de caudal medio mensual no varían de forma relevante, a excepción de la Estación Río Astaburuaga en Cono, donde existe un claro aumento entre junio y agosto.



**Figura 5:** Datos de caudales medios mensuales en l/s en los últimos 25 años (1995-2020), de cada estación de monitoreo fluviométrico. Los gráficos son de elaboración propia con datos de DGA.

En cuanto a los cauces menores en el área de estudio, los principales corresponden a vertientes en la parte alta de la quebrada de Paipote. Estas vertientes adquieren mayor relevancia al tratarse de cauces que son utilizados directamente en las actividades de los pueblos collas que habitan la zona. De estos, se pudieron adquirir los caudales asociados en los derechos de aprovechamiento de aguas otorgados a las comunidades (figura 6). Además, destacan otras vertientes como Santa Rosa, asociada a la quebrada homónima en la CSDM, y otras menores sin derechos de aprovechamiento de aguas en la quebrada de Paipote asociadas a pequeñas quebradas.



**Figura 6:** Vertientes en el sector alto de la quebrada de Paipote en las que la comunidad Colla Comuna de Copiapó tiene derechos de aguas inscritos en la DGA. Caudales descritos son asociados a los derechos de aprovechamiento de aguas.

Para analizar las precipitaciones se utilizan las estaciones meteorológicas con medición pluviométrica de la DGA, de las que 3 cuentan con un registro de información para los últimos 30 años casi completo. Estas corresponden a las estaciones Copiapó, Las Vegas y Pastos Grandes, con las cuales se calculan las precipitaciones medias mensuales. Los resultados se pueden ver en la tabla 1, donde se puede observar que para las estaciones de la DGA analizadas, las mayores precipitaciones ocurren entre los meses de mayo hasta agosto, correspondientes a las lluvias de invierno. Por otra parte, SIMCO SpA (2018) realizó una estimación de la precipitación media anual en la CSDM, utilizándose distintos datos de la DGA. De estas estimaciones se calculó un promedio que indica 164 mm anuales en la cuenca.

**Tabla 1:** Precipitaciones medias mensuales en mm en los últimos 30 años, para estaciones DGA cercanas al área de estudio.

Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total Anual
Copiapó	0,02	0	1,83	0,11	2,09	5,79	6,18	3,89	0,24	0,07	0	0,11	20,12
Las Vegas	0	0,83	4,03	0,84	6,89	5,67	8,83	4,34	1,03	0,78	0	0,11	32,93
Pastos Grandes	0	1,45	4,91	1,85	5,86	4,71	8,82	3,98	1,24	0,47	0	0,22	33,37

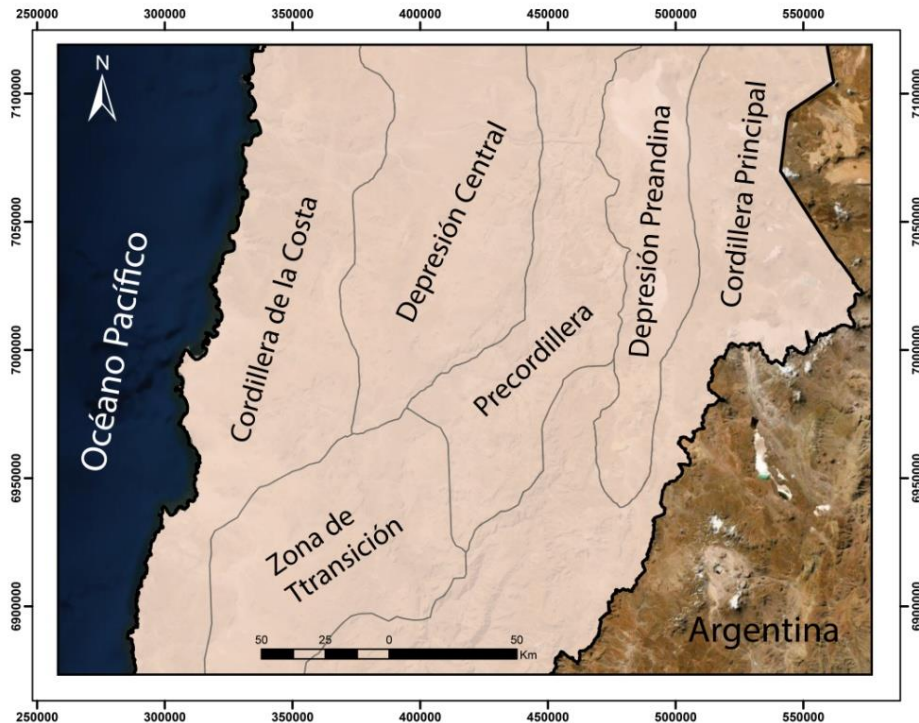
Finalmente, en la CSDM se han realizado cuatro estimaciones relevantes desde el año 1998, las que han sido recopiladas por SIMCO SpA (2018) en la línea base hidrológica para la EIA del Proyecto Sales de Maricunga. Las estimaciones realizadas corresponden a 1518 l/s para EDRA (1998), 1270 l/s para DGA (2009), 1577 l/s para GOLDER (2011) y GOLDER (2016), y 1308 l/s para Flosultions (2018).

### 3.3 Geología

De acuerdo con Riquelme y otros (2008) se pueden definir 6 unidades morfoestructurales longitudinales (figura 7), encontrándose particularmente en la Precordillera y Depresión Preandina. Estas unidades reflejan la evolución del arco magmático desde el Jurásico (Cordillera de la Costa) hasta su posición actual, que mantiene desde hace aproximadamente 25 millones de años (Mpodozis y Ramos, 1990; Scheuber y Reutter, 1992; Scheuber y otros, 1994; Charrier y otros, 2007).

La evolución de los Andes del Norte de Chile ha estado dominada por diversos sistemas o 'arcos' magmáticos, los que han migrado progresivamente hacia el este, posiblemente a causa de fenómenos de erosión por subducción (Rutland, 1971; von Heune y Lallemand, 1990; Stern, 1991). Estos sistemas magmáticos han sido asociados a cuencas extensionales de trasarco y grandes sistemas de fallas transcurrentes, ligadas a fases de convergencia oblicua (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Maksaev, 1990; Mpodozis y Ramos, 1990; Brown y otros, 1993). Posterior al aumento

de la velocidad de convergencia en el Oligoceno superior, a consecuencia de la ruptura de la placa Farallón, comienza la actividad del arco volcánico moderno de los Andes centrales en el norte de Chile (Jordan y Gardeweg, 1989; Coira y *otros*, 1982, 1993). En el área de estudio se puede observar la Franja de Maricunga, de edad oligocena-miocena, como evidencia de estos procesos magmáticos, la que se extiende a lo largo de 200 km con orientación norte-sur (Mpodozis y *otros*, 1995).



**Figura 7:** Unidades morfoestructurales Región de Atacama, Chile (modificado de Riquelme y *otros* (2008)).

La Franja de Maricunga se ubica, desde un punto de vista tectónico, en la zona de transición suave entre el segmento norte, con subducción inclinada, y el segmento central, con subducción subhorizontal, de los andes chileno-argentinos (Smalley e Isacks, 1987; Cahill e Isacks, 1992). Esta se extiende entre los 26° y los 28°S, a lo largo de una cadena de volcanes, actualmente inactivos, al borde occidental del Altiplano. Estos volcanes se encuentran edificados sobre un basamento que incluye unidades del Paleozoico, Mesozoico e inicios del Cenozoico, justo al oeste de elevados 'plateaus', donde se desarrollan las cuencas hidrográficamente cerradas y consecuentes salares (Mpodozis y *otros*, 1995). Al oriente de este 'plateau' se encuentra la Cordillera de Claudio Gay, formada por rocas del basamento paleozoico (Kubaneck y Zeil, 1971; Zentilli, 1991) y secuencias volcanosedimentarias cenozoicas.

En el Altiplano el activo volcanismo durante el Mioceno propició la formación de cuencas endorreicas al este de las franjas volcánicas, a alturas cercanas a los 4000 m s.n.m. Estas barreras topográficas permitieron el desarrollo de salares y lagunas con



alto contenido de sólidos disueltos en gran parte del Altiplano chileno. En el caso del Salar de Maricunga y la Laguna Santa Rosa, estas pertenecen a la cuenca endorreica Salar de Maricunga, la cual es delimitada al oeste por la Franja de Maricunga, donde destacan volcanes inactivos como el Volcán Santa Rosa o el Volcán Ojos de Maricunga.

### **3.3.1 Estratigrafía**

En el área de estudio se pueden distinguir rocas que afloran, tanto de forma estratificada como intrusivos, cuyas edades abarcan desde el Devónico hasta el Mioceno, las que se encuentran cubiertas localmente por sedimentos no consolidados de edades miocenas a holocenas (figura 8).

Respecto al Paleozoico, las rocas estratificadas más antiguas del área de estudio corresponden a la Formación Chinchas (DCch), definida por Mercado (1982) como una secuencia de areniscas y lutitas. Esta formación aflora en el sector central del área de estudio, y se caracteriza litológicamente por una alternancia de lutitas y areniscas de colores grises, verdes y negras, de ambiente subacuático, con intercalaciones de calizas y bancos conglomerádicos, principalmente hacia el techo. La secuencia se presenta bien estratificada, en bancos de 30 cm a 1 m de espesor, mostrando estructuras sinsedimentarias y estratificación gradada, convoluta y cruzada en las areniscas y lutitas. Inmediatamente al este de la formación Chinchas aflora la Formación Pantanoso (Pep), en la zona central del área de estudio. Esta fue definida por Mercado (1982), corresponde a una secuencia volcánica de aspecto macizo a débilmente estratificada, de colores gris-rojizo y rojizo, compuesta por lava, flujos piroclásticos ácidos e intercalaciones de areniscas, conglomerados y brechas volcanoclásticas. La litología de esta formación, de edad pérmica, corresponde a rocas de un característico color rojizo, de origen volcánico ácido, pudiendo encontrarse coladas de riolitas porfíricas, tobas líticas, cristalinas y vítreas, parcialmente soldadas, ignimbritas y brechas volcánicas. Además, pueden observarse escasas intercalaciones de conglomerados y areniscas gruesas (volcalitarenitas), con clastos de la misma naturaleza que las rocas efusivas.

Las rocas más antiguas del Mesozoico corresponden a la unidad del Triásico Superior Estratos El Mono (TrJem), definida informalmente por Mercado (1982) como una secuencia sedimentaria clástica subacuática continental. Esta aflora en la quebrada homónima, en las nacientes de la Quebrada Paipote, y las rocas corresponden a litarenitas y cuarcitas en general, cuyos clastos están compuestos principalmente por fragmentos de cuarzo, riolita, dacita y plagioclasa. El cemento de estas rocas está compuesto por calcita y presentan escaza matriz con una buena selección de los granos, en los cuales ocasionalmente una delgada cobertura de hematita otorga una coloración rojiza, y también, clorita y epidota otorgan una coloración verdosa. Posteriormente se reconocen las rocas jurásicas de la Formación Lautaro (Jl), las que corresponden a una secuencia sedimentaria fosilífera compuesta por areniscas,

calcarenitas, calcilutitas y calizas, definida por Segerstrom (1959). La litología presente en la Formación Lautaro corresponde a rocas calcáreas (Mercado, 1982) que afloran en cuatro franjas de orientación NNE-SSW, delimitadas por fallas inversas que controlan su exposición, al oeste de la Franja de Maricunga. Así, los estratos de la Formación Lautaro se presentan en posición vertical e incluso invertidos. En el área de estudio aflora principalmente la Segunda Franja, en el sector Quebrada El Peñón, donde es cubierta por los flujos volcánicos cenozoicos provenientes del volcán Santa Rosa.

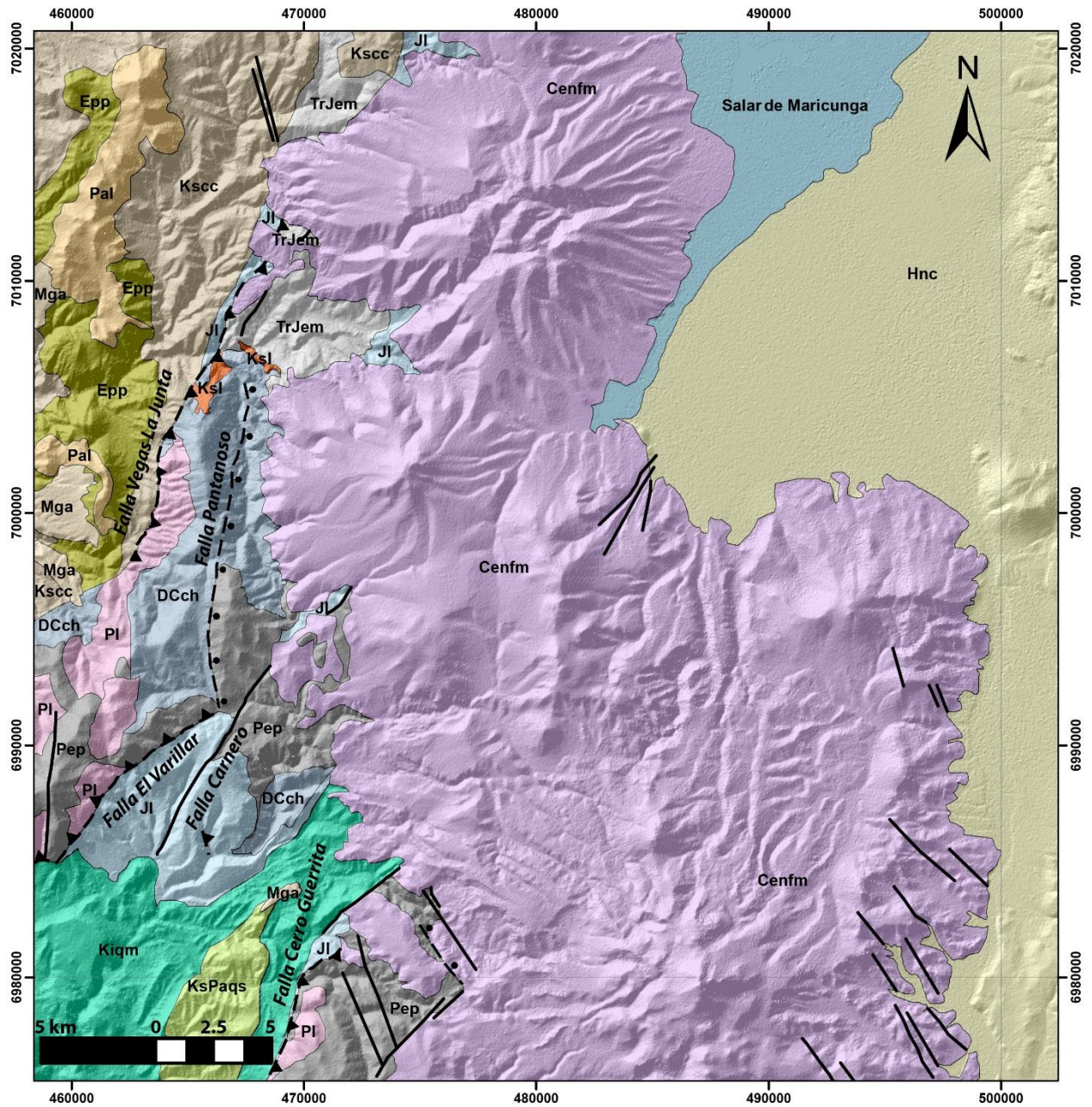
La Formación Quebrada Monardes (Kiqm) corresponde a una secuencia sedimentaria del Cretácico Inferior, predominantemente clástica continental (Muzzio, 1978). Esta formación aflora en el sector suroeste del área de estudio, al sur del volcán Santa Rosa, y se extiende en una franja NNE-SSW hacia el sur. También, a una escala no mapeable, aparecen areniscas rojas de esta formación en la Quebrada El Peñón (Mercado, 1982). La litología de las rocas de esta formación corresponde a areniscas rojas, conglomerados rojos y anaranjados y areniscas conglomerádicas, cuyos clastos son predominantemente volcánicos, andesíticos y riolíticos, y están cubiertos por una fina película de hematita que otorga la coloración rojiza. Hacia la base aparecen niveles evaporíticos y areniscas calcáreas. El cemento de estas rocas es calcáreo en la parte inferior y media de la secuencia, pero se vuelve zeolítico hacia la parte superior. Posteriormente en el Cretácico Superior se reconoce la unidad Estratos de cerro Los Carneros (Kscc), definida en el área de estudio como Depósitos Continentales de Quebrada Paipote, por Davidson y Mpodozis (1978), y luego redefinida por Mercado (1982), como una secuencia de rocas estratificadas de origen volcánico, con edad jurásica superior-cretácica inferior. En Mpodozis y otros (2012) litológicamente esta formación está compuesta por rocas volcánicas y brechas verdosas con fragmentos andesíticos y piroclásticos en una matriz pumícea. También areniscas volcanoclásticas gris-rojizas, depósitos de flujos piroclásticos y sedimentarios finos, brechas y conglomerados verdosos a pardos. Las rocas más jóvenes del Cretácico corresponden a la Formación Quebrada Seca (KsPaqs), definida por Mercado (1982) como una secuencia de rocas sedimentarias clásticas, y flujos volcánicos. En Mpodozis y otros (2012) esta formación se divide en 3 subunidades que afloran en el área de estudio. La primera, en la base, está compuesta por una ignimbrita roja, seguida de conglomerados y brechas volcanoclásticas pardas con estratificación gruesa y estructuras de paleocanales. Luego, el tercer nivel corresponde a lavas dacíticas pardo-rojizas.

Respecto al Cenozoico se pueden reconocer en el sector noroeste del área de estudio las rocas eocenas de la Formación Pircas (Epp), definida por Mercado (1982) como una secuencia de rocas sedimentarias clásticas bien estratificadas. Mpodozis y otros (2012) la divide en 3 subunidades que afloran en el área de estudio. La primera, en la base, está compuesta por brechas sedimentarias pardo-violáceas, conglomerados gris-violáceos areniscas verdes y pardo-amarillentas, con intercalaciones de fangolitas y calizas lacustres, andesitas y tobas. La segunda subunidad corresponde a andesitas basálticas, traquiandesitas y tobas. Luego, el tercer nivel corresponde a conglomerados con clastos de calizas jurásicas, granitoides leucocráticos y riolitas permo-triásicas, que gradan hacia el techo a areniscas feldespáticas. Cubriendo a los Estratos del cerro Los

Carneros y a las rocas de la Formación Las Pircas, al oeste de la Franja de Maricunga, se encuentran las rocas miocenas correspondientes a las Gravas de Atacama (Mga), definida informalmente por Mortimer (1973), como una unidad de sedimentos clásticos mal consolidados, con intercalaciones de ignimbritas, los que se encuentran rellenando el paleorelieve. En esta unidad son comunes las intercalaciones de ignimbritas, que han permitido datar radiométricamente esta unidad por diversos autores en numerosas localidades. Se reconocen también en el área de estudio unidades volcánicas y subvolcánicas correspondientes a la Franja de Maricunga, con edades desde el Oligoceno-Mioceno hasta el Plioceno?. Estas unidades han sido finamente detalladas y pueden subdividirse en siete diferentes fases, definidas en principio por Mpodozis y otros (1995). Se distinguen en esta unidad domos, coladas de lava, tobas y depósitos piroclásticos, de composiciones principalmente dacíticas, aunque también se destacan composiciones andesíticas en algunas subunidades. Muchas de estas rocas muestran signos de alteración hidrotermal moderada a fuerte, con mineralización aurífera (Mpodozis y otros, 2012).

La estratigrafía detallada desde el Devónico al Mioceno de observa ocasionalmente intruida por diferentes unidades intrusivas. En el Paleozoico (PI) destacan en el área de estudio el Batolito El Hielo y la Granodiorita de quebrada Pantanoso. El primero corresponde a un conjunto de granitoides pérmicos (252-260 Ma), donde predominan los monzogranitos hololeucocráticos, y el segundo está compuesto de granodioritas y tonalitas del Paleozoico Superior (<252 Ma) (Mpodozis y otros, 2012). Ambos intruyen a las rocas de las formaciones Chinchas y Pantanoso, pero la Granodiorita de quebrada Pantanoso además intruye al Batolito El Hielo. Se identifican también intrusivos del Cretácico superior (Ksl), que corresponden a los Intrusivos hipabisales andesíticos, que se encuentran intruyendo a las rocas de la Formación Chinchas y a las de los Estratos El Mono. Estas rocas están compuestas de stocks de textura afanítica y porfírica (ocoítas), e incluyen un stock diorítico (Mpodozis y otros, 2012). Los intrusivos más jóvenes corresponden al Paleógeno (Pal), y se pueden identificar cuerpos hipabisales dacíticos y dioríticos. Estos se encuentran en la zona oeste del área de estudio, y se encuentran intruyendo a las rocas de las Formaciones Las Pircas, Estratos del cerro Los Carneros, y Formación Quebrada Monardes (Mpodozis y otros, 2012).

Finalmente se observan unidades de sedimentos no consolidados de edad principalmente cuaternaria (Hnc), los que se distribuyen ampliamente en el área de estudio. Entre estos se distinguen, según Mpodozis y otros (2012): depósitos aluviales antiguos, depósitos lacustres, depósitos salinos, depósitos de remoción en masa, depósitos coluviales y depósitos aluviales. Estos en su mayoría pueden considerarse activos, y pueden llegar a tener alta relevancia en el sistema hidrogeológico.



**Leyenda y Simbología**

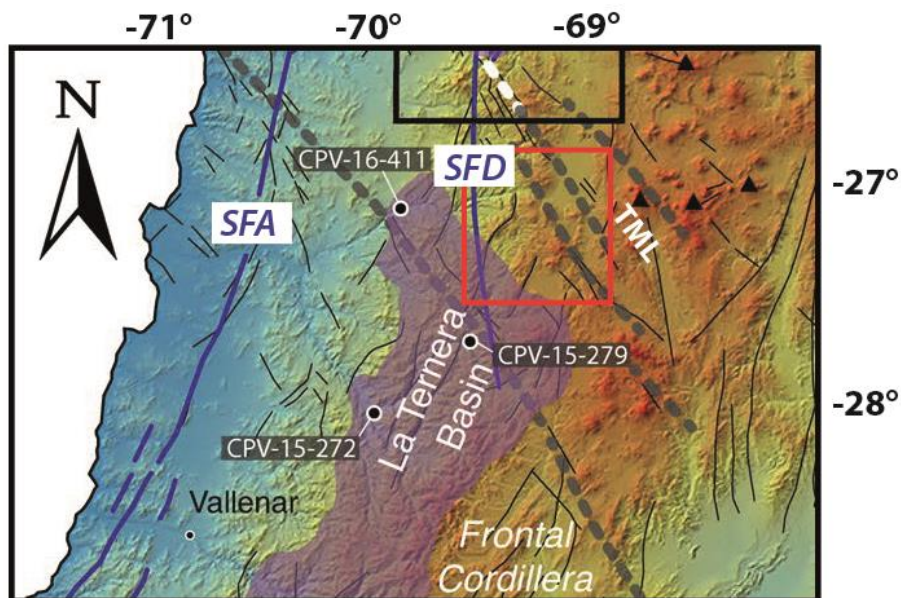
Hnc	Epp	Kscc	JI	Pep	Cenfm	Ksl	— Falla Inversa
Mga	KsPaqs	Kiqm	TrJem	DCch	Pal	PI	— Falla Normal
							— Falla Observada

**Figura 8:** Mapa Geológico simplificado en el área de estudio. Elaboración propia, en base a Mercado (1982), Cornejo y otros (1998) y Mpodozis y otros, (2012).

