



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DEL ESTERO EL COBRE, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

BÁRBARA JAZMÍN DE LA FUENTE RODRÍGUEZ

PROFESOR GUÍA:
MATÍAS TAUCARE TORO

PROFESORA CO-GUÍA:
LINDA DANIELE

COMISIÓN:
ALIDA PÉREZ FODICH

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CAPTA-CORFO no. 19CTIGH-121349 y por los fondos públicos otorgados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID): FONDECYT no. 1170569, FONDAF no. 15090013/ACE210005 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes - CEGA), FONDEQUIP no. EQM120098, Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007 y Anillos Temáticos no. ATE220029.

Santiago de Chile
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE GEÓLOGA
POR: BÁRBARA JAZMÍN DE LA FUENTE RODRÍGUEZ
FECHA: 2023
PROFESOR GUÍA: MATÍAS TAUCARE TORO

CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DEL ESTERO
EL COBRE, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE

El presente trabajo toma como lugar de estudio la subcuenca del Estero El Cobre, ubicada en la región de Valparaíso y se enfoca en determinar el efecto antrópico sobre los niveles y calidad de las aguas del acuífero aluvial de esta zona. Específicamente, los objetivos incluyen evaluar la composición química del agua subterránea, identificar el origen de los iones disueltos y los mecanismos de recarga, junto con determinar los patrones de circulación de las aguas subterráneas.

Los resultados evidencian que las facies hidrogeoquímicas son sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas, siendo la zona norte de los depósitos aluviales la que presenta las muestras con mayor contenido iónico del estudio. Con respecto a los mecanismos de recarga, se determinó que corresponden a recargas focalizadas en los valles laterales, junto con ingresos de aguas por el sector sur del área de estudio, provenientes del Río Aconcagua a través de canales de riego, evidenciado por la piezometría y la hidroquímica. Se interpretó que los iones disueltos se originan principalmente por las interacciones agua-roca (disolución de plagioclasas y calcita en presencia de CO₂ y pirita), además de factores antrópicos, como infiltraciones aguas con concentraciones de iones procedentes de la actividad agrícola, relacionada a fertilizantes y el uso de canales de riego, junto con la posible infiltración de aguas con concentraciones de iones asociados a depósitos mineras. Finalmente, con respecto a la piezometría y extracciones de agua, existen sectores donde los niveles piezométricos han sido alterados, asociado al uso de los derechos de agua, principalmente por parte de la agricultura y minería.

Se concluye que las actividades antrópicas han tenido un efecto en cuanto a la recarga de agua subterránea, niveles piezométricos y calidad de las aguas subterráneas, donde las zonas más críticas corresponden a las utilizadas por la actividad agrícola y la aplicación de fertilizantes han ejercido un impacto notable en la composición química de las aguas subterráneas. Otro sector posiblemente afectado por actividades antrópicas se encuentra en las proximidades del Estero El Cobre, ya que la presencia del yacimiento minero pudo haber proporcionado iones a las aguas, destacando la presencia de sulfato, lo cual no es posible afirmar con certeza con los datos analizados. Por último, se sugiere realizar nuevos estudios en esta subcuenca, complementándolos con otras metodologías y un mayor número de muestras.

*A mi madre y padre
Eva y Claudio
por su incondicional amor, infinito apoyo
e inmensa protección.*

***"Todo el esfuerzo es inútil,
si no crees en ti mismo."
-Might Guy***

Agradecimientos

Este trabajo de memoria se enmarca en el “Work package 1” del proyecto Anillos Temáticos no. ATE220029 dirigido por la profesora Dra. Linda Daniele. Las campañas de muestreo y los análisis de laboratorio de las muestras de agua empleadas en esta tesis fueron financiados por el consorcio tecnológico no. 19CTIGH-121349 (Centro Avanzando Para Tecnologías del Agua - CAPTA) y por los fondos públicos otorgados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID): FONDECYT no. 1170569, FONDAF no. 15090013/ACE210005 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes - CEGA), FONDEQUIP no. EQM120098, y Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007.

Quiero agradecer profundamente a mi profesor guía Dr. Matías Taucare por ayudarme desde incluso antes de comenzar este trabajo, por siempre tener disponibilidad para enseñarme y resolver mis dudas, por haberme brindado su confianza desde el día uno y su infinita comprensión en mis momentos más difíciles. He visto personalmente su dedicación tanto por la enseñanza como por la hidrogeología, por lo que ha sido un privilegio ser su estudiante y trabajar bajo su guía. A su vez, agradecerle a la profesora Dra. Linda Daniele, quien me brindó su apoyo y orientación desde que tuve el primer curso con ella. Agradezco sinceramente su comprensión, sus enseñanzas y consejos que me ha brindado a lo largo de estos años, me ha ayudado a crecer tanto en lo académico como a nivel personal. También agradecer a la profesora Dra. Alida Pérez, quien con sus consejos me ayudó de sobremanera para mejorar este trabajo, gracias por su disposición. Muchas gracias por ser parte mi comisión, pues los tres son profesionales a los que admiro enormemente y que han sido mentores fundamentales para mí.

A mi madre Eva, que a través de su inmenso cariño me crio, educó y protegió hasta de lo más mínimo, a mi padre Claudio, que se ha esforzado incansablemente para que nunca me falte nada y que logre todos mis proyectos, y a mi hermano Claudio, que ha sido un apoyo fundamental a lo largo de mis estudios. Los tres desde siempre se han preocupado de mí e hicieron de todo para que haya tenido la mejor educación posible desde pequeña. No saben cuánto los amo a los tres, son la mejor familia que podría tener, porque a pesar de que vivamos lejos siempre nos preocupamos de todos. Gracia por siempre estar en las buenas y malas, por cuidarme y apoyarme. También agradecer a mis tías, tíos, primas y primos que me han apoyado en todo este proceso y en los peores momentos, sobre todo a Hernán, y Caro G., que fueron un apoyo fundamental. A mis padrinos Nora y Marcelo, por su cariño enorme que me han demostrado siempre, junto con Pablo, que además de todo fue quien me mostró la geología.

Agradecer a mi hermana María Ignacia, desde niñas que crecimos juntas y que cuento con su apoyo y cariño, me ha salvado de muchas en incontables ocasiones. Gracias a toda su familia, en especial a sus padres Juana y Luis, quienes me ayudaron en el peor momento de mi carrera universitaria y me trataron como una hija más, nunca olvidaré todo lo que hicieron por mí desinteresadamente. También quiero agradecerle a Seba Contreras, ya que, aparte de ayudarme mucho en plan común con los ramos, fue un hermanito mayor que me cuidó mucho y me ayudó de muchas formas. Siempre me sentiré en deuda con ustedes.

También agradecer a la geogente, a Andrea, con quien nos apoyamos para nuestras memorias, su apañe fue muy importante para hacer este trabajo, nunca dudó en ayudarme y eso lo aprecio mucho. A Frijol, por siempre darme excelentes consejos hidro y material para lecturas, acompañado en cada ocasión con buenas charlas, memes y risas. A Nacho, por ser mi mejor amigo desde plan común y siempre estar presente en mi vida, gracias por prestarme el hombro desde que nos conocimos y de motivarme a vacilar. A las geocabras Yoyi, Gabi B., Caro M. y Amanda, a Pino y Rube, definitivamente sin ustedes estudiar geología no hubiera sido tan ameno y entretenido como lo fue, el cariño que les tengo es enorme. A Dani Esparta, por ser la besto friendo de geo, saber que puedo contar contigo hasta para lo más mínimo me llena mucho el corazoncito y es un gran alivio para el día a día.

A mis amigas del liceo Ale, Ana, Gillian, Domi, Bárbara, Dani con Tomi y Xime con Simoncito, les agradezco mucho que sean tan incondicionales, puede que nos juntemos poco pero cuando lo hacemos es como si nos hubiéramos visto el día anterior, las quiero demasiado a ustedes y a los niños, que son lo más lindos que hay. A mis amigos de plan común, en especial a Basti por ayudarme en los inicios de este trabajo, a Mati por ser un amigo tan preocupado y cuidador y a Coni, quien me apoyó en uno de los momentos más difíciles de mi vida. A Sofi y Yusara, les agradezco demasiado el afecto y la confianza que han puesto en mí, muchas gracias por toda su ayuda y compañía estos últimos dos años.

A mi psicóloga Camila, a quien le debo la vida. Muchas gracias por toda la paciencia que has tenido al tratarme, gracias por salvarme muchas veces y por siempre estar disponible, incluso fuera de tu horario laboral, gracias por todos los consejos y herramientas que me has entregado. A mi psiquiatra Dra. Constanza, gracias a su preocupación incluso fuera de la consulta, gracias por buscarme soluciones y siempre pensar en las mejores alternativas. Sin ustedes hubiera sido el triple de difícil completar mis estudios.

A mis gatitos Bojji y Noelle, quienes me han acompañado en todo momento realizando esta memoria, aguantando trasnochadas a mi lado o acostados en mis piernas y por siempre brindarme sus ronroneos.

Finalmente, quiero agradecerle a Natalie, que no solo me ha apoyado durante estos dos años y con la realización de este trabajo, sino que me ha motivado a seguir, me ha inspirado, ha estado conmigo en mis peores momentos, me ha cuidado y acompañado con paciencia y cariño. Gracias por compartir tus alegrías conmigo, por ser mi lugar seguro, por entenderme y estar conmigo en cada aventura.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción.....	1
1.1. Hipótesis de trabajo	2
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
Capítulo 2 : Área de estudio	3
2.1. Ubicación y acceso	3
2.2. Marco morfotectónico	4
2.3. Geología local	6
2.4. Relieve y geografía.....	8
2.5. Clima	9
2.6. Actividades económicas	11
Capítulo 3 : Metodología.....	14
3.1. Piezometría	14
3.2. Usos de aguas subterráneas	14
3.3. Hidrogeoquímica y composición isotópica	15
3.3.1. Validación de los análisis hidrogeoquímicos.....	15
3.3.2. Análisis Exploratorio de Datos y otros análisis.....	16
3.3.3. Análisis Estadístico Multivariante.....	17
3.3.4. Isótopos Estables.....	18
Capítulo 4 : Resultados	20
4.1. Piezometría	20
4.1.1. Evolución histórica	20
4.1.2. Elaboración de la piezometría	22
4.2. Extracciones	26
4.2.1. Evolución histórica	26
4.2.2. Uso, título y ejercicio de derecho del agua subterránea	28

4.2.3. Análisis espacio-temporal	31
4.3. Hidrogeoquímica	34
4.3.1. Parámetros fisicoquímicos	34
4.3.2. Elementos mayores.....	37
4.3.3. Elementos trazas	40
4.3.4. Clasificación de aguas y su distribución espacial	43
4.3.5. Correlación de iones.....	46
4.3.6. Análisis estadístico multivariante.....	55
4.4. Análisis isotópico	68
Capítulo 5 : Discusiones	73
5.1. Mecanismos de recarga.....	73
5.2. Origen de iones disuelto	78
5.3. Modelo hidrogeológico conceptual	81
Capítulo 6 : Conclusiones.....	83
Bibliografía.....	85
Anexos.....	93

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación y acceso del área de estudio.	3
Figura 2: Marco tectónico de los Andes Centrales del Sur, entre las latitudes 29° y 36°S mostrando la ubicación del área de estudio y la Zona de Falla Pocuro (PFZ). Modificado de Taucare et al. (2022a).	5
Figura 3: Mapa geológico del área de estudio (basado en Rivano et al., 1993; Boyce et al., 2020).....	8
Figura 4: Mapa de Fisiografía del área de estudio, junto al mapa de cuencas: Río Aconcagua (principal) y las que la bordean, Río Ligua por el norte y Río Maipo por el sur.	9
Figura 5: Promedios mensuales de precipitación en la estación pluviométrica El Cobre, para los períodos pre-2009 y 2010-2019. Datos extraídos de Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia de Chile (2019).	11
Figura 6: Mapa de uso de suelos del área de estudio. Datos extraídos de CONAF (2019).....	12
Figura 7: Diagrama de tortas de los porcentajes de uso de suelos.	12
Figura 8: Mapa de los canales de riego. Modificado de Infraestructura de Datos Geográficos (2021).	13
Figura 9: Ubicación de las captaciones de aguas subterráneas monitoreadas por la DGA.	20
Figura 10: Evolución histórica de las profundidades en [m] de las aguas subterráneas de los puntos de captación monitoreados por la DGA. La escala temporal abarca los años comprendidos entre 1983 y 2021.	21
Figura 11: Mapa de ubicación de los puntos de captación de aguas subterráneas, correspondientes a los medidos en la campaña de terreno y los monitoreados por la DGA durante septiembre del 2021. Corrientes efímeras modificadas de la BCN.	23
Figura 12: Mapa de isopiezas cada 5 [m], que representa la superficie piezométrica del acuífero. Corrientes efímeras modificadas de la BCN.	24
Figura 13: Mapa de dirección de flujo de las aguas subterráneas del acuífero, representado por flechas verdes. Corrientes efímeras modificadas de la BCN.	25

Figura 14: Cantidad de derechos de aguas subterráneas desde 1985 hasta 2021. a) Cantidad de derechos por año. b) Cantidad de derechos por año acumulado. Datos extraídos de DGA (2022).....	27
Figura 15: Evolución histórica del caudal de los derechos de aguas subterráneas otorgados desde 1985 hasta 2021. a) Caudal [m ³ /s] por año. b) Caudal [m ³ /s] por año acumulado. Datos extraídos de DGA (2022).	27
Figura 16: a) Caudales [m ³ /s] y cantidad de derechos según el tipo de uso. b) Caudal promedio, según la cantidad de derechos, calculado para cada uso. c) Tabla de valores, correspondiente a caudales, cantidad y sus respectivos promedios. Datos extraídos de DGA (2022).	28
Figura 17: Diagramas de torta de la evolución histórica de derechos de aguas subterráneas, desde la década de 1990 hasta la de 2020. a) Según caudal de derechos. b) Según cantidad de derechos.	29
Figura 18: Mapa de la distribución espacial de los usos de derechos en el área de estudio.	30
Figura 19: Evolución histórica de la distribución espacial de los usos de aguas subterráneas en el área de estudio desde la década de 1990 hasta la de 2020.	31
Figura 20: Mapa de distribución espacial de los derechos de aguas subterráneas según su caudal en L/s.	32
Figura 21: Mapas de derechos de aguas subterráneas en L/s, según su distribución espacial por década.	33
Figura 22: Mapa de ubicación de las muestras de la base de datos hidrogeoquímicas.	34
Figura 23: Gráficos binarios de los parámetros fisicoquímicos. a) CE vs T. b) CE vs pH. c) pH vs T.	36
Figura 24: Gráfico de cajas y bigotes de los parámetros fisicoquímicos.....	37
Figura 25: Diagramas de cajas y bigotes. a) Concentraciones de Aniones en ppm. b) Concentración de Cationes y Sílice en ppm.	38
Figura 26: Mapas de variación espacial de aniones según quintiles. La escala de colores va desde tonos blanquecinos, indicando menor concentración, a rojizos, el cual indica una concentración máxima.	39
Figura 27: Mapas de variación espacial de cationes y sílice según quintiles. La escala de colores va desde blanco, indicando menor concentración, a rojo, el cual indica una concentración máxima.	40

Figura 28: Diagrama de cajas y bigotes de Elementos Trazas.....	42
Figura 29: Diagramas de cajas y bigotes de la concentración de cobalto y bario en ppb.	42
Figura 30: Mapa de la distribución espacial de los elementos trazas cobalto y bario.....	43
Figura 31: Diagrama Piper para la clasificación química de aguas, con los datos en [meq/L](izquierda). Mapa de ubicación de las muestras (derecha).	44
Figura 32: Mapa de distribución de las muestras y sus diagramas Stiff asociados.	45
Figura 33: Matriz de correlación. En color azul se muestran las correlaciones altas $> 0.7 $, en amarillo las moderadas entre $ 0.5 $ y $ 0.7 $ y en rojo las débiles entre $ 0.3 $ y $ 0.5 $	47
Figura 34: Relaciones iónicas en [ppm] de aniones con respecto a aniones.	48
Figura 35: Relaciones iónicas en [ppm] de cloruro con respecto a cationes.	49
Figura 36: Relaciones iónicas en [ppm] de sulfato con respecto a cationes.	50
Figura 37: Relaciones iónicas en [ppm] de bicarbonato con respecto a cationes..	51
Figura 38: Relaciones iónicas en [ppm] de nitrato con respecto a cationes.	52
Figura 39: Relaciones iónicas en ppb de cobalto con respecto a otros elementos.	53
Figura 40: Relaciones iónicas en ppb de bario con respecto a otros elementos. ...	54
Figura 41: a) Dendrograma resultante del HCA. La línea roja punteada permite definir tres clústers principales. b) Diagramas Stiff para cada clúster. c) Valores de NO_3^- y CE de cada clúster.	55
Figura 42: Distribución espacial de las muestras, según el clúster asignado en el HCA.....	56
Figura 43: Diagramas de cajas y bigotes de los elementos por clúster.	57
Figura 44: Análisis factorial. a) Peso de las variables para el Factor 1 y 2 (Tabla y). b) Proyección de las cargas factoriales de las muestras de agua. Los colores de las muestras fueron asignados según el HCA.....	60
Figura 45: Variación espacial de los factores. a) Factor 1. b) Factor 2.	61
Figura 46: Diagramas de cajas y bigotes de puntuaciones factoriales de las muestras según los clústeres obtenidos en el HCA.....	62
Figura 47: Relación molar de Na^+ vs HCO_3^-	63

Figura 48: Relación molar de Ca^{2+} vs HCO_3^-	64
Figura 49: Relación molar de Na^+ vs SO_4^{2-}	65
Figura 50: Relación molar de Ca^{2+} vs SO_4^{2-}	66
Figura 51: Valores de pH de las muestras, junto con los límites máximos y mínimos de las normativas NCh409/1 y NCh1333.....	66
Figura 52: Concentración del cloruro de las muestras, junto con los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333.....	67
Figura 53: Concentración del sulfato de las muestras, junto con los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333.....	67
Figura 54: Concentración del nitrato de las muestras, junto con el límite de la norma NCh409/1.	68
Figura 55: Concentración del arsénico de las muestras, junto con el límite de la norma NCh409/1.	68
Figura 56: Isótopos estables en agua. a) Relación entre $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ con la línea de agua meteórica local “33°S Chile MWL”, definida por Taucare et al. (2020a). b) Relación entre altitud m s.n.m. y $\delta^{18}\text{O}$	70
Figura 57: Mapas de variación espacial de isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. La escala de colores va desde tonos blanquecinos, indicando menor concentración, a azulados, indicando una concentración mayor.	71
Figura 58: Diagramas de cajas y bigotes de las composiciones de isótopos estables según los clústers definidos en el HCA. a) $\delta^{18}\text{O}$ (‰). b) $\delta^2\text{H}$ (‰).	72
Figura 59: Mapa de isopiezas y derechos de agua. a) Según el caudal otorgado. b) Según el uso de derecho.....	74
Figura 60: Mapa de canales de riego junto con las muestras del área de estudio según los clústeres jerárquicos.....	76
Figura 61: Modelo hidrogeológico conceptual: representación esquemática de los procesos e interacciones principales en el acuífero y en superficie. No se encuentra escalado.	81

Índice de Tablas

Tabla 1: Error admisible del balance iónico según la conductividad eléctrica.....	16
Tabla 2: Sumatoria de derechos acumulados por década.....	33
Tabla 3: Parámetros fisicoquímicos de las muestras de aguas subterráneas y superficiales.....	35
Tabla 4: Balance iónico de las muestras. Datos destacados en verde indican errores admisibles.	37
Tabla 5: Estadísticos descriptivos principales de los elementos traza en [ppb]....	41
Tabla 6: Pruebas de KMO y Bartlett	58
Tabla 7: Matrices de componentes rotada. Rotación realizada con método Varimax. Valores >0.5 se resaltan en rojo.	58
Tabla 8: Puntajes factoriales según cada muestra. a) Factor 1. b) Factor 2.....	59
Tabla 9: Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ por muestra.	69
Tabla 10: Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Extraído de Servicio de Impuestos Internos (2023).....	93
Tabla 11: Número y superficie de Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) por categoría de uso del suelo en la comuna de Nogales, año agrícola de referencia 2020/2021. Extraído de INE (2021).	94
Tabla 12: Actividad minera en la comuna de Nogales. Extraído de DGA (2020).	95
Tabla 13: Datos piezométricos de pozos de este trabajo.	96
Tabla 14: Datos piezométricos de pozos DGA.....	96
Tabla 15: Ubicación de pozos DGA para el análisis de niveles anuales.....	97
Tabla 16: Niveles anuales en [m] de pozos DGA, durante el periodo 1983-2021.	97
Tabla 17: Ubicación de las muestras de este estudio.	98
Tabla 18: Elementos mayores y sílice en [ppm].....	98
Tabla 19: Elementos menores (Li, Be, B, Al, V, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu) en [ppb].	99
Tabla 20: Elementos menores (Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb) en [ppb].	99
Tabla 21: Elementos menores (Cs, Ba, W, Pb, U) en [ppb].....	100

Capítulo 1: Introducción

El agua es un recurso esencial en el planeta cuyo uso, gestión y preservación son de gran importancia. La influencia antrópica sobre los recursos hídricos, tanto en términos de cantidad como de calidad, ha llevado a una serie de desafíos ambientales que requieren una comprensión profunda y soluciones sostenibles (Peters & Meybeck, 2000). Entre estos desafíos, se destaca la alteración de los procesos de recarga de aguas subterráneas y la modificación de las características químicas de las aguas tanto superficiales como subterráneas.

La creciente explotación de los recursos hídricos para satisfacer las necesidades de una población en crecimiento y el desarrollo industrial, agrícola y urbano ha dado lugar a un incremento de la demanda que podría no ser sustentable (Famiglietti & Ferguson, 2021). Este uso, en muchas ocasiones, ha superado la capacidad natural de recarga, lo que ha llevado a la disminución de los niveles de agua subterránea en los acuíferos y al agotamiento de fuentes superficiales (Shen et al., 2015). Además, la liberación de contaminantes químicos y la alteración de la calidad del agua, resultado de actividades industriales y agrícolas, plantean serias amenazas para la salud y el medio ambiente (Al-Taai, 2021).

Chile, un país caracterizado por su diversidad geológica y climática, enfrenta retos importantes en la gestión del agua. La explotación intensiva de los recursos hídricos en las regiones áridas y semi-áridas del país, ha generado tensiones significativas entre el uso humano y la preservación de ecosistemas (Manzur, 2005). A pesar de los esfuerzos de regulación y monitoreo de las autoridades, como la creación y reformulación del código de aguas (DFL 1122, Ley 21.435; Congreso Nacional de Chile, 1981, 2022) o regulaciones para las obras de captación de aguas subterráneas (Resolución 1238 exenta; Congreso Nacional de Chile, 2019), entre otros, siguen existiendo un déficit en la comprensión de los sistemas hidrogeológicos y los impactos de las actividades antrópicas a nivel nacional.

En cuanto a efectos antrópicos ya conocidos, estudios recientes han demostrado que en la región de Valparaíso ha existido un incremento de las extracciones de aguas subterráneas autorizadas, lo que ha conllevado a la reducción de los niveles piezométricos de los acuíferos aluviales (Taucare *et al.*, 2024) y, junto con esto, se estima que la demanda de los recursos hídricos aumente en la región (Pérez-Soto, 2017). A su vez, estudios previos han demostrado que las aguas de la cuenca del Río Aconcagua se han visto contaminadas mediante actividades económicas como la agricultura y minería, proporcionando compuestos derivados de fertilizantes y metales pesados tanto a las aguas superficiales como a las subterráneas (Ribbe *et al.*, 2008; Molina *et al.*, 2010; Taucare *et al.*, 2010a).

Esta investigación busca abordar la problemática de la escasez hídrica, analizando las influencias humanas en la calidad y cantidad de aguas subterráneas en el acuífero aluvial de la cuenca del Estero El Cobre, Región de Valparaíso, mediante una

caracterización hidrogeológica donde se analizará la química y composición isotópica de las aguas, junto con la realización de un estudio piezométrico y de extracciones, con el fin de identificar el origen de los iones disueltos, entender los procesos de recarga y evaluar concretamente el impacto de las diversas actividades antrópicas en las aguas subterráneas. La elección de la cuenca del Estero El Cobre como área de estudio se debe a su importancia en la región de Valparaíso, donde la agricultura y la minería son actividades fundamentales. Esta situación destaca la necesidad de comprender en profundidad la hidrogeología y la hidrogeoquímica de la cuenca para abordar los desafíos relacionados con el agua en la región.

1.1. Hipótesis de trabajo

La hipótesis de este trabajo postula que la actividad antrópica, especialmente la agricultura y minería, ejerce un impacto significativo tanto en la cantidad como en la calidad del agua subterránea en el acuífero aluvial del Estero El Cobre. Se plantea que la extracción de este recurso puede afectar los flujos subterráneos, generando alteraciones en los niveles piezométricos. Además, se sugiere que la introducción de sustancias químicas, como fertilizantes agrícolas, y la implementación de infraestructuras para la captación de agua, como sistemas de riego, tienen el potencial de modificar la composición química, así como los procesos de recarga del agua subterránea en el área de estudio.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el efecto antrópico sobre los niveles y calidad del agua subterránea del acuífero aluvial del Estero el Cobre, Región de Valparaíso, Chile.

1.2.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general, se deben lograr los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la composición química del agua subterránea.
- Identificar el origen de los iones disueltos y los mecanismos de recarga.
- Determinar los patrones de circulación de las aguas subterráneas.

Capítulo 2: Área de estudio

En esta sección, se presentan los antecedentes relevantes relacionados con el área de estudio. Estos son organizados en varias categorías, que incluyen la ubicación y acceso, marco morfotectónico, la geología local, relieve y la geografía y datos pertinentes sobre el clima que caracteriza la zona. Esta información proporciona un contexto sólido para comprender el entorno en el que se desarrolla este trabajo.

2.1. Ubicación y acceso

El área de estudio se ubica en la Región de Valparaíso, en el valle de la cuenca del Río Aconcagua, en la provincia de Quillota, abarcando la comuna de Nogales y el norte de La Calera (Figura 1).

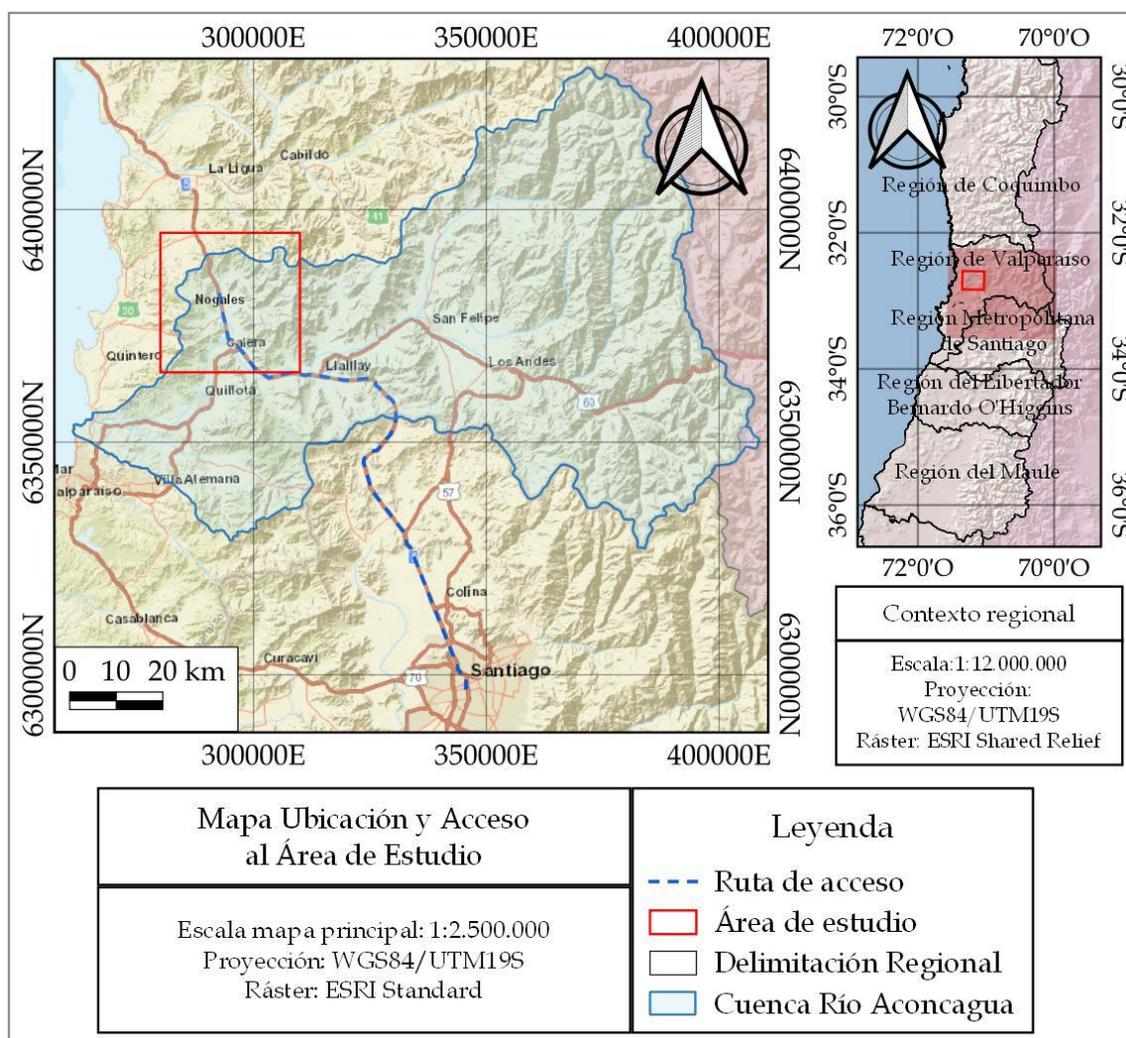


Figura 1: Mapa de ubicación y acceso del área de estudio.

Los poblados que se tienen en el área son, de N-S, El Melón, Nogales y La Calera. Sus coordenadas geográficas son aproximadamente 32°33'-32°50'S y 71°2'-71°21'O. Se encuentra a una distancia aproximada de 120 km de Santiago. La superficie de la cuenca del Río Aconcagua es de 7.340 km², mientras que la de la subcuenca del Estero El Cobre es de alrededor de 400 km².

Para acceder al área de estudio desde Santiago, se debe tomar la Autopista Central Ruta 5 en dirección hacia el norte. El tiempo estimado de viaje es de aproximadamente 1 hora y 20 minutos.

2.2. Marco morfotectónico

La Cordillera de Los Andes es un orógeno activo de tipo subducción que se extiende a lo largo del margen occidental de América del Sur (Figura 2). Entre las latitudes 32° y 36°S, el régimen tectónico de los Andes Centrales del Sur está regido por la naturaleza de la interacción entre la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana, con un azimut de convergencia actual de N78°E y un movimiento absoluto de la placa oceánica de 57 mm/año (Pardo-Casas y Molnar, 1987; Somoza, 1998; Angermann et al., 1999; Wang et al., 2018).

A lo largo de este segmento de los Andes, ocurren variaciones notables en la geometría de los slab y el volcanismo de la placa Sudamericana (Jordan et al., 1983; Cahill e Isacks, 1992; Tassara et al., 2006). Al norte de los 33°S, hasta los 27°S, en el segmento del flat-slab pampeano (Ramos et al., 2002), el ángulo de subducción es menor a 10° y los Andes tienen una dirección de tendencia N-S sin volcanismo activo. Al sur de 33°S, el ángulo de subducción tiene un promedio de 30° y los Andes tienen una dirección de tendencia de N15°E aprox., presentando volcanismo activo en la Zona Volcánica del Sur (Stern et al., 2007). Estas variaciones se atribuyen a la coexistencia de la subducción de la Dorsal de Juan Fernández y el Oroclino del Maipo (Gutscher et al., 2000; Yáñez et al., 2001, 2002; Farías et al., 2010; Martinod et al., 2010; Arriagada et al., 2013; Horton et al., 2022).

Una boyancia de la Placa de Nazca, inducida por la subducción de la Dorsal de Juan Fernández, ha contribuido al bajo ángulo del slab, aumentando el acoplamiento entre las placas al norte de 33°S. A su vez, el Oroclino del Maipo es un límite volcánico-tectónico, encontrándose volcanes controlados por un régimen compresional entre los 33.5° y 34°S, mientras que los ubicados al sur de 34.5°S están controlados por uno dextral-transpresional (Cembrano y Lara, 2009). El entorno tectónico descrito anteriormente se refleja en la forma actual de los Andes Centrales del Sur a lo largo de siete dominios morfotectónicos continentales paralelos a las fosas, de oeste a este (Cembrano et al., 2007; Giambiagi et al., 2016a): Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal, Precordillera, Antepaís y Sierras Pampeanas. En la Figura 2 se ilustran las estructuras principales y los dominios morfotectónicos antes mencionados.

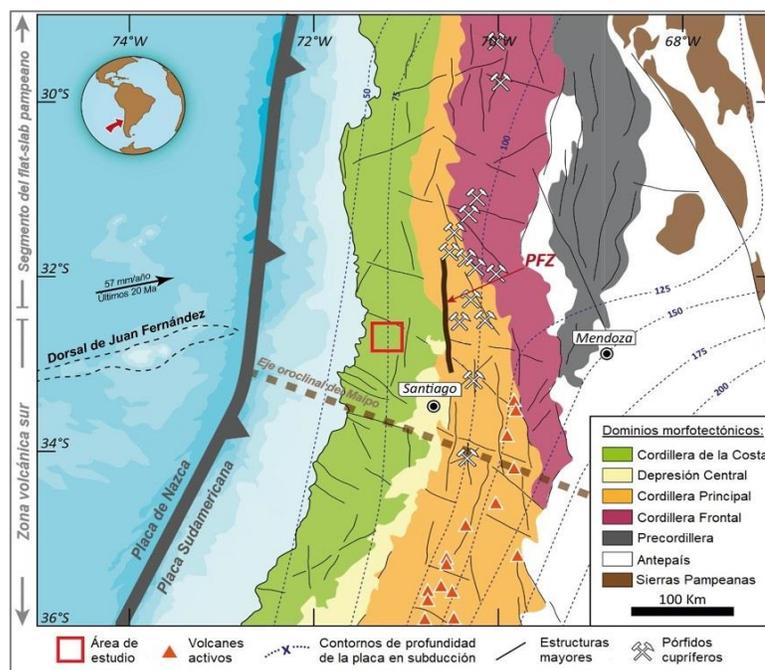


Figura 2: Marco tectónico de los Andes Centrales del Sur, entre las latitudes 29° y 36°S mostrando la ubicación del área de estudio y la Zona de Falla Pucuro (PFZ). Modificado de Taucare et al. (2022a).

El área de estudio está ubicada en la Cordillera de la Costa, la cual comprende un cinturón orogénico que se extiende paralelo a la fosa Perú-Chile por más de 1500 km. Entre los 32°-33°S, se observa un basamento intrusivo paleozoico y una cobertura volcano-sedimentaria mesocenozoica, donde tanto el basamento como las rocas del Mesozoico se encuentran intruidas por cinturones de orientación NS de plutones mesozoicos con edades decrecientes hacia el este (Parada et al., 1991; Rivano et al., 1993; Arancibia, 2004; Rodríguez et al., 2018). Este ambiente tectónico presenta deformaciones tanto extensionales como compresionales, representadas por fallas normales (Rivano et al., 1993; Arancibia, 2004; Giambiagi et al., 2022).

El comienzo de la Orogenia Andina se remonta al periodo del Triásico Superior, aproximadamente a los 215 Ma (Jara et al., 2021), donde luego de un período de fisura continental detenida y con una tasa de subducción posiblemente baja, se inicia una nueva subducción que produjo una gran reorganización paleogeográfica en el margen del suroeste de Gondwana (Mpodozis & Ramos, 1990; Charrier et al., 2007). Según Jara et al. (2021), los cambios en la configuración tectónica son evidenciados en los eventos magmáticos que ocurrieron en estos períodos, desde condiciones transtensionales/extensionales entre el Triásico Superior y Jurásico superior (~215-145 Ma) a un régimen transtensional entre el Cretácico Inferior al Cretácico Medio (~138-106 Ma).

Los eventos ocurridos entre el Triásico Superior y el Cretácico Inferior, como el retroceso de la placa, causaron la extensión del margen y un adelgazamiento de la corteza, donde el magmatismo relacionado a la subducción formó un arco volcánico a lo largo de la costa, el cual separó el océano hacia el oeste, de un mar interior o cuenca de arco

posterior al este (Mpodozis & Ramos, 1990; Charrier et al., 2007; Rossel et al., 2013). Debido a este régimen extensional, formaciones de tipo volcánicas y marinas fueron depositadas en una secuencia sinrift, donde las unidades del Cretácico Inferior conforman un homoclino con buzamiento hacia el este, en una cuenca que probablemente estuvo cerca del nivel del mar, inferido por el registro de transgresión marina en formaciones de este período (Vergara et al., 1995; Charrier et al., 2007; Rodríguez et al., 2018; Boyce et al., 2020). Las unidades volcánicas y marinas del Jurásico y Cretácico Inferior de esta etapa, junto a los intrusivos Paleozoicos, se encuentran expuestas en la Cordillera de la Costa en la actualidad (Boyce et al., 2020).

En el Cretácico Superior (~106-83 Ma), se tiene un importante cambio de un régimen tectónico extensional a un régimen compresivo, evidenciado por discordancias entre las distintas unidades, cambios en la procedencia de cuencas de retroarco y cizalle ductil e inverso, como la zona de cizalle Silla del Gobernador (Arancibia, 2004; Boyce et al., 2020). En esta etapa ocurre un incremento en la tasa de erosión y exhumación, interpretado como el inicio del levantamiento regional de la Cordillera de la Costa, relacionado con evento de gran importancia de acortamiento de la corteza, que probablemente comenzó al oeste para luego migrar hacia el este, durante la inversión de la cuenca intra-arco Las Chilcas (Arancibia, 2004; Boyce et al., 2020; Giambiagi et al., 2022). Posterior a esta etapa, entre los 73-65 Ma, se tiene una renovación del volcanismo de arco, dispuesto más al este y evidenciado por depósitos volcánicos correspondiente a estas edades (Boyce et al., 2020).

Luego, durante el Eoceno Superior y Mioceno Inferior, se desarrolló una cuenta extensional de intra-arco en la Cordillera Principal, donde la Cordillera de la Costa experimentó levantamiento (Charrier et al., 2005; Giambiagi et al., 2022). En esta etapa ocurre ruptura de la Placa de Farallón en las Placas de Nazca y Cocos a los ~23 Ma (Pardo-Casas & Molnar, 1987). Como resultado de esta importante reorganización de la placa tectónica, entre el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano, la tasa de convergencia de la Placa Farallón (Nazca) con respecto a la Placa Sudamericana aumentó de 50 a 60 mm/año hasta un máximo de 150 mm/año (Pardo-Casas & Molnar, 1987).

La Dorsal de Juan Fernández, ubicada en la Placa de Nazca, comenzó su subducción a los 10 Ma al norte de los 33°S. Se piensa que este evento produjo una subducción plana o flat-slab que perduró hasta los 5 Ma (Kay y Abbruzzi, 1996; Yáñez et al., 2001), evitando el desarrollo del volcanismo entre los 27°-33°S, generando una migración hacia el este de la cuña astenosférica (Rodríguez et al., 2018; Giambiagi et al., 2022).

2.3. Geología local

En el área de estudio es posible encontrar una serie de rocas intrusivas del Jurásico Medio-Superior, como la Unidad Cavilolén (166 ± 4 Ma - 156 ± 4 Ma) y la Unidad Puerto Oscuro (164 ± 4 Ma - 144 ± 0.1 Ma), las cuales aparecen exhumadas en el sector noroeste

(Rivano *et al.*, 1993). Las rocas estratificadas consisten en una secuencia marina-continental depositadas entre los periodos Jurásico Inferior-Pleistoceno temprano (Figura 3):

- **Formación Ajjal** (Jurásico Inferior-Medio), aflora por el lado oeste de la cordillera de la costa, aproximadamente entre los 31.8°S y 33.2°S. Esta formación comprende ~1400 m de traquitas y riocacitas ricas en sodio intercaladas con tobas, brechas volcánicas y lavas andesítico-basálticas, con escasas intercalaciones sedimentarias de areniscas, conglomerados y pelitas calcáreas (Rivano *et al.*, 1993).
- **Formación Cerro Calera** (Jurásico Medio), se presenta como una faja NS discontinua entre los 31.8°S y 33.0°S aprox., con afloramientos interrumpidos por los sedimentos que rellenan los valles. Esta formación comprende ~1300 m de areniscas, areniscas tobáceas, tufitas con intercalaciones de calizas y calcarenitas, además de facies calcáreas (Rivano *et al.*, 1993; Piraces, 1976).
- **Formación Horqueta** (Jurásico Medio-Superior), aflora como una franja NS por el lado este de la cordillera de la costa, aproximadamente entre los 31.9°S y 33.2°S. Esta formación consta de ~1200-2000 m de intercalaciones de lavas andesítico-basálticas, brechas volcánicas y tobas riocacíticas con menores alternancias de rocas sedimentarias detríticas (Rivano *et al.*, 1993).
- **Formación Lo Prado** (Berriasiano-Aptiano), aflora en dirección NS por el lado este de la cordillera de la costa, su extensión va desde los 31.8°S hasta los 35.8°S aprox. Su espesor es de ~3000 m, cuya litología presenta calcilitas negras con intercalaciones de calcarenitas grises y niveles de brechas o conglomerados. También se encuentran intercalaciones volcánicas de andesitas afaníticas y porfíricas, con algunos niveles ocoíticos e intercalaciones de tobas (Thomas, 1958; Rivano *et al.*, 1993; Boyce *et al.*, 2020). En esta formación es posible encontrar el yacimiento estratoligado El Soldado, el cual corresponde a un depósito metalífero de cobre, con presencia de alteración hidrotermal (Boric *et al.*, 2002).
- **Formación Veta Negra** (Barremiano-Aptiano), aflora en dirección NS por el lado este de la cordillera de la costa, aproximadamente entre los 32.0°S y 33.0°S. La formación comprende ~5000 m de rocas sedimentarias con clastos volcánicos, basaltos y andesitas, con flujos brechizados en la base, además de variables ocoíticas (Rivano *et al.*, 1993; Vergara *et al.*, 1995; Boyce *et al.*, 2020).
- **Formación Confluencia** (¿Mioceno?-¿Plioceno?), aflora por los valles de la cordillera de la costa y hacia el oeste de ella, aproximadamente entre los 32.1°S y 33.0°S. Corresponde a secuencias de gravas y ripios con intercalaciones de arenas poco consolidadas que se distribuyen en terrazas altas, cuyas potencias varían entre los ~50-100 m (Rivano y Sepúlveda, 1991; Rivano *et al.*, 1993).

En cuanto a los sedimentos no consolidados, la subcuenca del Estero El Cobre está rellena principalmente por depósitos aluviales y coluviales, con un espesor promedio de 200 m (DGA, 2015). A su vez, al oeste del área de estudio se observan depósitos eólicos, que corresponden a acumulaciones costeras expuestas en forma de playas actuales y dunas. Estos depósitos se sitúan junto a la franja costera y su desarrollo está estrechamente relacionado con las características morfológicas actuales.

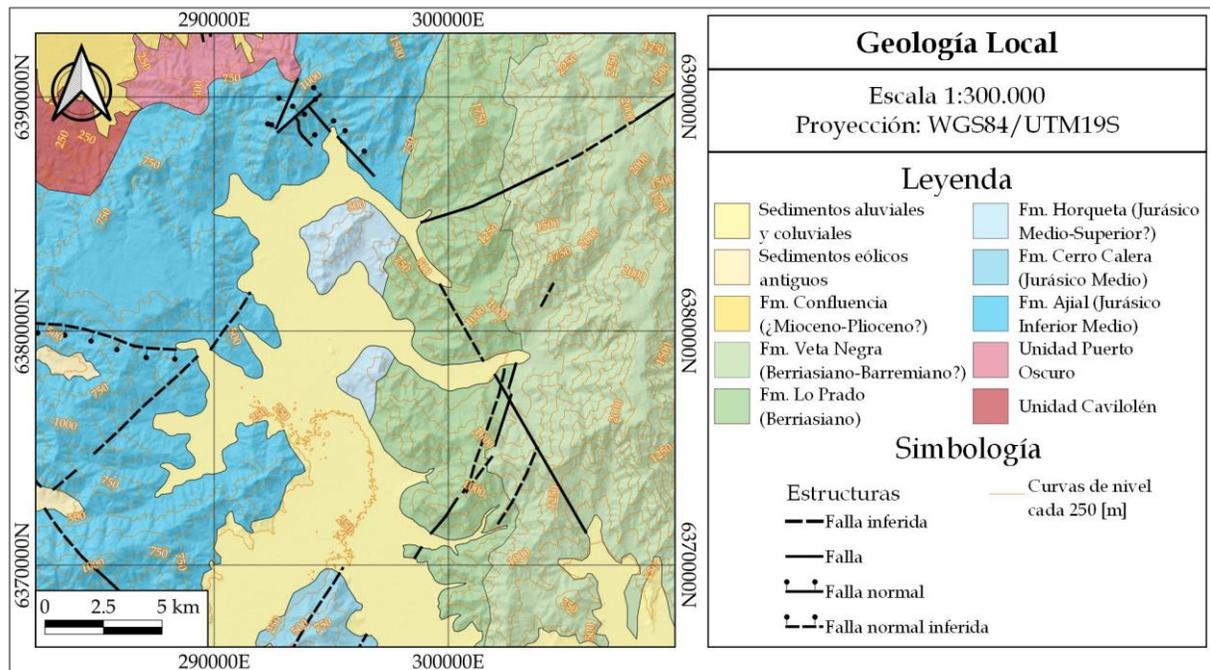


Figura 3: Mapa geológico del área de estudio (basado en Rivano et al., 1993; Boyce et al., 2020).

En cuanto a la geología estructural, según Rivano et al. (1993), en la Fm. Ajial se observan fallas normales hacia el N y W del área de estudio y fallas inferidas hacia el SW. Lo mismo ocurre en la Fm. Lo Prado y Fm. Veta Negra, donde se han inferido fallas que cruzan ambas formaciones.

2.4. Relieve y geografía

El área de estudio se ubica en el curso inferior de la cuenca del Río Aconcagua (Figura 4), perteneciente a la subcuenca por donde transcurre el cauce del Estero El Cobre, el cual nace a los 2200 [m s.n.m.] aprox. en Los Cerrillos, al igual que el Estero El Carretón, iniciando su cauce a los 2000 [m s.n.m.]. Este conjunto de cerros se ubica hacia el noreste del área de estudio y presentan las mayores elevaciones de la Cordillera de la Costa en la región estudiada. Hacia el NW, se encuentra el Cauce del Estero La Javiera, el cual nace a los 650 [m s.n.m.] aprox. Los cerros que le rodean alcanzan alturas de 800 [m s.n.m.] y, hacia el sur, es posible encontrar una meseta cuya elevación ~650 [m s.n.m.].

Hacia el W de la localidad de Nogales, viene descendiendo el Estero Pucalán y, al pasar por este poblado, cambia su nombre a Estero Los Litres.

Los esteros mencionados descienden hasta desembocar en el Estero El Melón, cuyo cauce pasa por el valle principal de la subcuenca, donde las altitudes que se pueden encontrar a lo largo del cauce varían entre los 200 y 260 [m s.n.m.] aprox., para luego converger en el Río Aconcagua, como se observa en la Figura 4.

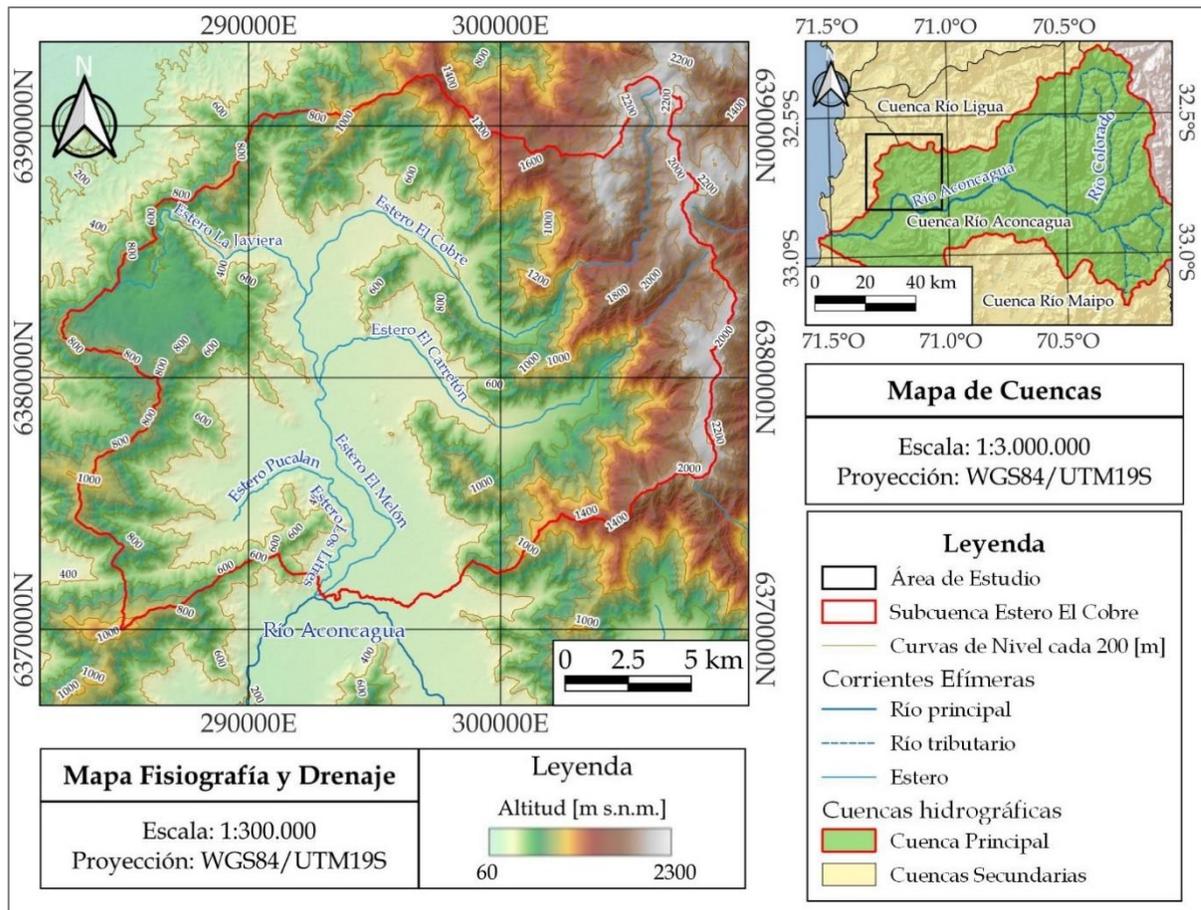


Figura 4: Mapa de Fisiografía del área de estudio, junto al mapa de cuencas: Río Aconcagua (principal) y las que la bordean, Río Ligua por el norte y Río Maipo por el sur.

2.5. Clima

Chile central, ubicado entre los 32° y 35°S, posee un clima semiárido (Falvey y Gurreaud, 2007). Los flujos de humedad provienen del Océano Pacífico y frentes fríos relacionados con sistemas de bajas presiones (Barrett *et al.*, 2009). La Cordillera Principal bloquea la circulación de humedad proveniente del Océano Atlántico, debido a que desempeña el papel de barrera orográfica al aislar el flanco occidental de los Andes chileno. El cauce del río Aconcagua presenta un régimen combinado, experimentando

aumentos en su caudal durante el invierno debido a las lluvias y en primavera por el deshielo, lo que sucede principalmente en la Cordillera Principal. Los afluentes ubicados en las zonas más altas de la cordillera siguen un patrón de flujo basado en la nieve, mientras que, en las áreas más bajas de la cuenca y en el área de estudio, el régimen es pluvial debido a la falta de precipitación en forma sólida.

Según datos recopilados de la Dirección General de Aguas (DGA) por Taucare *et al.* (2020a) del período histórico 1980-2010, las precipitaciones anuales promedio en la Cordillera de la Costa fueron de 520 mm/año, en la Depresión Central de 280 mm/año y en la Cordillera Principal de 620 mm/año. La mayor parte de las precipitaciones en el área de estudio ocurren durante los meses de junio, julio y agosto, correspondientes a un 70% aprox. de las precipitaciones promedio anuales (Figura 5). La variabilidad de las lluvias muestra una significativa fluctuación anual que está influenciada en parte por el fenómeno climático conocido como Oscilación "El Niño Sur" (ENSO, según su sigla en inglés) (Montecinos y Aceituno, 2003; Garreaud, 2009), el cual consiste en generar años húmedos durante la fase de "El Niño" y años secos en la fase de "La Niña". En la cuenca, al producirse eventos de lluvias anómalas se producen corrientes efímeras en los flancos de montaña (Viale y Garreaud, 2015). Durante los períodos húmedos, las precipitaciones alimentan los cauces de los afluentes perennes exorreicos originados en la Cordillera Principal, mientras que en los períodos secos estos son alimentados por las aguas subterráneas y el deshielo proveniente de las zonas más elevadas (Ohlanders *et al.*, 2013).

Desde el año 2010, se ha observado que Chile Central ha tenido una secuencia ininterrumpida de años secos no correlacionados con las variaciones de ENSO, donde el déficit anual de precipitaciones ha oscilado entre el 25 y 45%, lo que ha llevado a denominar a este evento como la "Megasequía" (Garreaud *et al.*, 2017, 2019). Esto se traduce en la disminución de los recursos hídricos superficiales en hasta un 90% (Garreaud *et al.*, 2019), por lo que las recargas de aguas superficiales se han visto abastecidas principalmente por el derretimiento de los cuerpos de nieve y hielo estacionales de la Cordillera Principal.

Las consecuencias de la Megasequía en el área de estudio se han visto reflejadas en la disminución de las precipitaciones. Se realizó una recopilación de precipitaciones medias de la estación pluviométrica El Cobre (32°39'11"S, 71°11'47"O), para los periodos de 1990-2009 y 2010-2019, en donde se tuvo que la precipitación media anual del primer periodo fue de 335.8 [mm], mientras que del segundo fue de 264.4 [mm], lo que equivale a una disminución del 21.3% de la precipitación media anual en la subcuenca del Estero El Cobre. Además, se obtuvo un gráfico de promedios mensuales de precipitaciones (Figura 5), en donde se visualizan las disminuciones de cada período, según el mes.

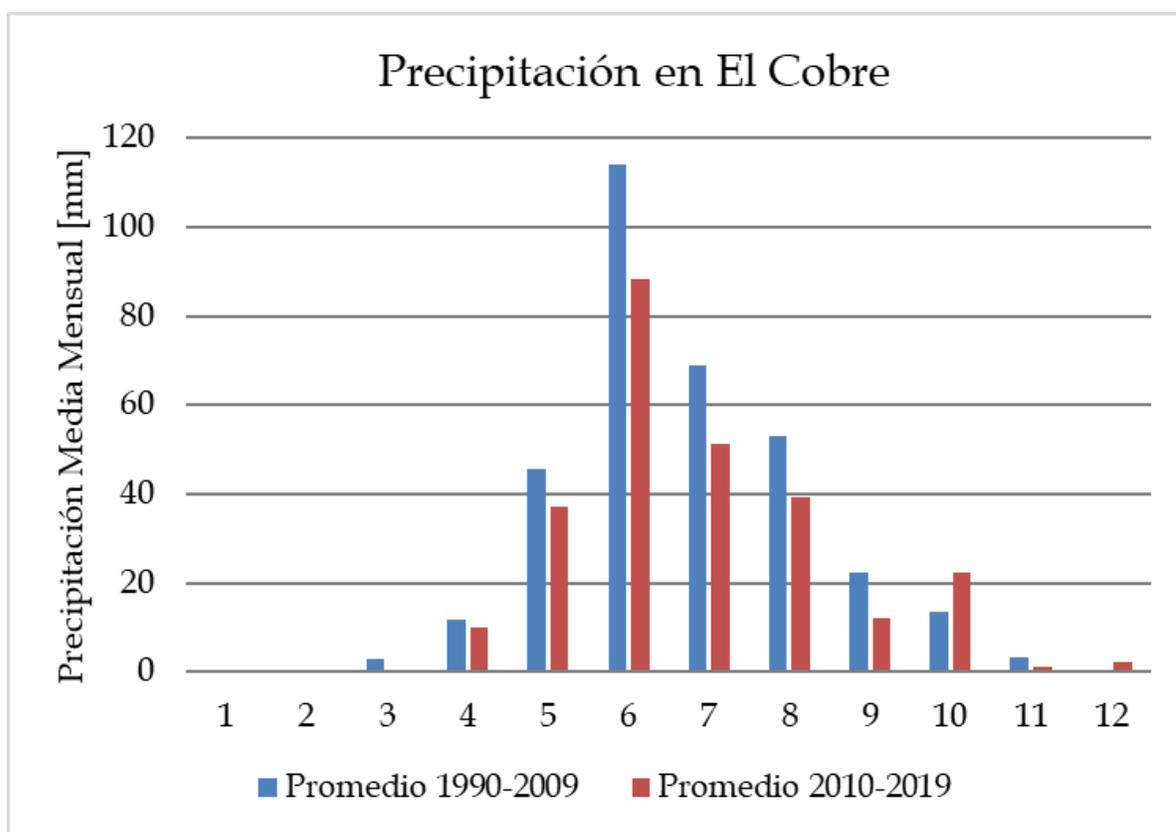


Figura 5: Promedios mensuales de precipitación en la estación pluviométrica El Cobre, para los períodos pre-2009 y 2010-2019. Datos extraídos de Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia de Chile (2019).

2.6. Actividades económicas

Con respecto a la configuración de los territorios productivos en Chile, la economía se basa principalmente en la agricultura y la minería, donde la construcción de territorialidad está directamente vinculada con las posibilidades y capacidades de extracción de rentas de la tierra, el clima y la cordillera. En específico, la cuenca del Río Aconcagua se sustenta precisamente en la agroexportación y la gran minería del cobre, que dan origen a una matriz productiva esencialmente extractivista (Canales y Canales-Cerón, 2016).

En la Figura 6 se presentan los usos de suelos y en la Figura 7 los porcentajes de éstos en el área de estudio. Según la información territorial de Corporación Nacional Forestal (CONAF, 2019), los bosques poseen una superficie de 184.78 km² (46.62%), las praderas y matorrales abarcan 115.23 km² (29.08%), los terrenos agrícolas cubren 70.21 km² (17.71%), los cuerpos de aguas y cajas de río 1.38 km² (0.35%), mientras que las áreas sin vegetación 1.36 km² (0.34%).

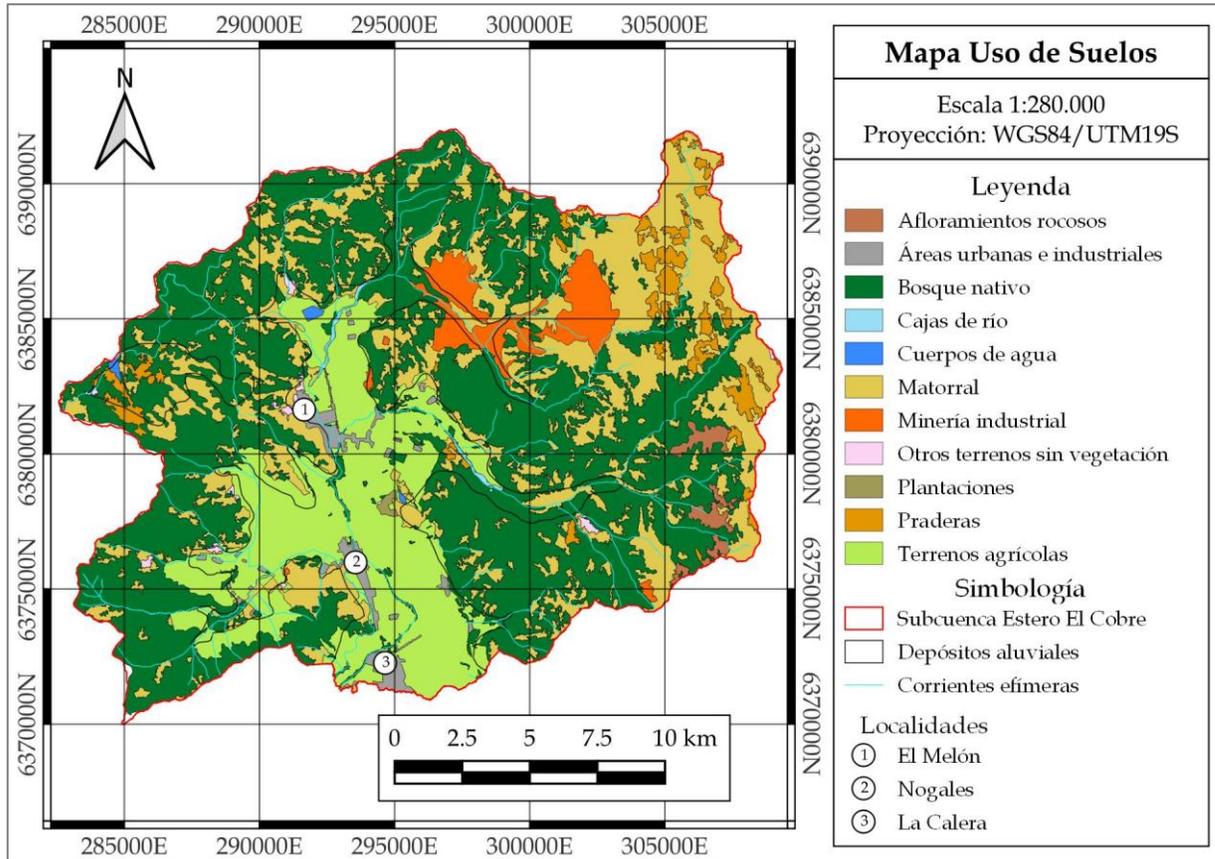


Figura 6: Mapa de uso de suelos del área de estudio. Datos extraídos de CONAF (2019).

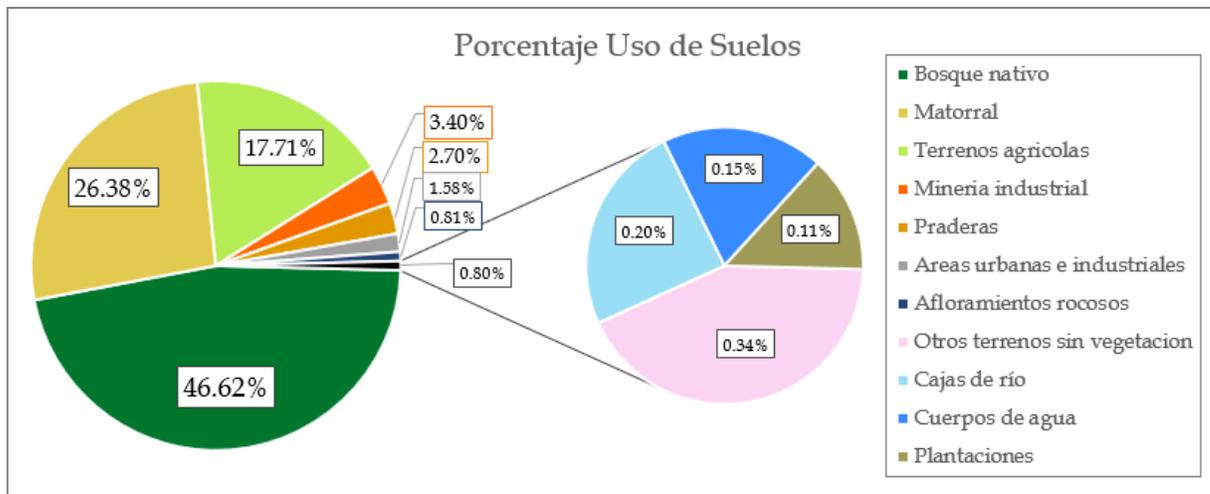


Figura 7: Diagrama de tortas de los porcentajes de uso de suelos.

Las principales actividades económicas en la comuna de Nogales son la agropecuaria y la minería. La agropecuaria abarca la agricultura, ganadería y silvicultura, las cuales se centran en los valles del área de estudio, en donde destacan los cultivos de cereales, legumbres, hortalizas, frutales, la cría de ganado bovino, aves de corral y la apicultura, junto con la explotación de viveros forestales y la extracción de madera (Servicio de Impuestos Internos, 2023). En relación con esta actividad, se debe destacar la presencia de

canales de regadío en el valle, que proporcionan aguas a las áreas agrícolas y se originan en el río Aconcagua (Figura 8). Por otro lado, la actividad minera tiene un rol fundamental en la economía de la comuna, en específico por la extracción y procesamiento de cobre en el sector noreste del área de estudio por parte de las empresas Anglo American Sur S.A. y Alejandro Jaime López Aliaga, además del procesamiento de carbonato de calcio a cargo de la empresa Molino de Minerales Pla LTDA (DGA, 2020). La División El Soldado, a cargo de Anglo American Sur S.A, destaca por su variedad de faenas y plantas, como lo son la mina rajo abierto y el tranque de relave El Torito, entre otros (ver Anexo A: Actividades económicas).

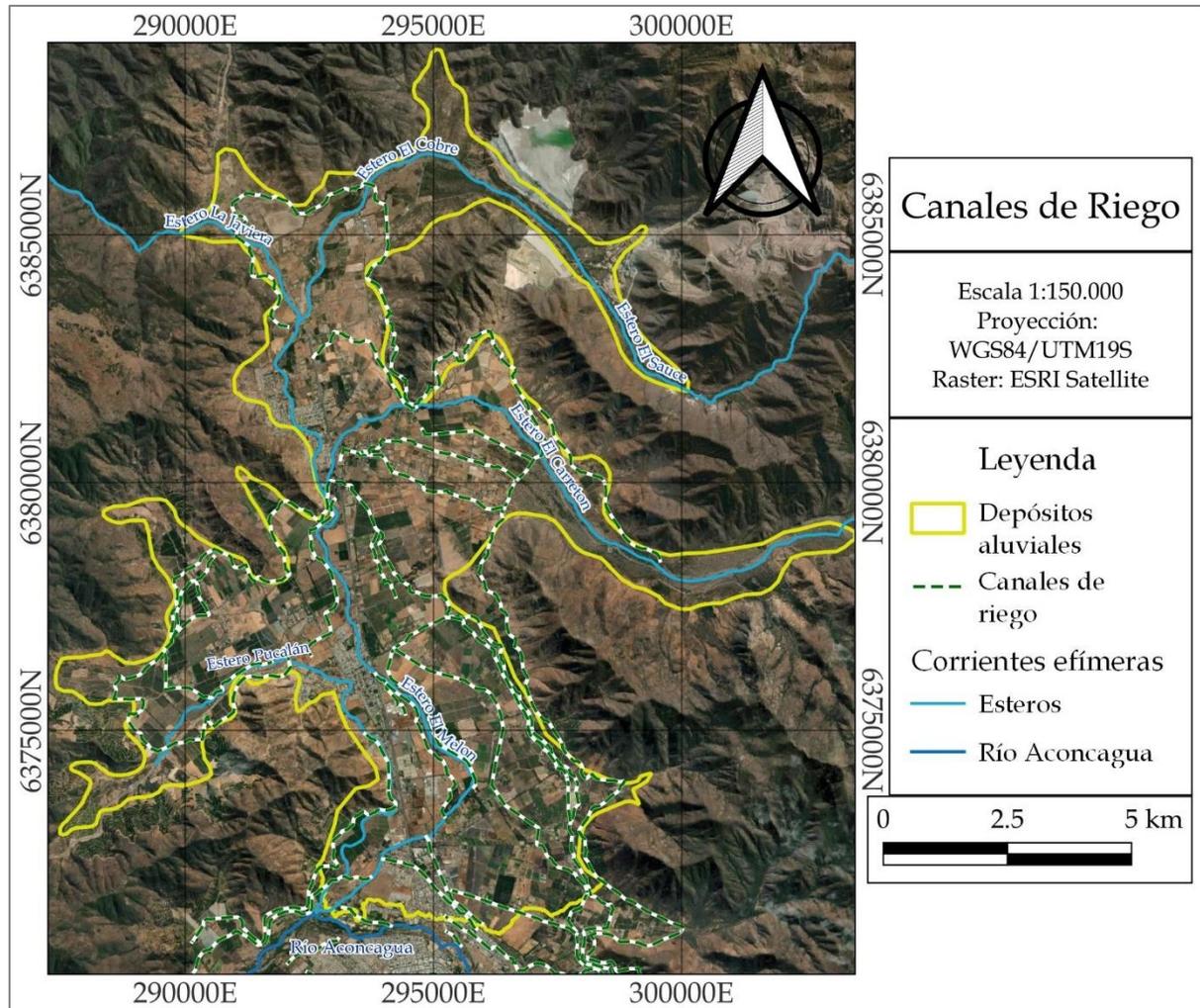


Figura 8: Mapa de los canales de riego. Modificado de Infraestructura de Datos Geográficos (2021).

Capítulo 3: Metodología

Las metodologías que se llevarán a cabo para la realización de este trabajo constan de las siguientes etapas: construcción de la piezometría, análisis de los usos de aguas subterráneas, análisis hidrogeoquímico y análisis isotópico.

3.1. Piezometría

En primer lugar, se llevó a cabo una campaña de terreno en septiembre de 2021, donde se midieron niveles estáticos de 17 puntos de captación de aguas subterráneas, correspondientes al acuífero aluvial del área de estudio. Posteriormente, se recopiló información pública sobre niveles estáticos proveniente de los Monitoreos de Extracciones Efectivas de aguas subterráneas del inventario de datos de la Dirección General de Aguas (DGA; <https://snia.mop.gob.cl/cExtracciones2/#/busquedaPublica>), registrados en septiembre de 2021. En esta búsqueda, se obtuvieron datos de 32 puntos de captación y, al sumarlos a los datos de la campaña de terreno, se confeccionó una base de datos (ver Anexo B: Datos piezométricos) que incluye las coordenadas N y E, junto con la cota hidráulica, tomando como referencia el nivel del mar.

Para la delimitación de la piezometría, se empleó el software QGIS v.3.26.2, donde se realizó una interpolación de los valores de cota hidráulica mediante el uso del complemento SAGA-GIS. El método de interpolación seleccionado fue el Multilevel B-Spline, que, a través de funciones matemáticas, permite ajustar los datos existentes para estimar valores desconocidos en un área. Como resultado, se obtiene una capa ráster, con los datos estimados de cota hidráulica en el área de estudio. En QGIS, se extrajeron las curvas de nivel de la capa ráster obtenida, con intervalos de 5 unidades, creando así curvas de isopiezas que representan los niveles piezométricos cada 5 [m]. Luego, las isopiezas fueron editadas manualmente según fuera necesario y, para concluir, se representaron las direcciones y sentidos de los flujos de aguas subterráneas del área de estudio mediante flechas.

A su vez, para evaluar la evolución histórica de los niveles piezométricos, se extrajeron datos de niveles estáticos en pozos pertenecientes a la DGA, desde su plataforma web. Estos datos fueron utilizados para realizar gráficos de profundidad [m] vs tiempo [años].

3.2. Usos de aguas subterráneas

Se procedió al análisis de los derechos de agua empleando la base de datos de Registros de Aprovechamiento de Aguas inscritos, la cual se obtuvo a través de la

plataforma web de la DGA. Esta base contiene los valores en [m³/s] y [L/s] de los caudales otorgados y fue filtrada espacialmente para que solo contenga los datos correspondientes dentro del área de estudio.

Para analizar el análisis de los derechos de aguas subterráneas y de sus usos, se realizaron una serie de gráficos y diagramas de tortas tanto para los caudales como de la cantidad de estos derechos a lo largo del tiempo, haciendo la distinción entre los diferentes usos, correspondientes a Agricultura, Agua Potable, Minería, Industrial y Otros. A su vez, se generaron mapas que incluyen la evolución de estos derechos por décadas, mostrando los diferentes usos y caudales otorgados.

Estos derechos se clasifican además según otras categorías, las cuales son especificadas en la sección de Resultados:

- Título: perpetuo o provisorio.
- Ejercicio de derecho:
 - Probabilidad de uso: permanente o eventual.
 - Oportunidad de uso: continua, discontinua y alterna.

3.3. Hidrogeoquímica y composición isotópica

En la campaña de terreno realizada en septiembre de 2021 por un hidrogeólogo, en el marco de un curso internacional de hidrología subterránea (CIHS), se recolectaron 17 muestras de aguas subterráneas, correspondientes al acuífero aluvial del Estero El Cobre, las cuales fueron extraídas de los pozos en donde se determinaron los niveles estáticos. A su vez, se midieron parámetros fisicoquímicos in situ como pH, temperatura y conductividad eléctrica (CE). Estas muestras fueron enviadas a análisis de laboratorio, donde se determinó el contenido de aniones (Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻), cationes (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), sílice (SiO₂), elementos traza (Li, B, Al, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs, Ba, Hg, Pb, U) e isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$). Para complementar la base de datos, se agregaron dos muestras de aguas superficiales (río y canal) extraídas en la subcuenca de Catemu, ubicada directamente hacia el este del área de estudio.

3.3.1. Validación de los análisis hidrogeoquímicos

Se realizó la validación de los análisis químicos entregados, el cual consiste en calcular el porcentaje de error del balance iónico de cada muestra con las concentraciones en [meq/L] de los elementos mayores (aniones y cationes), aplicando la Ecuación (1) (Custodio & Llamas, 1983):

$$\text{Error de balance iónico (\%)} = \left(\frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right) \times 200 \quad (1)$$

Siguiendo el principio de electroneutralidad, se establece que el margen de error aceptable debe mantenerse dentro de un rango inferior al $\pm 5\%$ (Appelo & Postma, 2005). No obstante, es importante reconocer que esta limitación puede ser ajustada en función de la conductividad eléctrica (CE) del agua.

Tabla 1: Error admisible del balance iónico según la conductividad eléctrica.