### 3.3.2 Estructuras

El área de estudio se encuentra dominado por el Sistema de Fallas Domeyko (SFD), además de lineamientos de orientación noroeste de escala continental que cobran relevancia al interceptar los sistemas de fallas norte-sur (Espinoza y otros, 2021). El SFD se ubica a lo largo del eje del arco volcánico desarrollado durante el Cretácico tardío-Eoceno, y corresponde a un sistema de importantes fallas de rumbo. Este sistema se ha utilizado para demostrar la inversión de fallas normales, y cambios en la cinemática de fallas de rumbo (Mpodozis y otros, 1993). Grandes depósitos cupríferos de tipo pórfido cuprífero del Eoceno al Oligoceno temprano, como Chuquicamata, de distribuyen a lo largo de este sistema de fallas. Además, en el área de estudio, la Franja de Maricunga se sobrepone a este sistema de fallas, justo en su extremo sur (figura 9).

Los lineamientos de orientación NO-SE corresponden a sistemas de fallas de escala continental oblicuos a la fosa, los que estarían estrechamente relacionados con la formación de fajas metalogénicas eocenas tardías-oligocenas, debido a su interacción con el SFD (J.P. Richards, 2003; Salfity, 1985). Estos lineamientos corticales han sido asociados a la fábrica pre-Andina del basamento, adquirida en el Paleozoico. Espinoza y otros (2021) resaltan que el rol de estas estructuras en la neotectónica en el antearco Andino ha sido subestimada. En el área de estudio se pueden ver representados por el Lineamiento Taltal-Maricunga (TML en la figura 9).



**Figura 9:** Mapa donde se destacan las principales fallas a escala regional del área de estudio. De estas destacan en líneas azules gruesas los dos grandes sistemas de fallas del norte de Chile, Sistema de fallas Atacama (SFA) y Sistemas de Fallas Domeyko (SFD). En rojo se observa el área de estudio aproximada, en donde se aprecian lineamientos NNO-SSE Taltal-Maricunga atravesándola. Extraída y modificada de Espinoza y otros (2021).

Por otra parte, se pueden encontrar en el área de estudio importantes estructuras de deformación frágil, entre las cuales destacan las fallas Vegas La Junta, Varillar, Pantanoso, Carnero y el extremo norte de la Falla Cerro Guerrita. De oeste a este la primera falla en aparecer es la Falla Vegas La Junta, la cual corresponde a una falla inversa de vergencia al oeste que sitúa las rocas del basamento paleozoico sobre las formaciones del Cretácico superior-Eoceno (Estratos del cerro Los Carneros y Formación Pircas). Inmediatamente al este aparece la Falla Pantanoso, de orientación norte-sur, cinemática normal y manteo al este, la que atraviesa a las unidades rocosas del Paleozoico, justo al oeste el volcán Santa Rosa. Al sur de esta última falla se puede ver el extremo norte de la Falla Varillar, falla inversa de orientación NNE-SSO y vergencia al este, que cabalga las rocas del Paleozoico sobre las formaciones mesozoicas (Lautaro, Quebrada Monardes y Quebrada Seca). Hacia el este aparece la falla observada Carnero, que se observa, con orientación NNE-SSO, atravesando las rocas paleozoicas de la Fm. Pantanosos, y las jurásicas de la Fm. Lautaro. La última falla de importancia también aparece al oeste de la Franja de Maricunga, observándose el extremo norte de esta. Esta es una falla inversa de vergencia al oeste y con orientación norte-sur, la que monta a las rocas paleozoicas sobre las del cretácico superior. Además, se observan diferentes grupos de fallas menores observadas, donde destacan grupos con orientación NNO-SSE especialmente al SE del área de estudio, como también otras con orientación aproximadamente norte-sur.

En cuanto a deformación dúctil se observan pliegues anticlinales y sinclinales en la zona oeste del área de estudio. De estos destaca un pliegue anticlinal en la Formación Chinchas, justo al este de la Falla Vegas La Junta en la Sierra El Hielo.

### **3.4 Hidrogeología**

En la CSDM se reconocen unidades de alta importancia hidrogeológica, las que se encuentran en depósitos no consolidados y corresponden a acuíferos intergranulares, extensos y altamente productivos (Iriarte, 1999). Corresponden a acuíferos libres, de alta a muy alta transmisividad (4000 a 43000 m<sup>2</sup>/día), que pueden llegar a superar los 300 m de espesor. Estos se encuentran en el área de estudio distribuidos en diferentes quebradas, pero principalmente en el Llano Ciénaga Redonda y el Salar. En el caso de la CQP, estas litologías corresponden a acuíferos libres en depósitos no consolidados alojados en depósitos aluviales activos e inactivos expuestos en la quebrada de Paipote (Lorca, 2011). En estos materiales, las aguas subterráneas afloran en vertientes, donde se estrechan estas quebradas y el nivel estático se ubica cercano a la superficie.

Principalmente se distingue solamente un área de importancia hidrogeológica en el área de estudio, particularmente en el sector sur de la CSDM. Este corresponde al acuífero intergranular del Llano Ciénaga Redonda, compuesto por depósitos sedimentarios aluviales y fluviales de gravas y arenas con intercalaciones de arenas finas y limos. La profundidad del nivel estático en esta unidad oscila entre los 7.7 y 45

m, y se estima un espesor total de entre 95 y 110 m. En la base de este acuífero se ha determinado un nivel impermeable de arcillas, y bajo este muy probablemente se encuentra otro acuífero intergranular, cuya profundidad se estimaría en 800 m (Iriarte, 1999).

Por otra parte, se distinguen en Iriarte (1999) unidades de media a baja importancia hidrogeológica, los que se encuentran en la CSDM en depósitos no consolidados y en rocas fisuradas. Los que se encuentran en depósitos no consolidados corresponden a acuíferos intergranulares, locales y con productividad irregular, o también extensos, pero moderadamente productivos. Estas unidades se componen de acuíferos libres o semiconfinados, con transmisividades medias a bajas, y se encuentran geográficamente dispersos. En el caso de la CQP, estas unidades se encuentran en diferentes tipos de depósitos no consolidados. En primer lugar, se pueden encontrar en quebradas secundarias de la quebrada de Paipote, de espesores y recargas menores, que otorgan una menor importancia en relación a la quebrada principal. También pueden encontrarse en depósitos coluviales, en depósitos de poca extensión areal pero de importancia local, y en depósitos de remoción en masa, depósitos aluviales antiguos y en la unidad geológica Gravas de Atacama. En Lorca (2011) no se reconocen en el área de estudio estas unidades en rocas fracturadas en la CQP.

Las unidades de baja importancia hidrogeológica corresponden a rocas o depósitos no consolidados que forman acuíferos menores con recursos de agua locales o limitados. Son acuíferos libres, o probablemente libres y/o confinados, de baja potencia, en general de baja a moderada transmisividad y permeabilidad. En Iriarte (1999), estas unidades tienen bajo a nulo potencial hidrogeológico y pertenecen principalmente a la Franja de Maricunga, que actúa como divisoria de aguas entre las cuencas hidrográficas CSDM y CQP. En la CQP se distingue en el sector de la quebrada Chinchas se distingue una de estas unidades en filones andesíticos, cuya presencia podría relacionarse al fracturamiento de los filones, o la zona de contacto entre estos intrusivos y la roca caja.

Finalmente, se distinguen unidades de nula importancia hidrogeológica en rocas o depósitos no consolidados esencialmente sin recursos de agua subterránea. A pesar de verse altamente fracturados en algunos casos, sus altas pendientes no permiten el almacenamiento. En Iriarte (1999) pueden distinguirse varias unidades, principalmente en altas cumbres. En el caso de Lorca (2011) esta unidad se atribuye al basamento rocoso, que corresponden a las principales formaciones sedimentarias, volcánicas y volcanoclásticas, de edades desde el Paleozoico hasta el Mioceno.

Se puede observar un mapa hidrogeológico simplificado de la CSDM, e inicio de la quebrada de Paipote, en la figura 10. El mapa fue elaborado en base a Iriarte (1999).

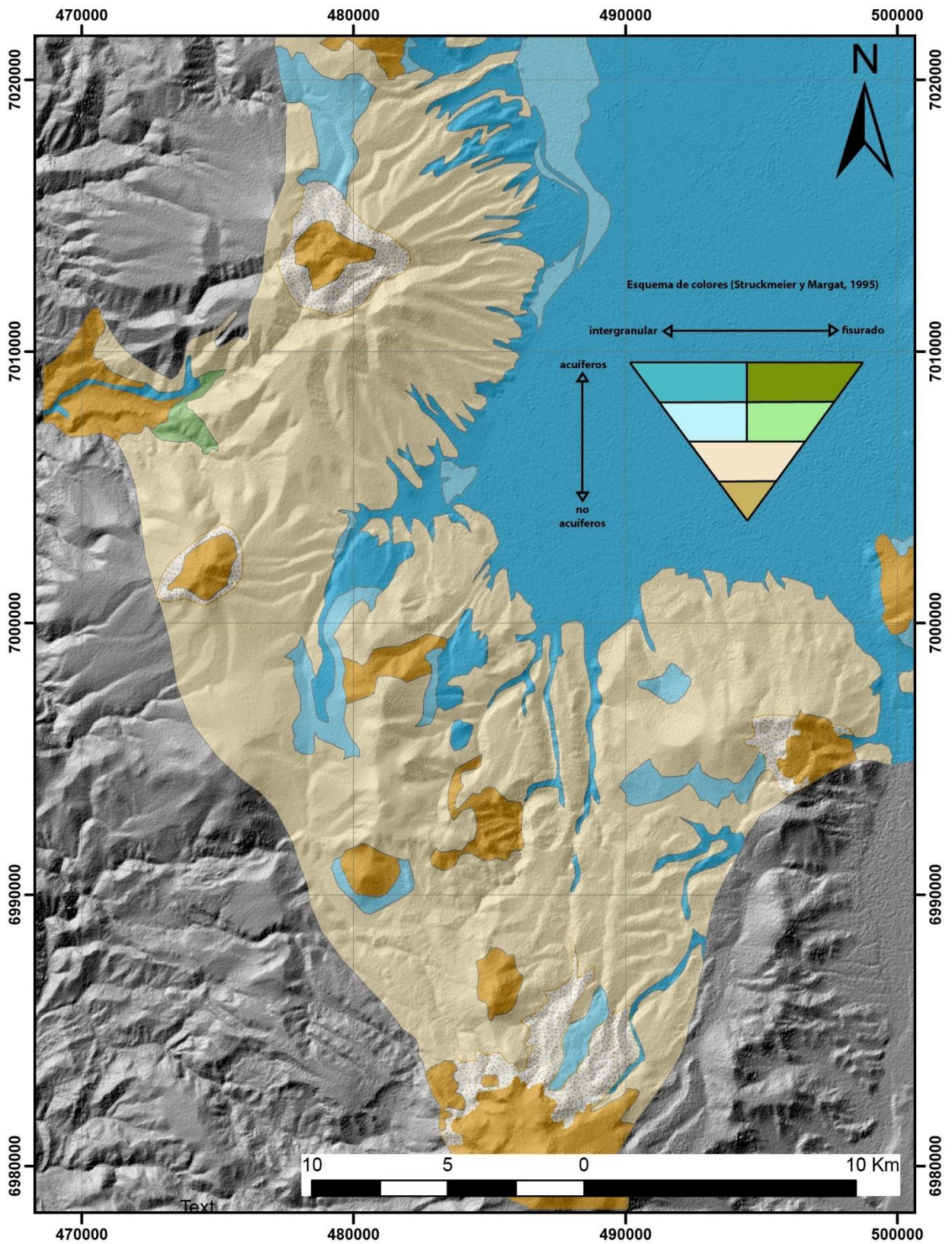


Figura 10: Mapa Hidrogeológico simplificado. Elaboración propia en base a Iriarte (1999).



### 3.5 Geoquímica

Se han realizado diferentes investigaciones hidroquímicas en el área de estudio, especialmente en el área del Salar de Maricunga, desde el año 1968 (Niemeyer, 1968). En el caso de Iriarte (1999), se realizó una recopilación de química de aguas de 38 puntos en la CSDM, específicamente en el sector del salar. De esta recopilación se desprenden diferentes tipos de aguas, donde destacan, por ejemplo, el Río Lamas de tipo clorurado-sódica, al igual que los pozos, gran parte de las Lagunas saladas, los ríos en el Salar, además de la lluvia y nieve. Por otro lado, los cursos superficiales del sector Ciénaga Redonda son de tipo sulfatado a clorurado-cálcica, al igual que las vertientes del sector norte. Los cursos superficiales del sector este son de tipo bicarbonatados, y en el sector sur son cloruradas-sódicas.

Por otra parte, Risacher y otros (1999) realizaron un análisis químico de 30 muestras de agua tomadas durante el año 1995. De estas muestras, 11 corresponden a aguas subterráneas y 19 a aguas superficiales. En este estudio se clasificaron las aguas según vías evolutivas, debido al gran número de tipos químicos de las aguas de aportes a Maricunga. Se concluye que existen 2 vías evolutivas en la laguna, los aportes diluidos pertenecen todos a las vías carbonatada y sulfatadas, lo que refleja composiciones adquiridas por alteración de rocas volcánicas o plutónicas (vía carbonatada y alcalina sulfatada) o volcano-sedimentarias (vía neutra sulfatada). En cambio, ningún agua diluida pertenece a la vía cálcica, que caracteriza terrenos sedimentarios. Así, las principales conclusiones apuntan a la dirección del movimiento de las aguas en el salar (sur a norte) y sus vías evolutivas, además de destacar los altos contenidos de arsénico en arroyos que no podrán ser usados como fuente de agua de riego o potable.

Risacher y otros (2003) elaboraron un estudio en profundidad de las cuencas altiplánicas con salares en el norte de Chile, revisadas anteriormente en Risacher y otros (1999). En este trabajo se indica que la meteorización de rocas volcánicas contribuye a la mayor parte de los componentes de los afluentes. Sin embargo, estas aguas muestran concentraciones mucho mayores, las que provendrían de una mezcla entre aguas meteóricas altamente diluidas y lagos salinos (apoyado por razón Cl/Br e isótopos  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ). Las salmueras infiltradas son “recicladas” en el ciclo hidrológico, en el que se mezclan con las aguas meteóricas. Los flujos de calor, provenientes del sistema magmático, serían la principal fuerza que mueve las aguas profundas incluso fuera de las cuencas. Además, indica que la razón entre la alcalinidad y el calcio se ve considerablemente disminuida debido a la oxidación de azufre nativo y al transporte eólico de yeso. Propone un modelo de reciclaje continuo en estos sistemas que permitiría que las aguas subterráneas mantuvieran sus firmas sedimentarias tempranas. Considera finalmente que estas cuencas no debieran tratarse como estrictamente cerradas.

En EDRA (1998) se incluyeron 9 sondajes perforados por Mantos de Oro (MDO), en el contexto de un estudio hidrológico del Salar de Maricunga como parte de la caracterización hidrológica del área de influencia del proyecto Lobo-Marte (Mineras Santa Rosa SMC y Mantos de Oro). Las diferentes aguas analizadas fueron divididas en 2 sectores principales, norte y sur, siendo las del norte las con mayores concentraciones de sales disueltas, de composición clorurado-sódica. En cuanto al sector sur, este presenta concentraciones de sales disueltas mucho más bajas pero el tipo es clorurado-sódico, y se concluye principalmente que el agua no es apta para el consumo humano.

Por su parte, Lorca (2011) realizó análisis químicos de 38 muestras de la CQP (1 de noria, 21 de pozos y 15 de vertientes), y 5 de la CSDM (2 de lagunas, 1 de pozo y 2 de vertientes). De estas, además, 24 también fueron sometidas a análisis de isótopos estables de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ . En este estudio se caracterizan el tipo de aguas en la CSDM como clorurado-sódicas, y por tanto más evolucionadas, en cambio en la CQP se caracterizan como principalmente sulfatado-cálcicas, y en las zonas más elevadas como bicarbonatados-sulfatados-cálcicas. Además, en las zonas altas se observa que las aguas tienen menor salinidad y más bicarbonatos que el resto. Los isótopos estables indican procesos de evaporación ya que se encuentran levemente desviadas hacia la derecha de la Línea Meteórica Local. Finalmente, entre otras conclusiones, se sugiere que no es posible determinar una conexión entre las cuencas CSDM y CQP con los datos obtenidos, pero se sugiere el uso de bromuro como trazador. Agrega además que, de existir una conexión, esta sería de poco caudal y podría cambiar localmente la química de las aguas, y sería improbable debido a la disposición norte-sur del SFD.

## 4 Observaciones de Terreno

Se obtuvieron muestras de aguas de 12 puntos de interés en el área de estudio, siguiendo la metodología planteada. La ubicación de estas muestras, la hora de muestreo y el tipo de agua de cada una se puede observar en la tabla 2. Se detallan a continuación las principales observaciones relativas a cada uno de los puntos de muestreo.

Tabla 2: Detalle 12 puntos de muestreo

ID	Tipo	Hora	Zona	UTM S	UTM E	Altitud
1	Vertiente	9:37 - 12:00	19 H	7006761	473836	3600
2	Vertiente	13:46 - 15:20	19 H	7008769	472623	3517
3	Vertiente	17:16 - 18:00	19 H	6999397	468116	3578
4	Vertiente	19:34 - 20:25	19 H	6999063	443330	-
5	Río	12:30 - 14:00	19 H	6960722	495961	4312
6	Vertiente	15:15 - 16:15	19 H	6988598	494258	4107
7	Vertiente	17:00	19 H	6998043	499570	3941
8	Laguna	18:40	19 H	7004580	482639	3775
9	Laguna	18:40	19 H	7004580	482639	3775
10	Vertiente	9:52 - 12:10	19 H	7012355	469526	3626
11	Vertiente	16:13 - 17:14	19 H	7016952	467765	3504
12	Vertiente	9:34	19 H	7002912	479787	3868

### Muestra 1: Vertiente El Peñón

En este lugar la amplitud de la quebrada El Peñón tiene un máximo de 20-25 m, y corresponde al extremo más alto donde se observa vegetación. El punto de surgencia se encuentra entre la vegetación, que hacía bastante difícil el acceso a muestrear (figura 11). Desde este punto la vegetación se vuelve abundante, aguas abajo.

El agua surge de entre las fracturas de un afloramiento rocoso homogéneo de color marrón claro, correspondiente a una arenisca. Se observó estratificación con una disposición N20E/40SE y 2 sets de diaclasas principales con disposiciones de N10E/90 y N35W/90. Sobre estas rocas en la quebrada se observan lavas de los volcanes cenozoicos que cubren a los depósitos mesozoicos.



**Figura 11:** Afloramiento de Vertiente el Peñón.

### **Muestra 2: Vertiente Ojo de Vaca**

Se ubica en la Quebrada Ojo de Vaca, la cual se angosta bastante en su zona más alta, con una amplitud máxima de 20 m, con alta concentración de vegetación. Cuesta observar el flujo debido a lo lento de este entre la vegetación. En las laderas de esta quebrada se observaron afloramientos de tobas cristalolíticas macizas y homogéneas color rosado grisáceo, con fracturas de aparente rumbo NE (figura 13). Para poder tomar una mejor muestra se canalizó artificialmente una zona con una amplitud de aprox. 15 cm (figura 12).



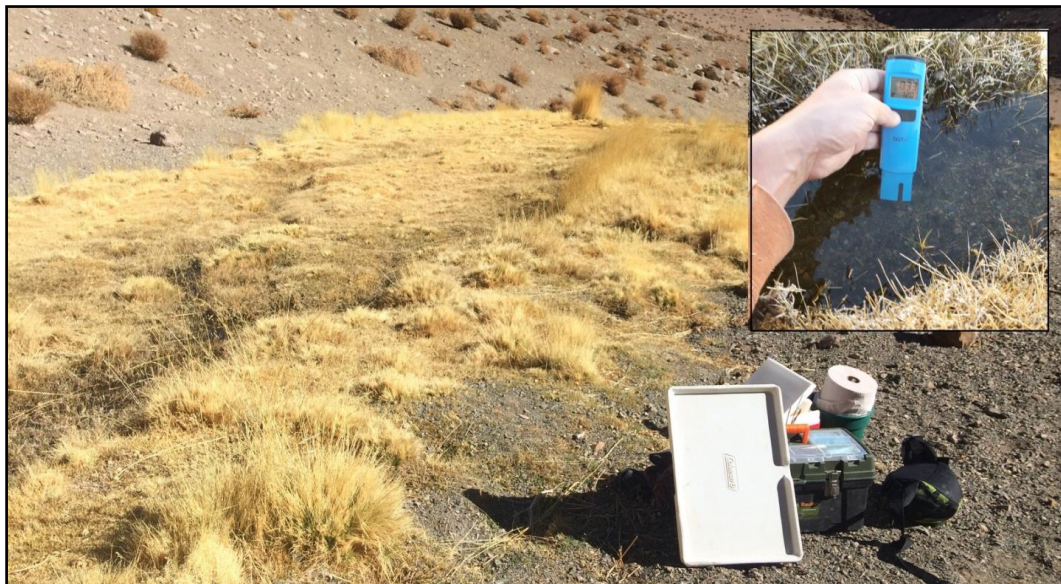
**Figura 12:** Detalle de canalización artificial realizada para el muestreo de la Vertiente Ojo de Vaca.



**Figura 13:** Quebrada Ojo de Vaca. En la imagen se puede observar el punto más alto en donde se podía observar agua fluir muy lentamente, donde la vegetación se observa color verde.

### **Muestra 3: Vertiente El Chinche**

Se ubica en una encajonada quebrada que descarga en la quebrada El Chinche, con una amplitud máxima de 10 m y está marcada por una contundente vegetación. En los flancos de la quebrada se pueden ver sedimentos no consolidados, y sobre estos se aprecian afloramientos con estratificación subhorizontal de colores gris-marrón y amarillentos (figura 15). El caudal de la vertiente muestreada fluye de manera continua con una apertura de 15 cm (figura 14).



**Figura 14:** Lugar de muestreo Vertiente El Chinche. No se pudo llegar al punto exacto de surgencia.



**Figura 15:** Rocas aledañas a la vertiente El Chinche. En rosado se pueden ver los depósitos volcánicos cenozoicos, sobre las formaciones estratificadas.

#### **Muestra 4: Vertiente El Obispo**

Esta vertiente se encuentra muy cerca de las instalaciones de la CCEB y es una de las más importantes, ya que se usa para riego. El agua fluye continuamente por una sección de aprox. 50 cm rodeada de mucha vegetación (figura 16). Se identifica un fuerte olor a azufre y cristalización de sales en la vegetación circundante.



**Figura 16:** Punto de muestreo vertiente El Obispo. Se distinguen sales sobre la vegetación.

### **Muestra 5: Río Astaburuaga**

Se encuentra en el valle del Río Astaburuaga, en la subcuenca Laguna del Negro Francisco, con 30-40 m de amplitud (figura 17). Se observan hacia los costados afloramientos bastante alterados y meteorizados, con colores que varían entre morado, amarillo y rojizo. La vegetación se concentra en las cercanías del río, el cual tiene un ancho de entre 1.4 y 2 metros.



**Figura 17:** Río Astaburuaga. Se puede observar agua congelada debido a la altura y el frío.

### **Muestra 6: Vertiente Villalobos**

Se tomo una muestra en una gran vega de 30 m de amplitud y con extensa vegetación y ojos de agua (figura 18). Las paredes del valle se observan levemente bajas, de 20 m de alto y cubiertas por sedimento no consolidado volcánico. En la ladera SE se observa un afloramiento fracturado de color marrón-rosado con sets de diaclasas subverticales. El punto de muestreo corresponde a un cauce de 1 m de ancho donde el agua fluye lentamente, además de estar rodeada de extensa vegetación.



**Figura 18:** Muestreo vertiente Villalobos. Se observa bastante vegetación y cercanía al volcán Copiapó.

### **Muestra 7: Quebrada Ciénaga Redonda**

Este punto de muestreo se ubica en la quebrada Ciénaga Redonda, en el último lugar donde se observa agua superficialmente antes de infiltrarse en el sector del Llano Ciénaga Redonda. Se reconoce una vertiente de 0.7-1 m de ancho y vegetación localizada en la orilla del cauce (figura 19). La quebrada tiene una amplitud de 120 m y se encuentra rellena de sedimento no consolidado. A 20 metros de este punto se midió en un pozo un nivel piezométrico de 3925.4 m s.n.m., a 15.6 metros de profundidad.



**Figura 19:** Quebrada Ciénaga Redonda. Se observa vegetación muy localizada a la orilla del cauce.

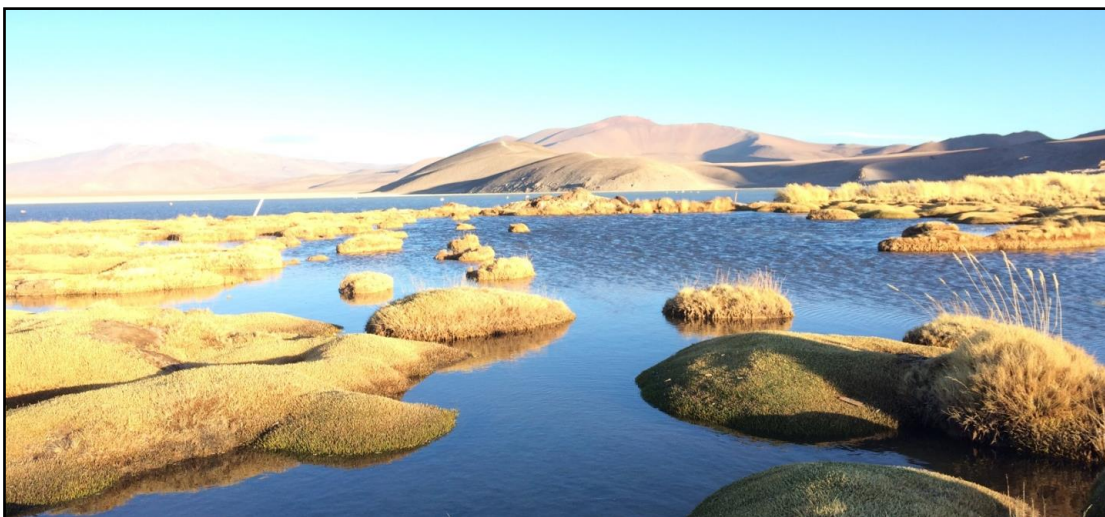


## Muestras 8 y 9: Laguna Santa Rosa

A la orilla oeste de la Laguna Santa Rosa, sur del Salar de Maricunga, frente a la casa/refugio de CONAF. Se lleva a cabo muestreo en 2 puntos: (a) lagunilla externa que podría ser afluente de la Laguna Santa Rosa (figura 21), y (b) en la Laguna misma (figura 20). El sector está marcado por la presencia de vegetación y fauna.



**Figura 20:** Sector muestreo Laguna Santa Rosa (b), en donde se puede observar vegetación y costras de sal a su alrededor.



**Figura 21:** Sector al costado de la Laguna Santa Rosa (a), donde se observa bastante vegetación.

## Muestra 10: Vertiente Las Vizcachas

Se encuentra en la quebrada Vizcachas, en un pequeño cajón de sentido E-W y de 8-10 m de amplitud. En el punto donde aflora el agua corresponde a una roca sedimentaria muy fracturada donde se puede apreciar un menor tamaño de la matriz y muy poco clasto mayor tamaño (figura 23).

Observando al oeste se observa una lava masiva de color marrón oscuro a negro, de cristales muy pequeños, textura afanítica y con muchas fracturas (figura 24b). Al este se observa en cambio una brecha sedimentaria con algunos clastos redondeados de tamaño entre 2 cm y 1 metro, polimícticos y con matriz color grisácea tamaño arena media (figura 24a). Esta última muestra presencia de vetillas de calcita de entre 0.5 a 1 cm. Cercano al contacto entre las litologías la roca se encuentra altamente fracturada, por lo que no se descarta una posible zona de falla (figura 22).



**Figura 22:** Zona de cambio contacto entre las litologías detalladas. Diferentes características sugieren que esta sea una zona de falla importante que podría ser revisada a detalle.



**Figura 23:** Punto de muestreo vertiente Vizcachas. Se puede observar una brecha sedimentaria con planos de debilidad en donde aflora el agua.



**Figura 24:** Se muestra la litología de las rocas cercanas a la surgencia de la vertiente Vizcachas. En a) se observa la brecha polimíctica, la cual tiene planos de debilidad rellenos de arena fina y limo. En b) se observa la lava afanítica.

### **Muestra 11: Vertiente Bailahuén**

Se ubica en la quebrada Larga, sector Bailahuén, de 15 m de ancho donde se observa un ojo de agua (figura 25). Este tiene 1 metro de ancho y 42 cm de profundidad, el agua se encuentra estancada, con color verdoso y musgo. Frente al ojo de agua se observa un afloramiento hacia el sur color rosado homogéneo con muchas diaclasas subverticales y planos horizontales correspondientes a una toba.



**Figura 25:** Sector muestreo Bailahuén.

### **Muestra 12: Vertiente Santa Rosa**

En la quebrada Santa Rosa, de 20 m de ancho y las laderas se encuentran cubiertas con material no consolidado de tobas rosadas-grisáceas. En el centro de la quebrada se encuentra un humedal (figura 26), en donde no se reconocen flujos de agua, pero sí estancada y a veces congelada. Se observa vegetación que continúa hasta muy abajo en la quebrada.

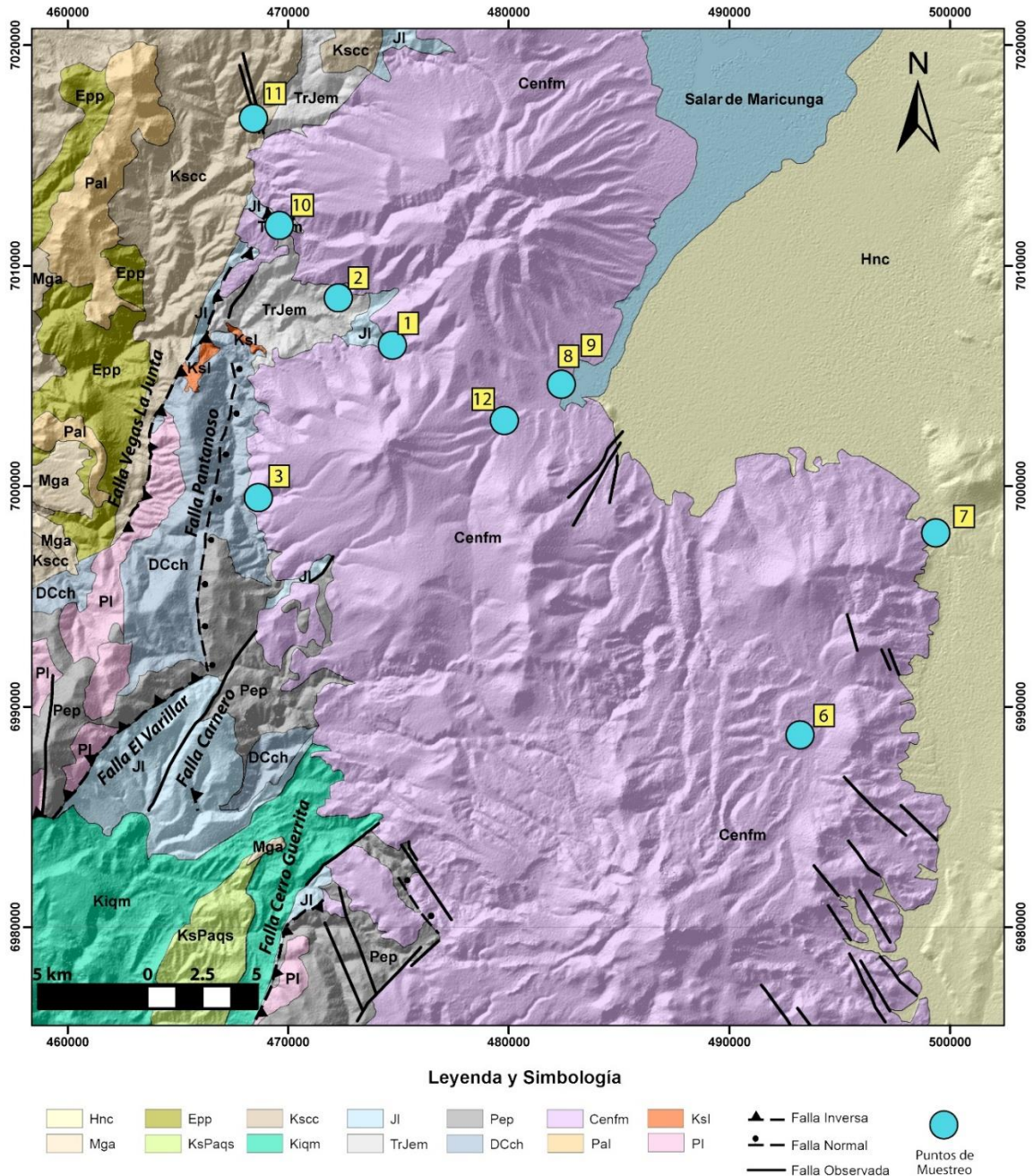


**Figura 26:** Sector muestreo vertiente Santa Rosa.

### **4.1 Observaciones generales en terreno**

Las principales observaciones de terreno corresponden a que las aguas observadas tienen una estrecha relación con la geología local. Las muestras de la CQP fueron todas identificadas con sus cabeceras en el límite entre las unidades volcánicas de la Franja de Maricunga y las rocas mesozoicas y paleozoicas que se encuentran

bajo las anteriores (figura 27), a excepción de la muestra número 4. Además, destaca la presencia de zonas importantes de falla que no han sido descritas anteriormente y que podrían ser de gran importancia para el entendimiento del sistema hidrogeológico. Finalmente es importante resaltar la dificultad de encontrar algunos de los afloramientos de agua, los que no hubieran sido posibles de identificar sin la ayuda de la CCEB.



**Figura 27:** Ubicación de muestras de agua tomadas en este trabajo en mapa Geológico simplificado en el área de estudio. Elaboración propia, en base a Mercado (1982), Cornejo y otros (1998) y Mpodozis y otros, (2012).

## 5 Resultados y discusión

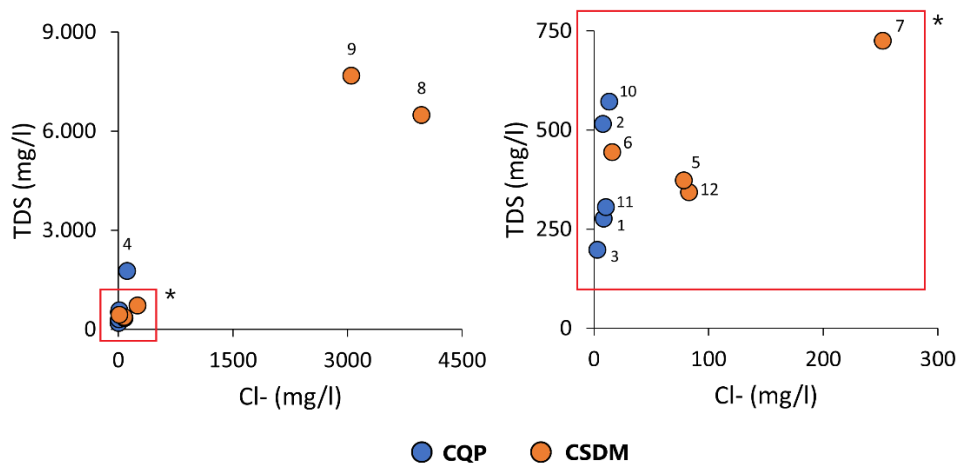
### 5.1 Parámetros fisicoquímicos

Las medidas de pH *in situ* de estas aguas entregan valores en el rango neutro a alcalino (6.73 a 9.23), con valores promedio de 8 (tabla 3). Estos valores de pH descartan procesos que acidifiquen el agua naturalmente, como la oxidación de pirita, o de manera antropogénica, como la interacción con botaderos mineros. En el caso de las muestras más alcalinas, como lo es la muestra 11, puede deberse a una mayor actividad biológica, que en este caso particular se asocia al estancamiento del agua y a la alta presencia de vegetación en el afloramiento. Las aguas de la CSDM muestran valores levemente más alcalinos que las de la CQP, a pesar de que las muestras 6 y 11 no muestran esta correlación geográfica. Las medidas de pH realizadas en laboratorio muestran diferencias respecto a las medidas *in situ* que oscilan entre 0.04 a 0.95, con un promedio de 0.33. Las temperaturas obtenidas para las diferentes muestras de aguas varían entre los 4.2 °C, en la muestra 12, hasta los 18.6 °C, en la muestra 4. Los resultados son completamente dispersos, incluso al compararse respecto a la altitud a la que fue tomada cada muestra. Esto último se puede asociar a que las diferentes muestras fueron tomadas a distintas horas del día, variando así su temperatura.

**Tabla 3:** Resultados de muestras de este estudio y estadísticos descriptivos para parámetros fisicoquímicos. Los valores para temperatura (T°) se encuentran en °C y los valores de conductividad eléctrica (CE) se encuentran en µS/cm.

	<i>pH (in situ)</i>	<i>pH (lab)</i>	<i>T° (in situ)</i>	<i>CE (in situ)</i>	
Resultados en muestras	1	8,21	8,02	12,2	430
	2	7,45	7,78	14,5	740
	3	7,77	8	12,1	330
	4	7,45	7,59	18,6	2390
	5	8,37	8,41	7,3	690
	6	6,73	7,13	7	670
	7	8,44	8,3	14,5	1270
	8	8,9	8,57	11,7	11900
	9	8,43	7,93	8,3	11600
	10	7,35	7,69	7,4	830
	11	9,23	8,85	15,6	520
	12	8,55	7,6	4,2	700
Estadísticos	<i>Mínimo</i>	6,73	7,13	4,2	330
	<i>Máximo</i>	9,23	8,85	18,6	11900
	<i>Promedio</i>	8,07	7,99	11,12	2672,5
	<i>Mediana</i>	8,29	7,97	11,9	720
	<i>Desv. Est.</i>	0,70	0,46	4,11	4092,71
	<i>Sesgo</i>	-0,24	0,12	0,07	1,73

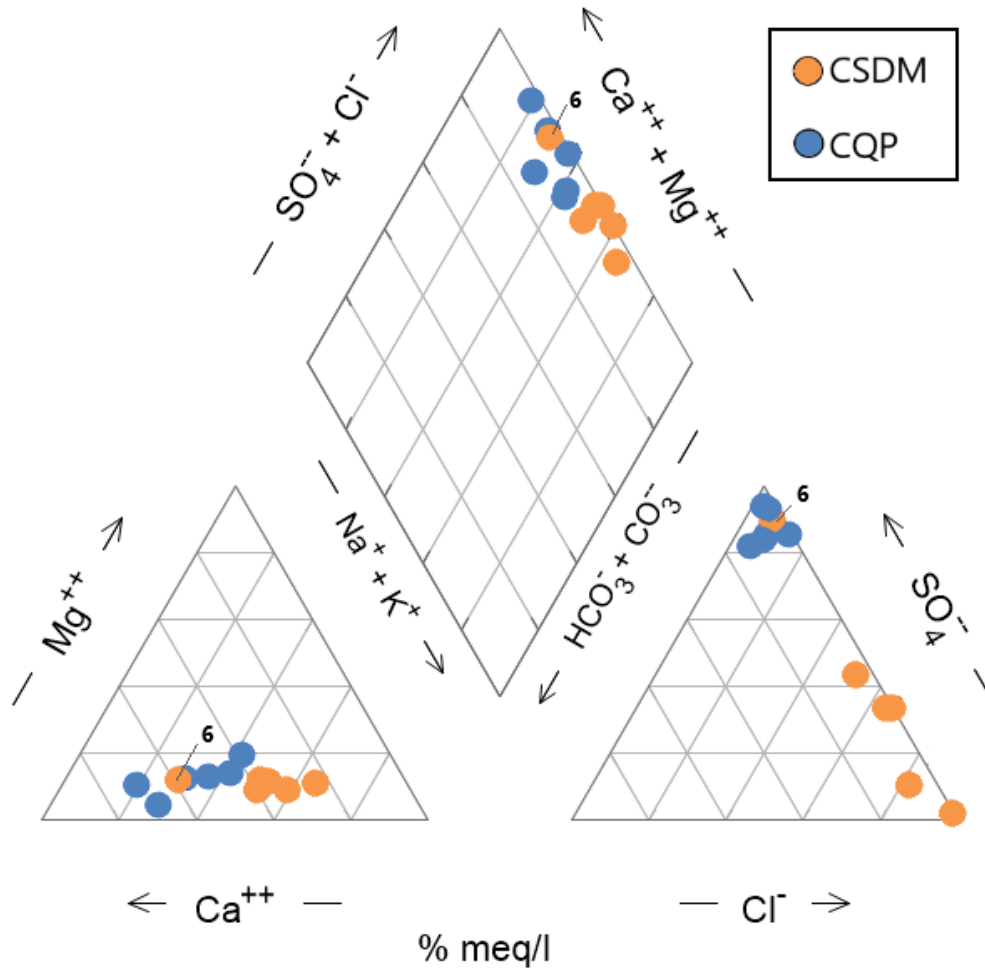
En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores medidos indican que las aguas estudiadas corresponden, en su mayoría, a agua dulce. Son una excepción las muestras 8, 9 y 4, que muestran características de agua salobre. Utilizando el total de sólidos disueltos (TDS por sus siglas en inglés) como medida directa de la salinidad, se obtiene un valor de  $r_s$  de 0.79 al compararse respecto a cloro, en donde los valores más altos se obtienen en las muestras 8 y 9 (figura 28). En general los valores son bajos en ambas cuencas estudiadas, sin denotar un límite claro, lo que no descarta que pueda existir una mezcla de las aguas de aquellos grupos. Sin embargo, al observar en detalle se identifican 2 tendencias diferentes. La primera agrupa principalmente a las muestras de la CSDM, e indica un aumento del TDS con el cloro, por su parte la segunda agrupa principalmente a las muestras de la CQP, y muestra un aumento del TDS sin un correspondiente aumento de cloro. En la segunda tendencia podrían estar contribuyendo otros iones a la salinidad de las aguas, probablemente iones de sulfato. En esta última tendencia se incluye la muestra 6, de la CSDM, como excepción.



**Figura 28:** Diagramas total sólidos disueltos (TDS) vs cloruro (en mg/l). En la imagen de la derecha se muestra el detalle sin las muestras 4, 8 y 9.

## 5.2 Geoquímica de elementos mayoritarios

En primer lugar, mediante un diagrama de Piper se puede realizar una clasificación del agua según su “facies hidroquímica”. Los resultados indican que las aguas estudiadas en este trabajo son de dos tipos: sulfatado-cálcicas y clorurado-sódicas (figura 29). Las muestras tomadas en la CSDM, a excepción de la muestra 6, tienen facies clorurada-sódica, mientras que las muestras tomadas en la CQP son de tipo sulfatadas cálcicas. Cabe destacar que las muestras cloruradas evidencian una mayor dispersión que las sulfatadas, cuyas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  superan el 80% de la suma aniónica considerada en el gráfico ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ). En los diagramas triangulares que componen el Piper, se observa que sistemáticamente la muestra 6 parece seguir la tendencia de las muestras tomadas en la CQP.