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	<50	200	500	2000	>2000
Error admisible (%)	30	10	8	4	4

Si la CE aumenta, indica una mayor presencia de iones disueltos en el agua, lo que conduce a una detección más precisa de estos elementos. Sin embargo, si el contenido iónico es bajo, la detección de iones se vuelve más complicada, aumentando el margen de error en el balance iónico. Si las muestras presentan un porcentaje de error dentro de los rangos permitidos según su CE, se consideran aceptables, mientras que el resto no son considerados para el análisis. Los errores admisibles de las muestras que se utilizarán en este trabajo se encuentran en la sección de Resultados.

3.3.2. Análisis Exploratorio de Datos y otros análisis

Para comenzar, se realiza un Análisis Exploratorio de Datos (EDA, por su sigla en inglés), el cual es un proceso investigativo en el que se utilizan estadísticas de resumen y herramientas gráficas para llegar a conocer los datos y comprender lo que se puede averiguar de ellos. La finalidad del EDA es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística (Daniele, 2007).

Los métodos gráficos que se suelen utilizar en estos análisis buscan representar los datos de manera sencilla y en su forma original, como en histogramas, distribución de la probabilidad, diagramas de bloques o mediante los estadísticos de las variables usando los diagramas de medias, de la desviación estándar y los diagramas de cajas y bigotes (Daniele, 2007). Para este estudio, se elaboraron una serie de diagramas de cajas y bigotes con los datos de parámetros fisicoquímicos, elementos mayores y trazas, utilizando el software Spyder, el cual es un entorno de desarrollo integrado y multiplataforma de código abierto (IDE) para programación científica en el lenguaje Python.

A continuación, se desarrollaron una serie de mapas para presentar la variación espacial tanto de elementos mayores como de algunos elementos traza de interés (cobalto y

bario), a través del software QGIS, representando las concentraciones en [ppm] de cada muestra en el área de estudio. Luego, con el fin de determinar las clasificaciones químicas de las aguas, se construyen diagramas Piper y Stiff mediante el software Geochemist's Workbench (GWB).

En la siguiente etapa se busca estudiar las posibles relaciones entre los distintos elementos presentes en las aguas, junto con los parámetros fisicoquímicos, a través de la confección de una matriz de correlación. Esta matriz permite comparar cada variable con las demás, entregando como resultado un coeficiente de correlación (R) para cada caso, el cual puede variar entre -1 y 1. Si R es un valor cercano a 1, significa que la correlación entre esas variables es excelente y directa, por el contrario, si es cercano a -1, se considera excelente e inversa. Para este trabajo, se define que si $R > |0.7|$, indica una alta o excelente correlación, entre $|0.5|$ y $|0.7|$ una correlación moderada, entre $|0.3|$ y $|0.5|$ una baja o débil correlación y menor a $|0.3|$ una escasa o nula correlación.

La matriz de correlación se construye normalizando todos los datos, de modo que el promedio de estos sea 1 y la desviación estándar 0. Luego, en el programa Microsoft Excel, se utiliza la herramienta Análisis de Datos para extraer los coeficientes de correlación. Ya con estos resultados, se realizaron una serie de diagramas binarios comparando los elementos que presentaron mayores correlaciones.

3.3.3. Análisis Estadístico Multivariante

Lo siguiente a desarrollar corresponde al Análisis Estadístico Multivariante (AEM), la cual consta de dos etapas: Análisis de Clústeres Jerárquicos (HCA, por su sigla en inglés) y Análisis Factorial (AF). El AEM se realizó mediante el software IBM SPSS Statistics V26®, utilizando las siguientes variables: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Co y Ba.

El objetivo del HCA es encontrar semejanzas entre las muestras existentes, para lo que se construye un dendrograma agrupando las variables con respecto a una matriz que representa el grado de similitud de éstas, la que por lo general es la matriz de correlación, aplicando el método de la Distancia Euclidiana (Osion, 1995) y el método de Ward como regla de vinculación (Castro et al., 2012). El procedimiento jerárquico comienza poniendo cada variable en un grupo, para luego calcular las variables que están más relacionadas, formando nuevos grupos hasta que quede el número de grupos deseados (Daniele, 2007).

En cuanto al AF, es una técnica que reduce las dimensiones de un conjunto de variables para reconstruirlo en combinaciones lineales, con el objetivo de crear estructuras de interdependencia entre variables cuantitativas y generar nuevas variables que son función lineal de las originales (Daniele, 2007).

Para comprobar el grado de asociación entre las variables, se utilizaron dos pruebas descritas por IBM (2021): El primero es la prueba de KMO o la Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo, la cual entrega un estadístico que indica la proporción de varianza en las variables que podrían ser causadas por factores subyacentes (Kaiser, 1970). Los valores altos, cercanos a 1.0, generalmente indican que un AF puede ser apropiado con los datos del estudio. Si el valor es inferior a 0.50, los resultados del análisis factorial probablemente no serán adecuados. En este estudio, se aplicará el criterio $KMO \geq 0.70$ para establecer si el índice es o no un valor apropiado. El segundo test corresponde a la Prueba de Esfericidad de Bartlett, el que demuestra la hipótesis de que la matriz de correlación es una matriz de identidad, lo que indicaría que sus variables no están relacionadas (Bartlett, 1950). Los valores pequeños (menos de 0.05) del nivel de significancia indican que el AF es apropiado con los datos existentes.

Uno de los resultados obtenidos del software IBM SPSS es la matriz de componentes, a la cual se le realiza una rotación ortogonal según el método Varimax (Kaiser, 1958) para maximizar la varianza de la carga al cuadrado de cada factor. Esta matriz resultante, proporciona la cantidad de factores obtenidos, junto con las variables que los representan y, además, se obtienen puntajes factoriales asignados a cada muestra. Luego, estos valores son representados en el plano cartesiano, obteniendo dos gráficos con los factores, tanto con los valores de cada variable presentes en la matriz de componentes rotada, como con los puntajes factoriales según cada muestra. Estos últimos son representados en el área de estudio, a través de mapas de variación espacial.

Posteriormente, los resultados obtenidos de ambos análisis estadísticos (HCA y AF) son combinados en diagramas de cajas y bigotes, para una mayor comprensión de las muestras de cada clúster y sus cargas factoriales.

Para finalizar, se estudian las interacciones agua-roca que pueden ocurrir en el área de estudio, según el contexto geológico, viendo cómo se comportan las muestras de cada clúster definido en el HCA, junto con el análisis de la calidad de las aguas, con respecto a las normativas chilenas NCh409/1 y NCh1333.

3.3.4. Isótopos Estables

En el ámbito de la hidrogeología, los isótopos estables del agua han tenido un extenso uso en la estimación de procesos hidrogeológicos (Jasechko, 2019). Asimismo, se emplean para evaluar las zonas que aportan a la recarga de las aguas subterráneas y para entender los mecanismos de recarga. En el presente estudio, se analizó la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 17 muestras de aguas subterráneas pertenecientes al área de estudio, junto con las 2 muestras de río y canal, correspondientes a la subcuenca de Catemu.

Inicialmente, las composiciones isotópicas fueron analizadas gráficamente, comparándolas con la línea de agua meteórica local (MWL, por su sigla en inglés), que representa la relación existente entre los isótopos estables de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de una región determinada. En específico, las muestras fueron comparadas con las líneas meteóricas global (GMWL; Craig, 1961), de Chile (Chile MWL; Sánchez-Murillo et al., 2018) y la desarrollada a los 33°S (33°S Chile MWL; Taucare et al., 2020a). Luego, se graficó la altitud en función de la composición de $\delta^{18}\text{O}$, para comparar las muestras con el gradiente orográfico (Taucare et al., 2020a). Este análisis permite estimar la altura de las precipitaciones que dieron origen al agua subterránea.

Por último, para complementar el análisis isotópico, se generaron mapas que ilustran la variación espacial de las composiciones de ambos isótopos dentro del área de estudio, junto con diagramas de cajas y bigotes para comparar la distribución de las composiciones isotópicas según los clústers definidos en el HCA.

Capítulo 4: Resultados

4.1. Piezometría

En esta sección se busca representar gráficamente la piezometría del acuífero aluvial del Estero El Cobre, por lo que se ha elaborado un análisis de la evolución histórica de los niveles piezométricos en el área de estudio y mapas de isopiezas representando estos niveles, correspondientes al mes de septiembre del 2021, junto a las direcciones de flujo de las aguas en el acuífero.

4.1.1. Evolución histórica

Se ha realizado un análisis de la evolución histórica de los niveles piezométricos del acuífero, utilizando la información recopilada de 3 pozos monitoreados por la DGA entre los años 1983 y 2021. Estos datos se encuentran en Anexo B: Datos piezométricos. En la Figura 9 se presenta la ubicación de estos pozos:

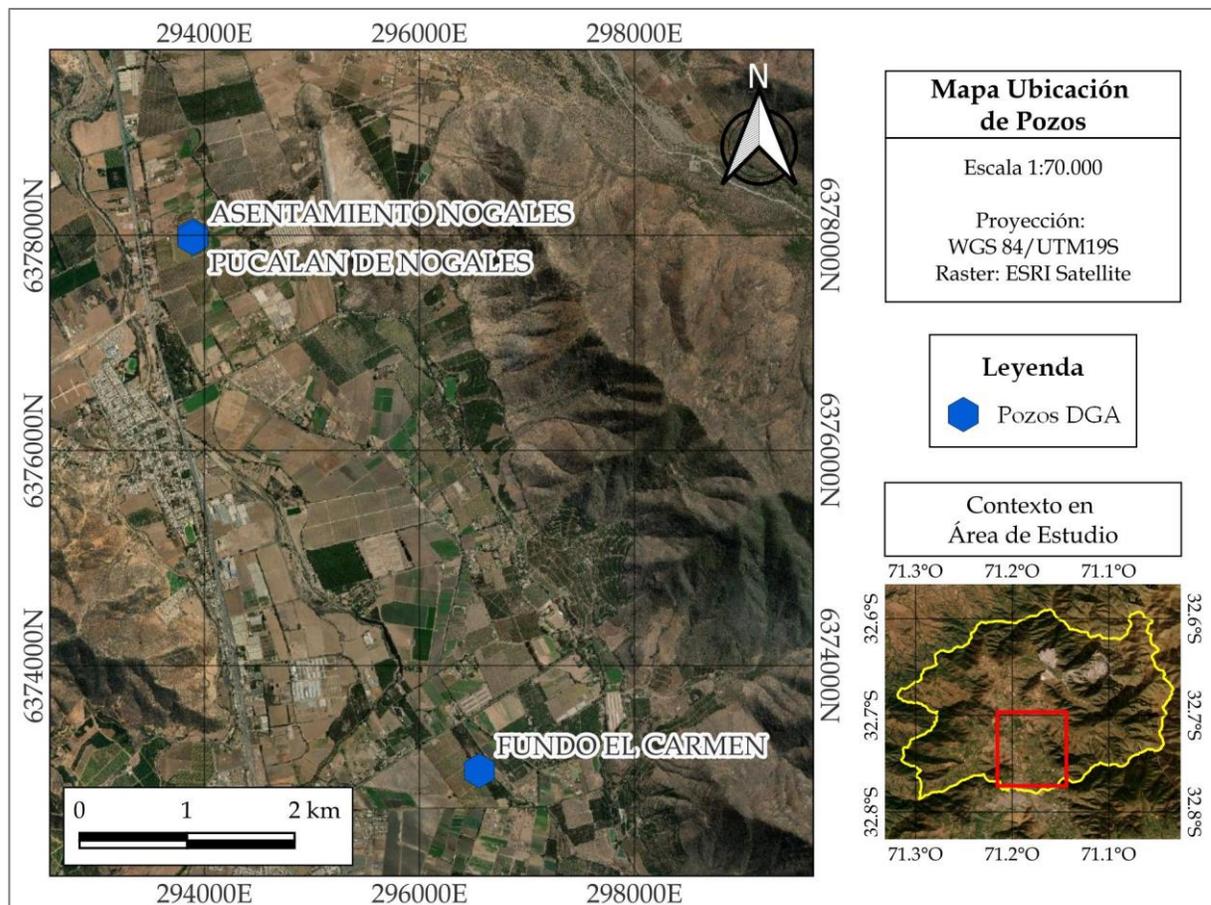


Figura 9: Ubicación de las captaciones de aguas subterráneas monitoreadas por la DGA.

Con la información correspondiente a estos pozos, se realizaron gráficos de profundidad en función del tiempo para representar la evolución temporal que han tenido las aguas subterráneas (Figura 10). Si bien, las curvas de todos los gráficos son diferentes entre sí, cabe destacar que los tres presentan un aumento de la profundidad desde el 2012 en adelante.

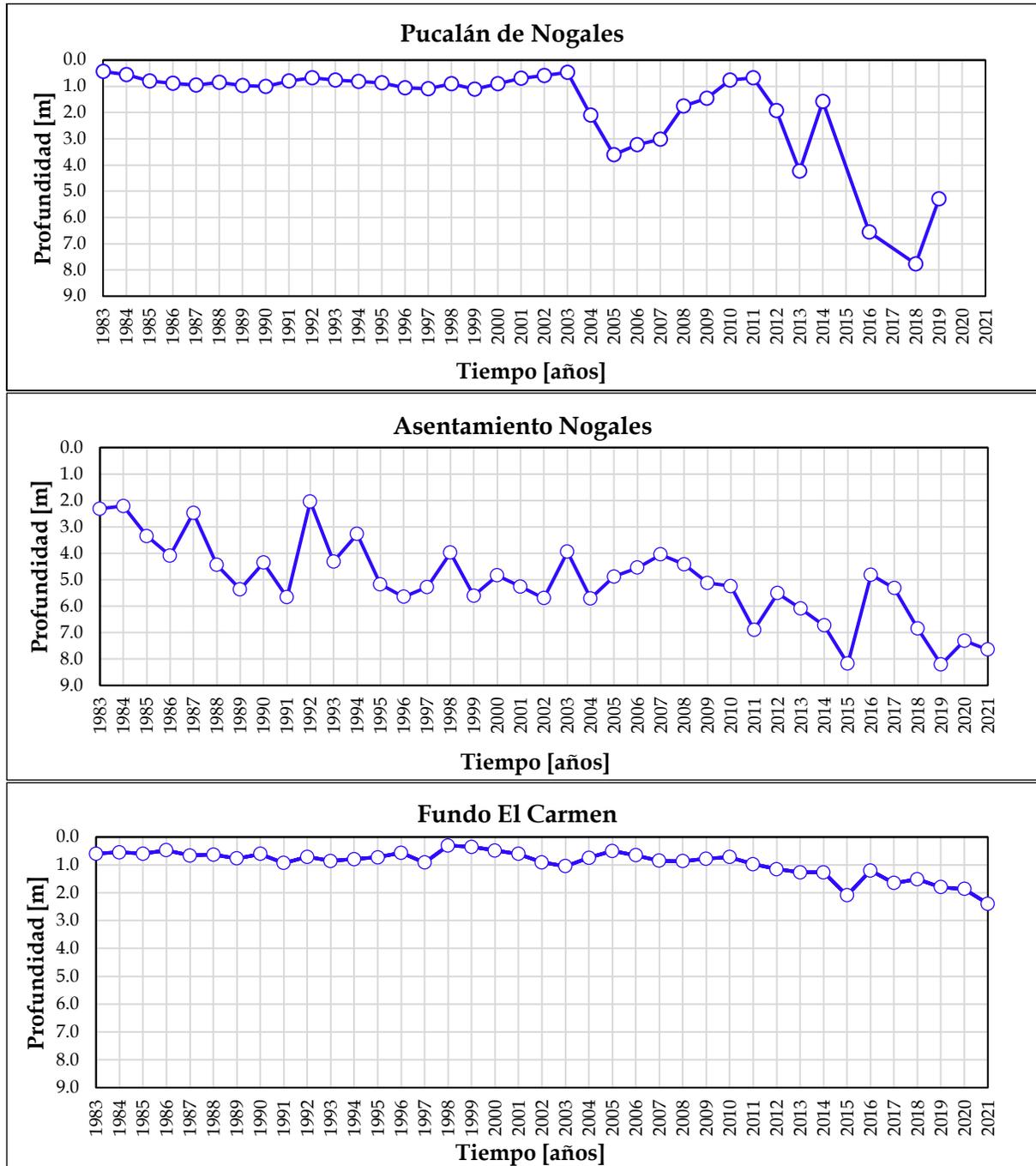


Figura 10: Evolución histórica de las profundidades en [m] de las aguas subterráneas de los puntos de captación monitoreados por la DGA. La escala temporal abarca los años comprendidos entre 1983 y 2021.

Para el pozo Pucalán de Nogales, se observa que los primeros 20 años los niveles estáticos se mantuvieron estables entre los 0 y 1 [m], donde luego experimentó diferentes alzas y bajas de la profundidad, variando entre 0.7 y 4.2 [m] aprox., entre los años 2004 y 2014, llegando a un máximo de 7.8 [m] de profundidad en el 2018 y finalizando el monitoreo con 5.3 [m] en 2019. Por otro lado, el pozo Asentamiento Nogales es el que posee mayores variaciones en las profundidades a lo largo de los años, con mínimos que no superan los 2 [m] en los primeros 10 años. Posterior al año 2007 se tiene un notorio aumento de la profundidad, llegando máximos que exceden los 8 [m], como se observa en los años 2015 y 2019. El pozo Fundo El Carmen es el que posee las menores variaciones del nivel estático, ya que desde el año 1983 y hasta el año 2011, las profundidades oscilaron siempre entre 0 y 1 [m], para luego aumentar hasta los 2.4 [m] en el año 2021.

4.1.2. Elaboración de la piezometría

Se ha generado una base de datos con mediciones de niveles estáticos en el área de estudio para 49 pozos. Los datos fueron obtenidos de la campaña de terreno, donde se tomaron 17 mediciones, y de los monitoreos de extracciones efectivas de la DGA, extrayendo 32 mediciones, todas correspondientes al mes de septiembre del 2021. Estos datos se pueden encontrar detallados y georreferenciados en Anexo B: Datos piezométricos.

Para presentar los datos de niveles estáticos, se ha elaborado un mapa (Figura 11) que ilustra la ubicación de cada pozo, con su respectiva medición en m s.n.m., donde los puntos de captación representados en morado corresponden a los medidos en la campaña de terreno, mientras que los representados en verde corresponden a los monitoreos de la DGA. Las mediciones obtenidas en este trabajo varían de los 237.70 a 299.49 m s.n.m., mientras que las mediciones de los monitoreos de la DGA van de los 222.20 a 294.09 m s.n.m.

Estos datos del nivel piezométrico fueron utilizados para delinear la superficie piezométrica del acuífero aluvial del área de estudio, la cual se presenta en la Figura 12 mediante el trazado de curvas isopiezas. Estas líneas equipotenciales brindan información sobre la dirección de flujo de las aguas subterráneas y del gradiente hidráulico en el acuífero. Cabe destacar que el trazado de isopiezas presenta discontinuidades en algunos sectores, en específico en los bordes de los depósitos aluviales. Esto se debe a la falta de información en estas zonas y a las posibles variaciones en el patrón de flujo del agua al circular entre las rocas volcánicas y los depósitos aluviales al borde del acuífero. Este mapa muestra una representación general del nivel piezométrico en el área de estudio.

En específico, se puede notar que el nivel piezométrico presenta disminuciones desde las quebradas hacia el centro del valle principal, variando entre los 300 y 230 m s.n.m. Así mismo, el gradiente hidráulico varía según la zona observada en el área de estudio, un ejemplo de esto es la quebrada del Estero El Carretón, donde las cotas hidráulicas tienden a estar más próximas unas de otras que en el sector del Estero El Melón,

donde las cotas tienden a alejarse entre sí. Otra característica por observar es que en las zonas centro y sur del área de estudio las isopiezas tienden a curvarse mucho más que en las quebradas y, en algunos casos, éstas llegan a cerrarse en sectores específicos.

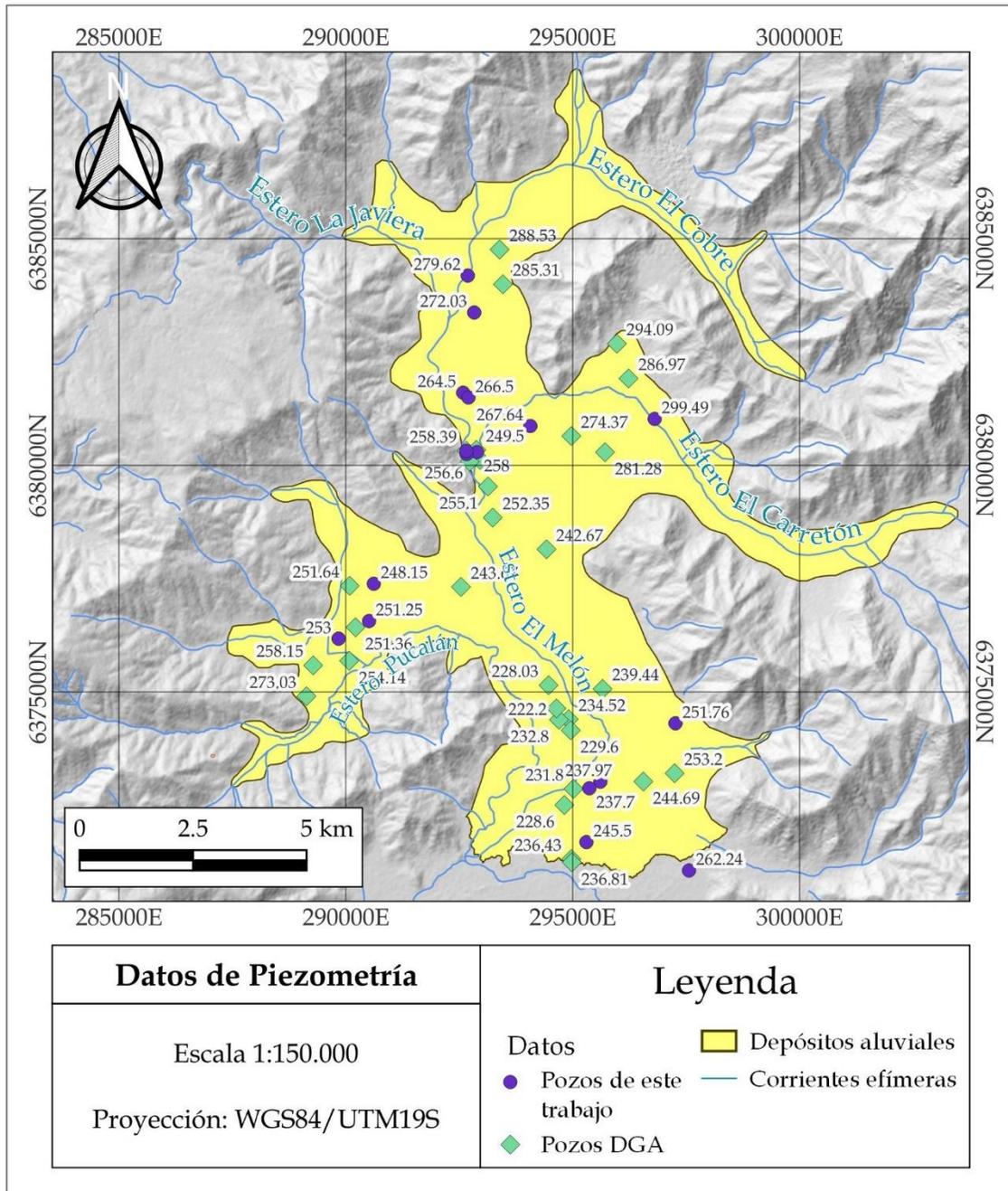


Figura 11: Mapa de ubicación de los puntos de captación de aguas subterráneas, correspondientes a los medidos en la campaña de terreno y los monitoreados por la DGA durante septiembre del 2021. Corrientes efímeras modificadas de la BCN.

Tomando en cuenta lo anterior, se establecen las líneas de flujo de las aguas en el acuífero, representando su dirección y sentido mediante flechas de color verde, tal como se muestra en la Figura 13. Para simplificar, se ha asumido que la distribución de la

permeabilidad en el subsuelo es isotrópica y homogénea, lo que implica que estas líneas son perpendiculares a las isopiezas. Además, el sentido del flujo se determina en función de la disminución del potencial hidráulico.

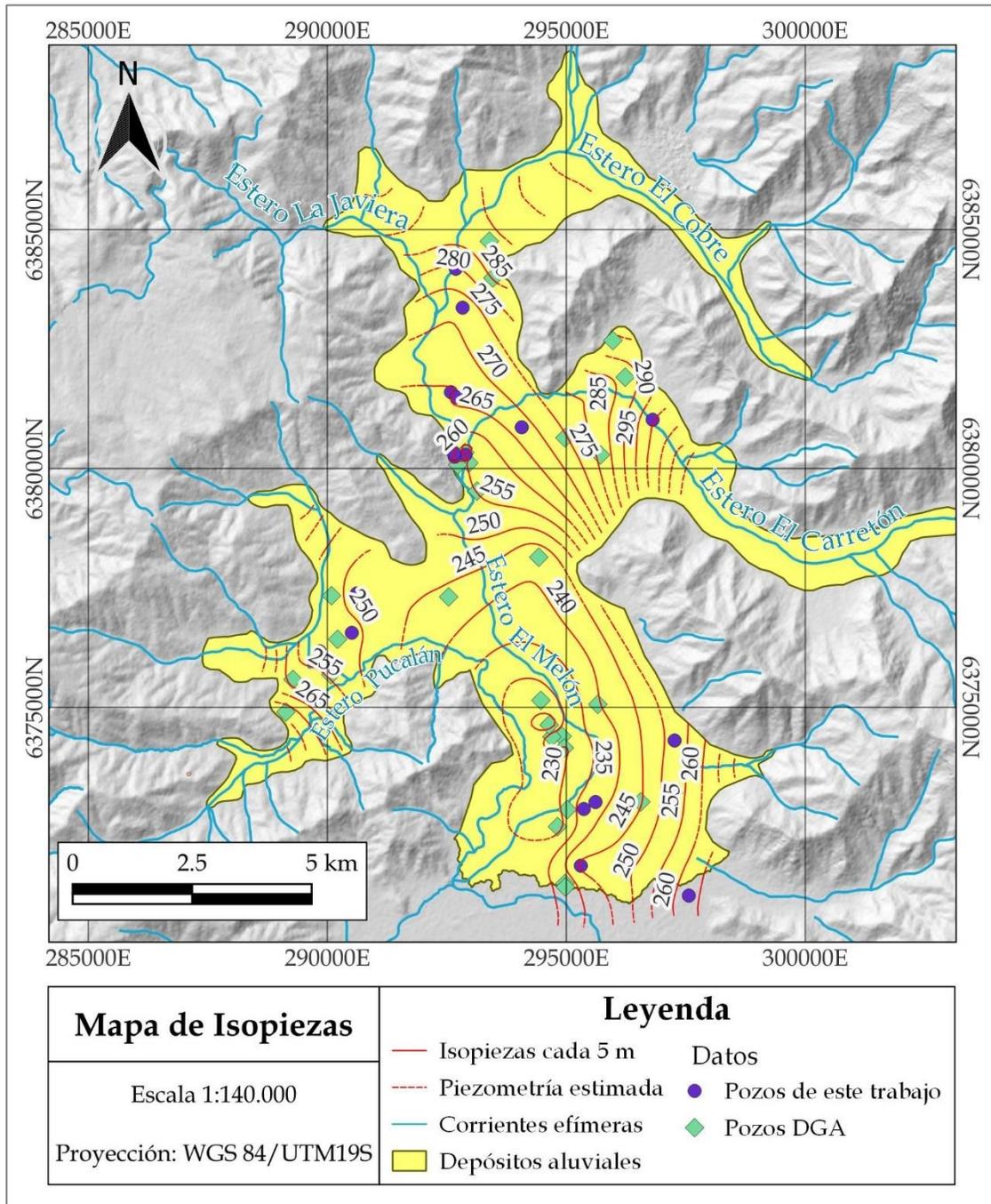


Figura 12: Mapa de isopiezas cada 5 [m], que representa la superficie piezométrica del acuífero. Corrientes efímeras modificadas de la BCN.

Desde una mirada general, es posible notar que las líneas de flujo se dirigen desde lo alto de las quebradas hasta las zonas sur del área de estudio, siguiendo el sentido de los esteros, aproximadamente. Si se observa con detención, los sectores con las isopiezas

más curvadas, en específico donde se tienen curvas cerradas, es posible observar que las líneas de flujo varían su dirección con respecto a la de los cauces de los esteros.

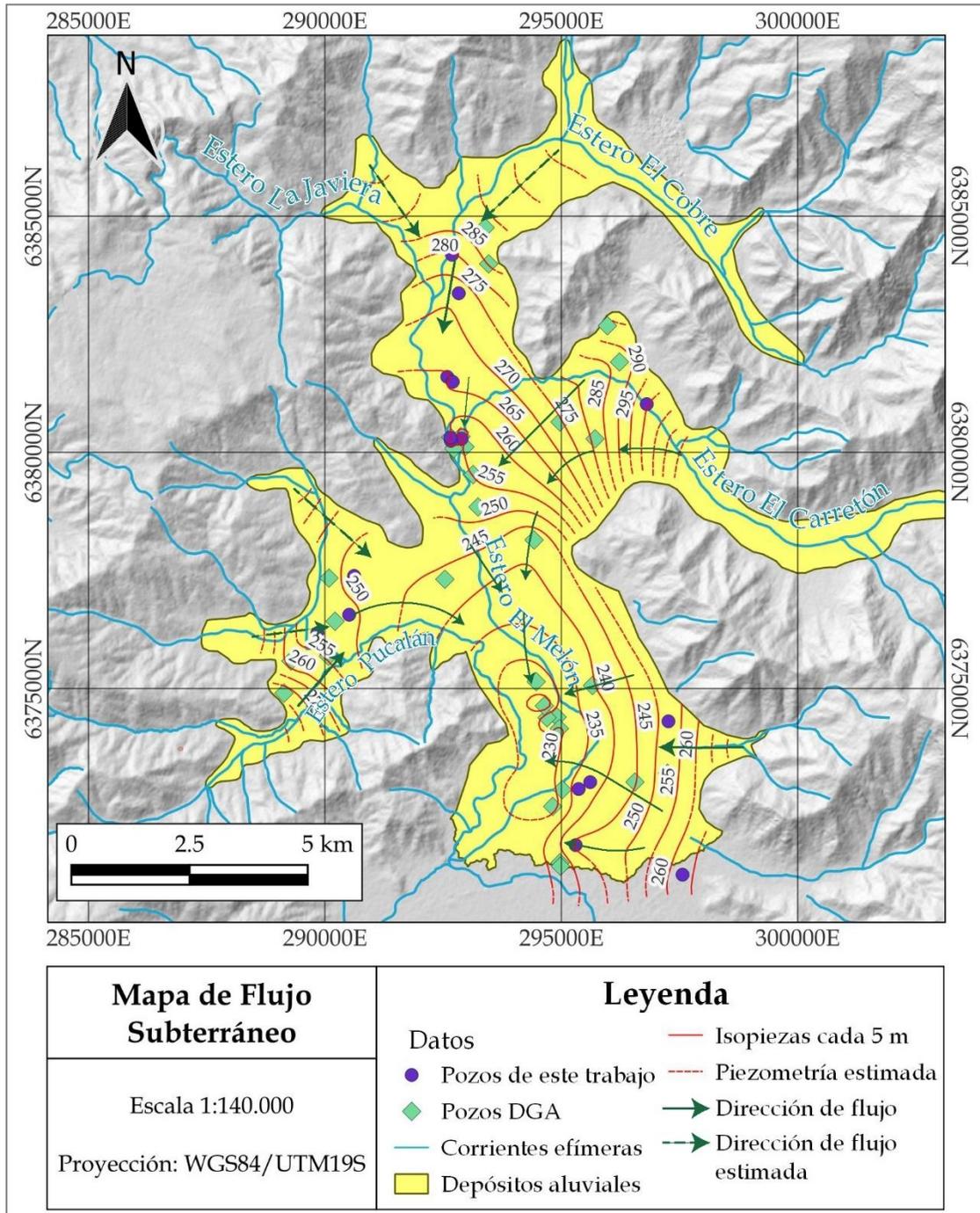


Figura 13: Mapa de dirección de flujo de las aguas subterráneas del acuífero, representado por flechas verdes. Corrientes efímeras modificadas de la BCN.

4.2. Extracciones

La información recopilada cuenta con 457 datos de derechos de aguas subterráneas correspondiente a la subcuenca del Estero El Cobre, con fechas que van desde 1985 hasta 2022. Cabe destacar que, en la década de 1980, solo hubo un derecho asignado, correspondiente al año inicial de los análisis.

4.2.1. Evolución histórica

Para visualizar la evolución de los derechos de aguas subterráneas otorgados a lo largo del tiempo, es necesario analizar tanto la cantidad de estos como el caudal. Los datos utilizados para este análisis provienen de la DGA (2022), cuyo rango temporal abarca desde el año 1985 hasta 2022.

En la Figura 14a se ha graficado la cantidad de derechos otorgados por año, en el que se observan peaks en los años 2008 y 2014, donde se otorgaron 91 y 56 derechos, respectivamente, siendo estos los años con mayor número de derechos otorgados. A partir del año 2015, se visualizan otros peaks que no superan los 35 derechos otorgados. Además, es importante destacar que desde 1997 la asignación de nuevos derechos no ha cesado, aunque ha variado en cuanto a su número. La Figura 14b presenta los mismos datos de manera acumulada, lo que permite apreciar los aumentos significativos en la asignación de derechos a lo largo del tiempo. Los peaks ya mencionados se observan claramente debido al incremento del área bajo la curva, lo que evidencia el notable aumento de derechos después de 2015, llegando a superar el 35% del total. Se destaca que el mayor número de derechos otorgados corresponde al uso agrícola a lo largo de la historia (89.5% del total de derechos).

En cuanto al análisis de los caudales otorgados por año, en la Figura 15a se examinan los caudales de los derechos otorgados desde 1985 hasta 2022. En este gráfico se observan diversos peaks, destacando el año 2008 como el año en que se concedieron los mayores caudales en derechos, con un total de 0.439 [m³/s], siendo la minería el uso con mayor caudal cedido, llegando hasta los 0.299 [m³/s]. Le sigue el año 2018 con el segundo peak más elevado en la gráfica, con un total de 0.369 [m³/s], correspondiendo casi en su totalidad al uso de la agricultura, con 0.363 [m³/s] cedido en el año (98.6% del caudal total). En la Figura 15b se tienen los caudales otorgados acumulados por año, donde se observa el aumento de éstos y los peaks anteriormente mencionados, debido al aumento del área bajo la curva de esos años. En esta gráfica es posible observar que el mayor valor de derechos es cedido hacia el uso de la agricultura a lo largo de la historia.

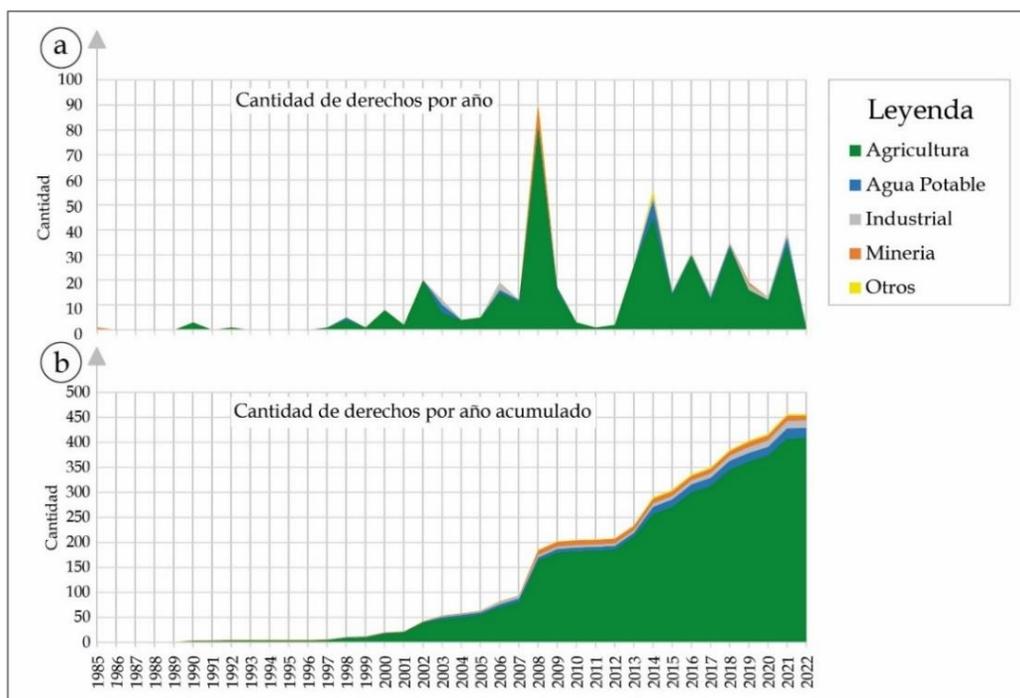


Figura 14: Cantidad de derechos de aguas subterráneas desde 1985 hasta 2021. a) Cantidad de derechos por año. b) Cantidad de derechos por año acumulado. Datos extraídos de DGA (2022).