**Figura 29:** Diagrama de Piper para muestras tomadas en terreno.

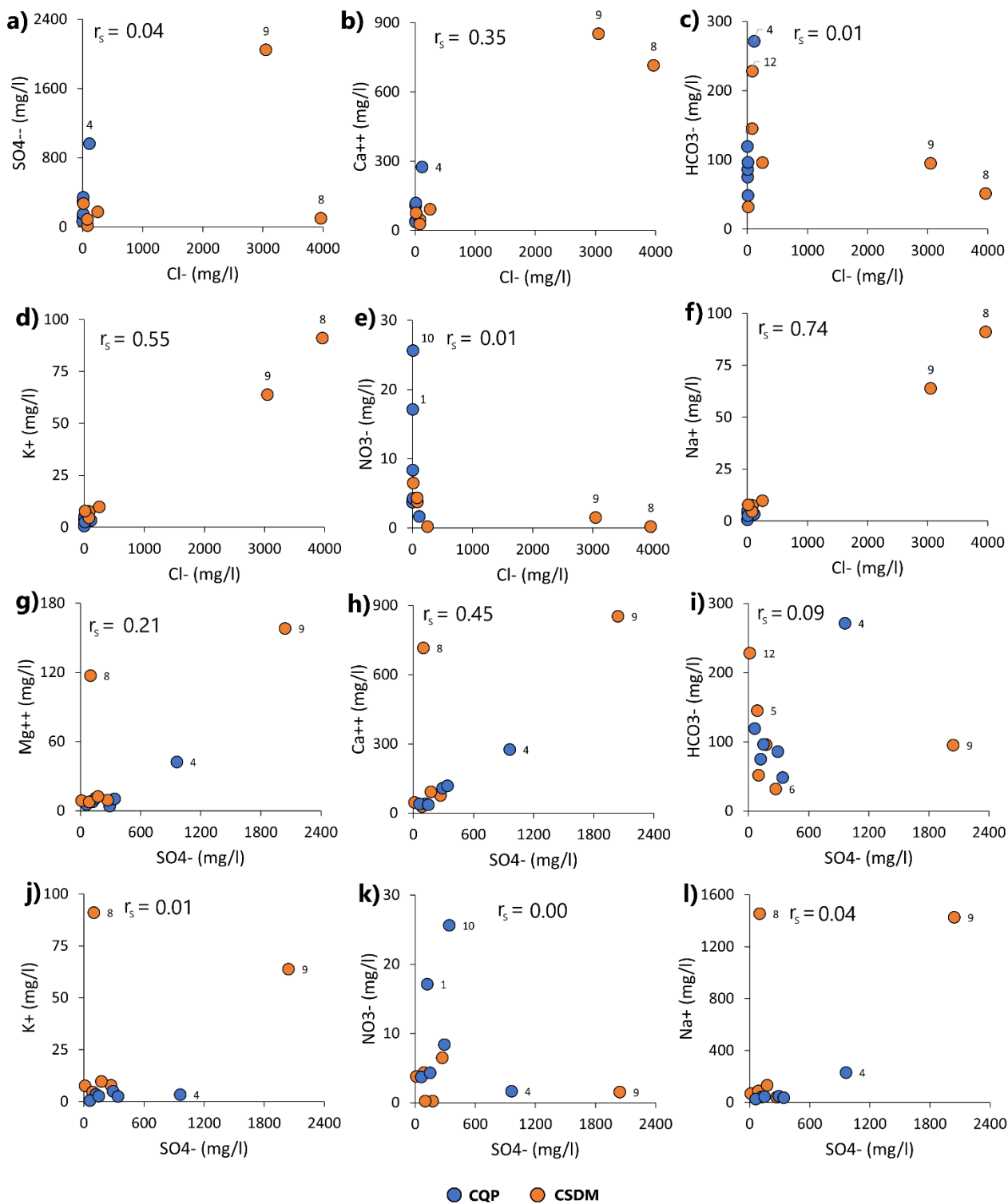
También, se estudiaron relaciones entre las variables mediante coeficientes de determinación de Spearman (tabla 4) y diagramas bivariantes, utilizando los iones cloruro y sulfato como referencia (figura 31). En la tabla 4 se puede observar que para sulfato la mejor correlación ocurre junto al calcio, y a su vez muestra bajas correlaciones con el resto de los elementos mayores. En el caso del cloruro se observan coeficientes de correlación en general altos, salvo por el sulfato y el bicarbonato. Este último parece no tener ninguna correlación con el resto de las variables evaluadas. Otros buenos coeficientes corresponden a los obtenidos entre nitrato-sodio y nitrato-cloro, por lo que las aguas de la CSDM debieran tener mayor contenido de nitrato, debido a que estas son cloruradas-sódicas. Esto último no se observa ni en el diagrama cloruro-nitrato ni en el sulfato-nitrato (figuras 31e y 31k), en donde los mayores valores se asocian a aguas de la CQP, con menores valores de cloruro y concentraciones variables de sulfato.



**Tabla 4:** Coeficientes de determinación de Spearman entre elementos mayoritarios. Se muestran también los principales estadísticos para cada componente, y su concentración en cada muestra, en mg/l.

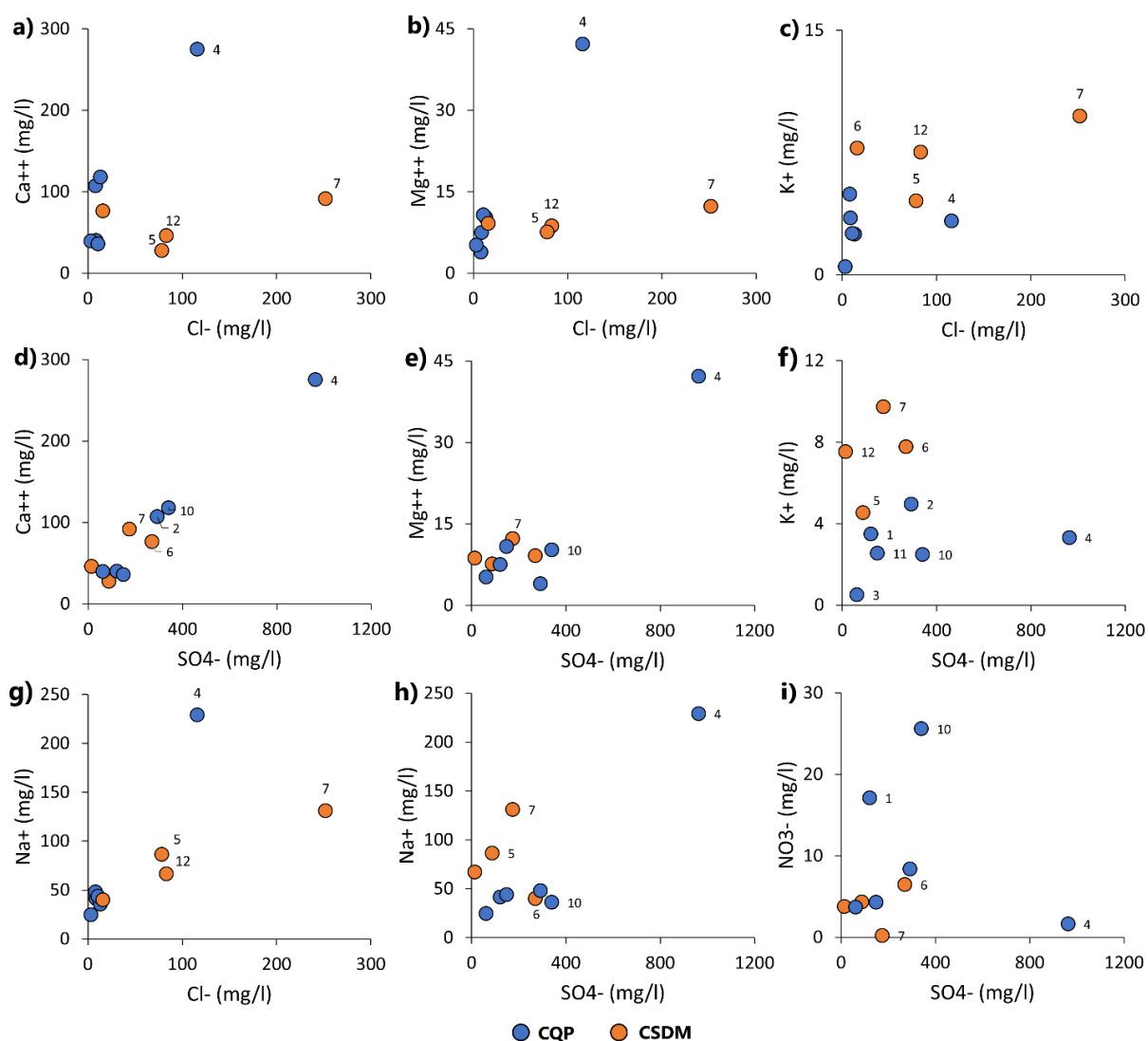
	<i>Ca++</i>	<i>Mg++</i>	<i>K+</i>	<i>Na+</i>	<i>HCO3-</i>	<i>Cl-</i>	<i>NO3-</i>	<i>SO4--</i>	
Concentración en muestras (mg/l)	1	39,9	7,48	3,48	41,3	74,8	8,67	17,1	121
	2	107	3,94	4,95	47,9	85,6	7,94	8,36	292
	3	39,4	5,22	0,5	24,5	119	3,18	3,7	62,5
	4	275	42,2	3,3	229	271	116	1,63	963
	5	27,7	7,61	4,53	86,4	145	78,4	4,33	88,2
	6	76,2	9,16	7,77	39,9	31,8	16	6,47	271
	7	91,5	12,3	9,74	131	95,9	252	0,2	175
	8	715	117	91	1453	51,4	3967	0,2	100
	9	852	158	63,8	1425	94,9	3052	1,51	2045
	10	118	10,2	2,48	36	48,3	13,4	25,6	341
	11	35,9	10,8	2,54	43,8	96,3	10,6	4,28	149
	12	45,9	8,7	7,53	66,9	228	83	3,75	13,9
Coeficientes de determinación	<i>Ca++</i>	X	0,40	0,24	0,28	0,10	0,35	0,13	<b>0,45</b>
	<i>Mg++</i>	0,40	X	0,22	<b>0,46</b>	0,00	<b>0,72</b>	0,42	0,21
	<i>K+</i>	0,24	0,22	X	<b>0,50</b>	0,07	<b>0,55</b>	0,26	0,01
	<i>Na+</i>	0,28	<b>0,46</b>	<b>0,50</b>	X	0,07	<b>0,74</b>	<b>0,51</b>	0,04
	<i>HCO3-</i>	0,10	0,00	0,07	0,07	X	0,00	0,13	0,09
	<i>Cl-</i>	0,35	<b>0,72</b>	<b>0,55</b>	<b>0,74</b>	0,00	X	<b>0,50</b>	0,04
	<i>NO3-</i>	0,13	0,42	0,26	<b>0,51</b>	0,13	<b>0,50</b>	X	0,00
	<i>SO4--</i>	<b>0,45</b>	0,21	0,01	0,04	0,09	0,04	0,00	X
Estadísticos	<i>Máximo</i>	27,70	3,94	0,50	24,50	31,80	3,18	0,20	13,90
	<i>Mínimo</i>	852,00	158,00	91,00	1453,00	271,00	3967,00	25,60	2045,00
	<i>Promedio</i>	201,96	32,72	16,80	302,06	111,83	634,02	6,43	385,13
	<i>Mediana</i>	83,85	9,68	4,74	57,40	95,40	47,20	4,02	162,00
	<i>Desv. Est.</i>	269,28	48,54	27,77	511,36	68,87	1301,24	7,27	554,81

Respecto a las concentraciones relativas entre las muestras, se puede observar que las muestras 8 y 9 muestran un enriquecimiento general de cationes respecto a las demás muestras de agua (figura 30). El cloruro se observa notablemente enriquecido en las muestras de la CSDM, mientras que el sulfato no presenta grandes diferencias entre las cuencas, salvo por la muestra 4 en ambos casos (figura 31). Para calcio y magnesio los valores se encuentran totalmente dispersos entre las cuencas, en cambio, el potasio y el sodio muestran diferencias entre las cuencas, con mayores concentraciones en la CSDM (figura 31). En el caso de los aniones, el nitrato pareciera tener un origen antrópico, mostrando valores más altos en las muestras 1 y 10 de la CQP (figura 30e y 30k), en cambio el bicarbonato no muestra ninguna tendencia, con valores dispersos entre ambas cuencas (figuras 30c y 30i). Se puede establecer entonces que, en general, no se observan diferencias sustanciales en las concentraciones de los elementos mayores entre las cuencas CSDM y CQP, a excepción del cloruro, del sodio y, en menor medida, del potasio.



**Figura 30:** Concentración de elementos mayoritarios (mg/l) vs. concentración de cloruro (mg/l) y sulfato (mg/l). Se detallan coeficientes de determinación de Spearman para cada par.

Respecto a las correlaciones de elementos mayores, los resultados de sodio son los que muestran una línea de tendencia más clara respecto a cloruro (figura 30f y 31g), con las aguas de la CSDM más enriquecidas que las de la CQP, a excepción de la muestra 6. En el caso de los aniones, estos no se correlacionan con el incremento de cloruro ni con sulfato, aunque este último pareciera sí mostrar una tendencia lineal respecto al primero, salvo por las muestras 8 y 4 (figura 30a). Los cationes en general indican que las muestras tomadas en la CSDM se correlacionan mejor con el cloruro, mientras que en las muestras tomadas en la CQP el incremento en la concentración de cationes no estaría relacionado con el cloruro, pero sí levemente con el sulfato (figura 31). Sin embargo, se puede observar que en general los elementos mayoritarios tienen buenos coeficientes de correlación con el cloruro (tabla 4), por lo que podrían tener un origen común en la interacción agua-roca.



**Figura 31:** Detalle de concentraciones de cationes mayoritarios (mg/l) vs cloruro (mg/l) descartando las muestras 8 y 9.

Utilizando las concentraciones en mmol/l, es posible investigar mejor los posibles procesos de disolución mineral que podrían estar asociados a las concentraciones medidas (figura 32). En el gráfico que relaciona sulfato con calcio (figura 32a) se muestra que casi todas las muestras siguen una tendencia de calcio-sulfato cercana a la línea estequiométrica 1:1, excepto la muestra 8, cuyos valores de calcio son muy elevados. Teniendo en cuenta que una de las principales fuentes de sulfato en agua es el yeso (Hounslow, 1995), y utilizando la ecuación de la disolución de yeso (tabla 5a), puede inferirse que es este proceso el que controla el enriquecimiento de sulfato y calcio en las aguas del área de estudio considerando los pH medidos.

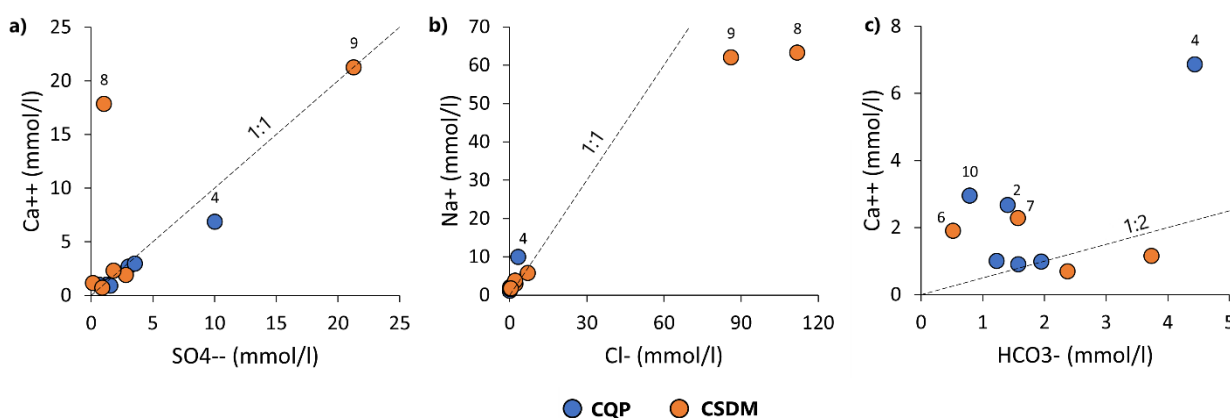
**Tabla 5:** Ecuaciones correspondientes a procesos de dilución mineral que controlan la concentración de elementos disueltos en agua.

	<b>Ecuaciones</b>	<b>Procesos</b>
a)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O \leftrightarrow Ca^{+2} + SO_4^{-2} + 2H_2O$	<i>disolución de yeso</i>
b)	$NaCl + H_2O \leftrightarrow Na^+ + Cl^- + H_2O$	<i>disolución de halita</i>
c)	$NaAlSi_3O_8 + CO_2 + 2H_2O \leftrightarrow Na^+ + 3SiO_2 + Al(OH)_3 + HCO_3^-$	<i>meteorización de albita</i>
d)	$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$	<i>disolución de calcita</i>

De la ecuación de disolución de yeso (tabla 5a) puede observarse que, si no existen otras fuentes de calcio y sulfato, entonces la relación calcio-sulfato de 1:1 en el sólido se mantiene en la solución. Debido a que las muestras siguen en general esta pauta (figura 32a) se puede concluir un origen común de estos iones por disolución de yeso en las aguas estudiadas. La única muestra que se aleja de esta línea estequiométrica muestra un enriquecimiento en calcio asociado a otras fuentes como podría ser la disolución de carbonatos o de silicatos con calcio en su estructura. Risacher y otros (2003) indican que solo el yeso profundo, proveniente de antiguos salares del Terciario (Dingman, 1962, 1967), pareciera contribuir calcio y sulfato a los afluentes principales de las cuencas altiplánicas chilenas, sin embargo, el transporte eólico de sedimento rico en yeso también contribuiría a enriquecer estas aguas en sulfato y calcio, disminuyendo a su vez los contenidos de carbonatos.

Por otra parte, la relación obtenida entre sodio y cloruro (figura 30f) muestra un coeficiente  $r_s$  de 0.74, lo que indica que estos elementos tendrían una fuente común en todas las muestras analizadas. Hounslow (1995) indica que la fuente principal de cloro corresponde a cloruro de sodio (NaCl), proveniente de la disolución de halita o directamente del agua de lluvia, por lo que, de no haber disolución de otros minerales con sodio en su estructura, entonces la relación sodio-cloruro en el mineral se debiera reflejar en una correspondencia de las muestras a la línea estequiométrica 1:1. Las muestras parecen alinearse con la mencionada línea (figura 32b), excepto por la

muestra 4, que presenta un leve exceso de sodio, y las muestras 8 y 9 que presentan menos sodio de los esperado de la disolución de cloruro de sodio.



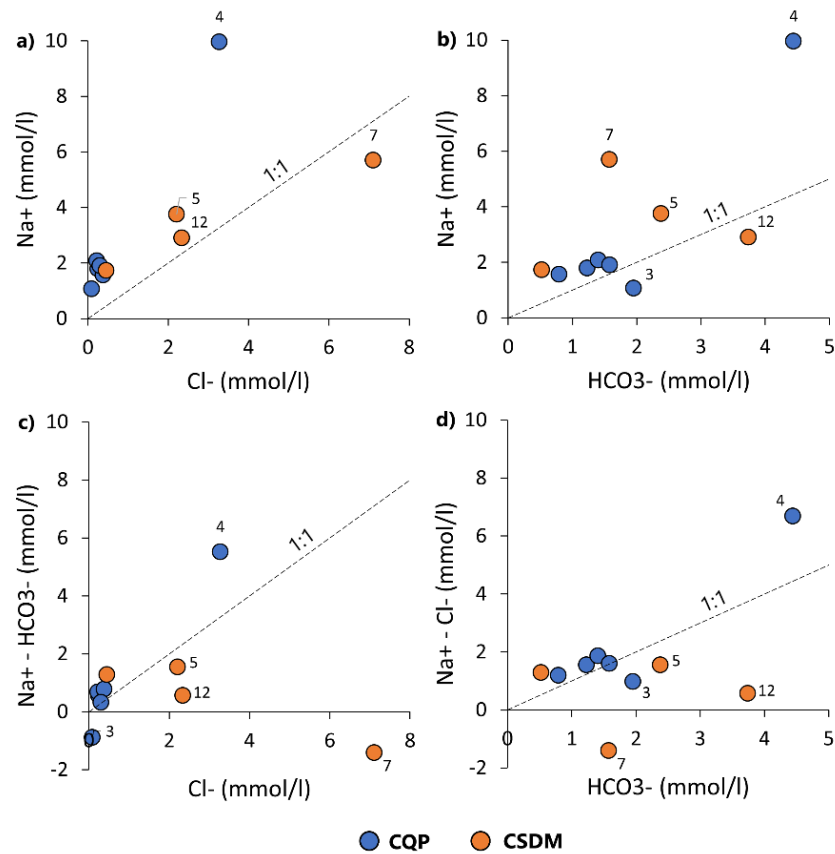
**Figura 32:** Gráficos calcio vs sulfato (a), sodio vs cloruro (b) y calcio vs bicarbonato (c) (en mmol/l). Se muestran las líneas de proporción entre los elementos en disolución de sulfato, halita y calcita respectivamente.

Sin embargo, al ampliar la gráfica excluyendo a las muestras 8 y 9 (figura 33a) se puede notar que la mayoría de las muestras presenta valores de sodio en exceso con respecto a la línea estequiométrica 1:1. Esto último se debe a la existencia de fuentes adicionales de sodio, como la que podría entregar la disolución de plagioclasas albiticas, que han sido reportadas en litologías volcánicas dacíticas del área de estudio. Las muestras 8 y 9 presentan un déficit de sodio que podría estar relacionado con su origen, al corresponder a aguas de la Laguna Santa Rosa. Se ha descrito que en estos ambientes puede ocurrir intercambio iónico inverso cuyo resultado es un empobrecimiento en sodio (Hounslow, 1995).

Dado que el área de estudio está fuertemente dominada por la presencia de rocas volcánicas de la Franja de Maricunga, es esperable que la disolución de minerales formadores de estas rocas controle parte de la química de las aguas que circulan a través de ellas. Específicamente, se han descrito rocas volcánicas de composiciones dacíticas en varias de las fases asociadas a esta franja, en la que dominan las mineralogías compuestas por plagioclasas albiticas y hornblenda. En el caso de la disolución de albita en presencia de ácido carbónico, se obtiene en la solución sodio y bicarbonato en una razón de 1:1 (tabla 5c).

En la figura 33b se observa que las aguas muestreadas se ajustan de manera aproximada a la línea estequiométrica considerada. Esto puede interpretarse como el hecho de que una posible fuente de sodio proceda de la interacción del agua con el medio volcánico. También en este caso, algunas muestras se encuentran alejadas de la línea dando cuenta de la complejidad de determinar una única fuente para estos iones. En los gráficos c y d de la misma figura, se intenta establecer la participación individual

de cada proceso en las muestras analizadas. En ellos se puede observar que las muestras de la CQP se ajustan mejor considerando el sodio procedente de la Albita (figura 33d).



**Figura 33:** Relaciones en mmol/l correspondientes a la meteorización de plagioclasas albiticas (a), halita (b) y a la participación individual de cada proceso (c y d).

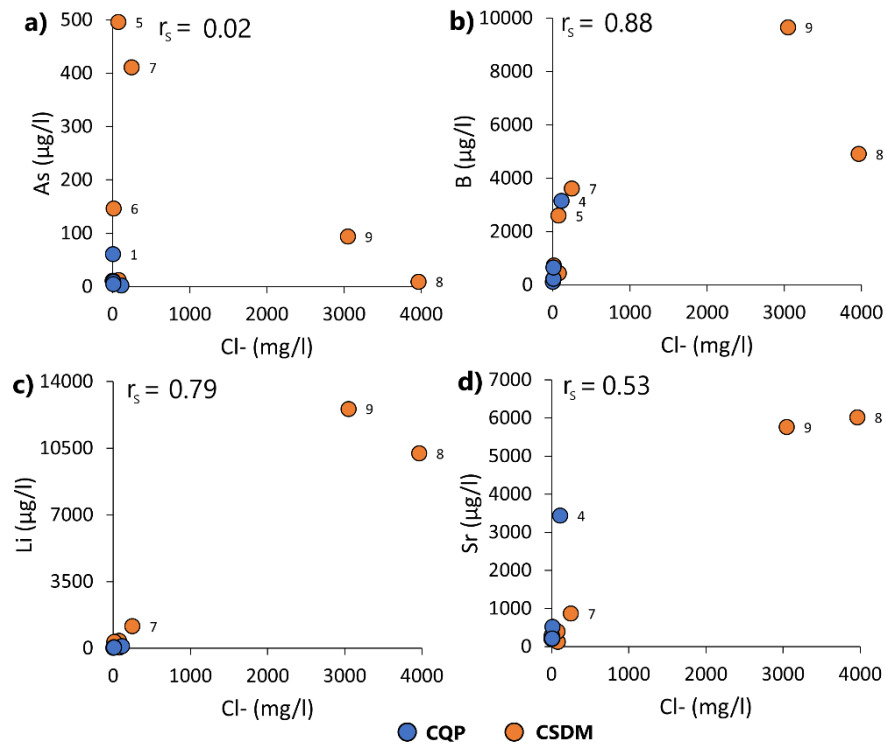
Para esclarecer el origen de otros iones relevantes en las aguas estudiadas se considera la disolución de minerales carbonáticos para explicar la presencia de bicarbonato y calcio, la cual entrega estos elementos en solución en relación estequiométrica de 2:1. Observando la figura 32c se puede notar que en general las muestras se ajustan bien con esta disolución, pero a su vez la mayoría muestra déficit o exceso de calcio. En el caso de las muestras que presentan déficit de calcio corresponden a las muestras 8 y 9, las que anteriormente se había mencionado que poseen un exceso de sodio, por lo que el intercambio catiónico entre calcio y sodio podría ser el proceso responsable de estos valores. Para las muestras que presentan exceso de calcio se sugieren fuentes adicionales de calcio, como podría ser el mismo contenido en plagioclasas.

### 5.3 Geoquímica de elementos minoritarios y trazas

**Tabla 6:** Coeficientes de determinación de Spearman entre elementos minoritarios y trazas principales y respecto a los elementos mayores. Se muestran también los principales estadísticos para cada componente y su concentración en cada muestra en µg/l.

	<i>As</i>	<i>B</i>	<i>Ba</i>	<i>Cu</i>	<i>Sr</i>	<i>Li</i>	<i>Hg</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	
Concentración en muestras (µg/l)	1	60,6	207	15,64	0,125	202,89	34,31	0,05	3,88	0,88
	2	10,26	191	21,49	0,55	295,76	38,23	0,11	3,29	1,81
	3	10,66	115	12,39	0,125	196,88	23,29	0,12	5,73	0,27
	4	2,35	3140	11,07	0,65	3435,2	105,85	0,1	40,49	6,97
	5	495,4	2590	18,12	0,55	390,09	383,84	0,05	3,66	0,49
	6	146,49	732	10,26	0,125	224,52	322,41	0,13	2,08	1,78
	7	410,82	3610	25,86	1,35	867,77	1144	0,13	3,71	1,38
	8	9,52	4900	752,63	1,35	6015,7	10220	0,15	1,11	4,94
	9	93,62	9660	102,87	4,73	5757,1	12574	0,13	6,59	16,1
	10	9,28	223	14,98	1,09	519,09	48,27	0,05	3,91	2,46
	11	4,5	647	16,05	4,15	207,61	27,41	0,05	3,66	2,7
	12	11,51	434	39,75	0,66	133,65	38,68	0,18	0,87	0,125
Coeficientes de determinación	<i>Ca++</i>	0,08	0,25	0,09	0,20	<b>0,57</b>	0,35	0,17	0,05	<b>0,53</b>
	<i>Mg++</i>	0,03	<b>0,78</b>	0,11	<b>0,61</b>	<b>0,57</b>	<b>0,49</b>	0,09	0,04	<b>0,55</b>
	<i>K+</i>	0,21	<b>0,49</b>	<b>0,46</b>	0,13	0,24	<b>0,62</b>	<b>0,51</b>	0,20	0,05
	<i>Na+</i>	0,00	<b>0,70</b>	<b>0,46</b>	0,35	<b>0,52</b>	<b>0,56</b>	0,16	0,00	0,24
	<i>HCO3-</i>	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00	0,05	0,06
	<i>Cl-</i>	0,02	<b>0,88</b>	0,31	0,39	<b>0,53</b>	<b>0,79</b>	0,29	0,01	0,19
	<i>NO3-</i>	0,00	0,48	0,24	0,26	0,23	0,27	0,39	0,01	0,07
	<i>SO4--</i>	0,05	0,10	0,03	0,10	0,35	0,12	0,03	0,27	<b>0,61</b>
	<i>As</i>	X	0,04	0,04	0,05	0,01	0,16	0,05	0,03	0,23
	<i>B</i>	0,04	X	0,20	0,41	<b>0,61</b>	<b>0,80</b>	0,14	0,00	0,32
	<i>Ba</i>	0,04	0,20	X	0,40	0,11	0,23	0,24	0,14	0,01
	<i>Cu</i>	0,05	0,41	0,40	X	0,30	0,22	0,04	0,00	0,36
	<i>Sr</i>	0,01	<b>0,61</b>	0,11	0,30	X	<b>0,66</b>	0,01	0,07	<b>0,59</b>
<i>Li</i>	0,16	<b>0,80</b>	0,23	0,22	<b>0,66</b>	X	0,19	0,00	0,19	
<i>Hg</i>	0,05	0,14	0,24	0,04	0,01	0,19	X	0,19	0,00	
<i>Mo</i>	0,03	0,00	0,14	0,00	0,07	0,00	0,19	X	0,12	
<i>Ti</i>	0,23	0,32	0,01	0,36	<b>0,59</b>	0,19	0,00	0,12	X	
Estadísticos	<i>Mínimo</i>	2,35	115,00	10,26	0,13	133,65	23,29	0,05	0,87	0,13
	<i>Máximo</i>	495,40	9660,00	752,63	4,73	6015,70	12574,00	0,18	40,49	16,10
	<i>Promedio</i>	105,42	2204,08	86,76	1,29	1520,52	2080,02	0,10	6,58	3,33
	<i>Mediana</i>	11,09	689,50	17,09	0,66	342,93	77,06	0,12	3,69	1,80
	<i>Desv. Est.</i>	162,09	2737,31	202,25	1,47	2137,81	4205,30	0,04	10,34	4,30

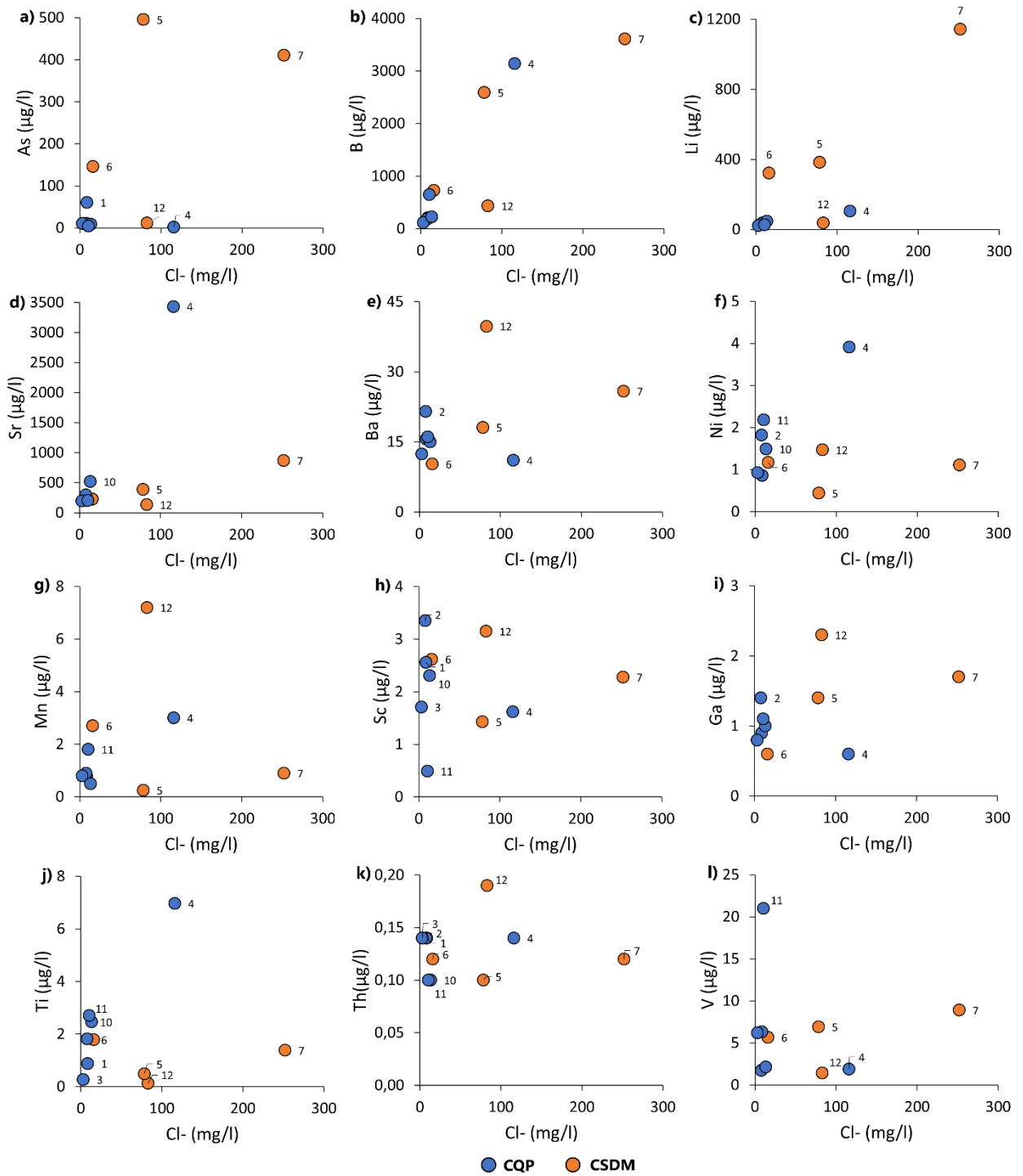
En cuanto a los elementos menores y trazas, también se estudiaron relaciones entre las variables mediante coeficientes de determinación de Spearman (tabla 6) y diagramas bivariantes, utilizando el ion cloruro como elemento conservativo (figura 34). Se destaca que las mayores concentraciones de estos elementos corresponden a arsénico, litio, boro, bario y estroncio, con varias muestras sobre 1 mg/l. Las muestras 8 y 9 son las que presentan un enriquecimiento mayor en estos elementos, salvo por el arsénico, que tiene bajas concentraciones en estas muestras. Analizando los principales elementos minoritarios y trazas de estas aguas se puede observar que el arsénico no muestra una tendencia con respecto a cloruro (figura 34a), a diferencia del boro, litio y estroncio (figura 34b - 34d). Estos últimos elementos también tienen buenas correlaciones con la mayoría de los cationes mayoritarios, como también entre ellos (tabla 6).



**Figura 34:** Concentración de elementos minoritarios y trazas principales (µg/l) vs. concentración de cloruro (mg/l). Se detallan coeficientes de determinación de Spearman para cada par.

En la figura 35 se quitan los resultados de concentraciones de las muestras 8 y 9, y se puede ver que en general las muestras de la CSDM están más enriquecidas en litio y boro que las muestras de la CQP (figuras 35b y 35c). En el caso del arsénico las muestras 8 y 9 tienen bajas concentraciones (figura 35a), por lo que solo las 5, 6 y 7 de la CSDM muestran mayores concentraciones. En el resto de los elementos no se observa una diferencia notable entre las cuencas (figura 35d – 35i).

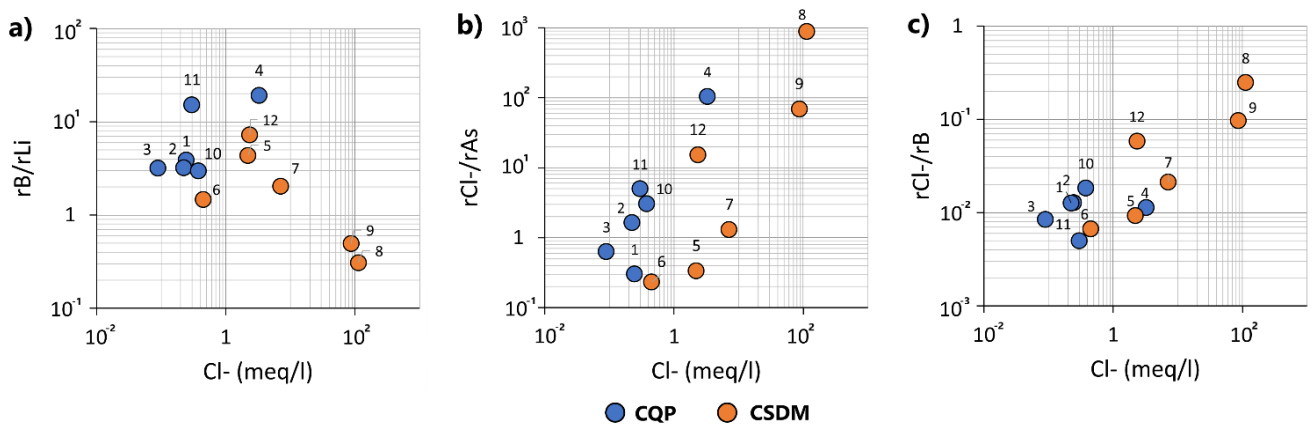




**Figura 35:** Concentración de elementos minoritarios y trazas principales (µg/l) vs. concentración de cloruro (mg/l), descartando las muestras 8 y 9.

Nicholson (1993) reporta que el análisis de las relaciones entre cloro, boro, arsénico y litio indican orígenes en común o direcciones de flujos. El autor propone que razones semejantes de  $rCl/rB$  y  $rCl/rAs$  entre las muestras pueden indicar fuentes

comunes de estos elementos en el agua. Por otra parte, razones decrecientes de  $rCl/rB$  y crecientes de  $rB/rLi$  indicarían dirección de flujos. Se puede observar que para  $rCl/rAs$  (figura 36b) todas las muestras tienen la misma tendencia, pero las razones varían en varios ordenes de magnitud. En el caso del  $rCl/rB$  (figura 36c) se observa la misma tendencia observada en  $rCl/rAs$ , destacando además los mayores valores en la CSDM. Las razones de  $rB/rLi$  (figura 36a) muestran tendencias diferentes entre las cuencas, en la CQP esta razón parece aumentar con el contenido de cloruro, mientras que en la CSDM decrece. Sin embargo, las razones de  $rB/rLi$  son semejantes entre la mayoría de las muestras de ambas cuencas, por lo que esta relación no sería buen indicador de flujo. Finalmente, solo de la relación  $rCl/rB$  se podría concluir una dirección de flujo desde la CSDM a la CQP, aunque con excepciones en las muestras 5 y 6.



**Figura 36:** Gráficos de relaciones  $rB/rLi$  (a),  $rCl/rAs$  (b) y  $rCl/rB$  (c) vs. cloruro, ambos en meq/l.

Como característica general de todos los elementos químicos analizados, estos muestran ciertas tendencias que pueden explicarse a través de procesos de disolución general de minerales en el área de estudio, los cuales tienen un origen en el volcanismo ácido y las rocas del basamento principalmente. Las muestras tomadas tanto en la CSDM como en la CQP parecen estar sometidas a procesos semejantes de interacción agua-roca, con algunas diferencias de intensidad. La concentración de cloruro en las muestras de agua tomadas en este trabajo corresponde a la diferencia principal que existe entre la CSDM y la CQP. Sin embargo, la mayoría de los componentes minoritarios y trazas, a excepción del litio y el boro, no muestran diferencias entre las muestras de la CSDM y la CQP. Los datos hidrogeoquímicos obtenidos en este trabajo resultan insuficientes para detallar los recorridos y la circulación del agua en un entorno geológico tan complejo, por lo que la forma en la que se transporta el agua en el sistema podría ser más compleja que lo que se ha propuesto anteriormente.

Un proceso que podría tener un rol importante en el enriquecimiento en componentes químicos del agua en la zona de estudio es la evaporación que existe

debido a las condiciones de hiperaridez. A este proceso se le conoce como evapoconcentración, y ha sido mencionado anteriormente por otros autores como un proceso fundamental en el Altiplano chileno (Acosta y Custodio, 2008; Acosta y *otros*, 2013; Scheihing y *otros*, 2018; entre otros). Debido a esto, las expresiones superficiales de agua en bofedales, que son particulares de la zona, podrían jugar un rol fundamental en el enriquecimiento químico de las muestras analizadas.

### 5.3.1 Normas chilenas de calidad de aguas

**Tabla 7:** Comparación de concentraciones de elementos obtenidas en este trabajo, respecto de normas chilenas de agua potable y riego (NCh. 409 y NCh. 1333 respectivamente). En azul se destacan aquellos valores que superan los límites de la norma de agua potable, en verde aquellas que superan la norma de agua de riego, y en rojo las que superan ambas normas. Las casillas donde no hay datos corresponden a aquellos resultados bajo el límite de detección o sin información. Las siglas n.a. se refieren a que no aplica esa casilla para el elemento correspondiente.

	Al	As	Ba	B	Cd	Cl-	Co	Cu	Cr	Fe	Li	pH
	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	n.a.
NCh. 1333	5000	100	4000	750	10	200	50	200	100	5000	2500	5.5 - 9
NCh. 409	n.a.	10	n.a.	n.a.	10	400	n.a.	2000	50	300	n.a.	6.5 - 8.5
<b>1</b>	528	73,78	19,02	245	0,69	8,67	2,12	111,64	0,73	24	40,22	8,21
<b>2</b>	20	13,44	26,54	277	0,06	7,94	0,16	2,18	0,87	195	50,73	7,45
<b>3</b>	58	14,16	14,06	160	-	3,18	0,06	2,29	0,63	31	30,21	7,77
<b>4</b>	13	3,36	12,97	3900	-	116	0,17	1,6	0,34	38	130,64	7,45
<b>5</b>	620	563	22,65	2730	-	78,4	0,27	0,78	0,71	446	390,78	8,37
<b>6</b>	11	187,41	11,77	864	0,06	16	-	0,85	0,63	35	380,6	6,73
<b>7</b>	18	547,52	34,63	4930	-	252	1,9	1,71	1,63	69	1530,4	8,44
<b>8</b>	12	15,61	930,25	6620	-	3967	0,61	1,73	0,75	299	13846	8,9
<b>9</b>	398	151,77	153,23	12000	0,13	3052	0,88	4,78	1,16	1300	15540	8,43
<b>10</b>	21	12,16	18,74	284	-	13,4	0,16	1,35	10,05	762	55,33	7,35
<b>11</b>	43	5,99	18,85	861	-	10,6	0,33	4,27	1,08	97	34,45	9,23
<b>12</b>	32	21,9	67	614	-	83	0,32	2,26	2,49	1230	50,6	8,55
	Mn	Mg	NO3	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Na%	SO4	V	TDS
	ug/l	mg/l	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	%	mg/l	ug/l	mg/l
NCh. 1333	200	n.a.	n.a.	1	10	200	5000	20	35	250	100	5000
NCh. 409	100	125	50	1	n.a.	n.a.	50	10	n.a.	500	n.a.	1500
<b>1</b>	25,4	7,48	17,1	0,14	4,61	1,5	-	1,16	44,354	121	7,89	276,27
<b>2</b>	10	3,94	8,36	0,15	4,1	2,61	-	-	28,496	292	2,31	514,78
<b>3</b>	2,3	5,22	3,7	0,13	6,71	0,93	-	0,38	34,45	62,5	8,72	197,90
<b>4</b>	4,3	42,2	1,63	0,15	49,34	4,42	-	6,06	41,231	963	2,52	1770,15
<b>5</b>	37,8	7,61	4,33	0,16	3,9	0,94	0,46	-	66,983	88,2	9,73	372,37
<b>6</b>	4	9,16	6,47	0,13	2,12	1,48	-	-	29,509	271	7,5	443,60
<b>7</b>	10,4	12,3	0,2	0,18	5,6	1,9	-	-	52,491	175	12,38	724,98
<b>8</b>	78,3	117	0,2	0,29	1,43	10,88	-	0,37	61,357	100	2,71	6490,47
<b>9</b>	39,2	158	1,51	0,26	8,77	12,4	1,96	1,96	57,091	2045	26,13	7672,26
<b>10</b>	6,5	10,2	25,6	0,13	5,14	3,54	0,29	-	21,085	341	3,37	571,27
<b>11</b>	58,9	10,8	4,28	0,13	4,82	2,82	0,34	0,52	46,952	149	28,41	305,22
<b>12</b>	496,5	8,7	3,75	0,23	0,88	1,61	-	-	50,702	13,9	2,12	342,86

## 5.4 Análisis multivariante

Se han realizado tratamientos estadísticos multivariante con el objetivo de dilucidar las relaciones entre las muestras y variables estudiadas. Debido a que el número de muestras es exiguo, estos resultados son aproximados y deberán ser validados en futuros trabajos que incluyan una cantidad mayor de muestras, para así permitir asegurar la validez matemática del tratamiento. Por lo tanto, en esta sección los resultados deben ser considerados como preliminares.

**Tabla 8:** Parámetros utilizados para análisis de conglomerados jerárquicos y análisis factorial en este trabajo. En la última columna se observa el sesgo habiendo aplicado la transformación logarítmica.