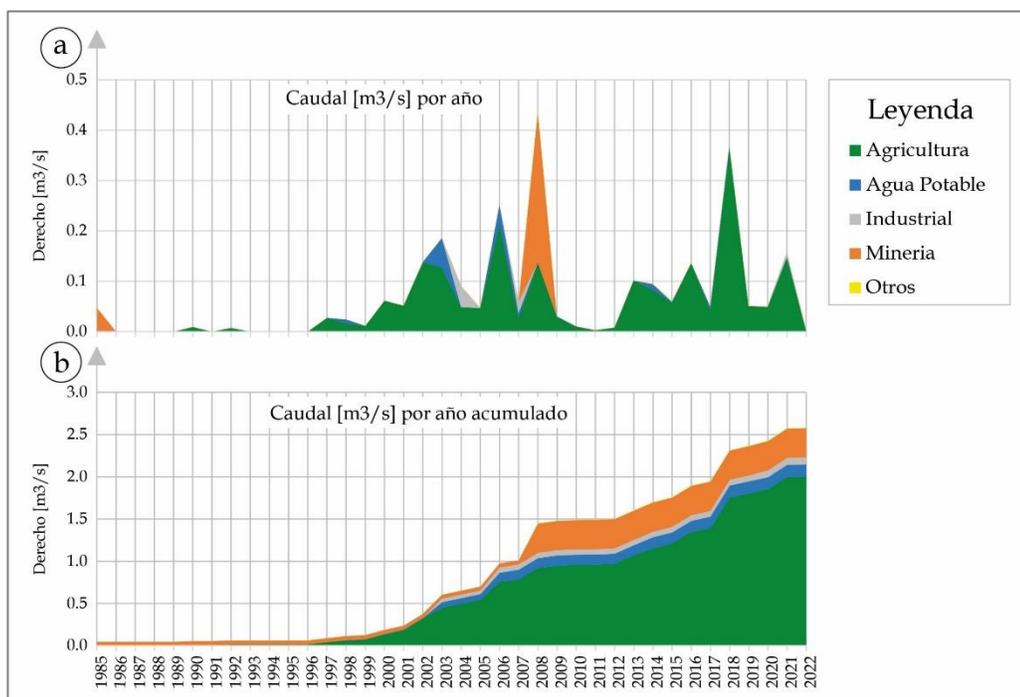


Figura 15: Evolución histórica del caudal de los derechos de aguas subterráneas otorgados desde 1985 hasta 2021. a) Caudal [m³/s] por año. b) Caudal [m³/s] por año acumulado. Datos extraídos de DGA (2022).

4.2.2. Uso, título y ejercicio de derecho del agua subterránea

Con relación al uso de los derechos de aguas subterráneas, es posible observar claramente que la agricultura es la actividad que posee la mayor cantidad de derechos otorgados, al igual que el mayor valor de caudal asignado, como se observa en la Figura 16a. La minería es el segundo uso con mayor porcentaje de caudales otorgados, aunque el agua potable es quien posee en segundo puesto en cuanto a la cantidad de derechos. Teniendo esto en cuenta, al realizar una comparación entre el caudal total otorgado a cada uso, con respecto a la cantidad de derechos de la subcuenca en estudio, como se observa en la Figura 16b, se obtiene los promedios de cada uso según el número de derechos. Se debe destacar que, aunque la cantidad de derechos otorgados al uso de la minería en el área de estudio es apenas del 2.2% del total, posee un promedio de caudal otorgado de $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada derecho, el cual es claramente superior a los demás, donde el siguiente uso con mayor magnitud es el del agua potable, que solo alcanza un promedio de $0.0073 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 16c).

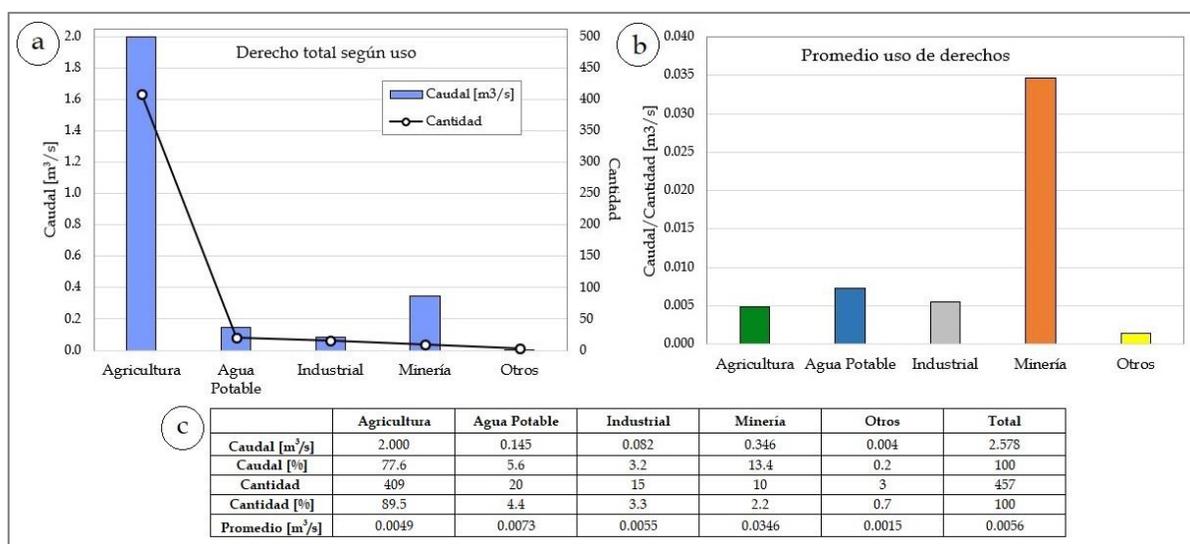


Figura 16: a) Caudales [m³/s] y cantidad de derechos según el tipo de uso. b) Caudal promedio, según la cantidad de derechos, calculado para cada uso. c) Tabla de valores, correspondiente a caudales, cantidad y sus respectivos promedios. Datos extraídos de DGA (2022).

En la Figura 17a se presentan los porcentajes por década de los derechos otorgados, según cada uso, donde la agricultura destaca a lo largo de todas las décadas, teniendo el mayor porcentaje de caudal concedido, llegando a un 77.6% aprox. hacia la década del 2020. Por otro lado, en la Figura 17b se tienen diagramas que representan los porcentajes por década para las cantidades de derechos otorgados, según cada uso, donde, al igual que en la figura anterior, existe un predominio de la agricultura, la cual es de casi el 90% de los derechos otorgados hacia la década del 2020. Teniendo esto en cuenta, es

importante destacar que los derechos otorgados a la minería, cuya mayoría de ellos fueron cedidos en la década del 2000, poseen caudales igualmente significativos, siendo de un 13.4% en total.

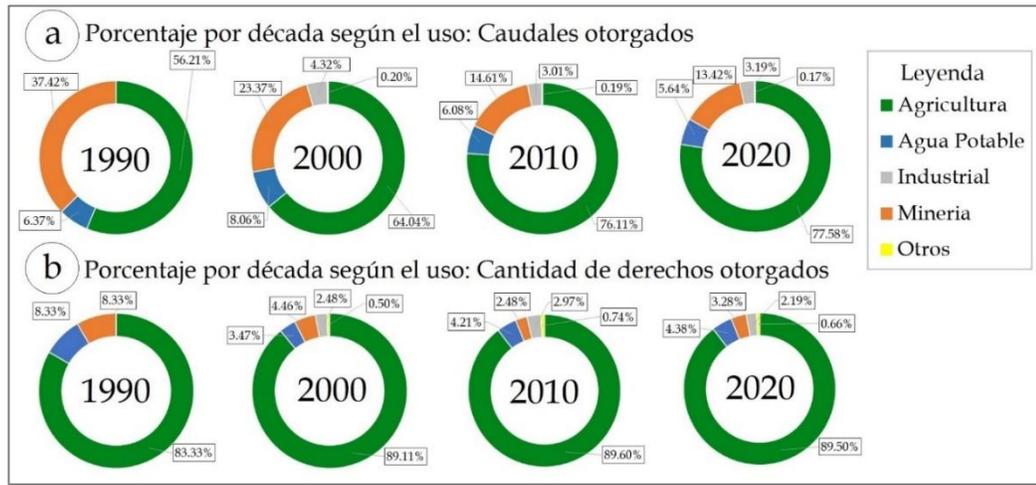


Figura 17: Diagramas de torta de la evolución histórica de derechos de aguas subterráneas, desde la década de 1990 hasta la de 2020. a) Según caudal de derechos. b) Según cantidad de derechos.

La distribución espacial de los derechos según los usos, se puede observar en la Figura 18. Es notorio el predominio de los derechos otorgados hacia la agricultura, como se ha mencionado, cuya distribución es generalmente homogénea dentro de los depósitos aluviales. Los derechos de agua potable se encuentran principalmente en las cercanías a los asentamientos humanos, al igual que lo de usos industriales. Los derechos pertenecientes al uso de la minería se encuentran en tres zonas específicas, siendo el primer sector ubicado entre las localidades de Nogales y La Calera, donde se encuentran 6 derechos otorgados, el segundo corresponde al sur de la localidad El Melón, con 3 derechos, y el tercer sector, el cual posee solo 1 derecho, es donde se sitúa la Operación El Soldado, a cargo de la empresa Anglo American, ubicada a 10 [km] aprox. de El Melón. Cabe destacar que los 10 derechos de aguas subterráneas correspondientes al uso de la minería en el área de estudio han sido otorgados a la empresa anteriormente mencionada.

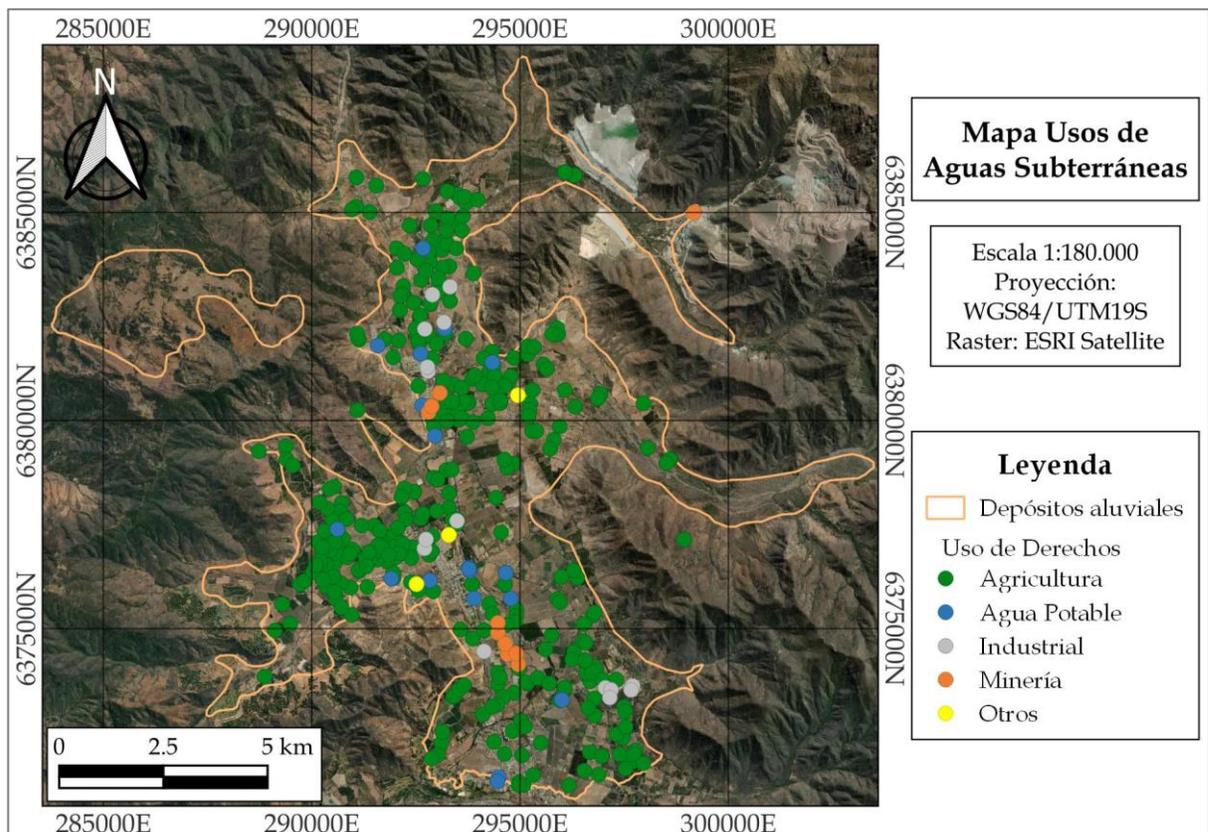


Figura 18: Mapa de la distribución espacial de los usos de derechos en el área de estudio.

Al analizar la evolución histórica de la distribución espacial de los derechos según sus usos (Figura 19), es posible visualizar claramente lo graficado en la Figura 17, pero al sumar la componente espacial, se pueden describir zonas predominantes para cada uso según las décadas. En la década de 1990, el sector sur es el que posee el mayor número de extracciones asociadas a la agricultura, mientras que para la del 2000 en adelante, la distribución de derechos para este uso es relativamente homogénea. El uso del agua potable se requiere mayormente para las zonas pobladas, aumentando el otorgamiento de derechos de este tipo en cada década, sobre todo en las cercanías de los esteros El Cobre y El Melón. En la década del 2000 se otorgaron los primeros derechos hacia el uso industrial, luego, la mayoría de éstos fueron otorgados en la década del 2010, mientras que unos pocos se sumaron a principios de la década de 2020. En el año 1985 se otorgó el 1er derecho en el área de estudio, cuyo uso fue hacia el sector minero, pero luego, en la década de 1990 no se concedieron derechos para este uso, mientras que en la década de 2000 fueron asignados 8 nuevos derechos. Finalmente, a fines de la década del 2010 se asignó el último derecho conocido a este uso. En cuanto a otros usos, en el área de estudio se otorgó 1 derecho en la década del 2000 y 2 más en la década del 2010, distribuidos entre la localidad de Nogales y hacia el este de El Melón.

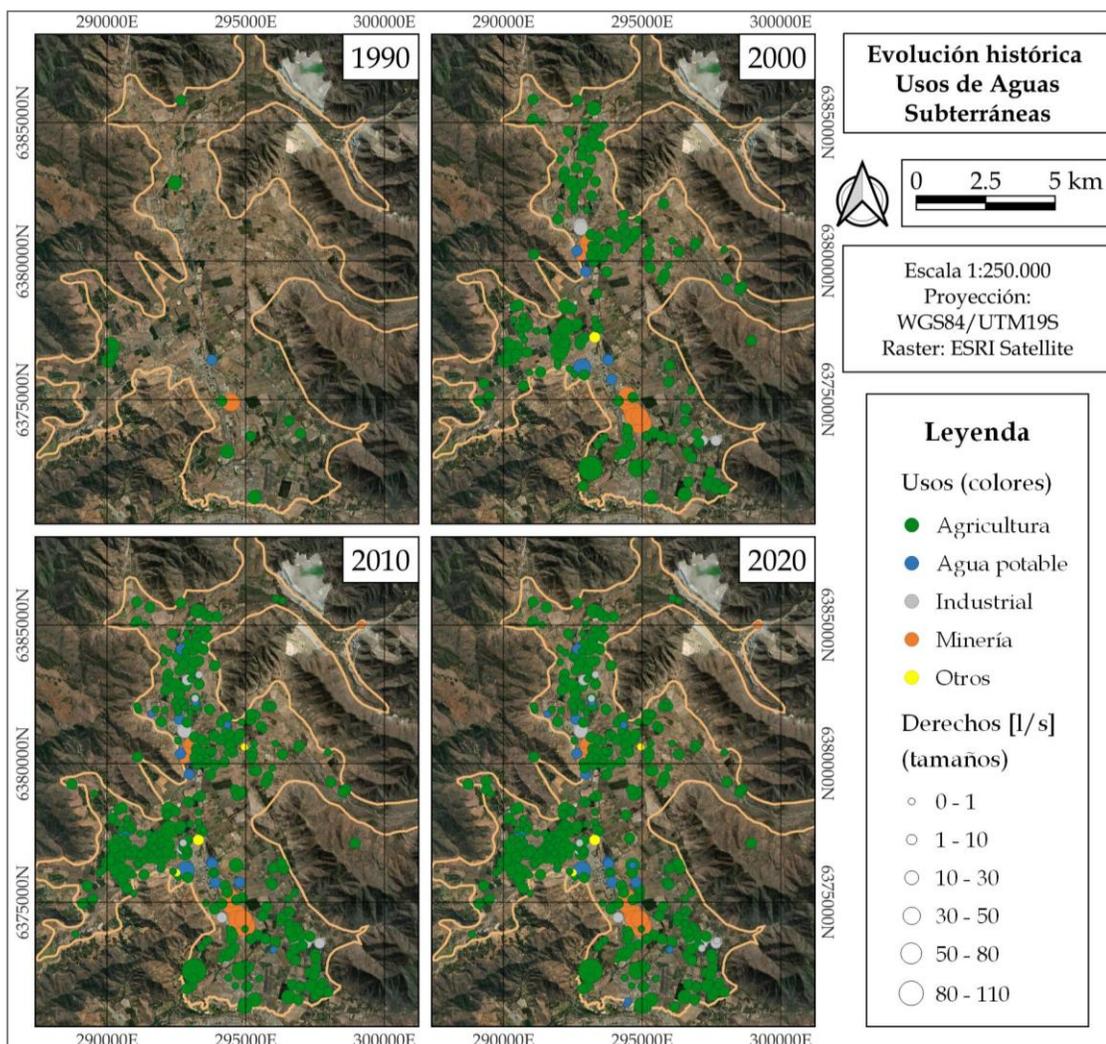


Figura 19: Evolución histórica de la distribución espacial de los usos de aguas subterráneas en el área de estudio desde la década de 1990 hasta la de 2020.

En cuanto al ejercicio de derecho, todas las probabilidades de uso son permanentes, mientras que las oportunidades de uso son continuas, a excepción de un solo derecho, correspondiente al código ND-0504-3277 (296543E, 6371586N), el cual ha sido destinado al uso agrícola, cuya oportunidad es alterna. Con respecto a los títulos, todos los derechos son perpetuos en el área de estudio.

4.2.3. Análisis espacio-temporal

En este apartado, se realizan diferentes mapas que ilustran la evolución espacio-temporal de los derechos de aguas subterráneas asociados al área de estudio, en donde se utilizan los 457 datos obtenidos de la DGA (2022) para presentar el desarrollo según cada década.

En la Figura 20 se observa la ubicación de cada derecho según sus L/s, donde los derechos con menor caudal son ilustrados con tonos azules y los de mayor, con tonos

rojos. Estos valores varían desde los 0.1 hasta los 110 L/s. Además, en el mapa es posible observar tres zonas con mayores extracciones, vinculados a las localidades y sus alrededores de El Melón, Nogales y La Calera, donde se tienen los derechos con tonalidades amarillas, con rangos que van desde 30 a 60 L/s aprox. En el sector norte de La Calera, es posible encontrar un derecho en rojo, cuyo código es ND-0504-3965, correspondiente al derecho de mayor caudal otorgado (110 L/s), destinado al uso agrícola.

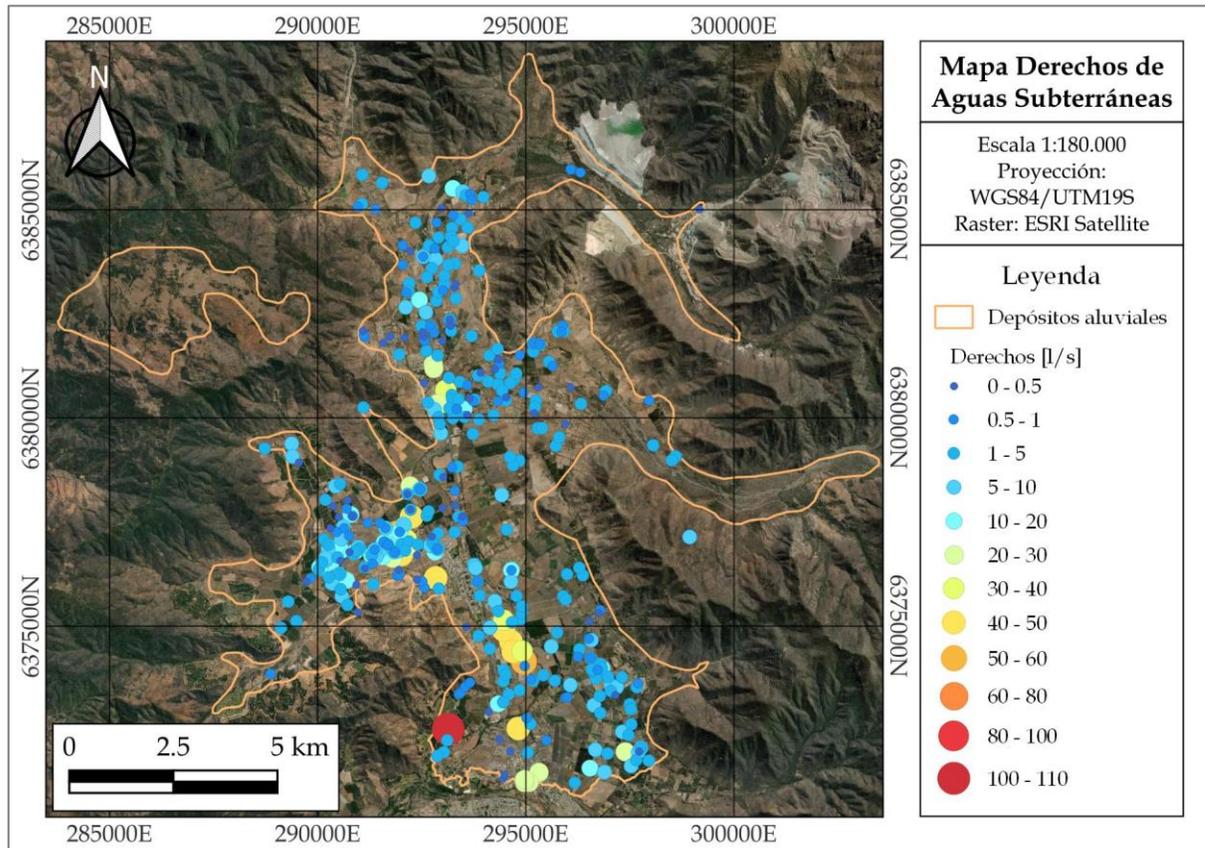


Figura 20: Mapa de distribución espacial de los derechos de aguas subterráneas según su caudal en L/s.

En la Figura 21 se observa la evolución espacio-temporal de los derechos en L/s. En estos mapas es posible visualizar los derechos acumulados desde la década de 1990 hasta 2020. En la Tabla 2 se presentan los valores en m^3/s de la sumatoria de los derechos acumulados según cada década. En la década de 1990 se observan extracciones menores en comparación a las siguientes, mientras que en la del 2000 se otorgaron la mayoría de los derechos que poseen los caudales más altos, además de corresponder a más del 50% de las extracciones existentes del área de estudio. Para la década del 2010, se concede el doble de los derechos ya existentes, lo que se traduce en el aumento de 0.9 [m^3/s] aprox. de extracciones, donde destacan algunos sectores en donde previamente no existían derechos otorgado, siendo un ejemplo las cercanías del Estero El Cobre, hacia el noreste del área de estudio. Finalmente, los derechos otorgados a inicios de la década del 2020, siendo 53 en total, representan apenas el 8.2% de las extracciones, ya que ninguno supera los 0.03

[m³/s]. Cabe destacar que, la distribución de los derechos con menor caudal, suele ser relativamente homogénea en el valle de esta subcuenca.

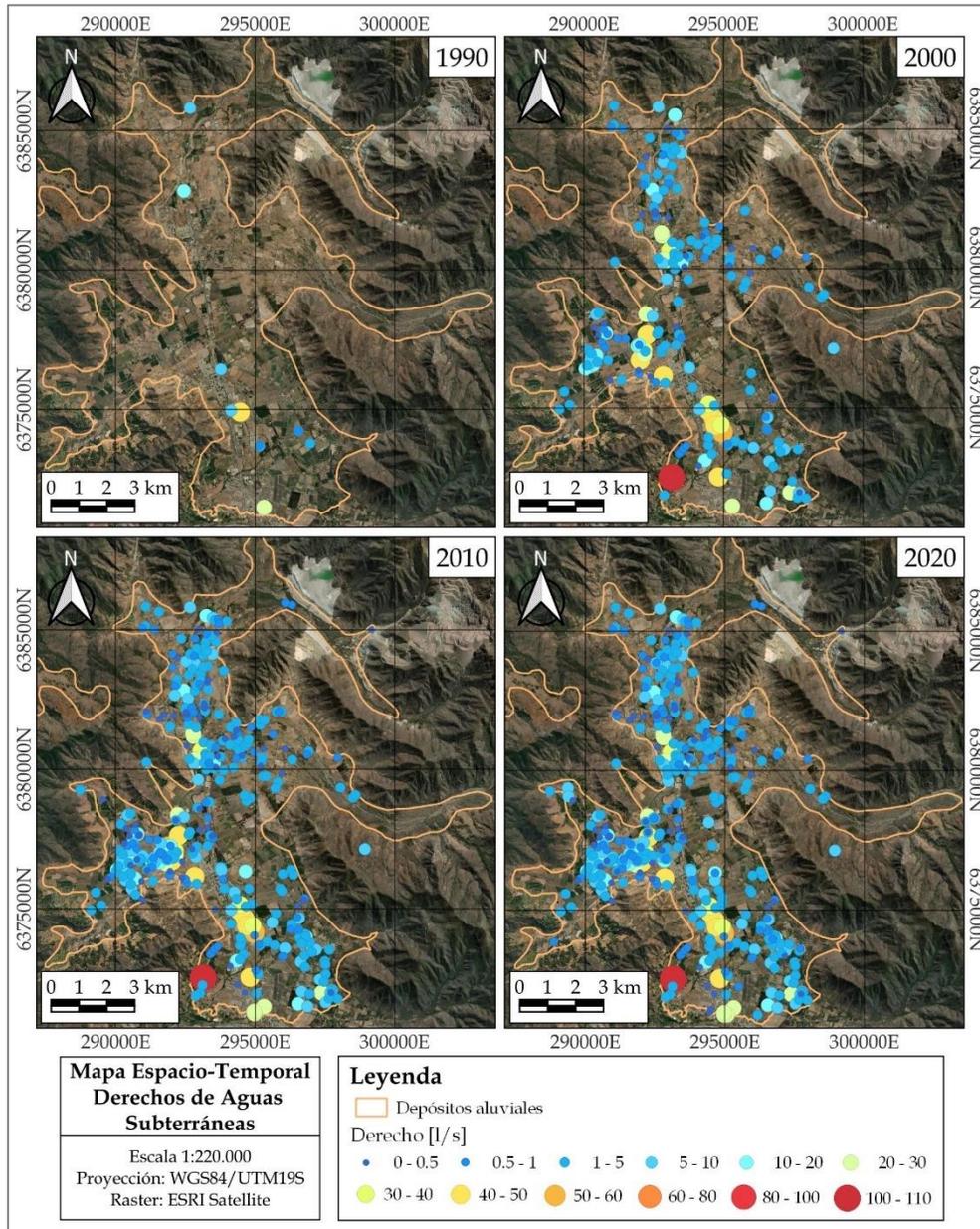


Figura 21: Mapas de derechos de aguas subterráneas en L/s, según su distribución espacial por década.

Tabla 2: Sumatoria de derechos acumulados por década.

Década	Derecho acumulado [m ³ /s]	% Caudales	Cantidad de derechos
1990	0.126	4.9%	12
2000	1.480	57.4%	202
2010	2.368	91.8%	404
2020	2.579	100%	457

4.3. Hidrogeoquímica

En esta sección se presentarán los análisis hidroquímicos de las 17 muestras de aguas subterráneas obtenidas en la campaña de terreno. Además, se añadieron 2 muestras de aguas superficiales (18 y 19) para complementar el estudio, provenientes de la subcuenca de Catemu, ubicada hacia el este del área de estudio. En la Figura 22 se presenta el mapa de ubicación de las muestras de aguas subterráneas y, en el Anexo 0, se detallan las coordenadas y código de cada muestra.

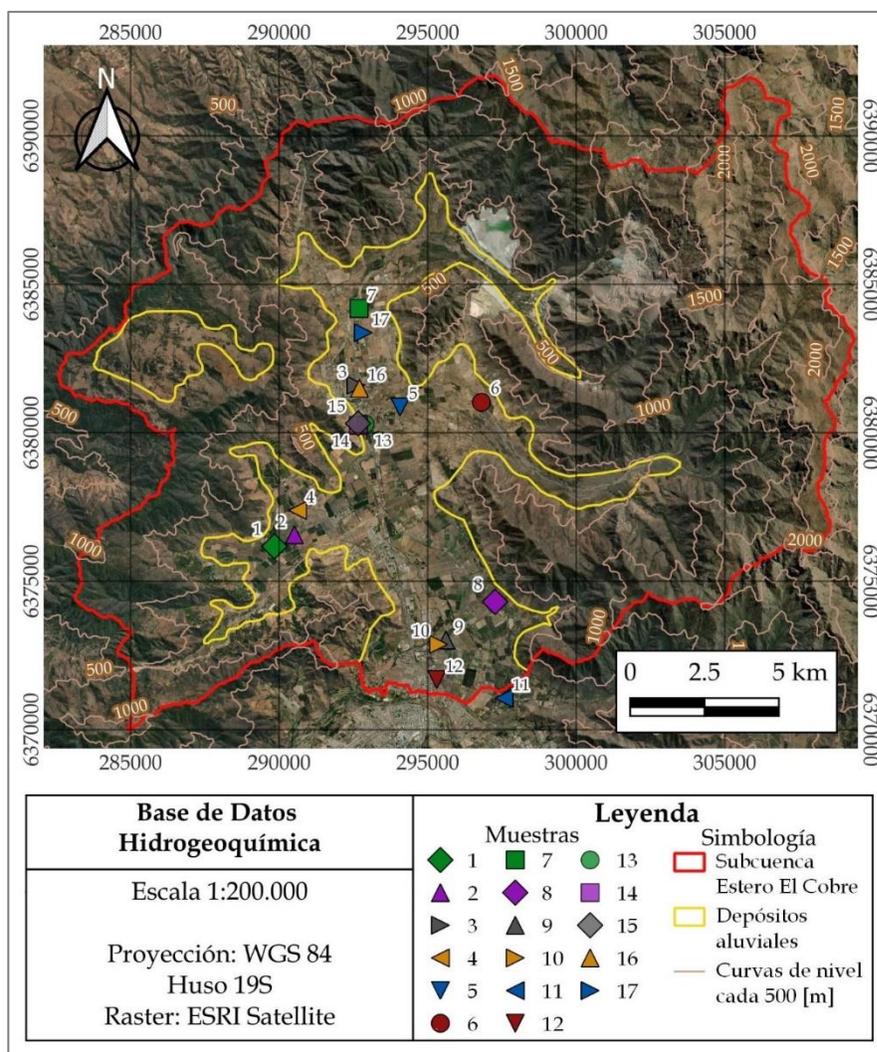


Figura 22: Mapa de ubicación de las muestras de la base de datos hidrogeoquímicas.

4.3.1. Parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos corresponden a mediciones in situ que ayudan a la caracterización de las aguas. La conductividad eléctrica (CE) mide la capacidad del agua para conducir la electricidad, está estrechamente relacionada con la presencia de iones

disueltos, ya que son los portadores de carga eléctrica que permiten la conducción de la corriente eléctrica. La temperatura (T) mide la energía cinética promedio de las partículas de un sistema, en este caso, del agua. Sus valores son representados en °C y, en el contexto del agua subterránea, este parámetro suele permanecer relativamente constante en un mismo punto del acuífero y puede influir en otras propiedades físicas y químicas del agua. Por último, el pH mide la acidez o alcalinidad del agua, en base a la concentración de H⁺ en solución. Un pH inferior a 7 indica una solución ácida, un pH igual a 7 es neutro, y un pH superior a 7 indica una solución alcalina. En la Tabla 3 se presentan los valores de estos parámetros de las muestras a analizar.

Tabla 3: Parámetros fisicoquímicos de las muestras de aguas subterráneas y superficiales.

Id	Tipo	CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	pH
1	Pozo	858.8	15.2	6.80
2	Pozo	850.5	19.5	7.12
3	Pozo	1197.0	21.1	6.91
4	Pozo	821.1	19.4	6.90
5	Pozo	449.2	17.3	6.91
6	Pozo	407.1	18.2	7.28
7	Pozo	1741.0	17.4	6.97
8	Pozo	895.7	17.7	6.84
9	Pozo	503.2	17.8	7.10
10	Pozo	574.8	18.4	7.14
11	Pozo	617.1	18.4	7.03
12	Pozo	1140.0	17.6	7.38
13	Pozo	1076.0	21.8	6.95
14	Pozo	1112.0	19.8	6.96
15	Pozo	1096.0	19.7	7.12
16	Pozo	1284.0	19.8	7.12
17	Pozo	747.1	20.5	6.97
18	Río	484.0	14.5	7.85
19	Canal	365.0	12.1	8.16

La CE de las muestras de agua subterránea varían entre 401.7 y 1741.0 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], correspondientes a las muestras nro. 6 y nro. 7, respectivamente. En cuanto a las aguas superficiales, la muestra de canal posee un valor de 365.0 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], mientras que la de río registró 484.0 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Los valores de T para las aguas subterráneas van desde los 15.2 [$^{\circ}\text{C}$] hasta los 21.8 [$^{\circ}\text{C}$], correspondientes a las muestras nro. 1 y nro. 13, mientras que la muestra de canal registró 12.1 [$^{\circ}\text{C}$] y la de río 14.5 [$^{\circ}\text{C}$]. Finalmente, las mediciones de pH en las aguas subterráneas arrojaron valores que van desde los 6.80 a 7.38, registrados en las muestras nro. 1 y nro. 12, respectivamente. Por su parte, las muestras de río y canal poseen valores de pH de 7.85 y 8.16 respectivamente. Como se puede observar, estos

valores de pH muestran que las aguas subterráneas son neutras a levemente alcalinas, mientras que la muestra de río es ligeramente alcalina y la de canal es alcalina. En la Figura 23 se observan gráficos binarios de los parámetros fisicoquímicos, donde en general, no se observan tendencias claras.

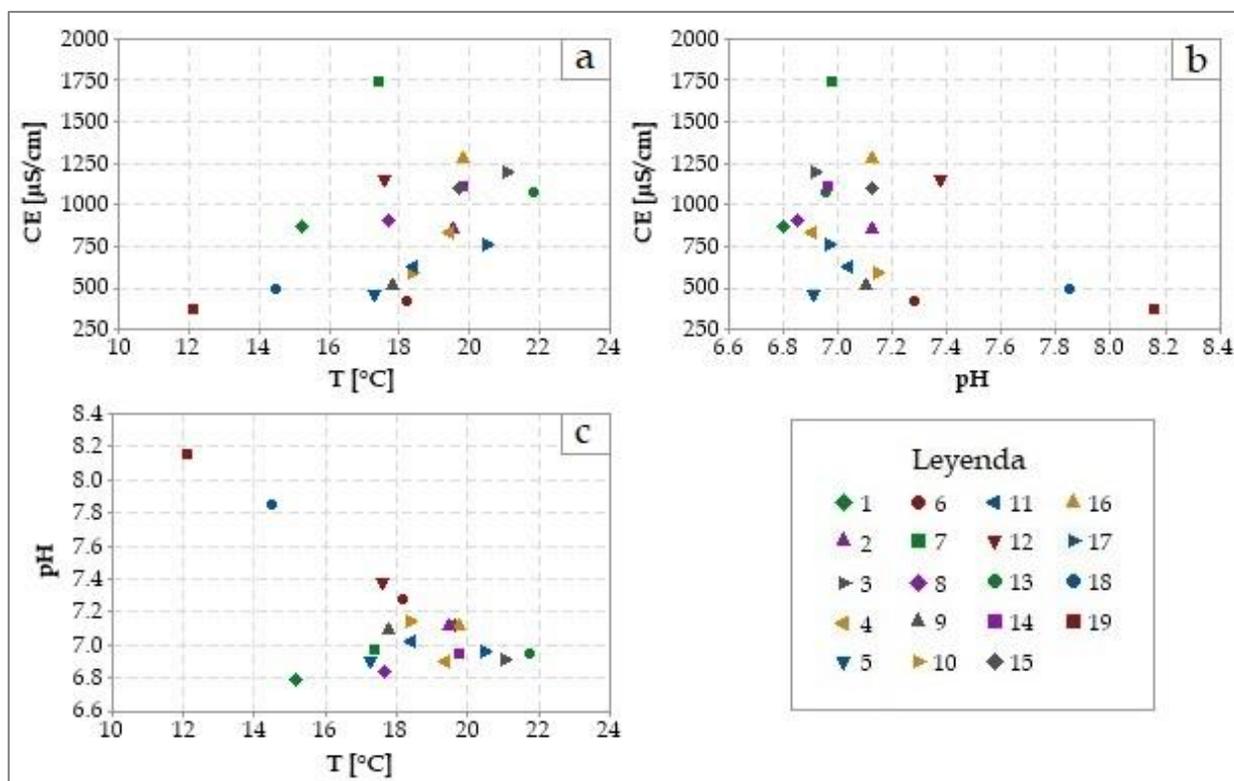


Figura 23: Gráficos binarios de los parámetros fisicoquímicos. a) CE vs T. b) CE vs pH. c) pH vs T.