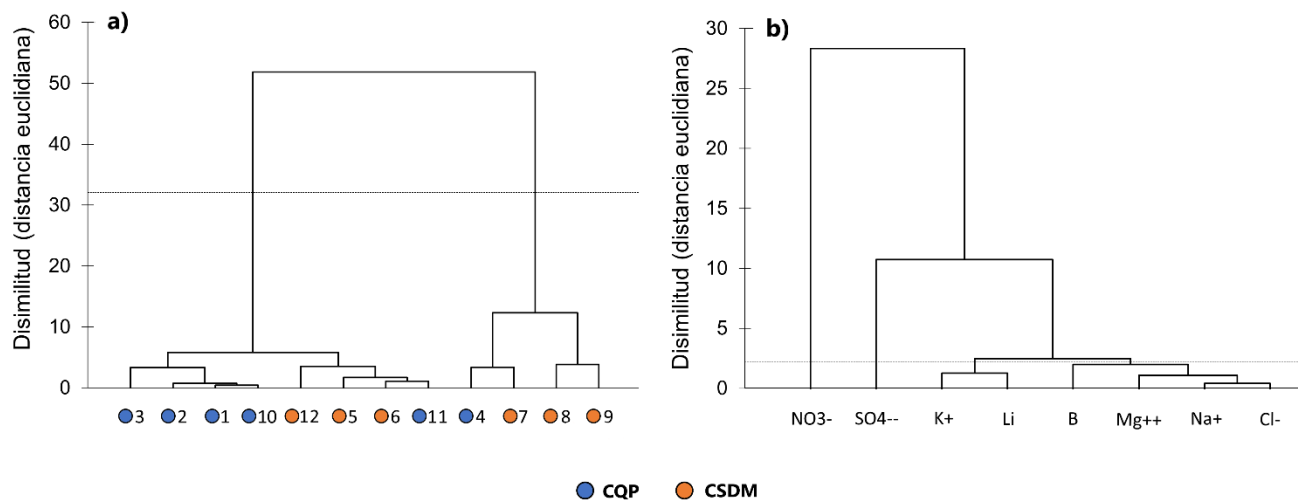
	K+	Mg <sup>++</sup>	Na+	Cl-	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	B	Li
<i>Mínimo</i>	0,5	3,94	24,5	3,18	13,9	0,2	115	23,29
<i>Máximo</i>	91	158	1453	3967	2045	25,6	9660	12574
<i>Promedio</i>	16,80	32,72	302,06	634,02	385,13	6,43	2204,08	2080,02
<i>Desv. Estándar</i>	27,77	48,54	511,36	1301,24	554,81	7,27	2737,31	4205,30
<i>Sesgo</i>	1,91	1,77	1,75	1,86	2,24	1,63	1,59	1,82

En primer lugar, se llevó a cabo un diagrama de conglomerados jerárquicos, utilizando 8 parámetros que incluyen elementos mayoritarios y trazas, con el fin de realizar observaciones generales y posibles implicancias. Para ello, los 8 parámetros fueron sometidos a una transformación logarítmica y luego fueron normalizados utilizando el método de puntuaciones normalizadas z-score, debido a que el sesgo en gran parte de ellas es alto y no siguen una distribución normal (tabla 8).

Al aplicar la metodología a todas las muestras tomadas en este estudio, la distribución mostró 2 conjuntos principales y 4 subconjuntos (figura 37a). El primero reúne a 8 de las muestras de agua, 5 de la CQP y 3 de la CSDM. A su vez, este conjunto se divide en 2, separando levemente a las aguas de la CQP de la CSDM, pero agregando la muestra número 11 en el segundo. Esto último puede deberse a la alta vegetación en el entorno de la muestra 11, y al escaso flujo observado en estas aguas. El segundo conjunto reúne 4 muestras de agua, 3 de la CSDM y 1 de la CQP, que se dividen en 2 subconjuntos: uno que agrupa a las muestras 8 y 9 (Laguna Santa Rosa), y otro con la 4 y 7. La muestra 4 no se correlaciona con las demás muestras de la CQP, lo que podría tener relación con lo alejado de la cabecera de la cuenca de esta muestra con respecto a las demás.

En el dendrograma de la figura 37b se puede observar que las variables utilizadas se agrupan formando 3 conjuntos. El primero, con menor distancia euclidiana, está conformado por 6 variables divididas en 2 subconjuntos, uno formado solamente por K y Li, y el otro por B, Mg, Na y Cl, los que corresponden a los elementos representativos de los procesos fisicoquímicos que definen la química de las muestras analizadas, como son las interacciones agua-roca. Con una mayor distancia euclidiana

se encuentran el sulfato y el nitrato, cuyas diferentes distancias sugieren que para estos iones los mecanismos que determinan su concentración en las muestras son diferentes al anteriormente descrito. Por lo tanto, se sugiere un origen antrópico para el nitrato, y, para el sulfato es posible que su origen sea tanto natural, por interacción agua-roca, como, al menos en parte, antrópico.



**Figura 37:** Dendrogramas obtenidos a partir de todas las muestras de este estudio.

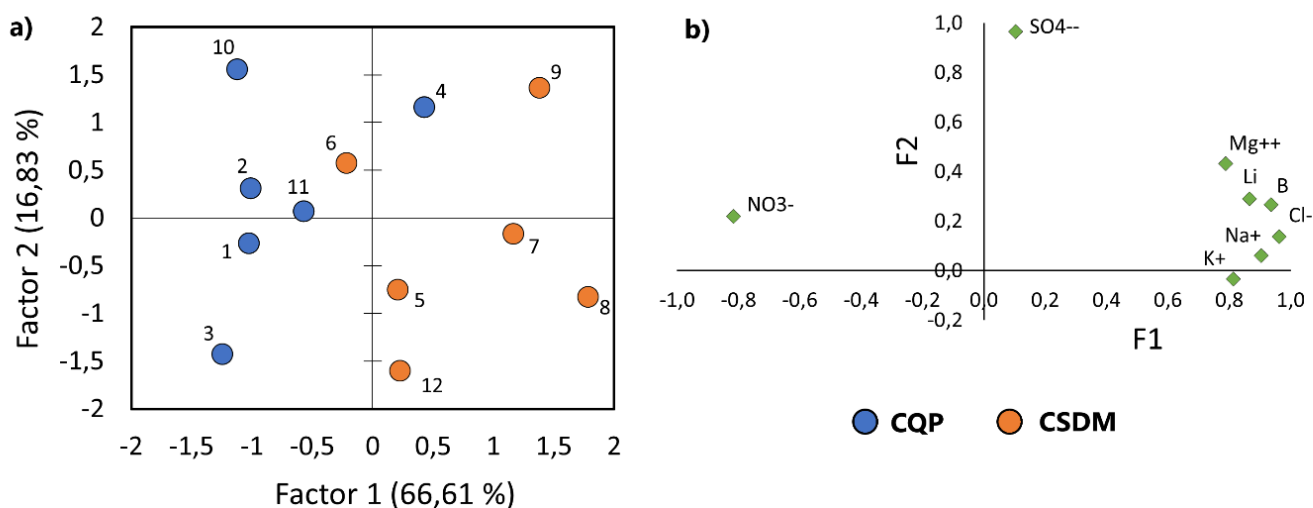
Se puede concluir de los dendrogramas que la mayoría de las aguas se correlacionan químicamente, tanto de la CSDM como de la CQP. Esto se puede relacionar con el grupo de parámetros que reúne potasio, litio, boro, magnesio, sodio y cloruro, ligados a la geología general de la zona que afecta a todas las aguas. Los subconjuntos que relacionan a las demás de las muestras estarían vinculados en cambio al enriquecimiento particular de nitrato y sulfato, de posible origen antrópico.

Para realizar el análisis factorial (AF) se consideraron los mismos 8 parámetros, utilizados anteriormente, obteniendo así los factores que agrupan las variables que determinan los principales rasgos fisicoquímicos de las muestras de agua analizadas. Se realizó una prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) para las muestras (tabla 9), cuyo resultado fue 0.656, lo que puede ser considerado aceptable para validar los resultados obtenidos. Con este tratamiento se obtuvieron 2 factores que explican el 83.44% de la varianza total de las muestras. El factor 1 (F1), que concentra el 66.61% de la varianza, muestra asociación estadística con la mayoría de los parámetros (figura 38b), salvo el nitrato y el sulfato. El factor 2 (F2) representa el 16,83% de la varianza y muestra una asociación principalmente con el sulfato (figura 38b).

**Tabla 9:** Cargas factoriales tras rotación de Varimax, y resultado de la prueba KMO.

	F1	F2	KMO
<i>K+</i>	0,813	-0,033	0,949
<i>Mg++</i>	0,788	0,432	0,557
<i>Na+</i>	0,904	0,060	0,664
<i>Cl-</i>	0,962	0,137	0,667
<i>NO3-</i>	-0,817	0,219	0,879
<i>SO4--</i>	0,104	0,966	0,198
<i>B</i>	0,935	0,267	0,736
<i>Li</i>	0,866	0,290	0,617

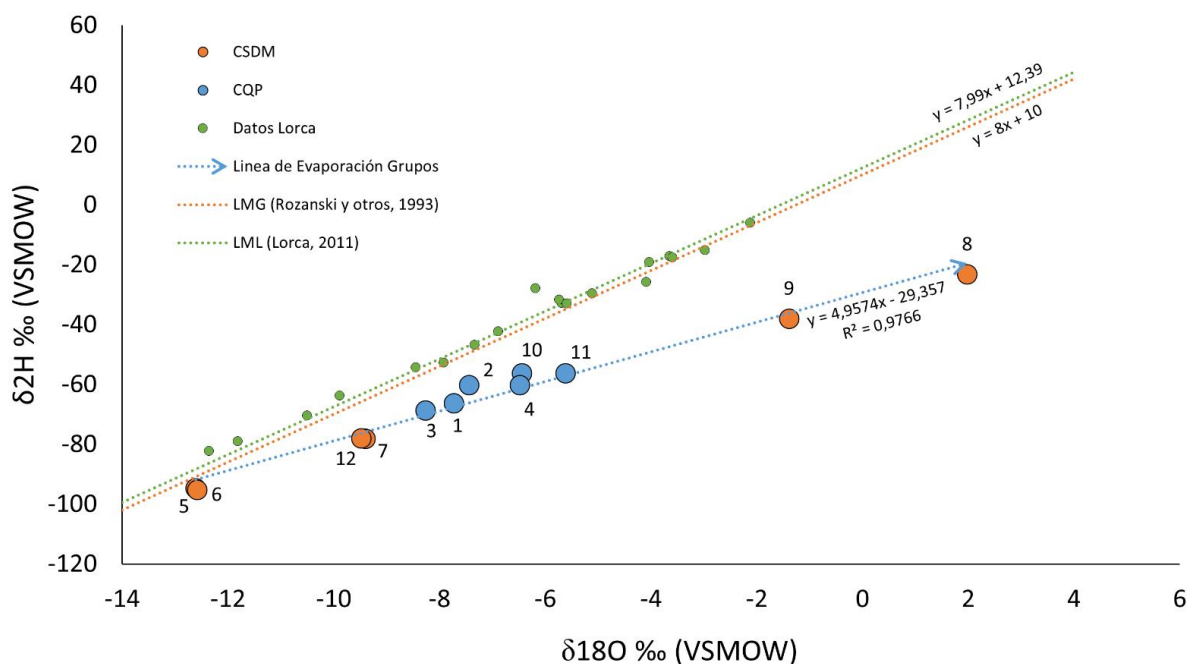
En la figura 38a se puede observar que las muestras tomadas en la CQP parecen estar más relacionadas al F2 que al F1, aunque las muestras 1 y 3 no se ajustan a esto, probablemente porque otras variables, no incluidas en el AF, determinan su química. Se observa que las muestras de ambas cuencas están sometidas a procesos diferentes, o al menos con diferente intensidad en la CSDM, que están determinadas por el F1 y no por el F2, a excepción de la muestra 9. Esto podría explicarse debido a que en la CSDM el proceso principal podría ser la interacción agua-roca, mientras que en la CQP dominaría la evaporación o la entrada de sulfato y nitrato, ligado a la fuerte influencia de actividades antrópicas. Por otra parte, las muestras 4 y 6 no se alinean con las características mostradas por las demás muestras en cada cuenca, lo que también podría tener relación con otras variables no incluidas en este análisis.



**Figura 38:** Proyección de los puntajes factoriales para las muestras de aguas, según los factores F1 y F2. Se pueden observar cómo se agrupan las muestras según sus características.

## 5.5 Isotopos estables de hidrógeno y oxígeno

Observando el gráfico del deuterio versus el oxígeno 18 (figura 39), se puede notar que, al ubicar los resultados isotópicos de las muestras de este trabajo, estas siguen de manera muy ajustada una línea de evaporación. Las aguas se ordenan en esta línea de la siguiente forma: aquellas correspondientes a la CSDM, salvo las muestras 8 y 9, se ubican al inicio, marcando condiciones menos sometidas a evaporación que las demás, en particular las muestras 5 y 6 son las que menos evaporadas se encuentran. Las aguas de la CQP corresponden a aguas con mayor control de la evaporación en sus firmas geoquímicas que las de la CSDM. Finalmente, las muestras 8 y 9 se ubican en el extremo de la línea, marcando los procesos más fuertes de evaporación asociados a la Laguna Santa Rosa. Por otra parte, la línea meteórica local (LML), calculada con los datos de Lorca (2011), coincide casi perfectamente con la línea meteórica global (LMG), y se encuentra levemente sobre esta, lo que indica una fuente de vapor árido, que guarda relación con el clima local del área de estudio.



**Figura 39:** Diagrama  $\delta^{18}\text{O} \text{‰ (VSMOW)}$  vs  $\delta^2\text{H} \text{‰ (VSMOW)}$  para las muestras obtenidas en este trabajo. Se detallan también las LML (Lorca, 2011) y LMG (Rozanski y otros, 1993). Se muestra también la línea de evaporación seguida por los grupos de muestras obtenidas.

Con respecto a la composición isotópica de deuterio y oxígeno 18 en aguas de zonas áridas, esta puede estar enriquecida respecto a la de las precipitaciones debido a evaporación ocurrida durante la escorrentía que tiene lugar previo a la infiltración (Clark y Fritz, 1997). En este caso las muestras fueron tomadas casi en su totalidad en la

surgencia de estas, particularmente en la CQP. De las muestras de la CSDM se pudo observar que solo las muestras 5 y 7 tenían una escorrentía considerable en el punto en que fueron tomadas. La muestra 6, a pesar de haber sido tomada en un afloramiento dentro de un humedal, no se descarta que haya habido expresiones superficiales de estas aguas en zonas más altas.

## **5.6 Sistema Hidrogeológico Salar de Maricunga-Quebrada de Paipote**

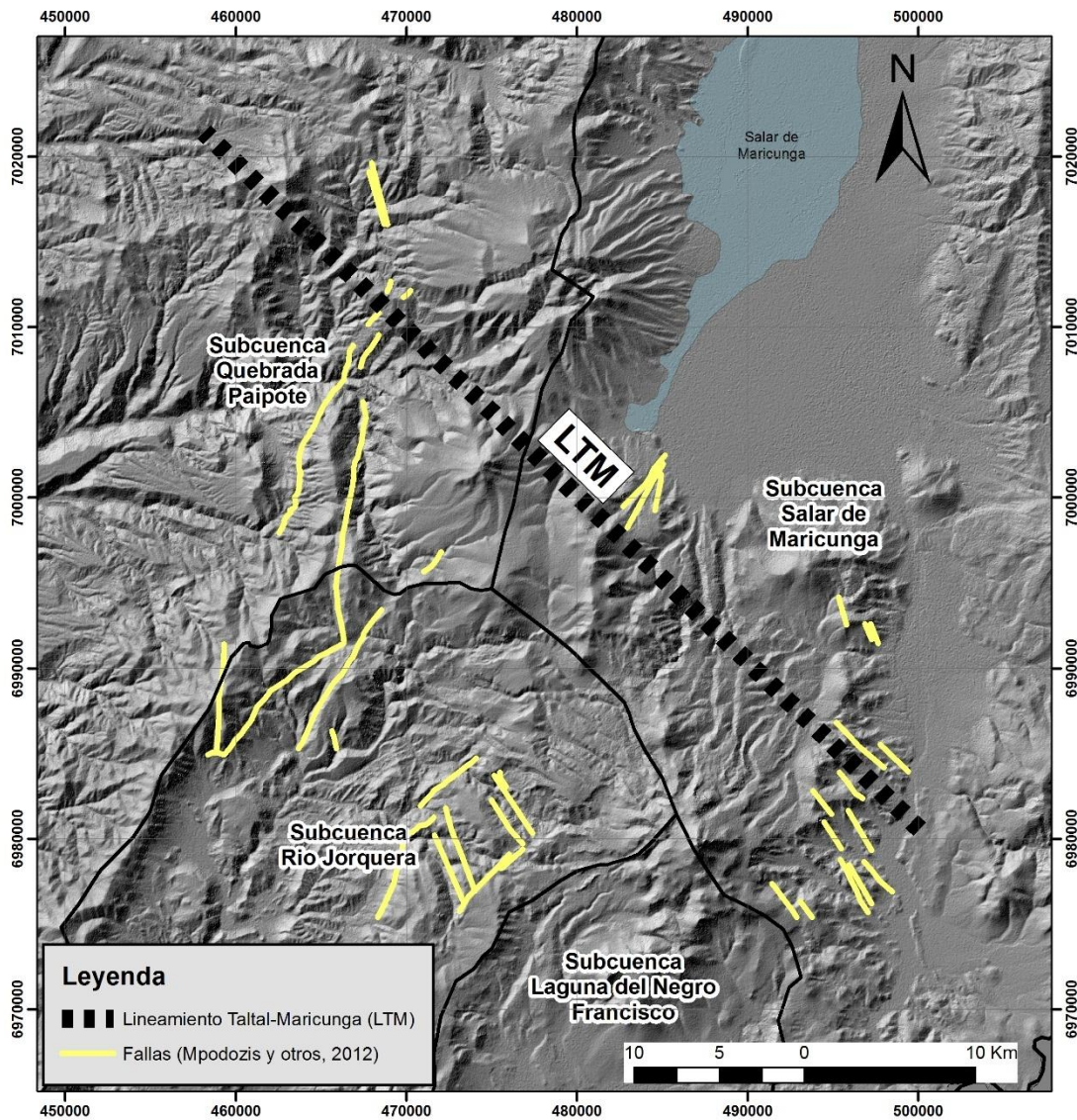
Los resultados analizados, a partir de las 12 muestras de agua recolectadas, han permitido identificar los procesos fisicoquímicos principales que afectan a las aguas de la CQP y CSDM, junto con algunas semejanzas y diferencias en la química determinada. Sin embargo, el exiguo número de éstas no ha permitido detectar todos los procesos que puedan ayudar a esclarecer la conexión o desconexión entre las dos cuencas. La interpretación hidrogeoquímica en un contexto hidrogeológico tan complejo requiere de datos adicionales para poder afirmar con seguridad la existencia de esta conexión. Sin embargo, un reanálisis de los antecedentes junto con esta nueva información permite elaborar un modelo conceptual que contemple esta posibilidad, y que tendrá que ser validado en terreno con estudios geológicos, estructurales e hidrogeológicos adicionales.

La existencia de flujos de agua subterránea entre cuencas altiplánicas cerradas, ha sido un punto de discusión entre diversos autores (Magaritz *y otros*, 1990; Montgomery *y otros*, 2003; Iriarte *y otros*, 2001; Risacher *y otros*, 2003; Lorca, 2011; Herrera *y otros*, 2016). Se ha propuesto tanto que el agua subterránea puede fluir a través de límites locales entre cuencas, evidenciado por la composición isotópica del agua (Herrera *y otros*, 2016), como también que la existencia de estos flujos entre cuencas endorreicas en el norte de Chile debiera ser considerada para un “desarrollo responsable” en el uso de los recursos hídricos (Montgomery *y otros*, 2003). Risacher *y otros* (2003) indican que, debido a la complejidad de la circulación de agua en formaciones volcánicas fracturadas, la infiltración podría transportar flujos de agua a cuencas adyacentes, e incluso más lejos. El autor concluye que los salares chilenos en la Cordillera de Los Andes no pueden ser considerados estrictamente como cuencas cerradas, pues de ser así se debieran observar modernas capas gruesas de sales, lo cual no ocurre. Particularmente, Lorca (2011) estudió la CQP y CSDM y, aunque no se obtuvieron resultados concluyentes, no se descartó la existencia de una conexión entre estas cuencas.

Diversos estudios en la zona han realizado modelos conceptuales y numéricos de la CSDM, generalmente con el fin de evaluar posibles impactos ambientales de proyectos mineros y/o industriales en la zona (EDRA, 1998; DGA, 2016; SIMCO SpA, 2018; Flosolutions, 2018). Estos muestran la complejidad del área de estudio al presentar posibles y diferentes interpretaciones de esta. Algunos de estos estudios han reportado superávit hídrico en la CSDM (SIMCO SpA (2018) y DGA (2016) en régimen natural), lo que no es consistente con una cuenca endorreica. SIMCO (2018) ha



reportado que los resultados obtenidos serían una consecuencia de la subestimación de la evaporación en la cuenca, a pesar de utilizar la estimación más alta realizada para la CSDM (GOLDER, 2011). Sin embargo, podrían no estar considerándose salidas laterales de la CSDM hacia la CQP.



**Figura 40:** Mapa Estructural zona de estudio. Se pueden ver en amarillo las fallas reconocidas en Mpodozis y otros (2012). Las fallas reconocidas en el sector sureste de la CSDM se ubican en la traza principal del Lineamiento Taltal-Maricunga (LTM).

Por otra parte, anteriormente la conexión entre la CSDM y la CQP había sido desestimada considerando el posible control estructural en el límite entre estas (Lorca, 2011). Debido a que el SFD tiene una orientación aproximadamente norte-sur, alineada con las unidades volcánicas de la Franja de Maricunga, los planos de falla no permitirían un transporte en sentido este-oeste, sino que actuaría como barrera hidrológica. Sin embargo, Espinoza y otros (2021) destacan que ha sido subestimado el

rol de los sistemas de fallas corticales preandinos de orientación NW en los procesos tectónicos que dominan la geología en el SFD. El autor propone que la intersección de estas fallas con el SFD habría promovido el emplazamiento de pórfidos de Cu-Mo, y que actualmente tienen un rol fundamental en la neotectónica del antearco andino. El sistema de lineamientos de fallas NW que afecta el área de estudio corresponde al "Lineamiento Taltal-Maricunga", y puede verse representado por fallas en la zona sureste del mapa geológico de Mpodozis y *otros* (2012), en las laderas al oeste de la quebrada Ciénaga Redonda (figura 40). Teniendo en cuenta este antecedente, la presencia de estas fallas al oeste de la Franja de Maricunga podría promover la circulación de flujos de agua subterránea entre las cuencas. Durante el terreno para el muestreo de agua para este estudio se pudo observar en la parte alta de la CQP afloramientos de rocas intensamente fracturadas, con sets de diaclasas en diversas direcciones (figura 22). Estas no pudieron ser analizadas en profundidad, pero podrían sugerir el potencial del sector quebrada Vizcachas, asociado a los lineamientos mencionados anteriormente.

Finalmente, es posible esbozar un modelo hidrogeológico conceptual (figura 41), que explica los resultados geoquímicos e isotópicos obtenidos, a través de una conexión entre cuencas vía rocas fracturadas. Este, recoge diferentes antecedentes hidrológicos, hidrogeológicos y estructurales que no descartan la existencia de esta conexión. Sin embargo, debe considerarse que los resultados de este estudio no son concluyentes para determinar con seguridad un flujo subterráneo de aguas entre las cuencas

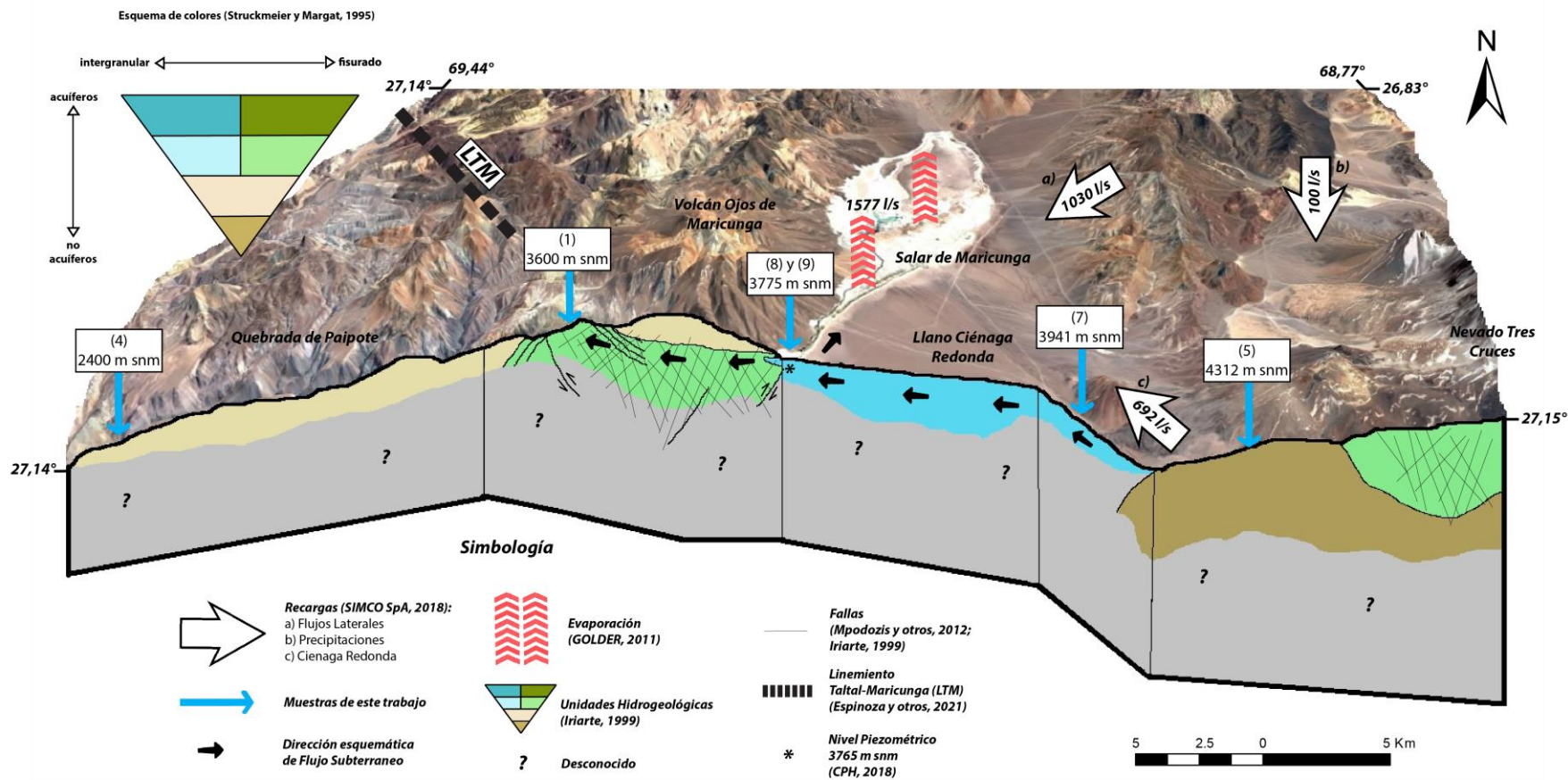


Figura 41: Modelo esquemático sistema hidrogeológico Salar de Maricunga-Quebrada de Paipote

## 6 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio contribuyen al entendimiento del origen y la calidad del agua de las vertientes utilizadas por la CCEB, así como su relación con la CSDM, aportando a mejorar la información hidrogeológica e hidrogeoquímica disponible para la línea base del territorio ancestral perteneciente a la comunidad. En este sentido, se logró dilucidar la posibilidad de una conexión entre la CSDM y la CQP, que explicaría parte de los aportes que dan origen a las aguas de las vertientes que nacen en la parte alta de la CQP, ubicadas en el territorio ancestral colla.

Los resultados de hidrogeoquímica indican que las aguas de la CQP y CSDM están sometidas a procesos de interacción agua-roca semejantes, los que tienen estrecha relación con la geología local. Sin embargo, existen diferencias en la química de las aguas de estas cuencas, ya que en la CSDM los procesos de interacción agua-roca parecen tener mayor intensidad que en la CQP. Además, las muestras tomadas en la CSDM están enriquecidas en cloruro, sodio y, en menor medida, en potasio, respecto a las de la CQP. Esto queda plasmado en la existencia de 2 tipos químicos: clorurado-sódicas en la CSDM, y sulfatado-cálcicas en la CQP. Por su lado, la mayor parte de los elementos minoritarios y trazas demuestran una mayor semejanza en las concentraciones encontradas en las aguas de ambas cuencas, lo que se puede ver claramente en los diagramas que visualizan estas concentraciones.

La estadística multivariante muestra resultados preliminares que indican que la mayoría de las aguas se correlacionan químicamente, tanto de la CSDM como de la CQP, y que las diferencias entre las muestras podrían asociarse al efecto de actividades antrópicas. En la CSDM el proceso principal parece ser la interacción agua-roca de alta intensidad, mientras que en la CQP dominaría la evaporación y la influencia de la agricultura artesanal. Sin embargo, la similitud mineralógica en el área de estudio limita la interpretación hidrogeoquímica. Por otra parte, algunas muestras no se alinean con las características mostradas por las demás muestras en cada cuenca, lo que también podría tener relación con otras variables no incluidas en este análisis.

Los resultados obtenidos de los isótopos estables de la molécula de agua, indican que las muestras analizadas son aguas meteóricas que han sufrido procesos de evaporación, al desviarse de la línea meteórica local y distribuirse a lo largo de la línea de evaporación. Sobre esta línea, los resultados indican que las aguas que han sido sometidas a procesos de evaporación más intensos corresponden a las muestras tomadas en la Laguna Santa Rosa. Luego, los valores sugieren un proceso de evaporación menos intenso en las aguas de la CSDM, fuera de la Laguna Santa Rosa, que en la CQP, lo que se condice con los resultados obtenidos de la estadística multivariante. Estos procesos de evaporación son característicos del altiplano y se ven favorecidos por la exposición en superficie de las aguas.

A pesar de que el número de muestras es exiguo, y que no se han podido detectar todos los procesos que puedan ayudar a esclarecer la conexión o desconexión

entre las dos cuencas, esta nueva información, junto a un reanálisis de antecedentes, han permitido elaborar un modelo conceptual que contemple esta posibilidad. La existencia de un sistema hidrogeológico interconectado, en el que las aguas de la CQP tienen parte de su origen en las aguas de la CSDM, había sido propuesta anteriormente a través de una conexión de cuencas mediante transporte subterráneo (Lorca, 2011; Risacher y *otros*, 2003). A esto se suma que los últimos balances hídricos evaluados en la CSDM obtienen resultados positivos (superávit) (Flosolutions, 2018; SIMCO SpA, 2018; DGA, 2016), y a que el contexto estructural local podría promover el transporte de agua bajo las rocas volcánicas de la Franja de Maricunga. Así, no se descarta una conexión entre las cuencas estudiadas, a través de estos sistemas de fallas, y que podría explicar el desbalance positivo obtenido en los últimos estudios.

Los resultados de este estudio deben considerarse como preliminares, ya que no son concluyentes para determinar con seguridad un flujo subterráneo de agua entre las cuencas. Los datos obtenidos en este trabajo resultan insuficientes para detallar los recorridos y la circulación del agua en un entorno geológico tan complejo. El número de muestras analizadas es exiguo, por lo cual se sugiere que en futuros trabajos se incluyan una cantidad mayor de muestras. Con el fin de obtener resultados concluyentes, que permitan resolver las interrogantes que restan para determinar el funcionamiento de este sistema hidrogeológico, se recomienda en primer lugar, la integración de datos geoquímicos realizados anteriormente, y la realización de un muestreo amplio de aguas ambas cuencas. Además, incluir análisis de elementos trazadores como el bromuro (Herrera y Custodio, 2000), e isótopos de estroncio, litio y boro (Godfrey y *otros*, 2019), podrían complementar los resultados de este estudio y garantizar su representatividad. Igualmente, es necesario profundizar en el rol del control estructural en la circulación de flujos, ya que este domina las secuencias rocosas en las que nacen las vertientes en la CQP, y en el límite occidental de la CSDM. Por otra parte, sería de gran aporte realizar perfiles TEM detallados que permitan conocer la geología de subsuperficie, específicamente en el límite suroeste del Salar de Maricunga.

La existencia de flujos subterráneos desde las cuencas altiplánicas hidrográficamente cerradas ha sido discutida por diversos autores, los que han advertido la importancia de esta interrogante en la gestión sustentable de los recursos hídricos y para el ecosistema (Montgomery y *otros*, 2003; Risacher y *otros*, 2003). En este caso, las condiciones de aridez extrema y la fragilidad del ecosistema hacen urgente la evaluación detallada de esta zona, donde el agua es fundamental tanto para su uso cotidiano como para mantener el equilibrio natural del medio, de alto valor cultural y natural. En esta línea, se destaca el aporte de este trabajo al entendimiento del sistema hidrogeológico local, que afecta directamente a la CCEB. Este complementa fuertemente la línea base que la comunidad está desarrollando, contribuyendo a la identificación de riesgos ambientales en el territorio, y para así asegurar la prosperidad de este.

Se resalta la importancia de incluir en los estudios técnicos la visión y comentarios de las comunidades que habitan el territorio, cuyo conocimiento es invaluable para comprender el funcionamiento de los ecosistemas. Estas observaciones fueron fundamentales para el desarrollo de este estudio, principalmente para encontrar los puntos muestreados y entender su importancia. Además, para entender la problemática local y los efectos de la gestión actual del territorio en sus quehaceres y sobre su cultura en general. Trabajar en conjunto con la comunidad ha permitido entender la problemática más allá del interés científico. Estas buenas prácticas permiten pensar en un futuro donde la gestión del agua pueda ser más participativa.

## 7 Bibliografía

- Acosta, O., & Custodio, E. (2008). Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). *Boletín Geológico y Minero*, 33-50.
- Acosta, O., Guimera, J., Custodio, E., Anson, I., & Delgado, J. (2013). Contribución al conocimiento de la hidrogeología de las cuencas intraandinas del N de Chile. *VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea*. La Plata.
- Brown, M., Diaz, F., & Grocott, J. (1993). Displacement history of the Atacama fault system 25° 00' S-27° 00' S, northern Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 1165-1174.
- Cahill, T., & Isacks, B. L. (1992). Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 17503-17529.
- Cárdenas, L. (8 de Enero de 2019). Minera canadiense demanda a comunidad indígena de Atacama y exige millonaria devolución. *La Tercera*.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. (2007). *Tectono-stratigraphic Evolution of the Andean Orogen in Chile*. In *The Geology of Chile* (Moreno, T., Gibbons, W., editors). The Geological Society of London, Special Publication.
- Clark, I., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 294-313.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C., & Ramos, V. (1982). Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth Science Reviews*, 303-332.
- Coira, B., Kay, S. M., & Viramonte, J. (1993). Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna—A model for changing subduction geometry. *International Geology Review*, 677-720.
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2020). *El mercado del litio y la importancia de Chile*. Santiago: Ministerio de Minería de Chile.

- Cornejo, P., Mpodozis, C., & Tomlinson, A. (1998). *Hoja Salar de Maricunga, Región de Atacama*. mapa escala 1:100.000, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos.
- CPH. (2018). *Modelo conceptual hidrogeológico del Salar de Maricunga. Capítulo 5: Modelo Conceptual*. Santiago.
- Davidson, J., & Mpodozis, C. (1978). *Geología de la Precordillera de Copiapó; las nacientes de Quebrada Paipote al oeste de Salar de Maricunga*. Departamento de Geología Universidad de Chile Comunicaciones.
- 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*. Realizado por DICTUC para DGA. (2008-2009). S.I.T. N° 157 (parte I).
- DGA. (2009). *Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama ubicadas entre el Río Copiapó y la Región de Antofagasta*. S.D.T. N° 276. Elaborado por DGA.
- DGA. (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*. Realizado por DICTUC para DGA. (2009). S.I.T. N° 195. (Parte II).
- DGA. (2010). *Cuencas Altiplánicas*. Obtenido de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx#trees>
- DGA. (2010). *Subcuencas Banco Nacional de Aguas*. Obtenido de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx#trees>
- DGA. (2013). *Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto Andinas de la Región de Atacama*. S.I.T.N°329. Realizado por AQUATERRA Ingenieros Limitada para DGA.
- DGA. (2016). *Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama (Fase 3)*. S.I.T. N° 398.
- Dingman, R. (1962). Tertiary salt domes near San Pedro de Atacama, Chile. . *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 450-D, D92– D94.
- Dingman, R. (1967). Geology and ground-water resources of the northern part of the salar de Atacama, Antofagasta Province, Chile. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1219.



- EDRA. (1998). *Estudio Hidrológico del Salar de Maricunga. Realizado para Minera Santa Rosa.*
- Espinoza, M., Oliveros, V., Vásquez, P., Giambiagi, L., Morgan, L., Gonzalez, R., . . . Bechis, F. (2021). Gondwanan inheritance on the building of the western Central Andes (Domeyko Range, Chile): Structural and thermochronological approach (U-Pb and  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ ). *Tectonics*.
- Flosolutions. (2018). *Estudio de Impacto Ambiental "Minera Salar Blanco S.A."*.
- Garcés, I. (Febrero de 2019). Maricunga al banquillo de los acusados. *Le monde diplomatique*.
- Godfrey, L., Herrera, C., Gamboa, C., & Mathur, R. (2019). Chemical and isotopic evolution of groundwater through the active Andean. *Chemical Geology*, 32-44.
- GOLDER. (2011). *Línea Base Hidrogeológica e Hidrológica Lobo Marte./ Estudio de Impacto Ambiental Proyecto "Reinicio y Expansión del Proyecto Lobo Marte". Elaborado por Golder para Kinross Gold Corporation.*
- GOLDER. (2016). *Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto "Explotación de Minerales La Coipa Fase 7". Elaborado por Golder para Minera Mantos de Oro.*
- Guler, C., Thyne, G., Mccray, J., & Keith turner, A. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 455-474.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
- Herrera, C., & Custodio Gimena, E. (2000). Utilización de la relación Cl-Br como trazador hidroquímico en hidrología subterránea. *Boletín geológico y minero*, 49-68.
- Herrera, H., 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 Tuyajto, northern Chilean Altiplano of the Andes. *Science of the Total Environment*, 303-318.
- Hounslow, A. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC Press.
- Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE). (2018). *Radiografía de Género: Pueblos Originarios en Chile 2017*. Santiago de Chile.

- Iriarte, S. (1999). *Mapa Hidrogeológico de la Cuenca Salar de Maricunga (Sector Salar de Maricunga), Región de Atacama*. 1 mapa escala 1:100.000, Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo No. 13, Santiago.
- Iriarte, S., Santibáñez, I., & Aravena, R. (2001). Evaluation of the Hydrogeological Interconnection between the Salar de Maricunga and the Piedra Pomez Basins, Atacama Región, Chile: an Isotope and Geochemical Approach. *South American Symposium on Isotope Geology*. Pucon.
- Jordan, T. E., & Gardeweg, M. (1989). Tectonic evolution of the late Cenozoic central Andes (20-33 S). *The Evolution of the Pacific Ocean Margins*, 193-207.
- Lorca, M. E. (2011). Hidrogeología e Hidrogeoquímica de la Cuenca de la Quebrada de Paipote, Región de Atacama, Chile. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Mención Geología, Universidad de Chile*, 125.
- Magaritz, M., Aravena, R., Pena, H., Suzuki, O., & Grilli, A. (1990). Source of Ground Water in the Deserts of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Ground Water from the Andes. *Ground Water*, 513-517.
- Maksaev, V. (1990). *Metallogeny, geological evolution, and thermochronology of the Chilean Andes between latitudes 21° and 26° south, and the origin of major porphyry copper deposits. Ph. D. Thesis (Unpublished)*. Nova Scotia: Dalhousie University.
- Mercado, M. (1982). *Geología de la Hoja Laguna del Negro Francisco, Región de Atacama: escala 1: 100.000*. Carta Geol. Chile, N° 56, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile).
- Ministerio de Educación y Depotes de la Nación Argentina. (2016). *Kollas de Jujuy. Un pueblo, muchos pueblos*. Buenos Aires.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2016). *Pueblos Indígenas: Consulta y Territorio*. Santiago de Chile.
- Montgomery, E., Rosko, M., Castro, S., Keller, B., & Bevacqua, P. (2003). Interbasin Underflow between Closed Altiplano Basins in Chile. *Ground Water*, 523–531.
- Mortimer, C. (1973). The Cenozoic history of the southern Atacama desert, Chile. *Journal of the Geological Society*, 505-526.
- Mpodozis, C., & Ramos, V. (1990). The Andes of Chile and Argentina; in: Ericksen, G.E., Cañas, M.T. and Reinemund, J.A. (Editors) *Geology of the Andes and Its Relation to Hydrocarbon and Energy Resources. Circum-Pacific Council for Energy and Hydrothermal Resources, American Association of Petroleum Geologists, Earth Science Series*, (págs. 59-90). Texas.

- Mpodozis, C., Cornejo, P., Kay, S., & Tittler, A. (1995). La Franja de Maricunga: Síntesis de la evolución del Frente Volcánico Oligoceno-Mioceno de la zona sur de los Andes Centrales. *Andean Geology*, 22(2), 273-313.
- Mpodozis, C., Iriarte, S., Gardeweg, M., & Valenzuela, M. (2012). *Carta Laguna del Negro Francisco, Región de Atacama*. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 145:30p., 1 mapa escala 1:100.000, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Mpodozis, C., Marinovic, N., Smoje, I., & Cuitiño, L. (1993). *Estudio Geológico-Estructural de la Cordillera de Domeyko entre Sierra Limón Verde y Sierra Mariposas, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Muzzio, G. (1978). *Sedimentitas rojas jurásicas de Quebrada Monardes, Precordillera de Copiapó*. Taller de Título 2, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Springer.
- Niemeyer, H. (1968). *Estudio de las cuencas cerradas de la cuenca de Copiapó*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Dirección de Riego.
- Pardo-Casas, F., & Molnar, P. (1987). Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics*, 233-248.
- Pressly, L. (20 de octubre de 2019). Litio: la fiebre del "oro blanco", ¿fortuna o infortunio para Argentina? *BBC Mundo*.
- Riquelme, R., Darrozes, J., Maire, E., Hérail, G., & Soula, J. C. (2008). Long-term denudation rates from the Central Andes (Chile) estimated from a Digital Elevation Model using the Black Top Hat function and Inverse Distance Weighting: implications for the Neogene climate of the Atacama Desert. *Andean Geology*, 105-121.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas, I, II, III Regiones, Chile*. Technical Report S.I.T. No. 51, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 249–293.
- Rozanski, K., Arguás-Arguás, L., & Gonfiantini, R. (1993). Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. *Climate change in continental isotopic records*, 78, 1-36.
- Rutland, R. W. (1971). Andean orogeny and ocean floor spreading. *Nature*, 252-255.

- Scheihing, K., Moya, C., Struck, U., Lictévout, E., & Tröger, U. (2018). Reassessing hydrological processes that control stable isotope tracers in groundwater of the Atacama Desert (Northern Chile). *Hydrology*, 3.
- Scheuber, E., & Reutter, K. (1992). Relation between Tectonics and Magmatism in the Andes of Northern Chile and Adjacent Areas between 21° and 25°S. *Tectonophysics*, 127-140.
- Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A., & Reutter, K. (1994). Tectonic Development of the North Chilean Andes in Relation to Plate Convergence and Magmatism since the Jurassic; in: Reutter, K.-J., Scheuber, E. & Wigger, P. (editores): *Tectonics of the Southern Central Andes*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, NY. 121-139.
- Segerstrom, K. (1959). *Cuadrado Los Loros, provincia de Atacama*. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- SIMCO SpA. (2018). *Estudio de Impacto Ambiental "Producción Sales de Maricunga" (Aprobado por SEIA, sept. 2020)*.
- Smalley Jr, R. F., & Isacks, B. L. (1987). A high-resolution local network study of the Nazca Plate Wadati-Benioff Zone under western Argentina. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 13903-13912.
- Stern, C. R. (1991). Role of subduction erosion in the generation of Andean magmas. *Geology*, 78-81.
- Struckmeier, W. F., & Margat, J. (s.f.). *Hydrogeological maps. A Guide and a Standard*. Hannover.
- Tribunal Ambiental. (23 de Noviembre de 2018). Tribunal Ambiental de Santiago condena a Minera Maricunga por daño ambiental en humedal altoandino de la Región de Atacama. Santiago, Chile.
- von Heune, R., & Lallemand, S. (1990). Tectonic erosion along the Japan and Peru convergent margins. *Geological Society of America Bulletin*, 704-720.
- Zeler, M., Troncoso, I., & Gutiérrez, J. L. (2014). *Aguadas: humedales de importancia para la conservación en la región de Atacama*. CIREN.
- Zentilli, M. (1991). Native Sulphur Deposits as The Crown Of Epithermal Systems?- Isotopic and Geochronological Data On The Copiapó Complex, Maricunga, Northern Chile. *In Congreso Geológico Chileno*, 616-620.