En la Figura 24, se observan gráficos de cajas y bigotes de los parámetros fisicoquímicos. En primer lugar, se tiene la distribución de los valores de CE, donde a simple vista se ven bastante dispersos y no presenta muestras con valores atípicos, no obstante, la muestra nro. 7 (valor máximo) posee una CE bastante elevada en comparación al resto. Posee una mediana de 850.5 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], el primer cuartil se encuentra a los 503.2 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y el tercero a los 1112.0 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. A continuación, se presenta la distribución de los valores de T, la cual presenta un valor atípico para la muestra nro. 19, además de presentar a la muestra nro. 18 en el extremo inferior. Posee una mediana de 18.4 [$^{\circ}\text{C}$], el primer cuartil se encuentra a los 17.4 [$^{\circ}\text{C}$] y el tercero a los 19.8 [$^{\circ}\text{C}$]. Por último, se tiene la distribución de los valores de pH, donde en primera instancia se observa poca dispersión de los valores, sin embargo, se tienen 2 valores atípicos, correspondientes a las muestras nro. 18 y 19. Posee una mediana de 7.03, el primer cuartil se encuentra a los 6.91 y el tercero a los 7.14. Cabe recalcar que las muestras nro. 18 y 19 corresponden a aguas superficiales.

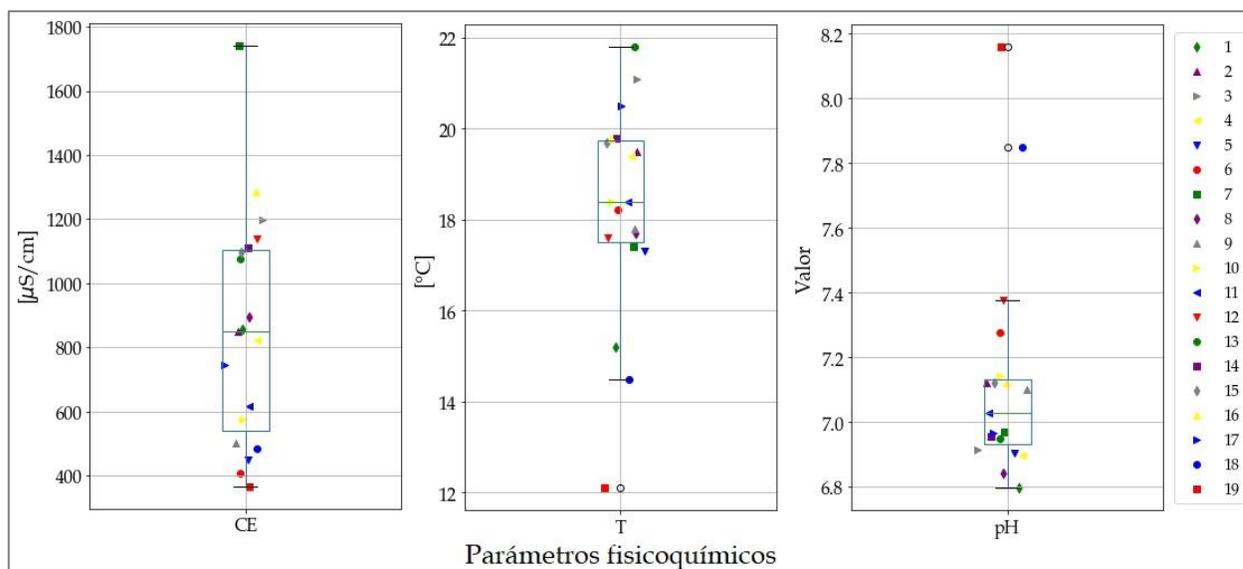


Figura 24: Gráfico de cajas y bigotes de los parámetros fisicoquímicos.

4.3.2. Elementos mayores

Antes de analizar la composición del agua, se probó la precisión del análisis hidrogeoquímico empleando la Ecuación (1) de error de balance iónico (Custodio & Llamas, 1976) a todas las muestras (Tabla 4). Se observa que todos los porcentajes de error son admisibles y, las muestras cuyos balances iónicos dieron cifras superiores a $\pm 4\%$, fueron las nro. 5 (-7.73) y 18 (-5.20), pero sus CE se encuentran entre los 200 - 500 $[\mu\text{S}/\text{cm}]$, por lo que estos errores siguen siendo admisibles.

Tabla 4: Balance iónico de las muestras. Datos destacados en verde indican errores admisibles.

Muestra	CE $[\mu\text{S}/\text{cm}]$	Balance iónico [%]	Muestra	CE $[\mu\text{S}/\text{cm}]$	Balance iónico [%]
1	858.8	-1.73	11	617.1	-1.69
2	850.5	-2.74	12	1140	0.27
3	1197	0.35	13	1076	-0.52
4	821.1	-3.26	14	1112	-0.56
5	449.2	-7.73	15	1096	-0.57
6	407.1	-1.49	16	1284	0.5
7	1741	0.63	17	747.1	-2.5
8	895.7	-1.46	18	484.0	-5.20
9	503.2	-1.12	19	365.0	1.32
10	574.8	-3.09			

Continuando con el análisis de los elementos mayores, se puede decir que los contenidos de los principales aniones en las muestras de aguas son de 46.58-674.74 ppm para sulfato (SO_4^{2-}), 135.0-321.0 ppm para bicarbonato (HCO_3^-), 8.13-68.89 ppm para cloruro

(Cl⁻), 12.70-78.31 ppm para nitrato (NO₃⁻) y 0.002-0.110 ppm para fluoruro (F⁻). El contenido de los principales cationes es de 41.32-205.6 ppm de calcio (Ca²⁺), 11.65-71.70 ppm de magnesio (Mg²⁺), de 13.7-59.2 ppm de sodio (Na⁺) y de 0.34-7.23 ppm de potasio (K⁺). El contenido de sílice (SiO₂), por su parte, varía de 16.0-47.0 ppm. Estos datos se encuentran en el Anexo 0.

En la Figura 25a se presentan los diagramas de cajas y bigotes que muestran la distribución en ppm de los aniones. Se observa que la distribución del sulfato es la más dispersa, dejando a la muestra nro. 7 como valor atípico, tiene una asimetría positiva y su mediana de 170.0 [ppm]. El fluoruro, por su parte, tiene concentraciones inferiores en relación a los demás aniones, por lo que su relevancia en este estudio es limitada. El cloruro posee una distribución poco variable, con una leve asimetría positiva, no presenta valores atípicos y su mediana es de 28.87 [ppm]. El bicarbonato también presenta una baja dispersión, tiene un valor atípico correspondiente a la muestra nro. 12 y su mediana es de 162.0 [ppm]. Por último, el nitrato presenta una distribución similar al cloruro, tiene un valor atípico correspondiente a la muestra nro. 4 y su mediana es de 32.19 [ppm].

En la Figura 25b se presenta el mismo diagrama, pero con las concentraciones de cationes y sílice en ppm. Se observa que la distribución de los valores de calcio es bastante dispersa en comparación a los otros iones, presenta una asimetría positiva, no se tienen valores atípicos y su mediana es de 84.3 [ppm]. Por el contrario, el potasio tiene concentraciones muy bajas y, al igual que el fluoruro, su relevancia en este estudio es limitada. El sodio posee una distribución poco variable, presenta un valor atípico correspondiente a la muestra nro. 7 y su mediana es de 25.40 [ppm]. El magnesio igualmente presenta baja dispersión, presenta una leve asimetría positiva, no muestra valores atópicos y su mediana es de 31.77 [ppm]. Finalmente, la sílice es quien presenta la menor dispersión del diagrama, no posee valores atípicos y su mediana es de 33.60 [ppm].

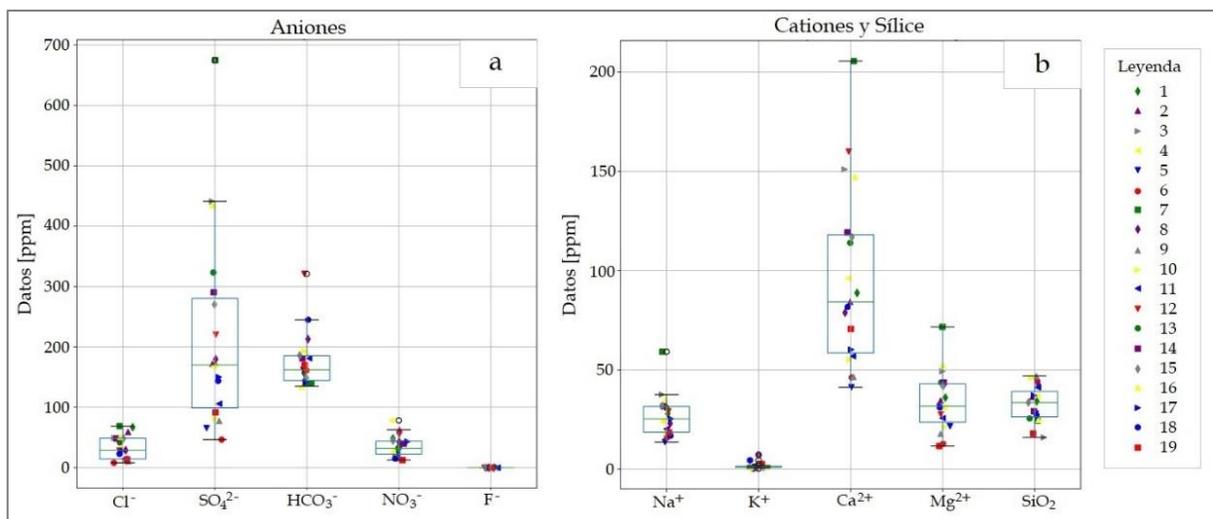


Figura 25: Diagramas de cajas y bigotes. a) Concentraciones de Aniones en ppm. b) Concentración de Cationes y Sílice en ppm.

En cuanto a la distribución espacial de los aniones más relevantes, se realizaron mapas que presentan las concentraciones en ppm de las 17 muestras de aguas subterráneas de este estudio. En la Figura 26a se observa que los valores de cloruro más elevados predominan hacia los sectores de los esteros El Cobre y Pucalán (norte y oeste), mientras que las concentraciones más bajas se sitúan en las cercanías de La Calera y por la quebrada del estero El Carretón. En la Figura 26b se observa que, en general el área de estudio posee una gran cantidad de sulfato en su acuífero aluvial, teniendo las concentraciones más altas en la zona norte, por los alrededores del estero El Cobre, no obstante, el sector con los valores más bajos corresponde a los cercanos al estero El Carretón. En la Figura 26c se observa una tendencia con respecto al bicarbonato, donde se tiene un aumento de las concentraciones de este anión desde el norte hacia el sur. Finalmente, en la Figura 26d se tiene una distribución más bien dispersa de las concentraciones, aunque se resalta que los mayores valores corresponden al sector del estero Pucalán.

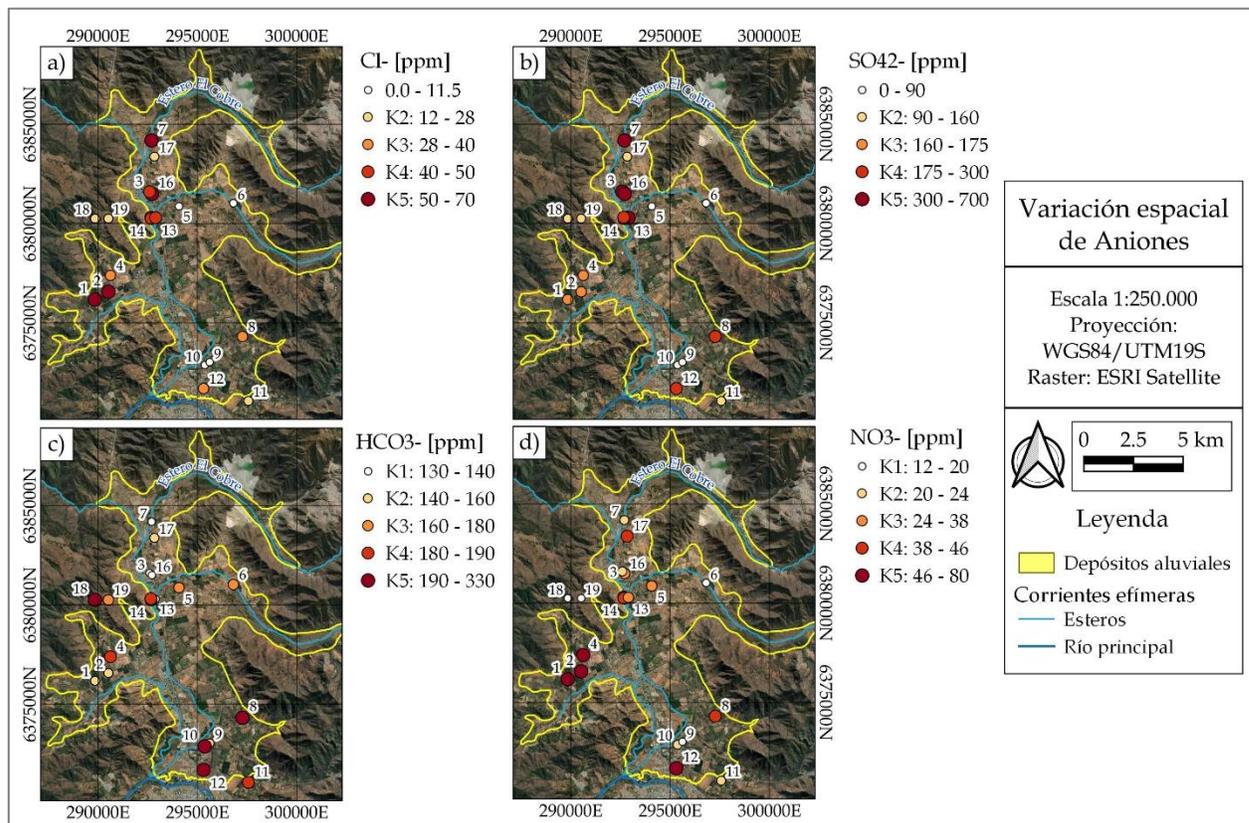


Figura 26: Mapas de variación espacial de aniones según quintiles. La escala de colores va desde tonos blanquecinos, indicando menor concentración, a rojos, el cual indica una concentración máxima.

A su vez, fueron elaborados mapas para analizar la distribución espacial de los cationes relevantes y la sílice de las 17 muestras de aguas subterráneas. En la Figura 27a, se observa que el sodio tiene valores más altos cerca del estero El Cobre, y concentraciones más bajas cerca del estero El Carretón y hacia el sector sur. En la Figura 27b, el calcio muestra mayores concentraciones hacia el norte, junto con valores elevados cerca del

estero Pucalán y hacia el sur, donde se destaca la muestra nro. 12, mientras que las menores concentraciones se ubican cerca del estero El Carretón. La Figura 27c muestra que el magnesio tiene bajas concentraciones en general, donde los mayores valores se presentan en la zona norte y los menores en la zona sur y alrededores del estero El Carretón. Por último, la Figura 27d muestra que la sílice tiene mayores concentraciones en la zona sur y cerca del estero El Carretón, en cambio, las concentraciones más bajas se sitúan en El Melón y alrededores.

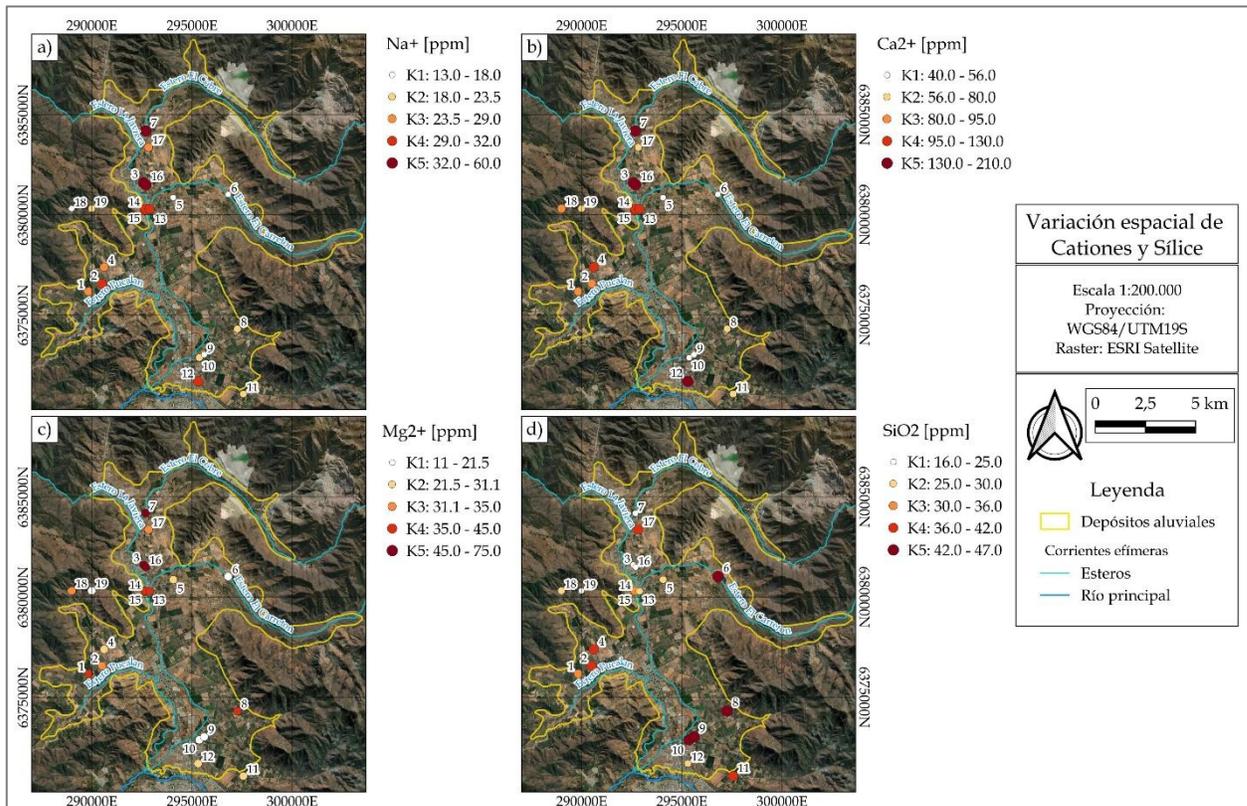


Figura 27: Mapas de variación espacial de cationes y sílice según quintiles. La escala de colores va desde blanco, indicando menor concentración, a rojo, el cual indica una concentración máxima.

4.3.3. Elementos trazas

Las concentraciones de los elementos trazas del total de las muestras utilizadas en este trabajo es muy variable, ya que dependiendo del elemento sus concentraciones serán menos o más dispersas que otras (ver Anexo 0). En la Tabla 5 se pueden encontrar los estadísticos descriptivos básicos de estos elementos, tales como el mínimo, máximo, media, mediana y desviación estándar.

Tabla 5: Estadísticos descriptivos principales de los elementos traza en [ppb].

Elemento	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desv. Est.
Li	0.28	3.34	0.91	0.64	0.75
B	18.85	165.14	63.46	64.99	31.53
Al	0.03	31.21	7.62	5.15	6.99
V	1.31	9.18	4.05	2.93	2.27
Fe	4.00	53.00	15.11	11.00	11.42
Mn	0.47	34.99	4.45	2.08	7.71
Co	0.18	1.00	0.45	0.36	0.24
Ni	2.55	16.81	6.61	5.09	4.10
Cu	0.03	18.41	5.65	4.00	5.19
Zn	10.30	345.50	89.20	67.00	77.80
As	0.16	3.78	0.99	0.63	0.96
Se	0.04	2.83	0.75	0.84	0.73
Rb	0.11	1.30	0.58	0.66	0.31
Sr	127.20	812.80	344.90	349.40	164.30
Ba	6.72	82.86	38.41	35.14	22.02
Pb	0.00	0.71	0.15	0.11	0.19
U	0.04	1.49	0.37	0.23	0.39

La Figura 28 presenta los diagramas de cajas y bigotes de los elementos trazas considerando las 19 muestras de este estudio. Es posible observar que la dispersión de los datos es mayor, en comparación a los elementos mayores, donde el boro, zinc, estroncio y bario se destacan al tener los mayores valores del diagrama, al igual que la mayor dispersión. Se destaca que el estroncio es quien posee las concentraciones más elevadas de todos los elementos traza. La mayoría de los elementos presentan uno o dos valores atípicos, a excepción del vanadio, cobalto y bario. Los elementos con las menores concentraciones medidas fueron el litio, cobalto, arsénico, selenio, rubidio, plomo y uranio, teniendo en común que ninguna de sus medianas supera el valor de 1 [ppb].

Con el fin de describir con mayores especificaciones las concentraciones de cobalto y bario, debido a que se utilizarán para el análisis estadístico multivariante más adelante, en la Figura 29 se presentan los diagramas de cajas exclusivos para estos elementos. La variación de concentraciones del cobalto es muy acotada, ya que su rango es de 0.18-1.00 [ppb], presenta asimetría positiva, el primer cuartil se ubica a los 0.23 [ppb], la mediana a los 0.36 [ppb] y el tercer cuartil a los 0.60 [ppb]. Por otro lado, las concentraciones de bario son más dispersas en comparación al cobalto, dado que su rango es de 6.72-82.86 [ppb], igualmente presenta asimetría positiva, el primer cuartil se ubica a los 16.0 [ppb], la mediana a los 335.14 [ppb] y el tercer cuartil a los 54.54 [ppb].

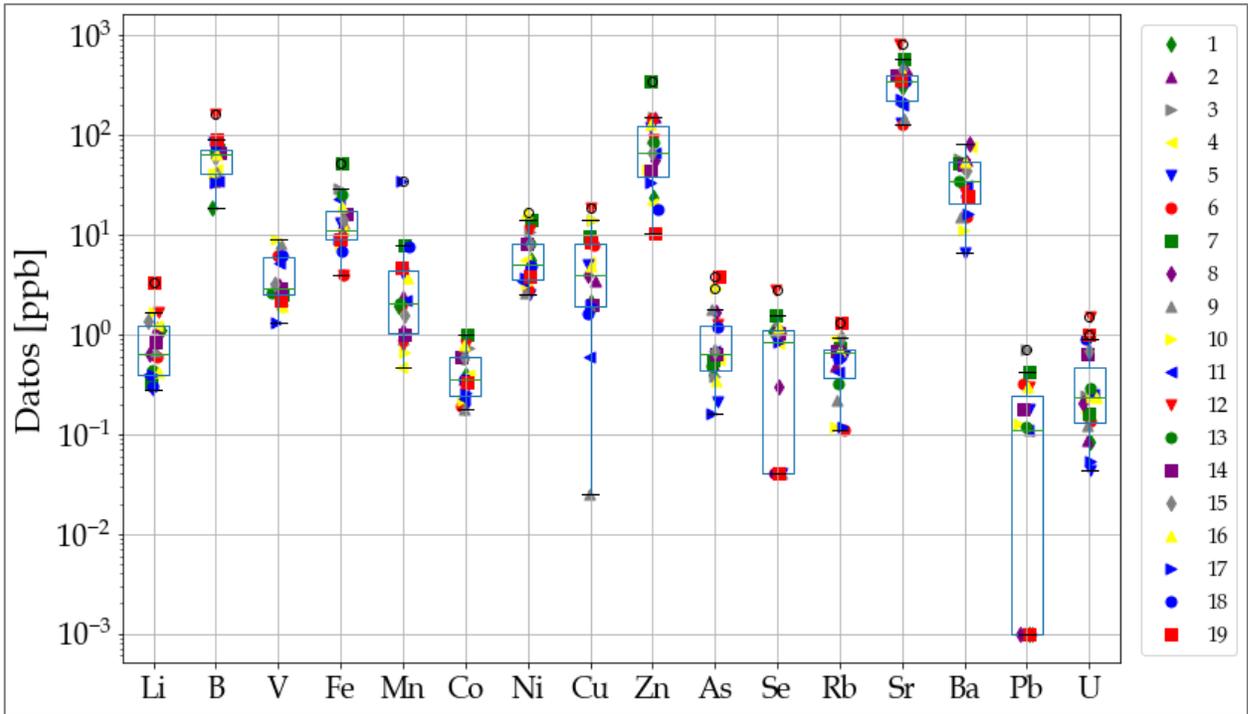


Figura 28: Diagrama de cajas y bigotes de Elementos Trazas.

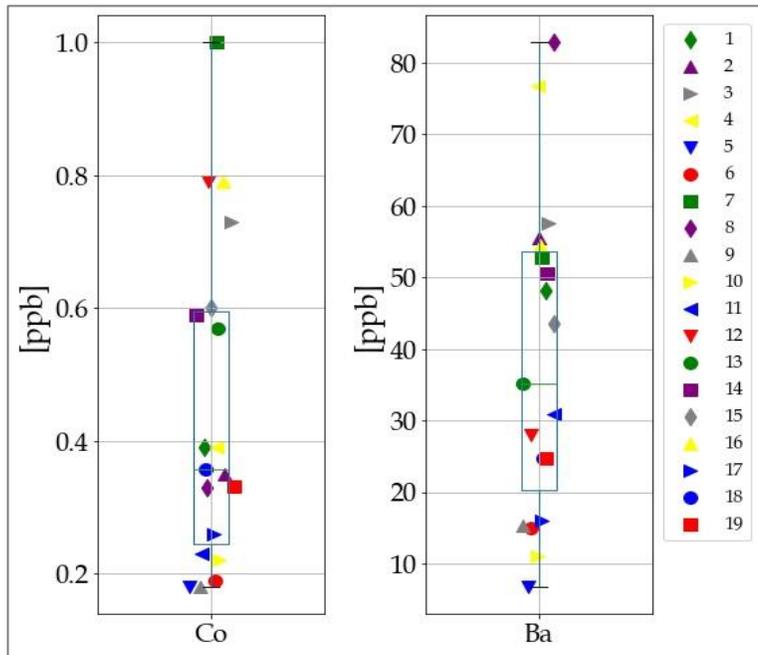


Figura 29: Diagramas de cajas y bigotes de la concentración de cobalto y bario en ppb.

En cuanto a la distribución espacial de estos elementos traza, la Figura 30a presenta un mapa con la variación de cobalto en el área de estudio, donde se observa que las mayores concentraciones se ubican en el sector de El Melón, por los alrededores del estero El Cobre y hacia el sector sur, donde se destaca la muestra nro. 12. No obstante, en la zona sur también se tienen las muestras con menores concentraciones de este elemento, al igual

que en los alrededores del estero El Carretón. En cuanto al bario, en la Figura 30b se presenta la distribución espacial de este elemento, donde en general las concentraciones son bastante dispersas, se observa que los valores más elevados se ubican en las cercanías del estero Pucalán y hacia el noreste de La Calera, además, en esta misma localidad es posible encontrar las muestras con menores concentraciones, junto con los alrededores del estero El Carretón.

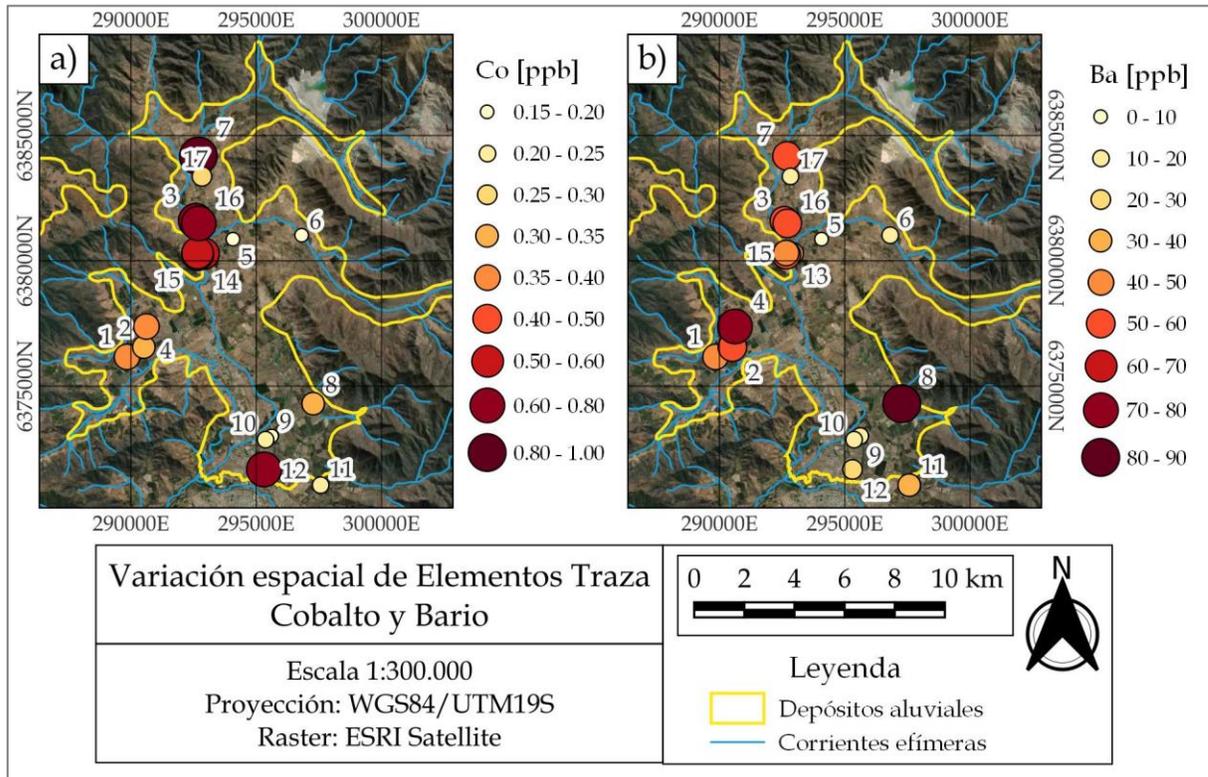


Figura 30: Mapa de la distribución espacial de los elementos traza cobalto y bario.

4.3.4. Clasificación de aguas y su distribución espacial

Para la clasificación química de las aguas subterráneas y superficiales se realizó un diagrama Piper, incluyendo las 19 muestras tanto de pozos como las de río y canal. Además, se construyeron diagramas Stiff para visualizar la distribución espacial de estas muestras dentro del área de estudio.

4.3.4.1. Diagrama Piper

El diagrama Piper es una representación gráfica para clasificar y visualizar la composición química de aguas subterráneas y superficiales. Se construye a partir de diagramas ternarios de aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) y cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) principales de la composición iónica de las muestras, en conjunto con un diamante central. Permite

comparar diferentes muestras de agua, identificar patrones y agrupar tipos de aguas con características similares.

En la Figura 31 se presenta el diagrama Piper realizado a partir de las muestras de aguas superficiales y subterráneas. Se puede observar que en los aniones las concentraciones de bicarbonato y sulfato predominan, mientras que los de cloruro son menores al 20% para la gran mayoría de las muestras, a excepción de las nro. 1 y 2, ubicadas en las cercanías del Estero Pucalán. Por otro lado, en los cationes se tiene un predominio de la composición cálcica de las muestras, ya que todas poseen un contenido por sobre el 40% de calcio, el contenido de magnesio por lo general varía entre un 20% y 40%, mientras que el del sodio y potasio no supera en ninguna muestra el 20%. Estas composiciones permiten decir que las clasificaciones principales de las aguas son del tipo **bicarbonatada cálcica** y **sulfatada cálcica**.

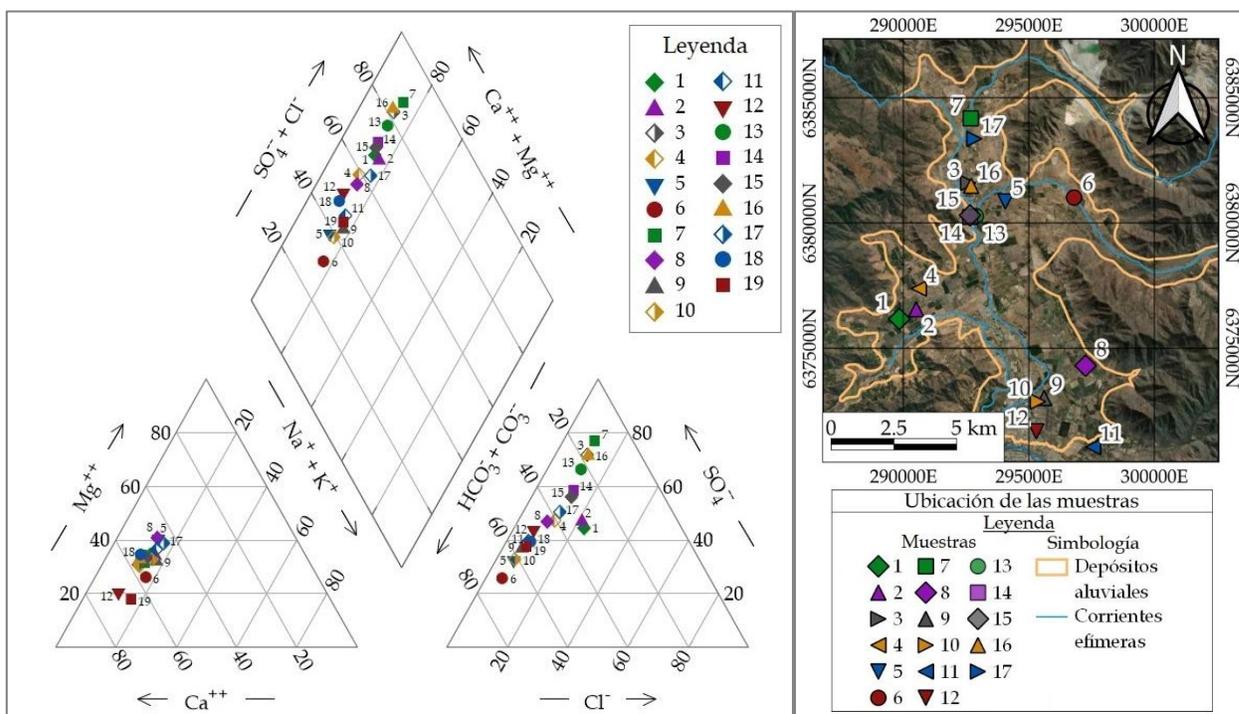


Figura 31: Diagrama Piper para la clasificación química de aguas, con los datos en [meq/L](izquierda). Mapa de ubicación de las muestras (derecha).

4.3.4.2. Diagrama Stiff

El diagrama Stiff es una representación gráfica que utiliza polígonos para mostrar espacialmente las facies hidrogeoquímicas, distinguiendo entre cationes mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) en el lado izquierdo, y aniones mayores (Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-) en el lado derecho. Estos diagramas facilitan la comparación de muestras similares de agua, permitiendo identificar patrones y similitudes de su composición química en el espacio. En la Figura 32 se observan los diagramas Stiff de las muestras del área de estudio, incluyendo las de aguas subterráneas.

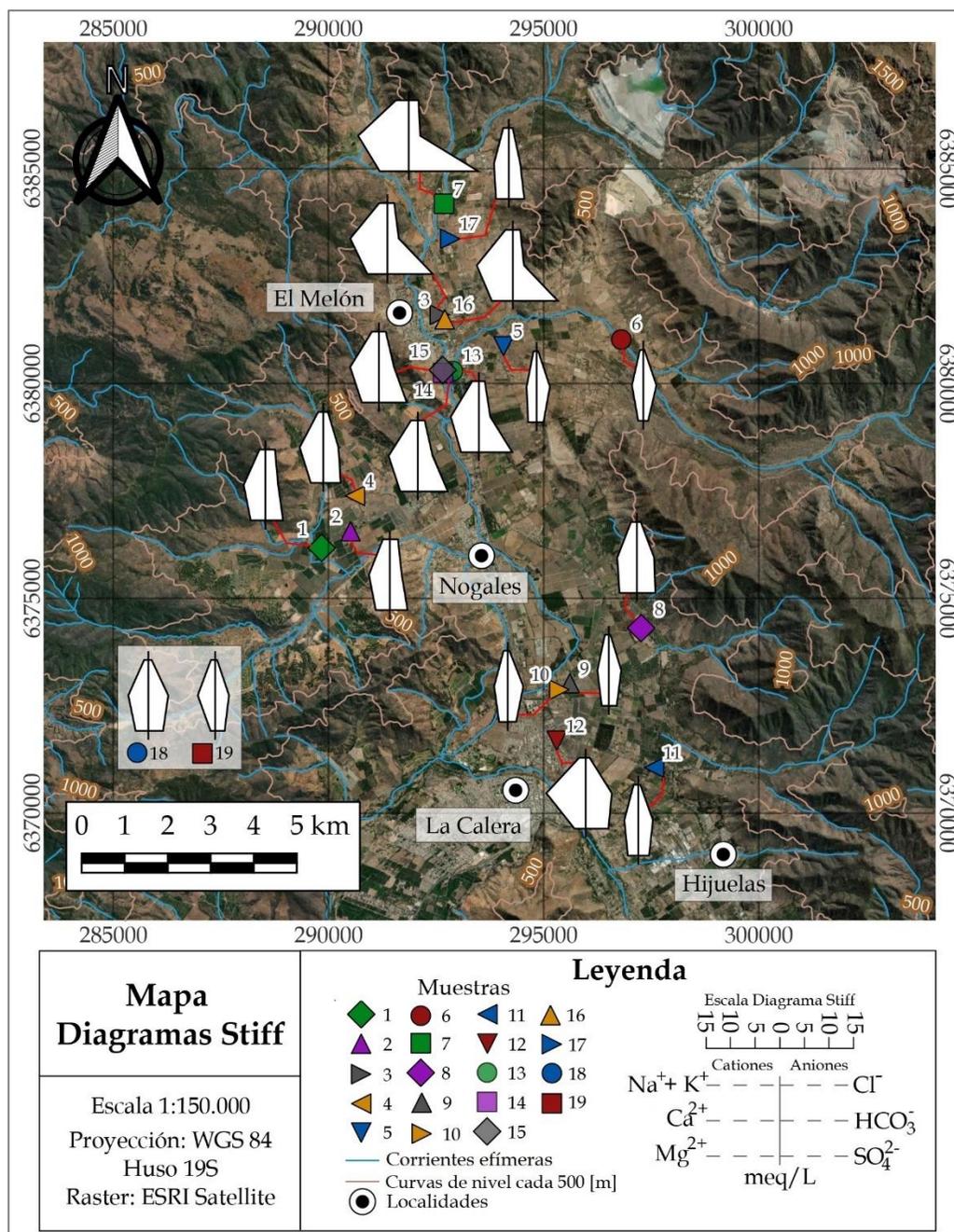


Figura 32: Mapa de distribución de las muestras y sus diagramas Stiff asociados.

En el mapa se observa que las muestras de la zona norte tienden a ser sulfatadas cálcicas (muestras nro. 3, 7, 13, 14, 15, 16, 17), al igual que las muestras provenientes de la quebrada del estero Pucalán (muestras nro. 1, 2, 4), aunque las concentraciones de los iones en estas últimas son menores que las de la zona norte (a excepción de la nro. 17). Por otro lado, la composición de las muestras de la zona sur y las cercanas al estero El Carretón es bicarbonatada cálcica, al igual que las muestras de aguas superficiales, con excepción de la nro. 8, que es sulfatada cálcica. En la zona sur destaca la muestra nro. 12, debido a sus altas concentraciones de iones, en comparación a las muestras aledañas.

4.3.5. Correlación de iones

El coeficiente de correlación (R) es una medida estadística que evalúa la relación entre dos variables, el cual varía entre -1 y 1. Un valor cercano a 1 denota una correlación positiva fuerte, mientras que un valor cercano a -1 indica una correlación negativa fuerte. Por otro lado, una matriz de correlación es una tabla que presenta los coeficientes de correlación entre múltiples pares de variables, permitiendo identificar patrones y relaciones en un conjunto de datos.

Se ha diseñado una matriz de correlación para determinar la relación entre los elementos que se encuentran en las 19 muestras de agua (Figura 33), con el fin de evaluar cuales de éstos son más competentes para la realización del análisis estadístico multivariable.

En cuanto a las correlaciones entre los elementos mayores, se observan excelentes correlaciones entre el cloruro y el sulfato, no obstante, las correlaciones entre los demás aniones son bajas o nulas. En los aniones versus cationes, se tiene que el cloruro y el sulfato presentan excelentes correlaciones con el sodio, calcio y magnesio, en cuanto al bicarbonato y al nitrato se presentan correlaciones bajas o nulas. En las correlaciones entre los mismos cationes, se tiene que, entre el sodio, calcio y magnesio las correlaciones son excelentes. Finalmente, respecto a los elementos traza, se tiene que el cobalto, níquel y selenio presentan excelentes correlaciones con el cloruro y sulfato, al igual que con el sodio, calcio y magnesio, a su vez, el estroncio presenta excelentes correlaciones con el sulfato, el calcio y el magnesio, por otro lado, el bario posee buenas correlaciones con los elementos mayores, tales como el cloruro, sulfato, nitrato, sodio, calcio, magnesio, además de algunos elementos traza como el cobalto y níquel.

	T	pH	Cl-	SO42-	HCO3-	NO3-	F-	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	SiO2	Li	B	Al	V	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Ba	Pb	U	
T	1.00																													
pH	-0.70	1.00																												
Cl-	0.26	-0.39	1.00																											
SO42-	0.38	-0.29	0.83	1.00																										
HCO3-	-0.32	0.37	-0.33	-0.18	1.00																									
NO3-	0.45	-0.56	0.44	0.27	0.15	1.00																								
F-	-0.04	-0.18	-0.17	-0.48	0.25	0.36	1.00																							
Na+	0.40	-0.35	0.88	0.93	-0.28	0.32	-0.27	1.00																						
K+	-0.42	0.29	-0.20	-0.01	0.41	-0.16	-0.46	-0.22	1.00																					
Ca2+	0.23	-0.10	0.77	0.94	0.04	0.27	-0.30	0.89	-0.05	1.00																				
Mg2+	0.40	-0.44	0.83	0.94	-0.29	0.24	-0.49	0.89	0.01	0.82	1.00																			
SiO2	0.17	-0.28	-0.40	-0.58	0.14	0.14	0.56	-0.43	-0.09	-0.61	-0.43	1.00																		
Li	-0.34	0.36	-0.05	-0.19	0.34	0.19	0.51	-0.07	-0.01	0.02	-0.39	0.10	1.00																	
B	-0.14	0.45	-0.22	0.17	0.47	-0.20	-0.25	0.01	0.30	0.33	0.05	-0.49	0.01	1.00																
Al	-0.31	0.18	-0.03	-0.12	0.05	0.04	0.10	-0.07	0.01	-0.12	0.01	0.27	-0.04	0.05	1.00															
V	-0.13	0.06	-0.51	-0.54	0.38	-0.21	0.31	-0.54	0.28	-0.48	-0.42	0.70	0.12	-0.12	0.11	1.00														
Fe	0.34	-0.42	0.56	0.67	-0.59	-0.03	-0.60	0.65	0.03	0.47	0.74	-0.43	-0.43	-0.13	-0.02	-0.35	1.00													
Mn	-0.11	0.19	0.13	0.16	-0.41	-0.29	-0.57	0.13	-0.03	0.02	0.22	-0.42	-0.51	-0.03	-0.01	-0.62	0.25	1.00												
Co	0.22	-0.07	0.76	0.94	0.02	0.24	-0.33	0.88	-0.07	0.99	0.80	-0.66	0.01	0.37	-0.09	-0.54	0.47	0.05	1.00											
Ni	0.30	-0.13	0.76	0.94	-0.03	0.25	-0.33	0.87	-0.11	0.98	0.82	-0.61	-0.06	0.33	-0.07	-0.52	0.48	0.05	0.98	1.00										
Cu	-0.04	0.11	0.18	0.23	0.18	0.18	0.01	0.25	-0.05	0.39	0.19	-0.42	0.20	0.40	-0.19	-0.31	-0.05	0.07	0.39	0.37	1.00									
Zn	0.54	-0.44	0.27	0.32	-0.34	0.01	-0.05	0.43	-0.29	0.26	0.45	0.00	-0.45	0.16	0.10	-0.10	0.42	0.04	0.25	0.32	0.09	1.00								
As	-0.54	0.59	-0.41	-0.30	0.50	-0.43	0.12	-0.30	0.49	-0.14	-0.39	0.20	0.60	0.26	0.03	0.58	-0.35	-0.47	-0.16	-0.22	-0.04	-0.35	1.00							
Se	0.48	-0.43	0.83	0.82	-0.10	0.68	-0.01	0.86	-0.29	0.82	0.72	-0.36	0.05	0.03	-0.13	-0.60	0.33	0.02	0.81	0.81	0.29	0.26	-0.45	1.00						
Rb	-0.44	0.30	0.32	0.36	0.16	0.12	-0.19	0.26	0.32	0.47	0.22	-0.62	0.39	0.33	-0.06	-0.32	0.21	-0.06	0.48	0.41	0.29	-0.33	0.17	0.25	1.00					
Sr	0.01	0.11	0.62	0.79	0.35	0.34	-0.23	0.73	0.22	0.90	0.62	-0.53	0.26	0.42	-0.08	-0.39	0.22	-0.06	0.89	0.84	0.42	0.00	0.12	0.74	0.57	1.00				
Ba	0.24	-0.38	0.64	0.62	-0.05	0.51	-0.13	0.58	0.21	0.59	0.62	-0.16	0.06	-0.07	-0.21	-0.10	0.39	-0.25	0.54	0.55	0.18	0.05	-0.10	0.60	0.48	0.58	1.00			
Pb	0.35	-0.21	-0.09	0.15	-0.15	-0.33	-0.06	0.17	-0.34	0.17	0.17	-0.14	-0.35	0.34	-0.07	-0.02	0.28	-0.12	0.19	0.24	0.12	0.67	-0.10	-0.02	-0.32	-0.10	-0.26	1.00		
U	-0.28	0.62	-0.04	0.24	0.63	-0.20	-0.17	0.11	0.28	0.44	0.01	-0.36	0.41	0.61	-0.05	0.04	-0.16	-0.25	0.46	0.39	0.18	-0.31	0.58	0.07	0.45	0.61	0.06	0.01	1.00	

Figura 33: Matriz de correlación. En color azul se muestran las correlaciones altas $> |0.7|$, en amarillo las moderadas entre $|0.5|$ y $|0.7|$ y en rojo las débiles entre $|0.3|$ y $|0.5|$.

El análisis de las relaciones iónicas permite comprender cómo diferentes iones interactúan en las aguas. Estas interacciones son clave para entender la calidad del agua e identificar el origen de los iones disueltos. Los diagramas binarios son una representación gráfica de estas relaciones iónicas, ayudando a comprender de mejor manera las interacciones químicas del agua. Es por esto que se han desarrollado una serie de diagramas binarios en donde se comparan los elementos mayores y elementos trazas principales y los que obtuvieron correlaciones relevantes para este estudio.

En la Figura 34 se presentan las relaciones iónicas entre aniones, donde se observa en primera instancia que la mayoría de los diagramas son sumamente dispersos, a excepción del cloruro con relación en sulfato, donde se aprecia, en general, un incremento del sulfato cuando aumenta el cloruro. Al observar la matriz de correlación, se observa que, entre los aniones, el cloruro con el sulfato son los únicos que poseen un $R > 0.7$ ($R = 0.83$), lo que implica una excelente correlación positiva, mientras que los demás presentan $R < |0.5|$, es decir, correlaciones bajas o nulas.

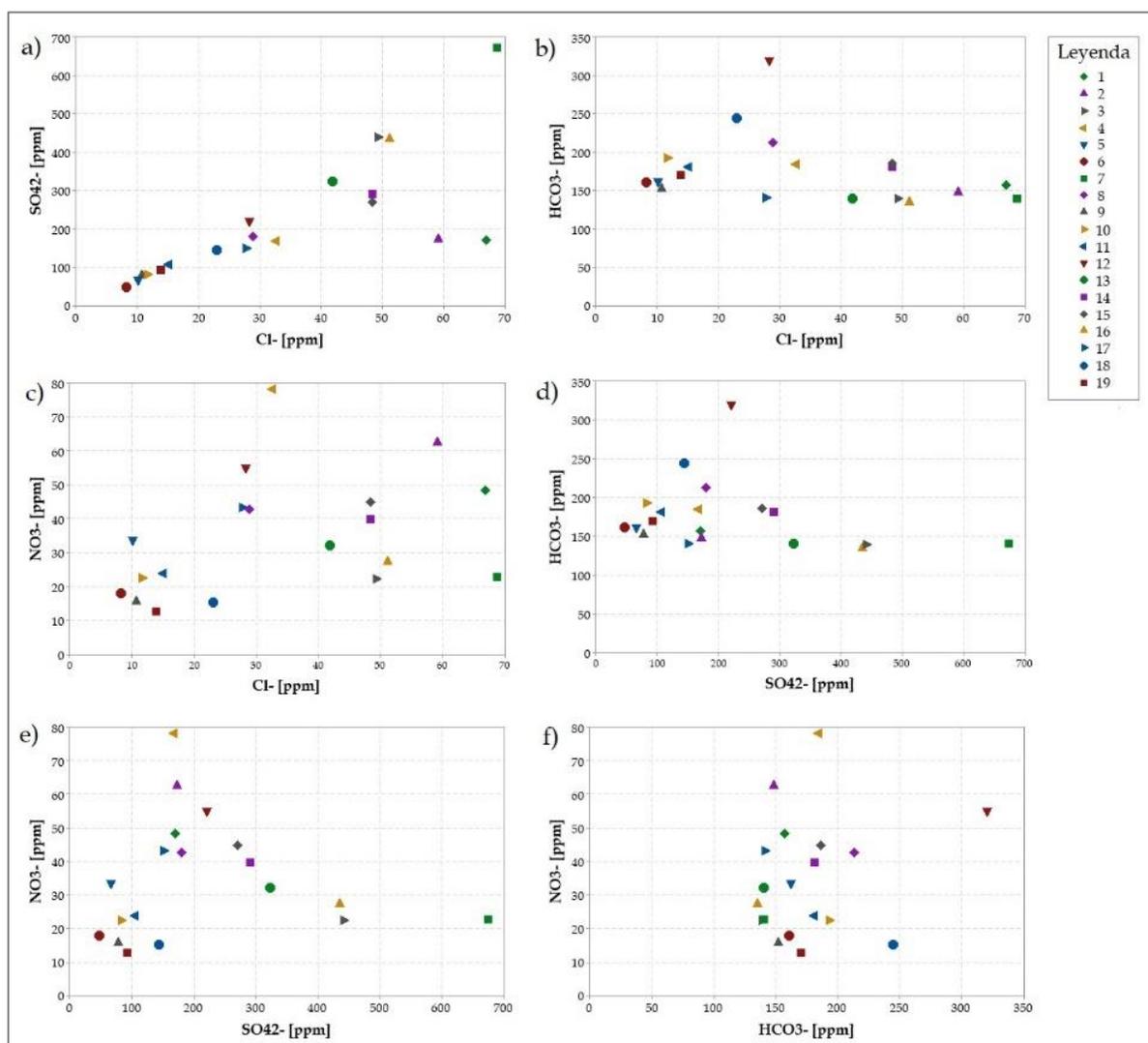


Figura 34: Relaciones iónicas en [ppm] de aniones con respecto a aniones.

En cuanto al cloruro, en relación a los cationes, en la Figura 35 se observa que existe gran dispersión al relacionarlo con el potasio y sílice, mientras que las relaciones con el sodio, calcio y magnesio muestran que éstos tienden a aumentar a medida que aumenta el cloruro. Al observar la matriz de correlación se observa que los R con el potasio y sílice son nulas y bajas, respectivamente ($R < |0.5|$), mientras que las correlaciones con los otros cationes son excelentes y positivas ($R > 0.7$).

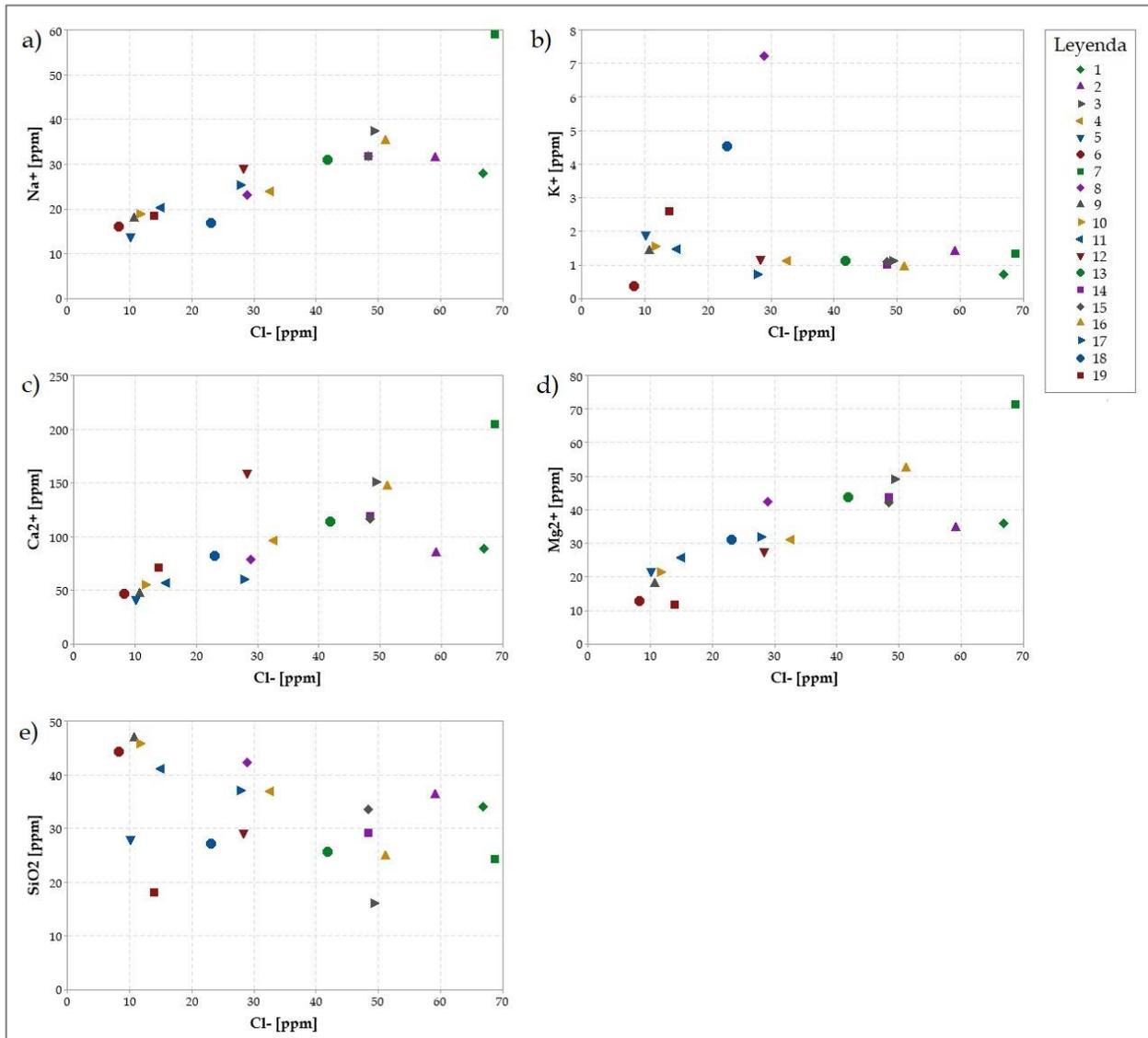


Figura 35: Relaciones iónicas en [ppm] de cloruro con respecto a cationes.

Siguiendo con la relación iónica de sulfato con respecto a los cationes, en la Figura 36 se observa que, al compararlo con el sodio, calcio y magnesio, existe un aumento de la concentración de estos cationes a medida que aumenta la del sulfato, mientras que con la sílice es todo lo contrario, ya que éste disminuye su concentración a medida que la del sulfato aumenta, por otro lado, la relación iónica con el potasio posee una gran dispersión. Al observar la matriz de correlación, se tiene que los R de sodio, calcio y magnesio superan el 0.9, no obstante, el de la sílice es de $R = -0.58$, teniendo así una buena correlación

inversa, mientras que el potasio posee un R muy cercano a 0, mostrando una nula correlación.

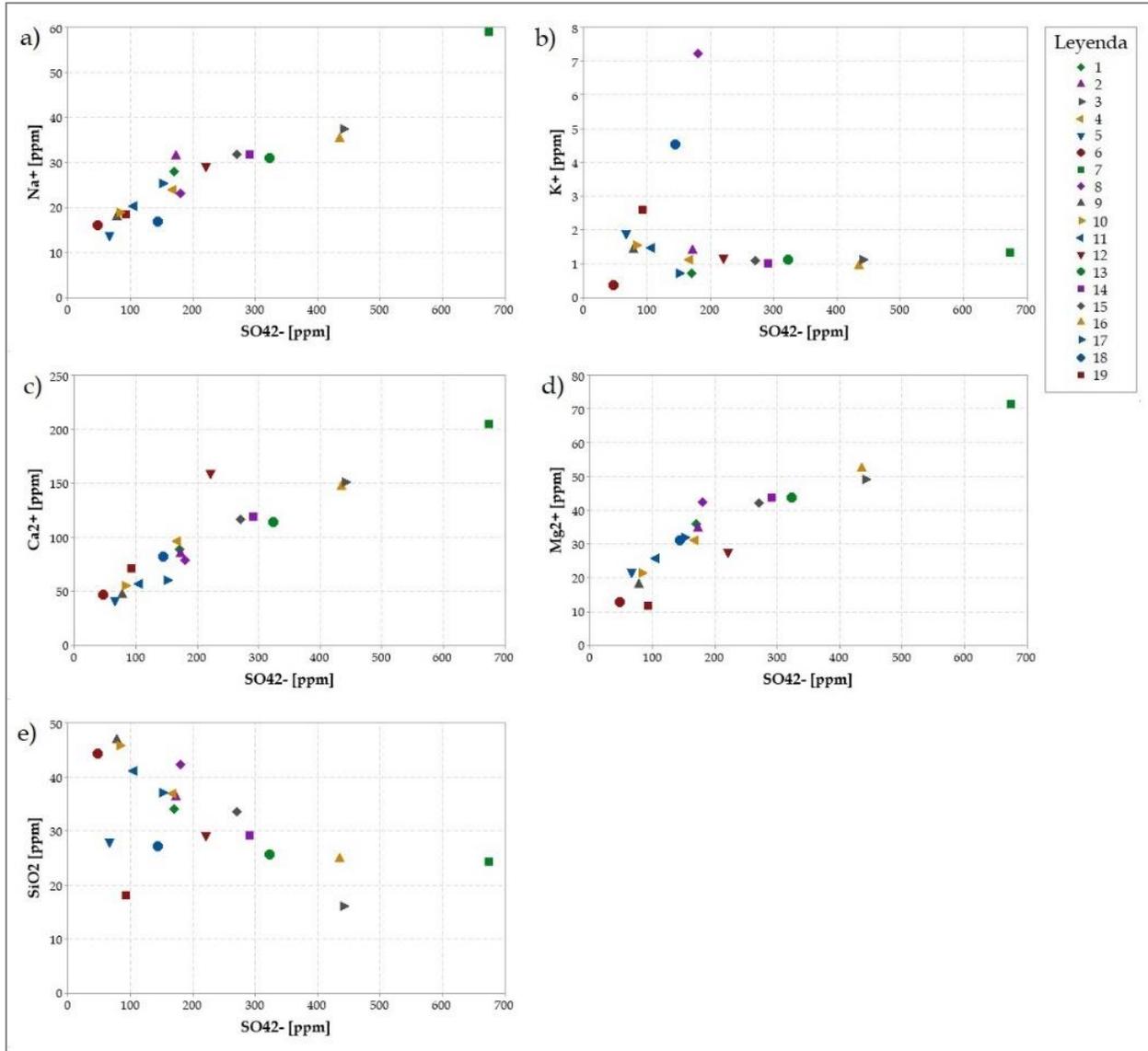


Figura 36: Relaciones iónicas en [ppm] de sulfato con respecto a cationes.

Continuando con la relación iónica del bicarbonato con los cationes, en la Figura 37 se observa gran dispersión en todos los diagramas, además, al observar la matriz de correlación, es posible apreciar que, en casi todos los casos, se tiene que $R < |0.3|$, correspondiendo a correlaciones nulas, a excepción el potasio, donde $R=0.41$, existiendo una correlación baja.

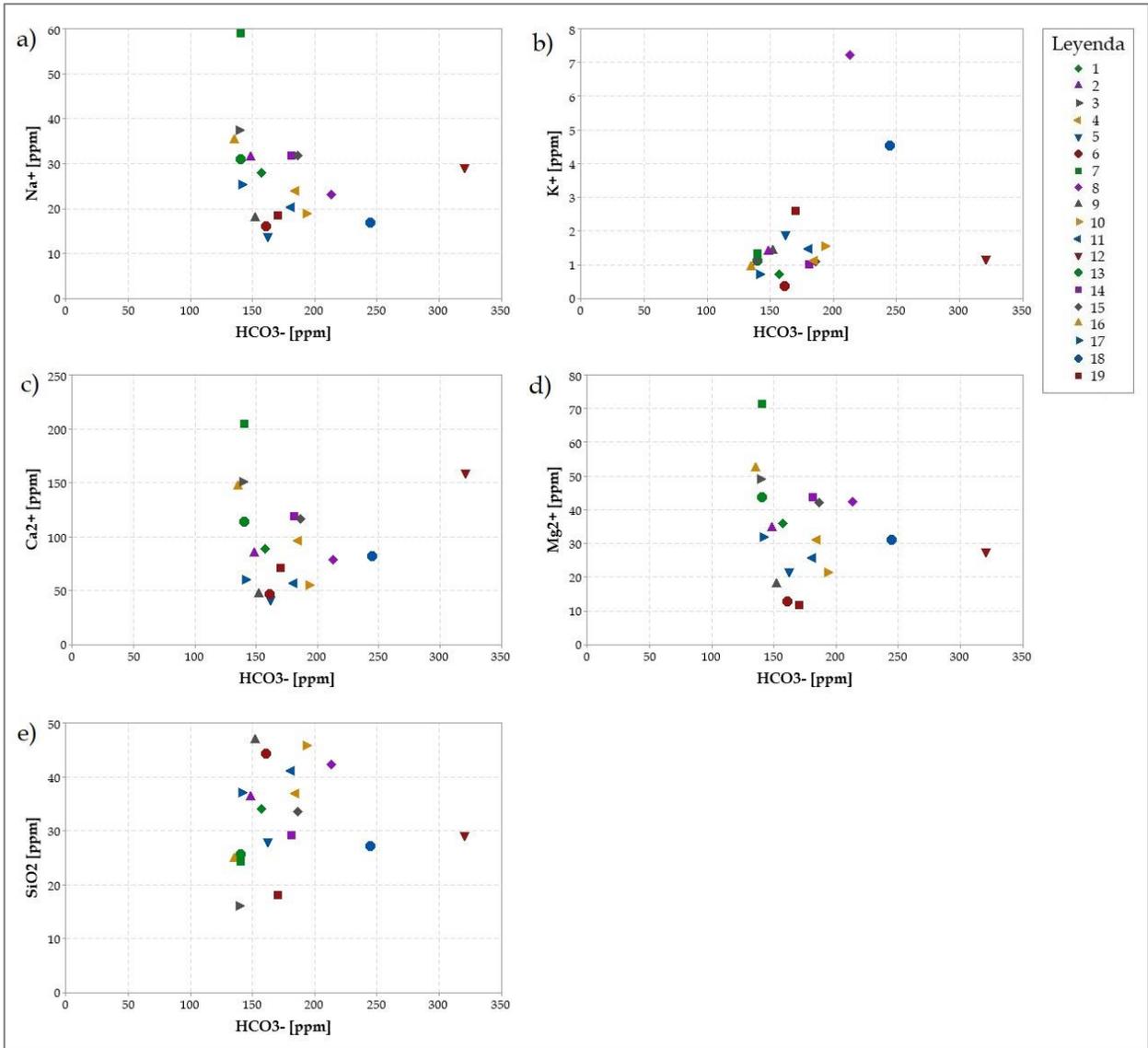


Figura 37: Relaciones iónicas en [ppm] de bicarbonato con respecto a cationes.

Con respecto a las relaciones iónicas entre el nitrato y los cationes, se puede decir que es muy similar a la mencionada anteriormente en el caso del bicarbonato, ya que en la Figura 38 igualmente se observa una gran dispersión en todos los diagramas. Al ver la matriz de correlación, se aprecia que casi todas las correlaciones son nulas, con $R < |0.3|$ en casi todos los casos, a excepción del sodio, cuyo $R=0.32$, representando una baja correlación.

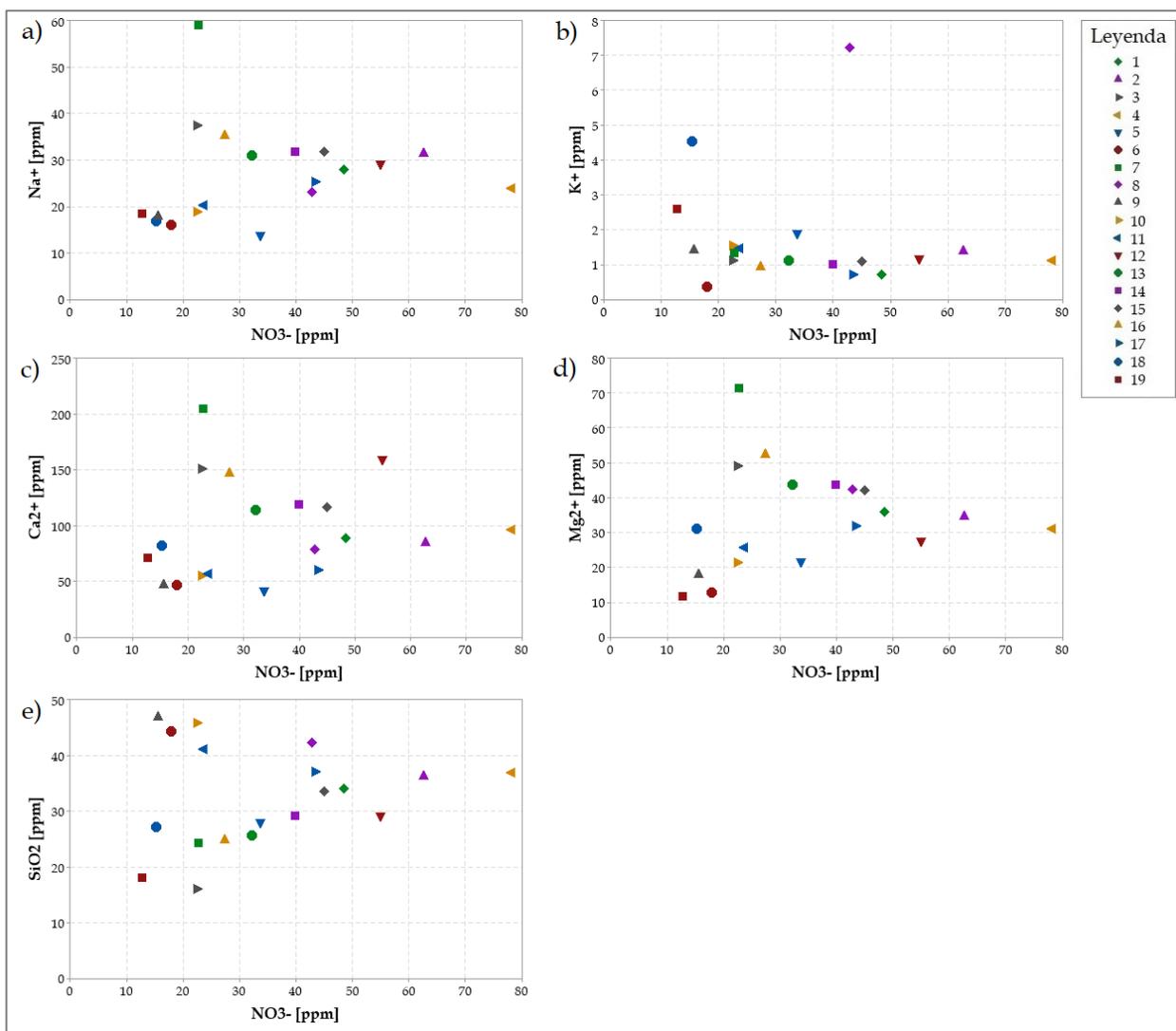


Figura 38: Relaciones iónicas en [ppm] de nitrato con respecto a cationes.

Continuando con los elementos traza, realiza la construcción de diagramas binarios para el cobalto y bario, elementos relevantes para este estudio. Estos serán utilizados para el Análisis Estadístico Multivariante (siguiente sección), debido a que el cobalto posee excelentes correlaciones ($R > 0.7$) con ciertos elementos mayores (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), además de que suele asociarse a minerales de cobre, lo que implica que su presencia en el área de estudio podría deberse a la actividad minera y las interacciones agua-roca. En cuanto al bario, presenta buenas correlaciones ($0.5 < R < 0.7$) con algunos elementos mayores (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), donde su presencia en el área de estudio posiblemente se deba a la actividad agrícola, ya que ciertos fertilizantes, especialmente los fosfatados, a menudo contienen bario como impureza.

Con respecto a las relaciones iónicas del cobalto, en la Figura 39 se observan que las concentraciones de éste aumentan a medida que las de cloruro, sulfato, sodio, calcio y magnesio también aumentan, reflejando las excelentes correlaciones mencionadas anteriormente. Por otro lado, los diagramas del bicarbonato y nitrato muestran gran

dispersión, concordando con la matriz de correlación, la que muestra que estos elementos poseen correlaciones nulas. A su vez, al compararlo con el bario, en el general de las muestras se tiene un aumento de la concentración de cobalto a medida que aumenta la de este elemento, reflejando la buena correlación que se observa en la matriz ($R=0.54$).

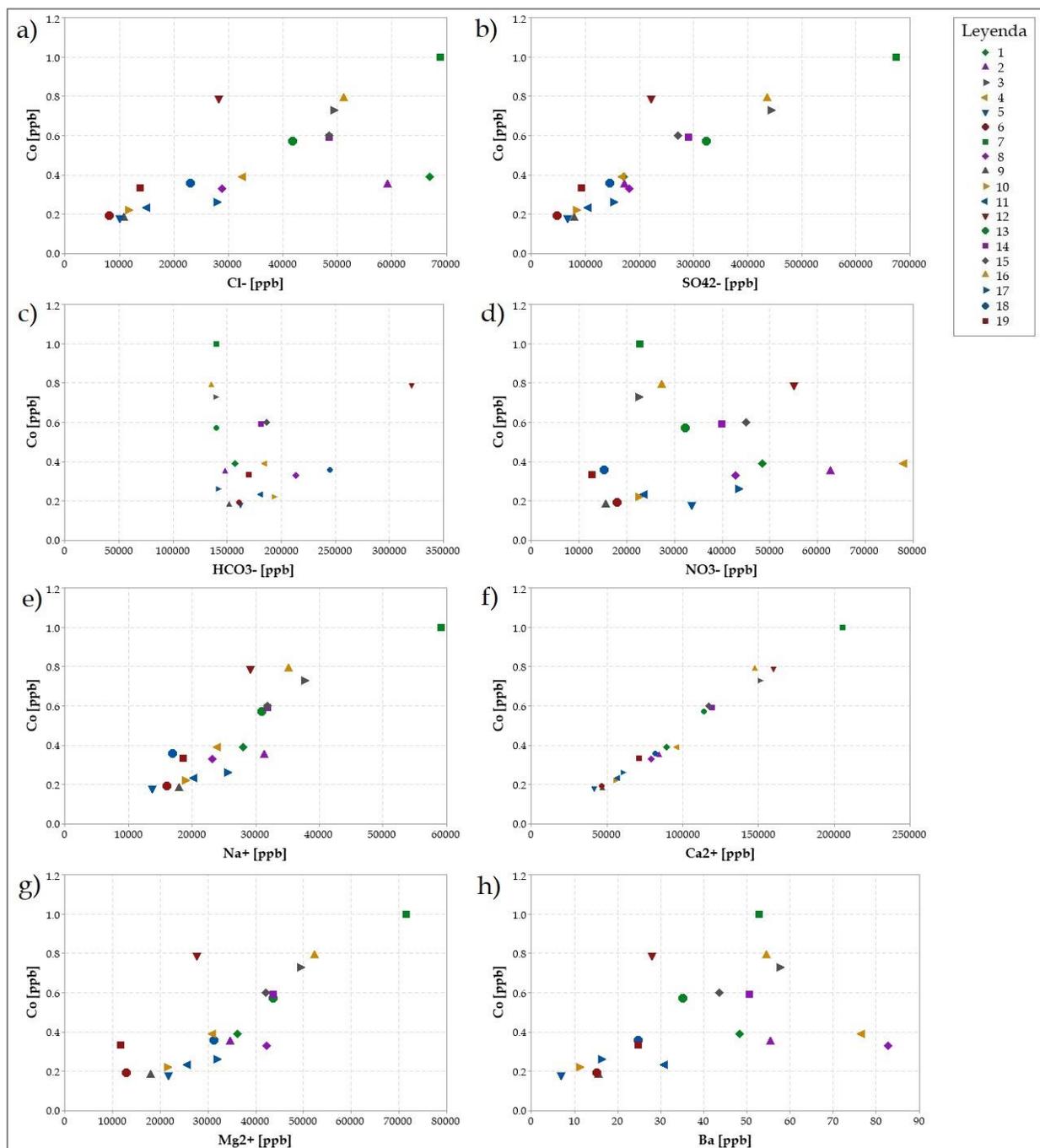


Figura 39: Relaciones iónicas en ppb de cobalto con respecto a otros elementos.