## 8 Anexos

ID	Ubicación			Parámetros Físicoquímicos					Componentes Mayoritarios (mg/l)							
	UTM N	UTM E	Elevación	CE Lab	CE (is)	pH (is)	pH Lab	T° (is)	Ca++	Mg++	K+	Na+	HCO3-	Cl-	NO3-	SO4--
1	7006268	474520	3600	451	430	8,21	8,02	12,2	39,9	7,48	3,48	41,3	74,8	8,67	17,1	121
2	7008769	472623	3517	772	740	7,45	7,78	14,5	107	3,94	4,95	47,9	85,6	7,94	8,36	292
3	6999397	468116	3578	350	330	7,77	8	12,1	39,4	5,22		24,5	119	3,18	3,7	62,5
4	6999063	443330	2400	2459	2390	7,45	7,59	18,6	275	42,2	3,3	229	271	116	1,63	963
5	6960722	495961	4312	714	690	8,37	8,41	7,3	27,7	7,61	4,53	86,4	145	78,4	4,33	88,2
6	6988598	494258	4107	683	670	6,73	7,13	7	76,2	9,16	7,77	39,9	31,8	16	6,47	271
7	6998043	499570	3941	1304	1270	8,44	8,3	14,5	91,5	12,3	9,74	131	95,9	252	0,2	175
8	7004580	482639	3775	11577	11900	8,9	8,57	11,7	715	117	91	1453	51,4	3967	0,2	100
9	7004551	482646	3775	11362	11600	8,43	7,93	8,3	852	158	63,8	1425	94,9	3052	1,51	2045
10	7012355	469526	3626	861	830	7,35	7,69	7,4	118	10,2	2,48	36	48,3	13,4	25,6	341
11	7016952	467765	3504	544	520	9,23	8,85	15,6	35,9	10,8	2,54	43,8	96,3	10,6	4,28	149
12	7002912	479787	3868	692	700	8,55	7,6	4,2	45,9	8,7	7,53	66,9	228	83	3,75	13,9

**Anexo A:** Tabla general química de muestras post filtro por límite de detección 1: Ubicación, Parámetros Físicoquímicos y Componentes Mayoritarios. La elevación se encuentra en m s.n.m., la conductividad eléctrica (CE) en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la temperatura (T°) en °C. *is* corresponden a medidas *in situ* realizadas en terreno. Sin valor se encuentran las mediciones bajo el límite de detección.

<i>Componentes Minoritarios y Trazas (<math>\mu\text{g/l}</math>)</i>																
<b>ID</b>	<b>As</b>	<b>Ba</b>	<b>B</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Sc</b>	<b>Sr</b>	<b>Ga</b>	<b>Li</b>	<b>Mn</b>	<b>Hg</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Ti</b>	<b>Th</b>	<b>V</b>
<b>1</b>	60,6	15,64	207			2,56	202,9	0,9	34,31	0,8		3,88	0,86	0,88	0,14	6,34
<b>2</b>	10,26	21,49	191	0,12	0,55	3,35	295,8	1,4	38,23	0,9	0,11	3,29	1,82	1,81	0,14	1,73
<b>3</b>	10,66	12,39	115			1,71	196,9	0,8	23,29	0,8	0,12	5,73	0,93	0,27	0,14	6,21
<b>4</b>	2,35	11,07	3140	0,17	0,65	1,62	3435	0,6	105,85	3	0,1	40,49	3,91	6,97	0,14	1,9
<b>5</b>	495,4	18,12	2590		0,55	1,43	390,1	1,4	383,84			3,66	0,44	0,49	0,1	6,92
<b>6</b>	146,49	10,26	732			2,62	224,5	0,6	322,41	2,7	0,13	2,08	1,17	1,78	0,12	5,66
<b>7</b>	410,82	25,86	3610	1,36	1,35	2,28	867,8	1,7	1144	0,9	0,13	3,71	1,11	1,38	0,12	8,9
<b>8</b>	9,52	752,63	4900	0,48	1,35	2,01	6016	48,9	10220	7,9	0,15	1,11	8,65	4,94	0,11	1,5
<b>9</b>	93,62	102,87	9660	0,58	4,73	2,37	5757	7,1	12574	9,8	0,13	6,59	10,15	16,1	0,11	16,44
<b>10</b>	9,28	14,98	223	0,07	1,09	2,31	519,1	1	48,27	0,5		3,91	1,49	2,46	0,1	2,14
<b>11</b>	4,5	16,05	647	0,19	4,15	0,49	207,6	1,1	27,41	1,8		3,66	2,18	2,7	0,1	21
<b>12</b>	11,51	39,75	434	0,08	0,66	3,15	133,7	2,3	38,68	7,2	0,18	0,87	1,47		0,19	1,43

**Anexo B:** Tabla general química de muestras post filtro por límite de detección 2: Componentes minoritarios y Trazas. Sin valor se encuentran las mediciones bajo el límite de detección.

	<i>Ca++</i>	<i>Mg++</i>	<i>K+</i>	<i>Na+</i>	<i>HCO3-</i>	<i>Cl-</i>	<i>NO3-</i>	<i>SO4--</i>	<i>As</i>	<i>Ba</i>	<i>B</i>
<i>Ca++</i>	X	0,64	0,49	0,53	-0,31	0,59	-0,36	0,67	-0,28	0,31	0,50
<i>Mg++</i>	0,64	X	0,47	0,68	-0,03	0,85	-0,64	0,45	-0,17	0,33	0,88
<i>K+</i>	0,49	0,47	X	0,71	-0,27	0,74	-0,51	0,09	0,45	0,68	0,70
<i>Na+</i>	0,53	0,68	0,71	X	0,26	0,86	-0,71	0,19	0,06	0,68	0,84
<i>HCO3-</i>	-0,31	-0,03	-0,27	0,26	X	0,07	-0,36	-0,29	-0,08	0,04	0,03
<i>Cl-</i>	0,59	0,85	0,74	0,86	0,07	X	-0,71	0,20	0,15	0,55	0,94
<i>NO3-</i>	-0,36	-0,64	-0,51	-0,71	-0,36	-0,71	X	0,06	-0,05	-0,49	-0,69
<i>SO4--</i>	0,67	0,45	0,09	0,19	-0,29	0,20	0,06	X	-0,23	-0,17	0,32
<i>As</i>	-0,28	-0,17	0,45	0,06	-0,08	0,15	-0,05	-0,23	X	0,19	0,20
<i>Ba</i>	0,31	0,33	0,68	0,68	0,04	0,55	-0,49	-0,17	0,19	X	0,45
<i>B</i>	0,50	0,88	0,70	0,84	0,03	0,94	-0,69	0,32	0,20	0,45	X
<i>Co</i>	0,59	0,74	0,52	0,72	0,09	0,65	-0,70	0,39	-0,20	0,63	0,66
<i>Cu</i>	0,45	0,78	0,36	0,59	0,06	0,63	-0,51	0,31	-0,22	0,64	0,64
<i>Sc</i>	0,29	-0,31	0,37	-0,15	-0,43	-0,11	0,33	0,13	0,24	0,15	-0,27
<i>Sr</i>	0,76	0,76	0,49	0,72	-0,20	0,73	-0,48	0,59	-0,08	0,34	0,78
<i>Ga</i>	0,31	0,35	0,67	0,65	0,01	0,58	-0,47	-0,16	0,21	0,99	0,47
<i>Li</i>	0,59	0,70	0,79	0,75	-0,18	0,89	-0,51	0,34	0,40	0,48	0,90
<i>Mn</i>	0,60	0,65	0,64	0,62	0,04	0,64	-0,61	0,22	-0,19	0,43	0,58
<i>Hg</i>	0,42	0,30	0,72	0,41	-0,02	0,54	-0,62	-0,18	0,22	0,49	0,37
<i>Mo</i>	0,21	0,21	-0,44	-0,05	0,22	-0,07	-0,08	0,52	-0,18	-0,37	0,04
<i>Ni</i>	0,76	0,69	0,32	0,53	-0,08	0,48	-0,39	0,56	-0,59	0,35	0,48
<i>Ti</i>	0,73	0,74	0,23	0,49	-0,24	0,44	-0,26	0,78	-0,48	0,12	0,57
<i>Th</i>	0,02	-0,40	0,00	-0,09	0,31	-0,21	-0,05	-0,22	-0,03	-0,10	-0,39
<i>V</i>	-0,33	0,18	-0,11	-0,06	0,04	-0,06	-0,08	0,18	0,34	-0,06	0,22

**Anexo C:** Matriz de correlaciones de Spearman 1

	<i>Co</i>	<i>Cu</i>	<i>Sc</i>	<i>Sr</i>	<i>Ga</i>	<i>Li</i>	<i>Mn</i>	<i>Hg</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Th</i>	<i>V</i>
<b><i>Ca++</i></b>	0,59	0,45	0,29	0,76	0,31	0,59	0,60	0,42	0,21	0,76	0,73	0,02	-0,33
<b><i>Mg++</i></b>	0,74	0,78	-0,31	0,76	0,35	0,70	0,65	0,30	0,21	0,69	0,74	-0,40	0,18
<b><i>K+</i></b>	0,52	0,36	0,37	0,49	0,67	0,79	0,64	0,72	-0,44	0,32	0,23	0,00	-0,11
<b><i>Na+</i></b>	0,72	0,59	-0,15	0,72	0,65	0,75	0,62	0,41	-0,05	0,53	0,49	-0,09	-0,06
<b><i>HCO3-</i></b>	0,09	0,06	-0,43	-0,20	0,01	-0,18	0,04	-0,02	0,22	-0,08	-0,24	0,31	0,04
<b><i>Cl-</i></b>	0,65	0,63	-0,11	0,73	0,58	0,89	0,64	0,54	-0,07	0,48	0,44	-0,21	-0,06
<b><i>NO3-</i></b>	-0,70	-0,51	0,33	-0,48	-0,47	-0,51	-0,61	-0,62	-0,08	-0,39	-0,26	-0,05	-0,08
<b><i>SO4--</i></b>	0,39	0,31	0,13	0,59	-0,16	0,34	0,22	-0,18	0,52	0,56	0,78	-0,22	0,18
<b><i>As</i></b>	-0,20	-0,22	0,24	-0,08	0,21	0,40	-0,19	0,22	-0,18	-0,59	-0,48	-0,03	0,34
<b><i>Ba</i></b>	0,63	0,64	0,15	0,34	0,99	0,48	0,43	0,49	-0,37	0,35	0,12	-0,10	-0,06
<b><i>B</i></b>	0,66	0,64	-0,27	0,78	0,47	0,90	0,58	0,37	0,04	0,48	0,57	-0,39	0,22
<b><i>Co</i></b>	X	0,87	-0,12	0,63	0,61	0,49	0,60	0,38	0,06	0,70	0,62	-0,17	0,15
<b><i>Cu</i></b>	0,87	X	-0,25	0,55	0,67	0,47	0,50	0,20	0,05	0,69	0,60	-0,49	0,27
<b><i>Sc</i></b>	-0,12	-0,25	X	-0,23	0,13	0,01	0,20	0,42	-0,35	0,00	-0,20	0,53	-0,45
<b><i>Sr</i></b>	0,63	0,55	-0,23	X	0,36	0,81	0,34	0,12	0,26	0,58	0,77	-0,45	0,04
<b><i>Ga</i></b>	0,61	0,67	0,13	0,36	X	0,52	0,40	0,49	-0,39	0,34	0,12	-0,19	-0,05
<b><i>Li</i></b>	0,49	0,47	0,01	0,81	0,52	X	0,43	0,43	-0,04	0,34	0,43	-0,36	0,04
<b><i>Mn</i></b>	0,60	0,50	0,20	0,34	0,40	0,43	X	0,72	-0,18	0,77	0,51	0,21	-0,22
<b><i>Hg</i></b>	0,38	0,20	0,42	0,12	0,49	0,43	0,72	X	-0,43	0,30	-0,05	0,40	-0,42
<b><i>Mo</i></b>	0,06	0,05	-0,35	0,26	-0,39	-0,04	-0,18	-0,43	X	0,08	0,34	-0,06	0,43
<b><i>Ni</i></b>	0,70	0,69	0,00	0,58	0,34	0,34	0,77	0,30	0,08	X	0,86	-0,15	-0,17
<b><i>Ti</i></b>	0,62	0,60	-0,20	0,77	0,12	0,43	0,51	-0,05	0,34	0,86	X	-0,41	0,13
<b><i>Th</i></b>	-0,17	-0,49	0,53	-0,45	-0,19	-0,36	0,21	0,40	-0,06	-0,15	-0,41	X	-0,51
<b><i>V</i></b>	0,15	0,27	-0,45	0,04	-0,05	0,04	-0,22	-0,42	0,43	-0,17	0,13	-0,51	X

**Anexo D:** Matriz de correlación de Spearman 2



	<i>Ca++</i>	<i>Mg++</i>	<i>K+</i>	<i>Na+</i>	<i>HCO3-</i>	<i>Cl-</i>	<i>NO3-</i>	<i>SO4--</i>	<i>As</i>	<i>Ba</i>	<i>B</i>
<i>Ca++</i>	X	0,40	0,24	0,28	0,10	0,35	0,13	0,45	0,08	0,09	0,25
<i>Mg++</i>	0,40	X	0,22	0,46	0,00	0,72	0,42	0,21	0,03	0,11	0,78
<i>K+</i>	0,24	0,22	X	0,50	0,07	0,55	0,26	0,01	0,21	0,46	0,49
<i>Na+</i>	0,28	0,46	0,50	X	0,07	0,74	0,51	0,04	0,00	0,46	0,70
<i>HCO3-</i>	0,10	0,00	0,07	0,07	X	0,00	0,13	0,09	0,01	0,00	0,00
<i>Cl-</i>	0,35	0,72	0,55	0,74	0,00	X	0,50	0,04	0,02	0,31	0,88
<i>NO3-</i>	0,13	0,42	0,26	0,51	0,13	0,50	X	0,00	0,00	0,24	0,48
<i>SO4--</i>	0,45	0,21	0,01	0,04	0,09	0,04	0,00	X	0,05	0,03	0,10
<i>As</i>	0,08	0,03	0,21	0,00	0,01	0,02	0,00	0,05	X	0,04	0,04
<i>Ba</i>	0,09	0,11	0,46	0,46	0,00	0,31	0,24	0,03	0,04	X	0,20
<i>B</i>	0,25	0,78	0,49	0,70	0,00	0,88	0,48	0,10	0,04	0,20	X
<i>Co</i>	0,35	0,55	0,27	0,52	0,01	0,42	0,48	0,15	0,04	0,39	0,43
<i>Cu</i>	0,20	0,61	0,13	0,35	0,00	0,39	0,26	0,10	0,05	0,40	0,41
<i>Sc</i>	0,09	0,10	0,14	0,02	0,18	0,01	0,11	0,02	0,06	0,02	0,07
<i>Sr</i>	0,57	0,57	0,24	0,52	0,04	0,53	0,23	0,35	0,01	0,11	0,61
<i>Ga</i>	0,09	0,13	0,45	0,42	0,00	0,33	0,22	0,03	0,04	0,98	0,22
<i>Li</i>	0,35	0,49	0,62	0,56	0,03	0,79	0,27	0,12	0,16	0,23	0,80
<i>Mn</i>	0,36	0,42	0,40	0,38	0,00	0,41	0,37	0,05	0,04	0,19	0,34
<i>Hg</i>	0,17	0,09	0,51	0,16	0,00	0,29	0,39	0,03	0,05	0,24	0,14
<i>Mo</i>	0,05	0,04	0,20	0,00	0,05	0,01	0,01	0,27	0,03	0,14	0,00
<i>Ni</i>	0,58	0,48	0,10	0,28	0,01	0,23	0,15	0,31	0,35	0,12	0,23
<i>Ti</i>	0,53	0,55	0,05	0,24	0,06	0,19	0,07	0,61	0,23	0,01	0,32
<i>Th</i>	0,00	0,16	0,00	0,01	0,09	0,04	0,00	0,05	0,00	0,01	0,15
<i>V</i>	0,11	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,12	0,00	0,05

**Anexo E:** Coeficientes de Determinación de Spearman 1.

	<i>Co</i>	<i>Cu</i>	<i>Sc</i>	<i>Sr</i>	<i>Ga</i>	<i>Li</i>	<i>Mn</i>	<i>Hg</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Th</i>	<i>V</i>
<b><i>Ca++</i></b>	0,35	0,20	0,09	0,57	0,09	0,35	0,36	0,17	0,05	0,58	0,53	0,00	0,11
<b><i>Mg++</i></b>	0,55	0,61	0,10	0,57	0,13	0,49	0,42	0,09	0,04	0,48	0,55	0,16	0,03
<b><i>K+</i></b>	0,27	0,13	0,14	0,24	0,45	0,62	0,40	0,51	0,20	0,10	0,05	0,00	0,01
<b><i>Na+</i></b>	0,52	0,35	0,02	0,52	0,42	0,56	0,38	0,16	0,00	0,28	0,24	0,01	0,00
<b><i>HCO3-</i></b>	0,01	0,00	0,18	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,05	0,01	0,06	0,09	0,00
<b><i>Cl-</i></b>	0,42	0,39	0,01	0,53	0,33	0,79	0,41	0,29	0,01	0,23	0,19	0,04	0,00
<b><i>NO3-</i></b>	0,48	0,26	0,11	0,23	0,22	0,27	0,37	0,39	0,01	0,15	0,07	0,00	0,01
<b><i>SO4--</i></b>	0,15	0,10	0,02	0,35	0,03	0,12	0,05	0,03	0,27	0,31	0,61	0,05	0,03
<b><i>As</i></b>	0,04	0,05	0,06	0,01	0,04	0,16	0,04	0,05	0,03	0,35	0,23	0,00	0,12
<b><i>Ba</i></b>	0,39	0,40	0,02	0,11	0,98	0,23	0,19	0,24	0,14	0,12	0,01	0,01	0,00
<b><i>B</i></b>	0,43	0,41	0,07	0,61	0,22	0,80	0,34	0,14	0,00	0,23	0,32	0,15	0,05
<b><i>Co</i></b>	X	0,75	0,01	0,40	0,37	0,24	0,36	0,14	0,00	0,49	0,38	0,03	0,02
<b><i>Cu</i></b>	0,75	X	0,06	0,30	0,44	0,22	0,25	0,04	0,00	0,47	0,36	0,24	0,07
<b><i>Sc</i></b>	0,01	0,06	X	0,05	0,02	0,00	0,04	0,18	0,13	0,00	0,04	0,28	0,21
<b><i>Sr</i></b>	0,40	0,30	0,05	X	0,13	0,66	0,11	0,01	0,07	0,34	0,59	0,21	0,00
<b><i>Ga</i></b>	0,37	0,44	0,02	0,13	X	0,27	0,16	0,24	0,15	0,12	0,01	0,04	0,00
<b><i>Li</i></b>	0,24	0,22	0,00	0,66	0,27	X	0,18	0,19	0,00	0,11	0,19	0,13	0,00
<b><i>Mn</i></b>	0,36	0,25	0,04	0,11	0,16	0,18	X	0,52	0,03	0,59	0,26	0,04	0,05
<b><i>Hg</i></b>	0,14	0,04	0,18	0,01	0,24	0,19	0,52	X	0,19	0,09	0,00	0,16	0,17
<b><i>Mo</i></b>	0,00	0,00	0,13	0,07	0,15	0,00	0,03	0,19	X	0,01	0,12	0,00	0,19
<b><i>Ni</i></b>	0,49	0,47	0,00	0,34	0,12	0,11	0,59	0,09	0,01	X	0,74	0,02	0,03
<b><i>Ti</i></b>	0,38	0,36	0,04	0,59	0,01	0,19	0,26	0,00	0,12	0,74	X	0,17	0,02
<b><i>Th</i></b>	0,03	0,24	0,28	0,21	0,04	0,13	0,04	0,16	0,00	0,02	0,17	X	0,26
<b><i>V</i></b>	0,02	0,07	0,21	0,00	0,00	0,00	0,05	0,17	0,19	0,03	0,02	0,26	X

**Anexo F:** Coeficientes de Determinación de Spearman 2.

	<i>Unidades</i>	<i>Precisión</i>	<i>Límite Detección</i>	<i>Técnica</i>		<i>Unidades</i>	<i>Precisión</i>	<i>Límite Detección</i>	<i>Técnica</i>
<b>C.E.</b>	μS/cm (25°C)	-	10	Electrometría	<b>Sn</b>	mg/l	±10%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>pH</b>		-	0,1	Electrometría	<b>Sr</b>	mg/l	±12%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Ca</b>	mg/l	-	0,5	Espect ICP-OES	<b>P</b>	mg/l	-	0,005	Espect ICP-MS
<b>Mg</b>	mg/l	±19%	0,2	Espect ICP-OES	<b>Ga</b>	mg/l	±13%	0,0001	Espect ICP-MS
<b>K</b>	mg/l	±19%	1	Espect ICP-OES	<b>Fe</b>	mg/l	±12%	0,005	Espect ICP-MS
<b>Na</b>	mg/l	±19%	0,5	Espect ICP-OES	<b>Li</b>	mg/l	±7%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>HCO3</b>	mg/l HCO3	-	10	Titulación	<b>Mg</b>	mg/l	-	0,01	Espect ICP-MS
<b>Cl</b>	mg/l	-	0,5	Cromatog Iónica	<b>Mn</b>	mg/l	±9%	0,0005	Espect ICP-MS
<b>NO3</b>	mg/l	-	0,2	Cromatog Iónica	<b>Hg</b>	mg/l	±12%	0,00010	Espect ICP-MS
<b>SO4</b>	mg/l	-	0,5	Cromatog Iónica	<b>Mo</b>	mg/l	±7%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Al</b>	ug/l	±10%	0,005	Espect ICP-MS	<b>Ni</b>	mg/l	±11%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Sb</b>	mg/l	±19%	0,00025	Espect ICP-MS	<b>Ag</b>	mg/l	±7%	0,0005	Espect ICP-MS
<b>As</b>	mg/l	±11%	0,00025	Espect ICP-MS	<b>Pb</b>	mg/l	±12%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Ba</b>	mg/l	±8%	0,00025	Espect ICP-MS	<b>Se</b>	mg/l	±18%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Be</b>	mg/l	±6%	0,00025	Espect ICP-MS	<b>Tl</b>	mg/l	±4%	0,00005	Espect ICP-MS
<b>Bi</b>	mg/l	±9%	0,00025	Espect ICP-MS	<b>Te</b>	mg/l	±8%	0,0001	Espect ICP-MS
<b>B</b>	mg/l	±18%	0,005	Espect ICP-MS	<b>Ti</b>	mg/l	±14%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Cd</b>	mg/l	±5%	0,00005	Espect ICP-MS	<b>U</b>	mg/l	±8%	0,00005	Espect ICP-MS
<b>Co</b>	mg/l	±12%	0,00005	Espect ICP-MS	<b>V</b>	mg/l	±6%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Cu</b>	mg/l	±7%	0,00025	Espect ICP-MS	<b>W</b>	mg/l	±7%	0,00025	Espect ICP-MS
<b>Cr</b>	mg/l	±8%	0,00025	Espect ICP-MS	<b>Zn</b>	mg/l	±12%	0,005	Espect ICP-MS
<b>Sc</b>	mg/l	±17%	0,00005	Espect ICP-MS	<b>Th</b>	mg/l	±8%	0,00005	Espect ICP-MS

**Anexo G:** Precisión (2σ), límite de detección, técnica y unidades utilizadas para los componentes analizados por el laboratorio AGQ Labs.