Finalmente, en cuanto a las relaciones iónicas del bario, en la Figura 40 se aprecia que la mayoría de los diagramas muestran una sutil tendencia al aumento de las concentraciones de este elemento a medida que la de los otros también aumentan, a excepción

del diagrama del bicarbonato, donde se observa gran dispersión de las muestras. Esto se ve reflejado en las buenas correlaciones que posee este elemento traza con los mayoritarios, como se mencionó anteriormente, y la nula correlación entre bario y bicarbonato.

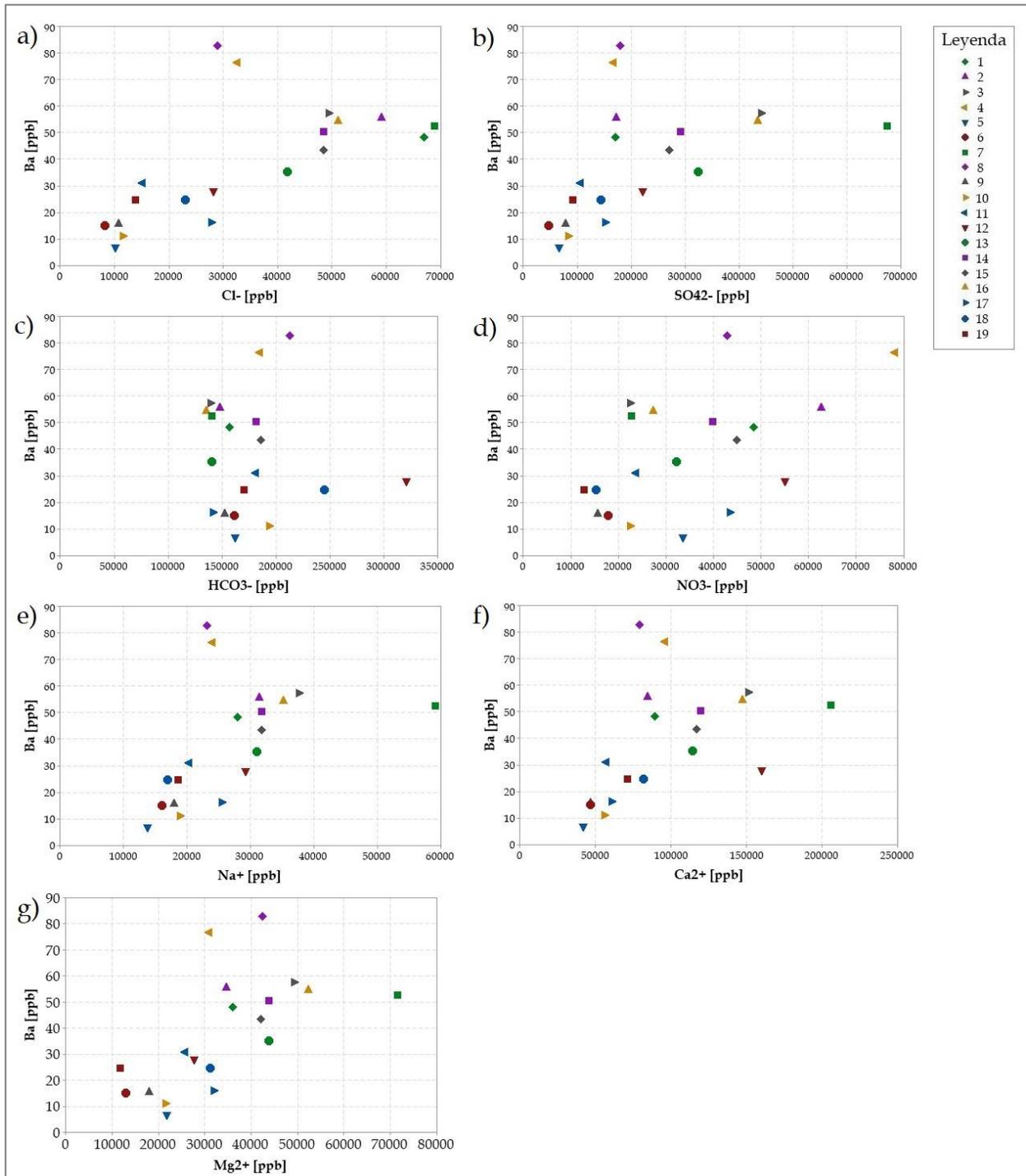


Figura 40: Relaciones iónicas en ppb de bario con respecto a otros elementos.

4.3.6. Análisis estadístico multivariante

En el análisis estadístico multivariante (AEM) se busca categorizar las muestras de aguas de forma cuantitativa, donde son agrupadas según similitudes entre sus parámetros químicos, lo que permite explorar conexiones entre ellas según las ubicaciones de muestreo (Cloutier et al., 2008). Para ello, se aplicarán dos métodos de AEM utilizando las 17 muestras de pozo de este estudio y las 2 de río y canal: el Análisis de Clústers Jerárquicos (HCA) y el Análisis Factorial (AF). Las variables a ingresar para ambos análisis corresponden a los siguientes elementos mayoritarios y trazas: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Co y Ba. Los elementos traza que se han elegido para este análisis se debe a son elementos relacionados a yacimientos minerales (Co) y fluidos hidrotermales (Ba), pudiendo haber una relación entre éstos y otros elementos provenientes de interacciones agua-roca, lo que podría explicar sus buenas correlaciones con los elementos mayores (Figura 33).

4.3.6.1. Análisis de clúster jerárquicos (HCA)

En el HCA se utilizó la distancia Euclidiana para determinar las distancias entre los clústers (Olson, 1995), dando como resultado un dendrograma que representa gráficamente las agrupaciones de muestras según sus características químicas.

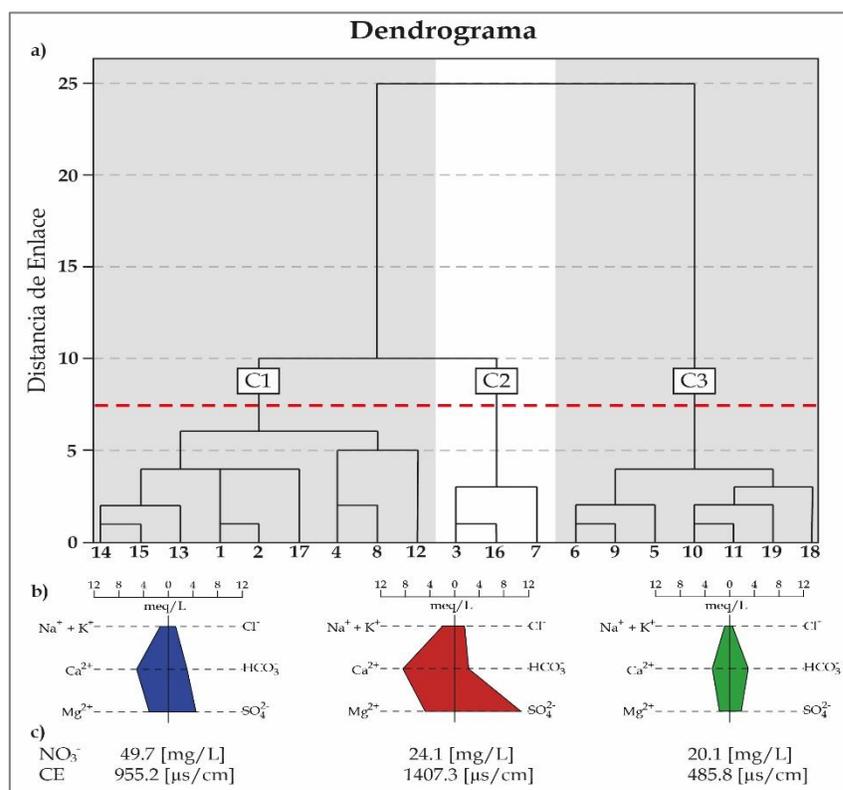


Figura 41: a) Dendrograma resultante del HCA. La línea roja punteada permite definir tres clústers principales. b) Diagramas Stiff para cada clúster. c) Valores de NO_3^- y CE de cada clúster.

En el dendrograma (Figura 41a) es posible apreciar que en el Clúster 1 (C1) se agrupan nueve muestras (1, 2, 4, 8, 12, 13, 14, 15 y 17), en el Clúster 2 (C2) solamente tres (3, 7 y 16) y en el Clúster 3 (C3) fueron agrupadas el resto, incluyendo las muestras de río y canal (5, 6, 9, 10, 11, 18 y 19). En la Figura 41b se muestran los diagramas Stiff para cada clúster, realizado con el promedio de los elementos mayores de las muestras que componen a cada grupo, dando como resultados que tanto las aguas de los C1 y C2 son sulfatadas cálcicas, mientras que las del C3 serían bicarbonatadas cálcicas. Estos diagramas, a su vez, muestran que el promedio de las concentraciones de calcio, magnesio y sulfato son mucho mayores en el C2 en comparación al C1, por otro lado, el promedio de concentraciones iónicas en el C3 en general es mucho menor que el de los otros clústers. Además, en la Figura 41c se muestra que el promedio de las concentraciones de nitrato en el C1 es mayor que en los otros (49.7 [mg/L]), siguiéndole el C2 (24.1 [mg/L]) y por último el C3 (20.1 [mg/L]). En cuanto a la CE, el C2 presentó el mayor promedio de este parámetro (1407.3 [$\mu\text{s}/\text{cm}$]), siguiéndole el C3 (485.8 [$\mu\text{s}/\text{cm}$]) y por último el C1 (955.2 [$\mu\text{s}/\text{cm}$]).

A continuación, se presentará la distribución espacial de los clústers obtenidos en el HCA en el área de estudio.

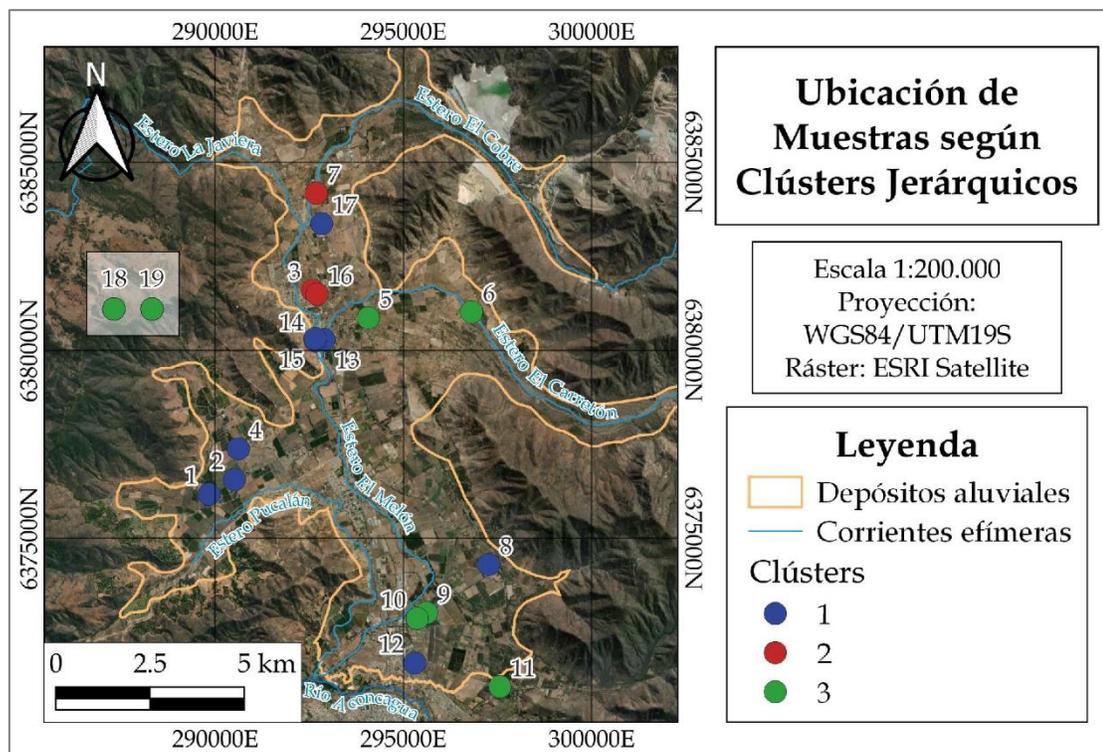


Figura 42: Distribución espacial de las muestras, según el clúster asignado en el HCA.

En la Figura 42 se observa que las muestras pertenecientes al C1, representadas en azul, poseen una gran dispersión en el área de estudio, ubicándose en las cercanías del Estero El Cobre, zonas aledañas al Estero Pucalán y hacia el norte de La Calera. Por otro lado, las muestras del C2, representadas en rojo, se ubican en el sector norte en los alrededores del Estero El Cobre. Finalmente, las muestras del C3, representadas en verde,

poseen dos ubicaciones en específico, siendo éstas las cercanías al Estero El Carretón y los sectores norte y noreste de La Calera, sumándose además las muestras de río y canal que fueron extraídas fuera del área de estudio.

Para entender las tendencias de cada clúster, con respecto a los elementos mayores y algunos elementos traza, se construyeron diagramas caja por elemento (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , Co, Ni, Sr y Ba), como se observa en la Figura 43. En ellos, se puede observar las distribuciones de las concentraciones según los clústeres obtenidos en este análisis. Para el Clúster 1, es posible ver grandes dispersiones de las concentraciones en los elementos Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , Co, Ni y Ba. Por otro lado, las muestras del Clúster 2 suelen tener las mayores concentraciones, donde destacan los elementos Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Co, Ni y Sr, mientras que las concentraciones de HCO_3^- y SiO_2 son las más bajas. Finalmente, el Clúster 3 suele tener menor dispersión y las concentraciones más bajas de los tres grupos. Esto ocurre en los elementos Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Co y Ni. En cuando al SiO_2 , este clúster destaca al tener la mayor dispersión de los grupos.

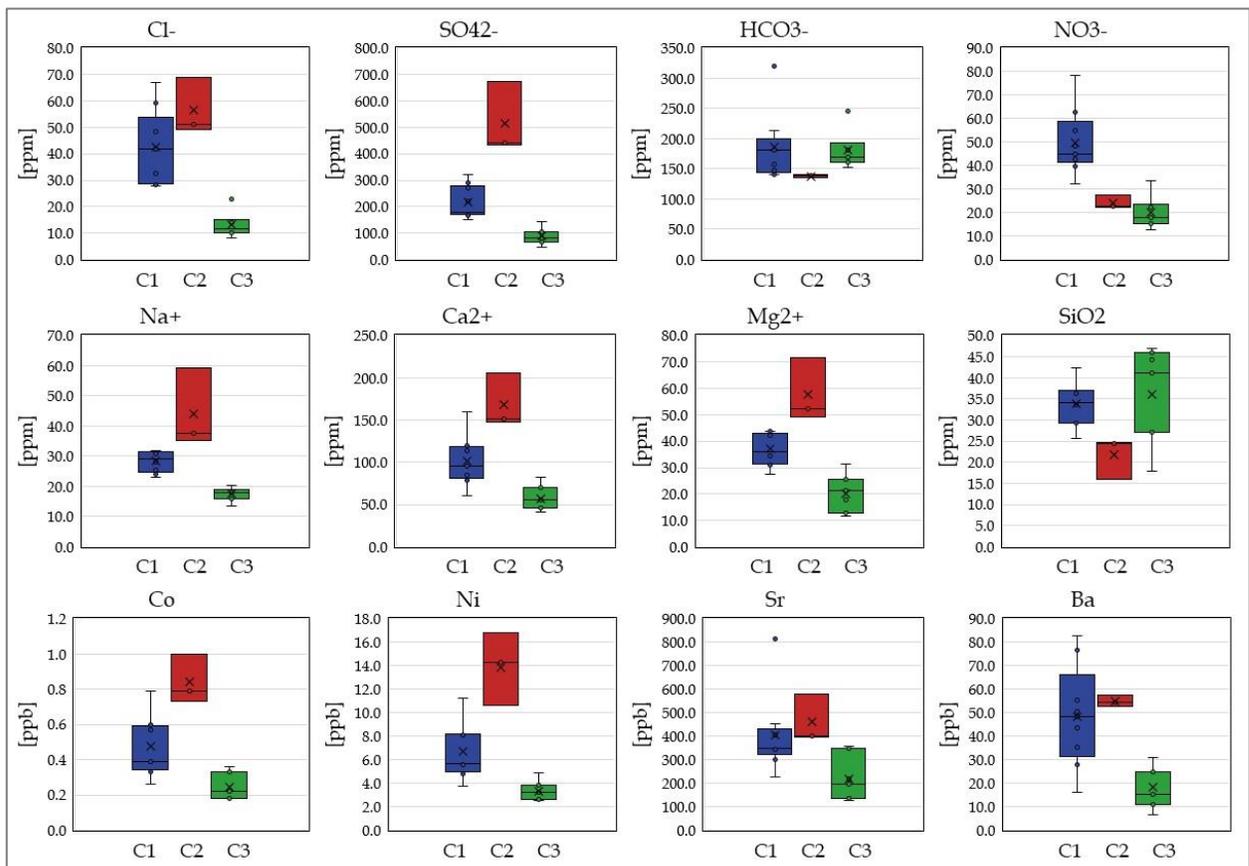


Figura 43: Diagramas de cajas y bigotes de los elementos por clúster.

4.3.6.2. Análisis factorial (AF)

El análisis factorial busca encontrar el menor número de variables que explican la mayor parte de la varianza, con el fin de reducir la redundancia entre las variables

utilizando un número menor de factores (Shiker, 2012). Las variables ingresadas corresponden a los siguientes elementos mayoritarios y trazas de las 19 muestras: Cl⁻, SO₄²⁺, HCO₃⁻, NO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Co y Ba.

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de KMO y Bartlett, donde el resultado del índice KMO arrojó un valor de 0.728, además, la prueba de Bartlett dio un valor de 0.0, por lo tanto, ambas pruebas validan el AF en este estudio, con las variables a utilizar.

Tabla 6: Pruebas de KMO y Bartlett

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.728
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	220.201
	gl	36
	Sig.	0.000

Los resultados obtenidos del AF para los datos hidrogeoquímicos mencionados anteriormente se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7: Matrices de componentes rotada. Rotación realizada con método Varimax. Valores >0.5 se resaltan en rojo.

Matriz de componentes rotada		
Variables	Componentes	
	Factor 1	Factor 2
Cl ⁻	0.91	-0.02
SO ₄ ²⁺	0.98	0.00
HCO ₃ ⁻	-0.26	0.82
NO ₃ ⁻	0.35	0.66
Na ⁺	0.97	-0.06
Ca ²⁺	0.92	0.18
Mg ²⁺	0.94	-0.10
Co	0.91	0.15
Ba	0.69	0.34
Varianza (%)	66.55	13.99
Varianza Acumulada (%)	66.55	80.54

La matriz de cargas factoriales se rota a una estructura simple ortogonal, de acuerdo con la rotación Varimax, lo que resulta en la maximización de la varianza de las cargas factoriales de las variables, donde cada factor se describe en términos de solo esas variables y permite una mayor facilidad de interpretación (Jayakumar & Siraz, 1997). Esta rotación dio como resultado la matriz presentada en la Tabla 7, en donde se obtuvieron dos

factores. En el Factor 1 se incluyeron las variables Cl^- , SO_4^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Co y Ba, mientras que en el Factor 2, se incluyeron únicamente las variables HCO_3^- y NO_3^- .

A continuación, se presenta el valor de los factores para las 19 muestra, resaltando en tono rojizos los valores negativos y en tonos azulados los positivos. El orden presentado es ascendente con respecto al valor de cada factor.

Tabla 8: Puntajes factoriales según cada muestra. a) Factor 1. b) Factor 2.

a.

Muestra	6	5	9	10	19	11	18	17	8	12	4	2	1	15	13	14	3	16	7
Clúster	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Factor 1	-1.46	-1.40	-1.21	-1.12	-0.91	-0.80	-0.62	-0.34	0.09	0.14	0.16	0.44	0.45	0.65	0.68	0.72	1.21	1.24	2.09

b.

Muestra	7	9	3	16	19	6	13	17	5	11	10	1	2	18	14	15	8	4	12
Clúster	2	3	2	2	3	3	1	1	3	3	3	1	1	3	1	1	1	1	1
Factor 2	-1.22	-1.14	-0.91	-0.84	-0.71	-0.71	-0.71	-0.57	-0.27	-0.11	-0.10	0.14	0.27	0.39	0.42	0.57	1.36	1.59	2.57

Los dos factores expuestos en la Tabla 8 explican el 80.54% de la varianza acumulada. El Factor 1 representa el 66.55% de la varianza, sus puntuaciones varían entre -1.46 y 2.09, correspondientes a las muestras 6 y 7, respectivamente. Por otro lado, el Factor 2 representa el 13.99% de la varianza y sus puntuaciones varían entre -1.22 y 2.57, correspondientes a las muestras 7 y 12, respectivamente.

En cuanto a la representación gráfica del AF, es posible apreciar en la Figura 44a las variables se relacionan con los factores. En relación al Factor 1, se observa que las variables Cl^- , SO_4^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Co y Ba poseen una carga mayor a 0.5, no obstante, el NO_3^- igualmente presenta una carga positiva, aunque menor, con este factor, mientras que el HCO_3^- , una carga negativa. Por otro lado, respecto al Factor 2, se tiene que las variables HCO_3^- y NO_3^- son las únicas que poseen cargas superiores a 0.5, aunque otros elementos igualmente poseen cargas positivas, como el Ba, cuya carga es mayor a 0.3. Las variables SO_4^{2+} , Ca^{2+} y Co presentan cargas cercanas al 0, mientras que Cl^- , Na^+ y Mg^{2+} poseen cargas negativas.

En la Figura 44b se observa la representación gráfica de las puntuaciones factoriales de las 19 muestras de agua, cuya simbología indica a qué clúster pertenece cada una. En relación a las muestras del Clúster 1, se aprecia que tienen valores positivos entre 0 y 1 en el Factor 1, excepto la muestra 17, que posee un valor negativo. Por otro lado, las puntuaciones del Factor 2 son bastante dispersas, variando entre -1 y 3. Destacan las muestras 17 y 13, que presentan valores negativos para este factor. En cuanto al Clúster 2, las muestras tienen valores positivos en el Factor 1, mientras que las puntuaciones del Factor 2 son negativas. Por último, en cuanto a las muestras del Clúster 3, todas muestran valores

negativos tanto en el Factor 1 como en el Factor 2, excepto la muestra 18, la única en el grupo con un valor positivo en este último.

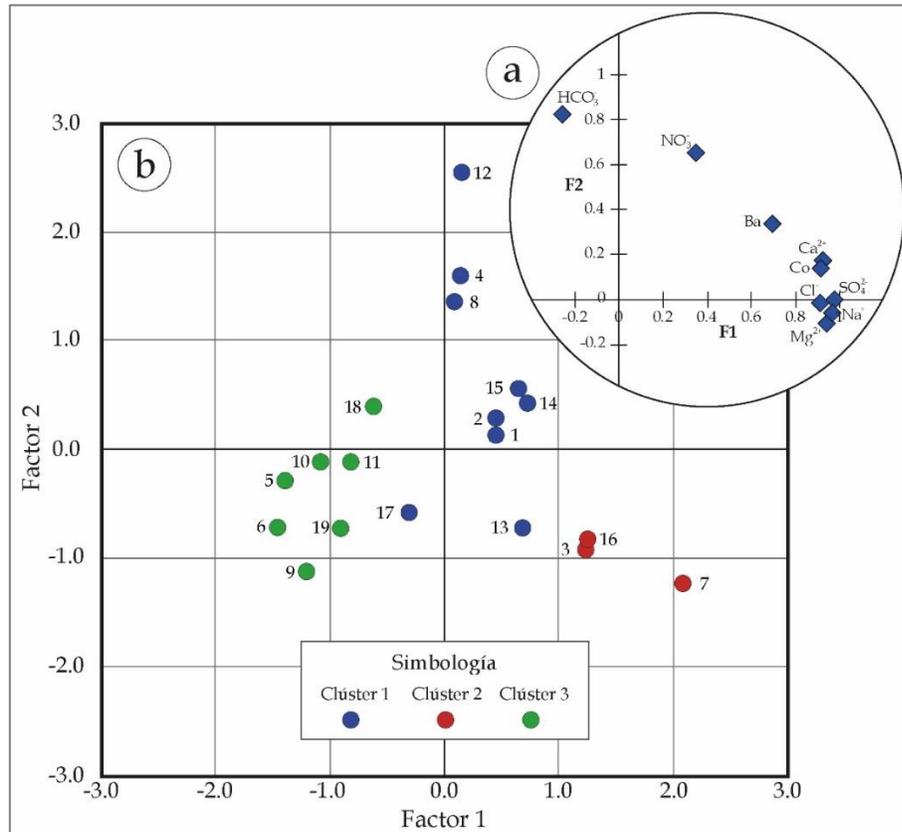


Figura 44: Análisis factorial. a) Peso de las variables para el Factor 1 y 2 (Tabla y). b) Proyección de las cargas factoriales de las muestras de agua. Los colores de las muestras fueron asignados según el HCA.

A continuación, en la Figura 45 se presentan mapas de la ubicación de las muestras en el área de estudio, donde la simbología de las muestras representa la puntuación de cada una para cada factor, utilizando tonos rojizos para los valores negativos y azulados para los positivos. En la Figura 45a se observan las puntuaciones según el Factor 1 y en la Figura 45b según el Factor 2.

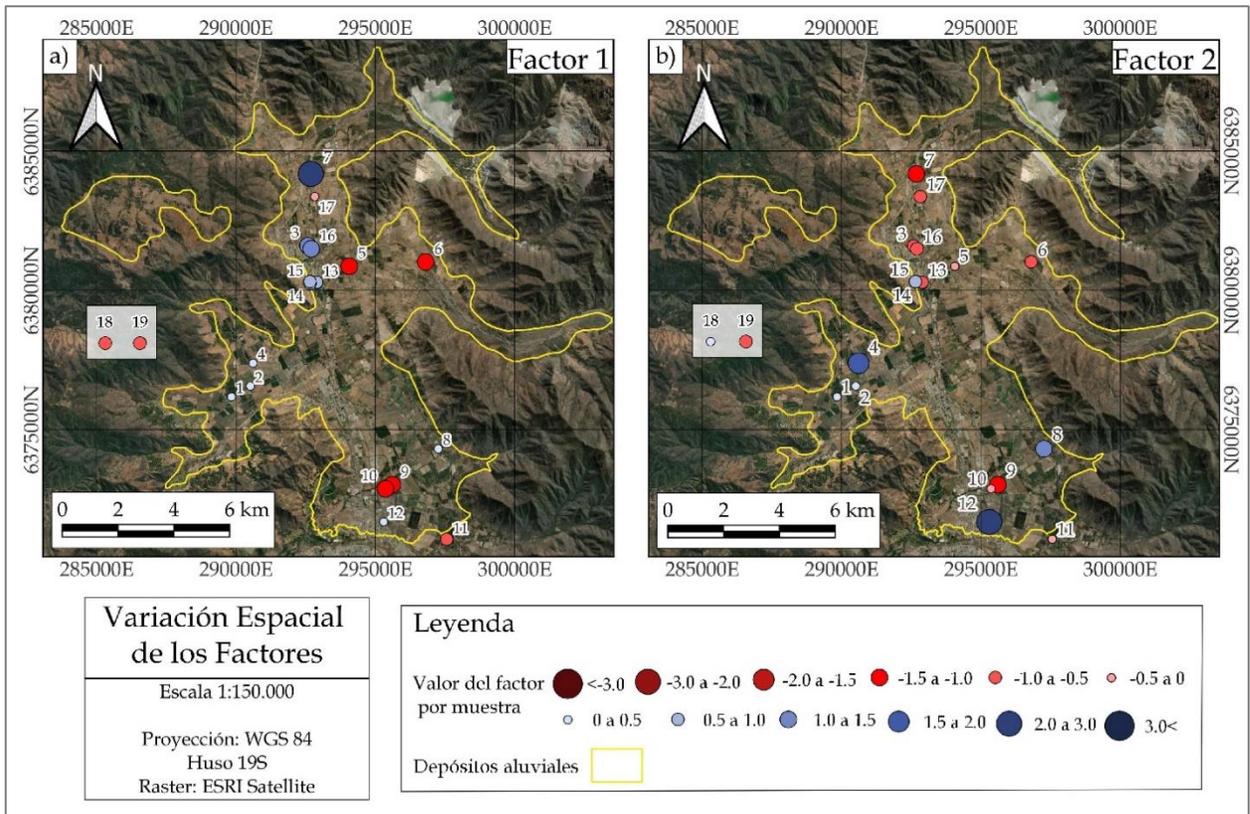


Figura 45: Variación espacial de los factores. a) Factor 1. b) Factor 2.

En la Figura 45a, se observa que el Factor 1 tiene una gran relevancia en la zona norte del área de estudio (con excepción de la muestra 17). Específicamente, en las proximidades del Estero El Cobre. Por otro lado, los sectores con las puntuaciones más bajas corresponden a las cercanías del Estero El Carretón, la zona sur (excepto las muestras 12 y 8) y el área de las aguas superficiales. Esto muestra una muy baja relevancia de este factor en estos puntos. El sector del Estero Pucalán posee muestras con valores positivos, pero muy cercanos a 0, por lo que la influencia del Factor 1 en esta zona es moderada.

Con relación al Factor 2, en la Figura 45b se observa un predominio de muestras rojizas, donde destacan los sectores de los esteros El Cobre y El Carretón, junto con ciertos sectores hacia el sur del área de estudio. Esto evidencia la baja relevancia de este factor para estas zonas. Por otro lado, el sector con la mayor puntuación corresponde al sector sur del área de estudio, en específico en la zona norte de la localidad de La Calera. A su vez, hacia el noreste de La Calera, igualmente es posible encontrar una zona con una puntuación positiva importante. Por otro lado, el sector del Estero Pucalán igualmente obtuvo valores positivos, junto con el sector sur de la localidad El Melón, el cual presenta dos muestras (14 y 15) con valores positivos. Por lo tanto, el Factor 2 tiene una gran relevancia en estos cuatro sectores mencionados.

En la Figura 46 se observan diagramas de cajas y bigotes con las cargas factoriales de las muestras de cada clúster, para visualizar la dispersión de los valores. En el Factor

1 es posible notar que los rangos de cada clúster son acotados. A su vez, el Clúster 1 presenta una asimetría negativa, dejando ver que la mayoría de los datos se encuentran más concentrados hacia valores positivos. El Clúster 2 presenta las puntuaciones más altas de este factor, mientras que el Clúster 3 las más bajas, además de presentar una leve asimetría positiva, mostrando que la mayoría de los datos presentan cargas menores. En el Factor 2, el Clúster 1 es el que presenta mayor dispersión, además posee una asimetría positiva, mostrando que la mayoría de los datos se encuentran cercanos al 0. Por otro lado, el Clúster 2 presenta una baja dispersión alrededor del -1. Finalmente, el Clúster 3 presenta un rango más acotado en comparación al Clúster 1 y presenta asimetría negativa, mostrando que la mayoría de las muestras se encuentran cercanas al cero, mientras que el resto se ubican hacia valores negativos.

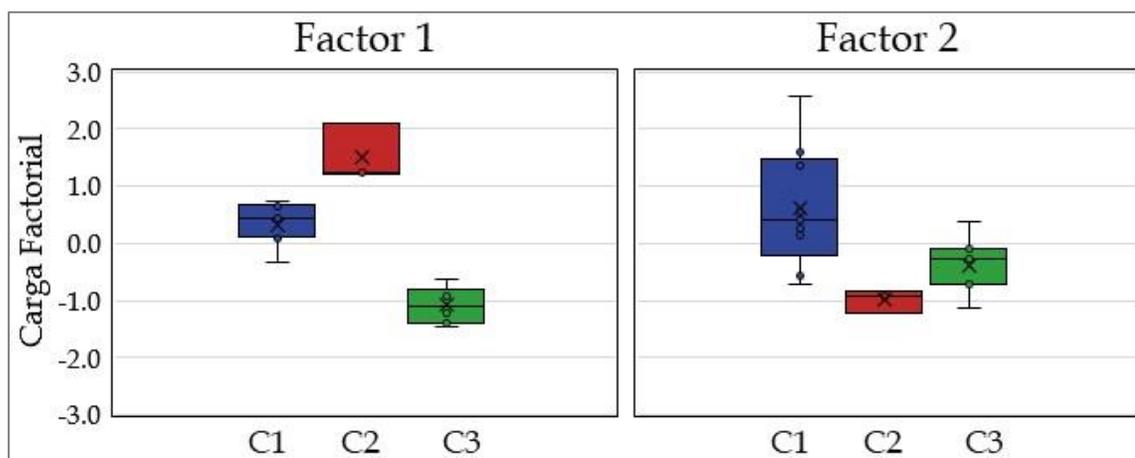


Figura 46: Diagramas de cajas y bigotes de puntuaciones factoriales de las muestras según los clústeres obtenidos en el HCA.

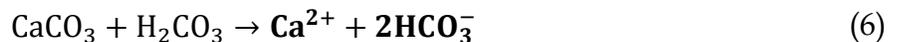
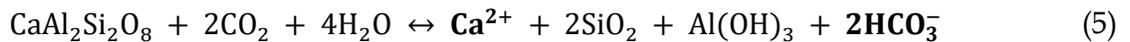
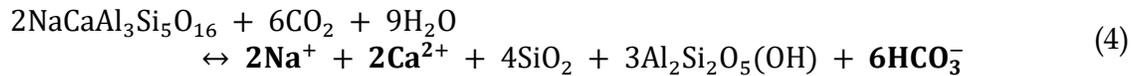
4.3.6.3. Interacción agua - roca según AEM

Para lograr una mayor comprensión de lo que ocurre a lo largo de las trayectorias de flujos en la subcuenca del Estero El Cobre, se complementarán los resultados anteriores analizando las reacciones y procesos geoquímicos según las 19 muestras de este estudio.

Como se mencionó en el Capítulo 2, las rocas que predominan en el área de estudio son volcano-sedimentarias de composición andesíticas, cuyos minerales más abundantes son las plagioclasas. En los Andes de Chile Central, existe toda la familia de plagioclasas, correspondiente a la solución sólida entre la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), teniendo a la labradorita como plagioclasa intermedia (Fuentes et al., 2004). A su vez, en las formaciones aledañas a los depósitos aluviales, se tiene la existencia de facies sedimentarias calcáreas y, por ende, del mineral calcita (CaCO_3).

Para que ocurra la disolución de plagioclasa y calcita, es necesario que exista ácido carbónico (H_2CO_3), producto de la reacción química entre el agua y CO_2 (Sheikhy Narany et al., 2014; Lerman y Wu, 2008; Frengstad y Banks, 2007), el cual puede provenir del suelo

o la atmósfera (Ecuación (2)). La disolución de plagioclasa sódica (albita) libera una proporción estequiométrica de 1:1 de $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ (Ecuación (3)). La disolución de labradorita de 1:3 de $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ y 1:3 de $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ (Ecuación (4)). Finalmente, la disolución de plagioclasa cálcica (anortita) libera una proporción estequiométrica de 1:2 de $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ (Ecuación (5)), al igual que la disolución de calcita (Ecuación (6)).



En las Figura 47 y Figura 48 se ilustra la relación molar de sodio y calcio con respecto al bicarbonato, respectivamente, distinguiendo los datos según los distintos clústeres obtenidos en el HCA, para analizar estas reacciones en el área de estudio. La Figura 47 muestra un gran contenido sódico en el Clúster 2, en comparación a los otros, cercano a la relación estequiométrica 1:1, mientras que los otros clústeres se encuentran cercanos a la relación 1:3.

A su vez, la Figura 48 muestra un alto contenido molar de calcio en el Clúster 2, en comparación a los otros, superando bastante la relación estequiométrica 1:1. El Clúster 1, por su parte, posee varias muestras cercanas a la relación 1:1, como las nro. 1, 2, 4 y 12, en especial las muestras nro. 13, 14 y 15, mientras que las muestras 8 y 17 se encuentran más cercanas a la relación 1:2. El Clúster 3 presenta muestras bastante cercanas a la relación 1:2, a excepción de la muestra nro. 5, la cual se aproxima más a la relación 1:3.

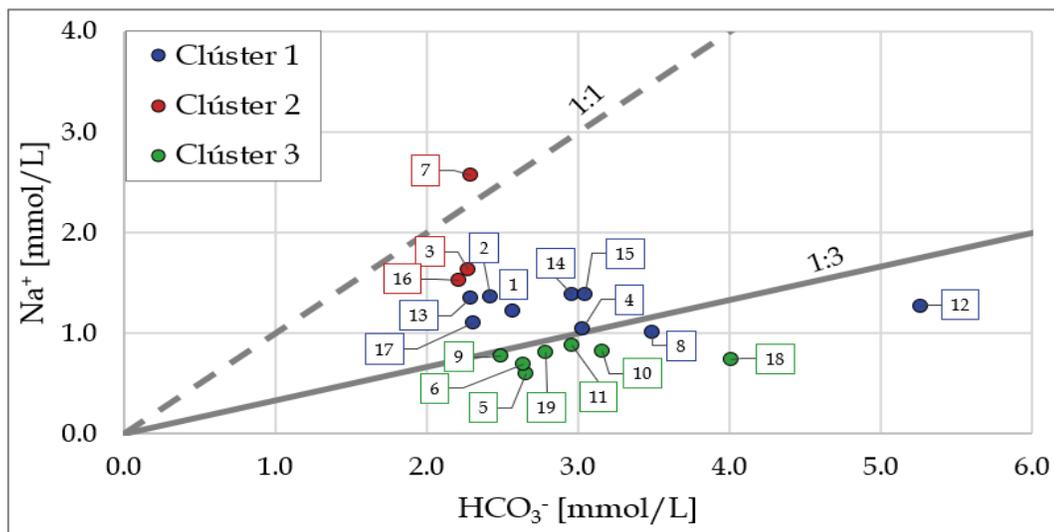


Figura 47: Relación molar de Na^+ vs HCO_3^- .

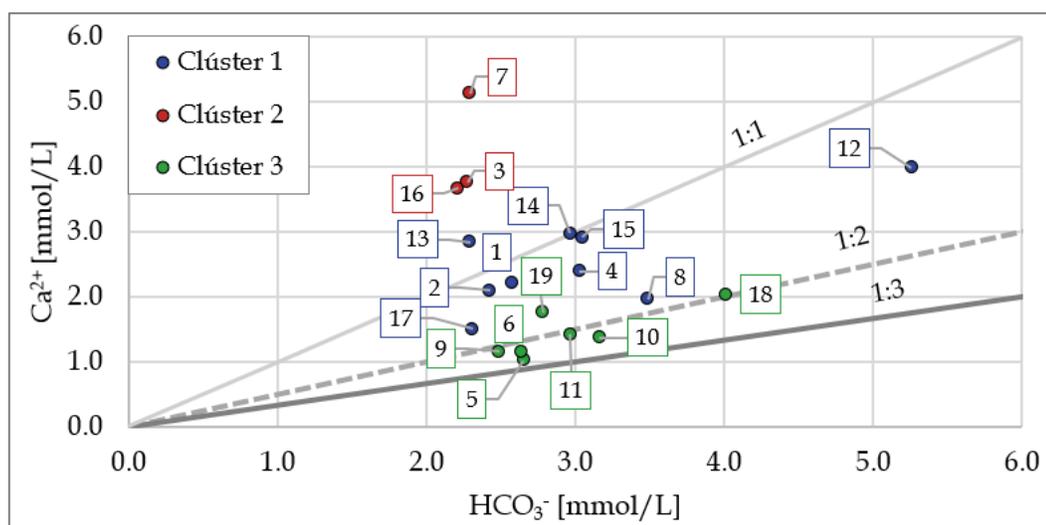
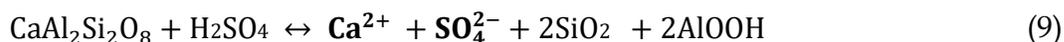
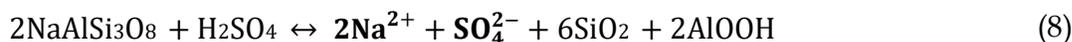
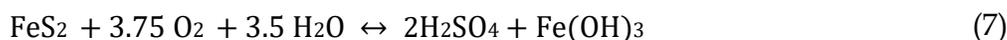


Figura 48: Relación molar de Ca^{2+} vs HCO_3^- .

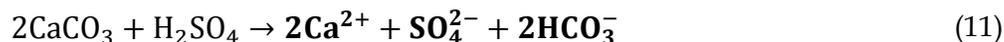
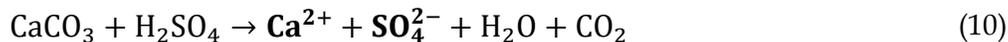
Además de las disoluciones producidas con el dióxido de carbono y ácido carbónico en medios acuosos, es importante notar que el contexto geológico en el que se encuentra el área de estudio es de gran importancia dentro del ámbito minero, relacionado a los depósitos de cobre. En la Cuenca del Río Aconcagua, así como dentro de la subcuenca del Estero El Cobre, se encuentran variados yacimientos de cobre, a los que se asocian minerales como la pirita y otros sulfuros. La oxidación de sulfuros da lugar a la formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4), generando drenajes ácidos que pueden provocar alteraciones en las rocas, produciéndose disolución de plagioclasas y calcita. Estos procesos se han evidenciado en Chile Central en estudios como Treskow (2019) y Valenzuela-Díaz et al. (2020).

La oxidación de pirita genera ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), como se muestra en la Ecuación (7). Cuando este ácido interactúa con las plagioclasas, se produce una reacción química que genera sílice (SiO_2) y boehmita (AlOOH), liberando en solución acuosa iones de Na^+ , Ca^{2+} y SO_4^{2-} . La disolución de plagioclasa sódica (albita) en presencia de pirita libera una proporción estequiométrica de 2:1 de $\text{Na}^+/\text{SO}_4^{2-}$ (Ecuación (8)) y la disolución de plagioclasa cálcica (anortita) libera una proporción estequiométrica de 1:1 de $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ (Ecuación (9)).



Asimismo, el ácido sulfúrico puede interactuar con la calcita y, dependiendo del entorno, pueden ocurrir dos reacciones (Ecuaciones (10) y (11)). Si la roca o el sedimento contienen una alta proporción de carbonato de calcio, entonces es más probable que ocurra la Ecuación (10). Sin embargo, si la roca o el sedimento contienen una proporción

menor de carbonato de calcio y una proporción mayor de otros minerales carbonatados, entonces es más probable que ocurra la ecuación (11). Además, la proporción de CO_2 consumido a HCO_3^- producido depende de las proporciones de ácidos carbónico y sulfúrico en la solución y la composición mineral de la fuente de meteorización (Lerman y Wu, 2008).



En las Figura 49 y Figura 50 se ilustra la relación molar de Na^+ y Ca^{2+} con respecto al SO_4^{2-} , respectivamente, distinguiendo los datos según los distintos clústeres obtenidos en el HCA, para analizar estas reacciones en el área de estudio. En la Figura 49 se observa que la única muestra cercana a la relación estequiométrica de 2:1 es la 6. El resto de las muestras se encuentran alejadas de esta relación, puesto que el contenido de sulfato va en aumento. En la Figura 50 se tiene que, tanto las muestras del Clúster 1 como del Clúster 3 se encuentran sobre o en la línea estequiométrica 1:1, a excepción de la muestra 13, cuyo contenido molar de SO_4^{2-} es mayor que el de Ca^{2+} . Por otro lado, las muestras del Clúster 2 se encuentran por debajo de la 1:1. Las muestras del Clúster 3 tienden a acercarse más a la relación 2:1, junto con la muestra nro. 12.

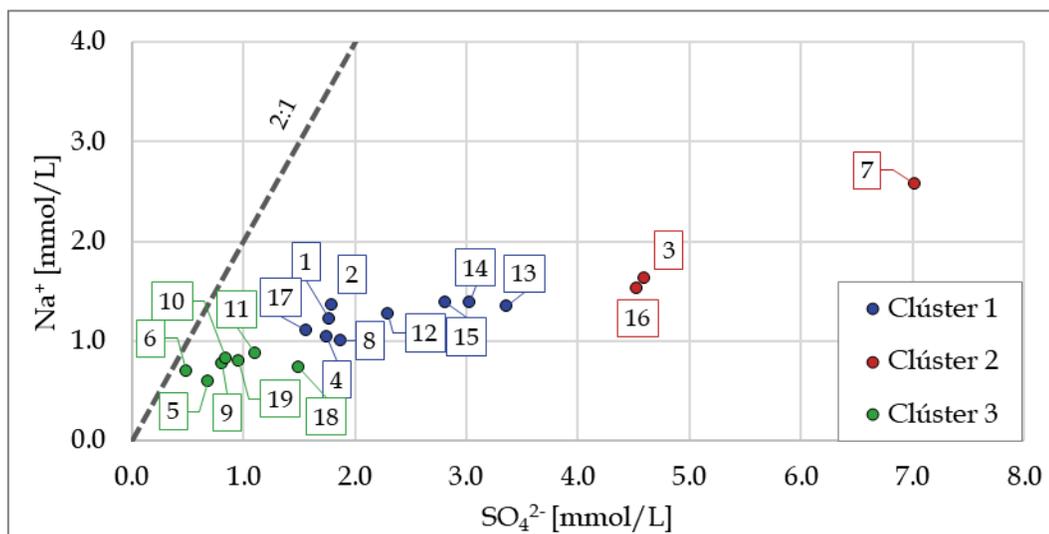


Figura 49: Relación molar de Na^+ vs SO_4^{2-} .

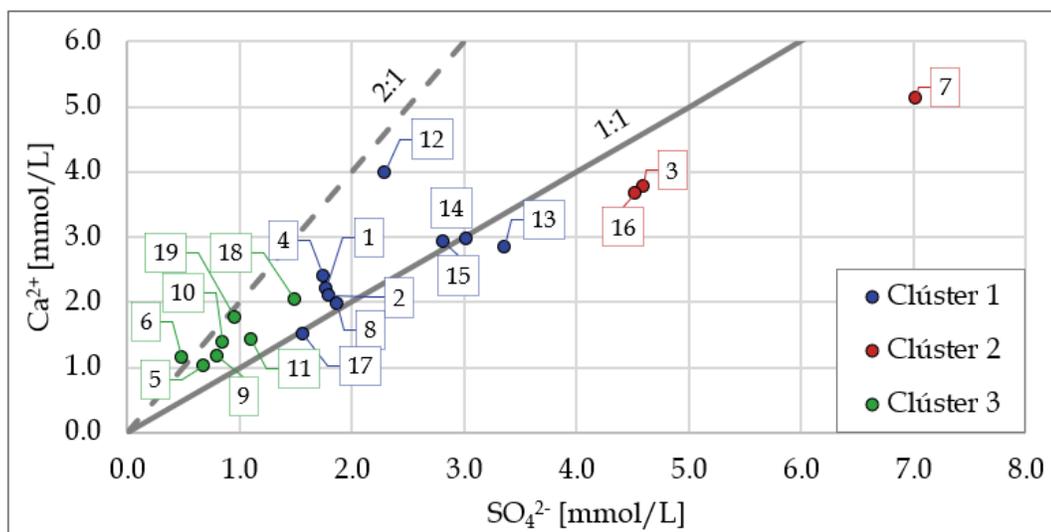


Figura 50: Relación molar de Ca^{2+} vs SO_4^{2-} .

4.3.6.4. Calidad de agua

A continuación, se abordará detalladamente la calidad del agua en el contexto de las normativas chilenas NCh409/1 y NCh1333. Estas normativas, desempeñan un papel fundamental en la regulación y supervisión de los parámetros que determinan la calidad del agua en diversas fuentes hídricas.

Con respecto al pH (Figura 51), se puede ver que todas las muestras están dentro de los valores permitidos por ambas normativas, al igual que las concentraciones de cloruro (Figura 52) y arsénico (Figura 55). Es importante mencionar que en la Figura 55 no se incluye el límite de la NCh1333, ya que éste es de 100 ppb, por lo que queda fuera de los límites de la gráfica.

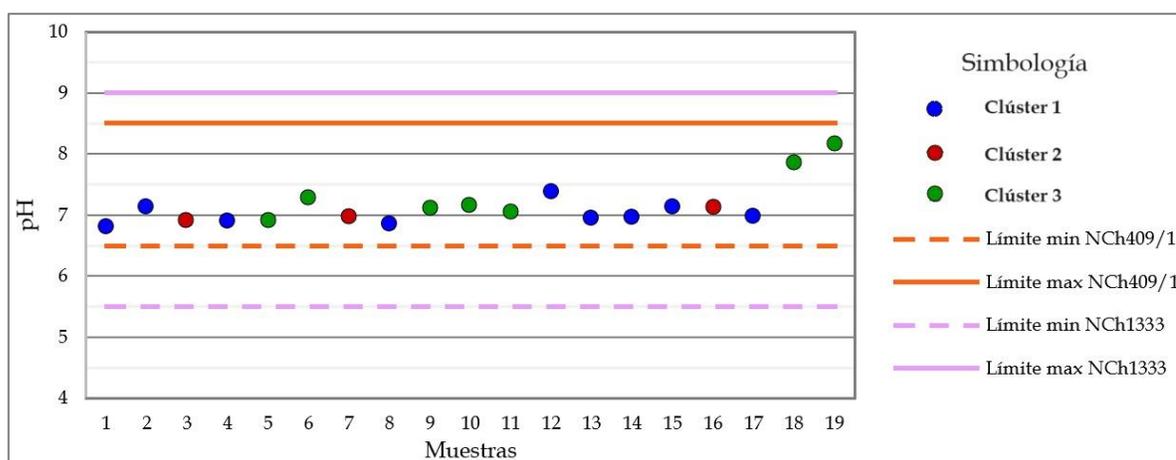


Figura 51: Valores de pH de las muestras, junto con los límites máximos y mínimos de las normativas NCh409/1 y NCh1333.

No obstante, ciertas muestras superaron los límites de concentraciones de sulfato de estas normas (Figura 53), como es el caso de las muestras del Clúster 2, donde las tres superaron los límites permitidos por la NCh1333, destacando la muestra nro. 7, la cual supera además el límite de la NCh409/1 por más de 150 ppm. A su vez, las muestras nro. 13, 14 y 15 del Clúster 1 igualmente superaron el límite de la NCh1333, pero no así el de la NCh409/1. El resto de las muestras del Clúster 1 y las del Clúster 3 mantuvieron sus concentraciones por debajo de los límites permitidos en ambas normas.

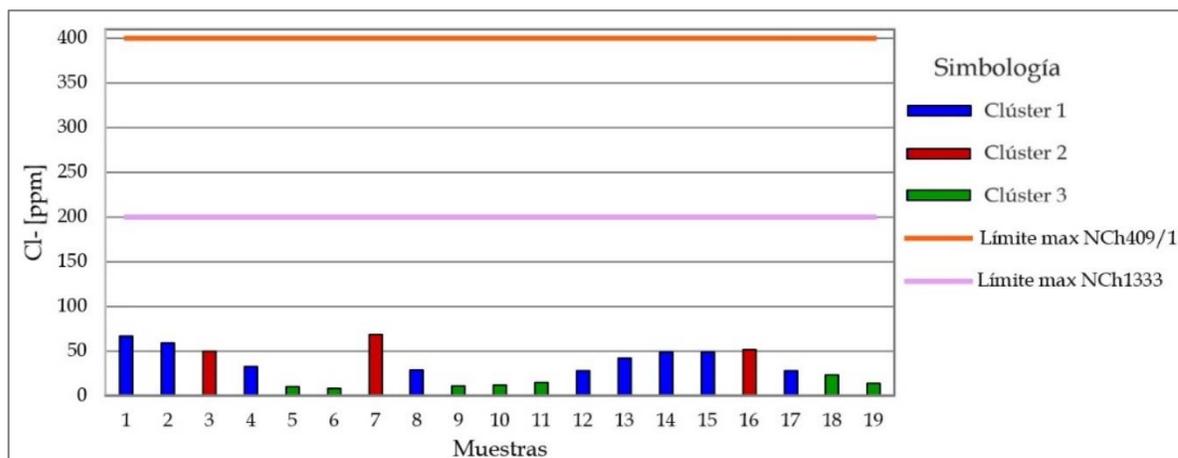


Figura 52: Concentración del cloruro de las muestras, junto con los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333.

En cuanto a las concentraciones de nitrato (Figura 54), es posible notar que las muestras que superaron el límite de la NCh409/1 corresponden al Clúster 1, siendo estas las nro. 2, 4 y 12, se destaca además que otras muestras de este clúster, como las nro. 1, 8, 15 y 17 que, si bien sus concentraciones no sobrepasan el límite de esta norma, sus concentraciones están bastante cercanas a éste (no más de 10 ppm), el resto de las muestras del estudio están por debajo de los 40 ppm, por lo que no sobrepasan ningún límite.

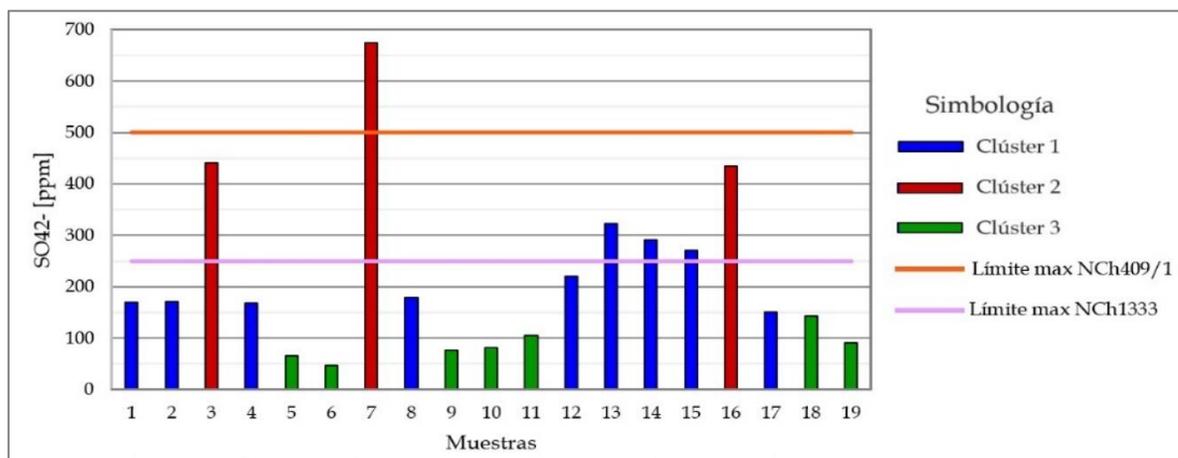


Figura 53: Concentración del sulfato de las muestras, junto con los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333.

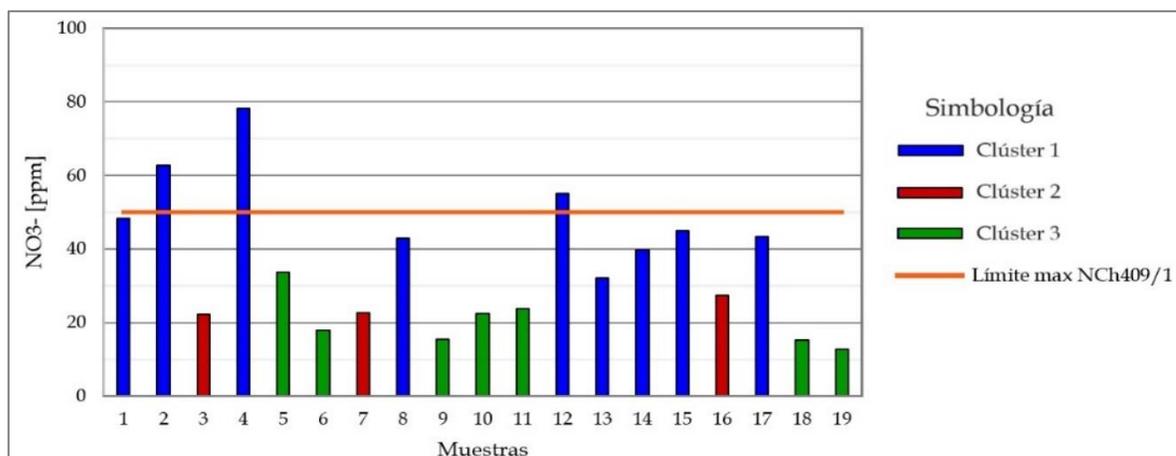


Figura 54: Concentración del nitrato de las muestras, junto con el límite de la norma NCh409/1.

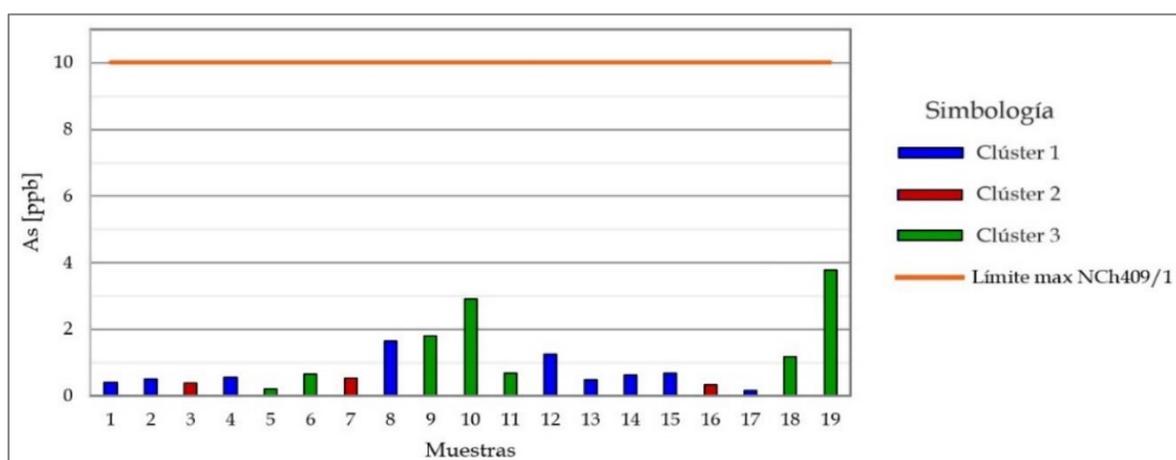


Figura 55: Concentración del arsénico de las muestras, junto con el límite de la norma NCh409/1.

4.4. Análisis isotópico

La composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en el agua subterránea, asociadas a las 17 muestras obtenidas en la campana de terreno, oscilan entre -12.94% y -7.48% , representados por las muestras 8 y 3, respectivamente, mientras que el de las muestras de aguas superficiales, correspondientes a las muestras 18 y 19, son de -12.90% en ambas. Por otro lado, la composición isotópica de $\delta^2\text{H}$ en las muestras de aguas subterráneas varía entre -96.83% y -54.77% , correspondientes a las muestras 8 y 7, respectivamente, además, las muestras de aguas superficiales poseen composiciones de -97.10% en la muestra 18 y -96.30% en la 19. Todos estos datos se encuentran en la Tabla 9.

Este análisis isotópico igualmente incluye muestras de río para comparar aguas el comportamiento de las aguas de este estudio con aguas superficiales extraídas aguas arriba en la cuenca del río Aconcagua, correspondientes a Medina-Sagredo (2023).

Tabla 9: Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ por muestra.

Muestras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Cota [m s.n.m.]	208	235	250	233	248	276	263	227	215	216	242	229	247	239	215	245	246	448	453
$\delta^{18}\text{O}$ VSMOW	-8.71	-9.62	-7.48	-10.42	-9.60	-8.51	-7.50	-12.94	-10.96	-11.23	-12.00	-12.39	-7.62	-7.92	-7.84	-7.68	-9.76	-12.90	-12.90
$\delta^2\text{H}$ VSMOW	-63.40	-70.63	-55.57	-75.40	-68.87	-60.28	-54.77	-96.83	-77.82	-80.37	-89.25	-92.80	-55.15	-56.79	-57.05	-55.82	-72.06	-97.10	-96.30

La Figura 56a muestra la comparación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de los datos de aguas subterráneas y superficiales analizadas en la sección anterior, junto con muestras del Río Aconcagua aguas arriba entre 620 y 2830 [m s.n.m.], correspondientes al estudio de Medina-Sagredo (2023), las cuales fueron incluidas para visualizar una posible relación entre éstas y las muestras de este estudio. Además, se graficó la Línea Meteorica Local (o en sus siglas en inglés “MWL”) “33°S Chile MWL”, definida por Taucare *et al.* (2020a). En la gráfica se logra apreciar que las muestras 19 muestras de este estudio poseen una tendencia muy similar a la MWL de Chile, definida por Sánchez-Murillo *et al.* (2018), a la 33°S Chile MWL antes mencionada y a Línea Meteorica Global (GMWL) definida por Craig (1961). Si se observan las muestras de este estudio según sus clústeres, es posible ver que las del Clúster 1 poseen los mayores valores de composición isotópica tanto en $\delta^{18}\text{O}$ como en $\delta^2\text{H}$, mientras que las de los otros clústeres se encuentran dispersas a lo largo de las líneas de tendencias. Las muestras de río de Medina-Sagredo (2023), por lo general, siguen la tendencia de las líneas meteoricas, pero presentan con mayor dispersión en comparación a las muestras de este trabajo.

La Figura 56b muestra la relación entre la altitud en m s.n.m. y la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$, junto con la línea media de precipitación, correspondiente al gradiente de elevación regional del contenido isotópico de las precipitaciones ($\nabla_z \delta^{18}\text{O}_p = -0.30\text{‰}(\delta^{18}\text{O})/100\text{m}$; $R^2=0.99$), definido por Taucare *et al.* (2020a). Al realizar la intersección de entre las variables presentes y la media de precipitación del contenido isotópico a los 33°S, se obtiene la elevación a la que fueron precipitadas las aguas muestreadas, permitiendo ver, según su altitud, si la procedencia de las aguas es local o si fueron precipitadas aguas arriba. Además, es posible notar que la distribución de las altitudes del muestreo de aguas subterráneas varía desde los 208 y 276 m s.n.m., correspondientes a las muestras 1 y 6, respectivamente. Las aguas superficiales fueron muestreadas a los 448 y 453 m s.n.m., valores pertenecientes a las muestras 18 y 19, respectivamente. Cabe mencionar que las cotas máximas de la subcuenca del Estero El Cobre son de 2200 m s.n.m. aprox. hacia el E y de 800 m s.n.m. aprox. hacia el W (ver Sección 2.4).

Teniendo lo anterior en cuenta, en la Figura 56b, se observa que las muestras aguas superficiales, junto con la muestra 8, son las que fueron precipitadas a mayores elevaciones, cercanas a los 2300 m s.n.m. Les siguen las muestras 12 y 11, cuyas precipitaciones ocurrieron a los 2100 y 2000 m s.n.m. aprox., respectivamente. Las muestras 10 y 9 precipitaron a los 1700 m s.n.m. aprox. Luego, la muestra 4 precipitó a los 1500 m s.n.m. aprox, y la 17 cercana a los 1260 m s.n.m. Las últimas muestras con valores superiores a los 1000

m s.n.m. corresponden a las 2 y 5, las cuales precipitaron a los 1200 m s.n.m. aprox. Las muestras 1 y 6 precipitaron cercanas a los 900 m s.n.m., mientras que las 14 y 15 a los 650 m s.n.m. aprox. Por último, las muestras 3, 7, 13 y 16 precipitaron entre los 500 y 580 m s.n.m., obteniendo las elevaciones más bajas del total de muestras. En cuanto a las muestras de río de Medina-Sagredo (2023), el rango de precipitación va desde los 1500 a 3000 m s.n.m., aprox.

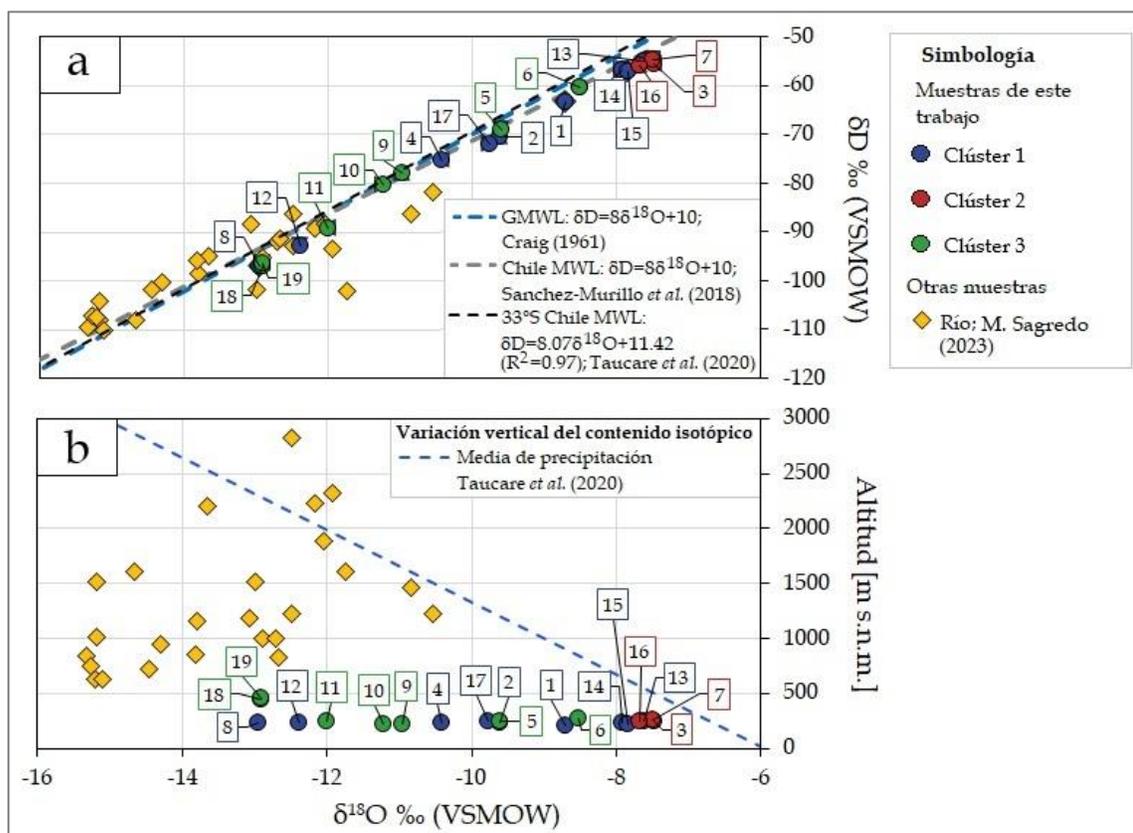


Figura 56: Isótopos estables en agua. a) Relación entre $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ con la línea de agua meteórica local "33°S Chile MWL", definida por Taucare *et al.* (2020a). b) Relación entre altitud m s.n.m. y $\delta^{18}\text{O}$.

Además, la variación espacial de los isótopos en el área de estudio (Figura 57) permite ver que las muestras más cercanas al Estero El Cobre (sector norte) son las que presentan los valores más enriquecidos tanto de $\delta^{18}\text{O}$ como de $\delta^2\text{H}$, mientras que las del sector sur y las aguas superficiales son las que presentan los valores más empobrecidos en ambos isótopos. En cambio, las muestras 9, 17 y las próximas a los esteros Pucalán y El Carretón registraron composiciones isotópicas más cercanas a la mediana que hacia los valores límites.

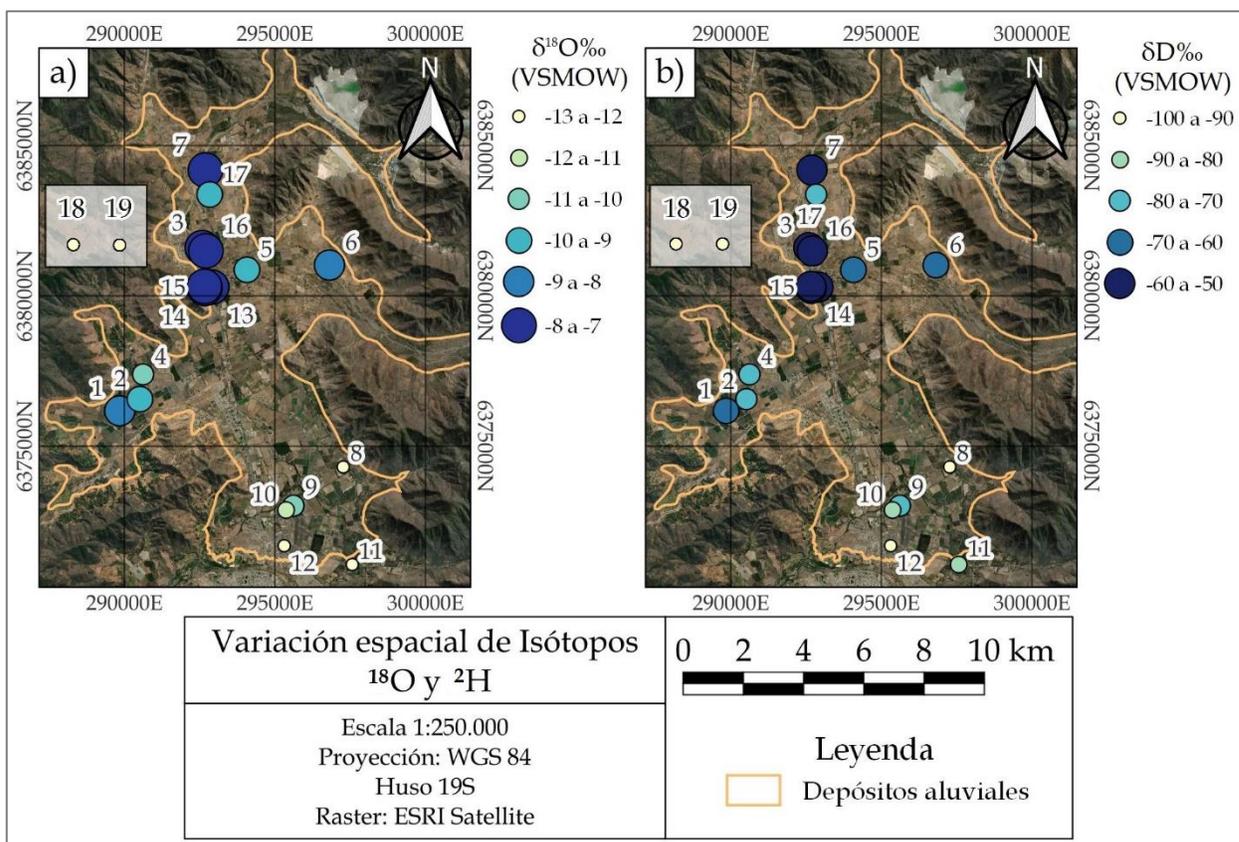


Figura 57: Mapas de variación espacial de isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$. La escala de colores va desde tonos blanquecinos, indicando menor concentración, a azulados, indicando una concentración mayor.

Por último, la Figura 58 presenta diagramas de cajas y bigotes con la composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ por clúster, en donde no se obtuvieron valores atípicos en ningún caso. En el Clúster 1, se observa una gran dispersión de los datos en ambos diagramas, variando entre -12.94‰ y -7.62‰ la composición de $\delta^{18}\text{O}$ y entre -96.83‰ y -55.15‰ la de $\delta^2\text{H}$. También se aprecia una distribución asimétrica negativa, dejando ver que la mayoría de los datos se encuentran más concentrados hacia valores mayores tanto en ambos isótopos. A su vez, el Clúster 2 presenta las mayores composiciones de los grupos. Si bien, este clúster está compuesto solo por tres muestras (3, 7 y 16), es posible ver que poseen una dispersión bastante baja, en comparación a los otros, variando entre -7.68‰ y -7.48‰ la composición de $\delta^{18}\text{O}$ y entre -55.82‰ y -54.77‰ la de $\delta^2\text{H}$. Por otro lado, el Clúster 3, al igual que el 1, posee una gran dispersión, sin embargo, los datos presentan asimetría positiva, lo que indica que la mayor concentración de los datos se encuentra hacia los valores más bajos de la distribución. La composición de $\delta^{18}\text{O}$ de este clúster varía entre -12.90‰ y -8.51‰ y la de $\delta^2\text{H}$ entre -97.10‰ y -60.28‰ .

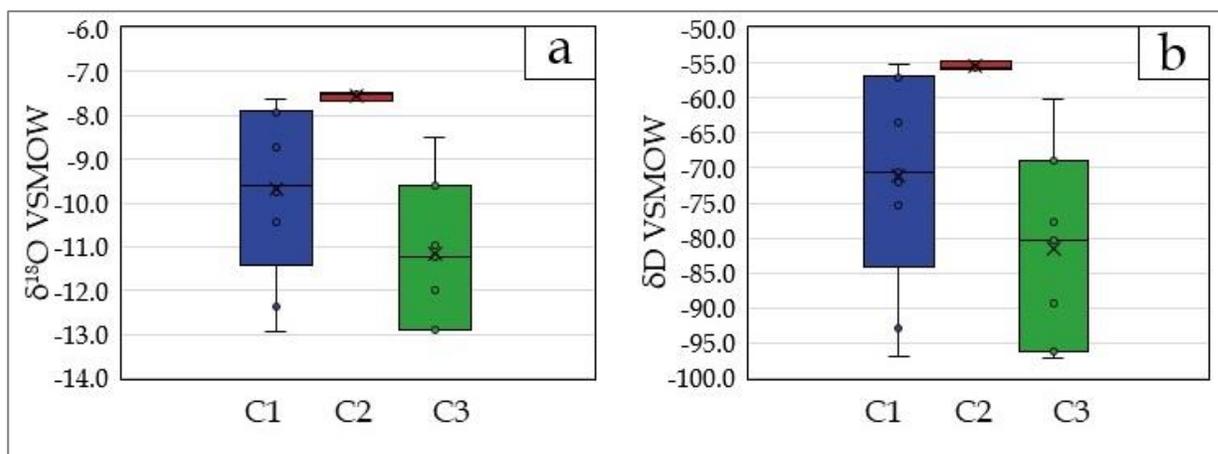


Figura 58: Diagramas de cajas y bigotes de las composiciones de isótopos estables según los clústers definidos en el HCA. a) $\delta^{18}\text{O}$ (‰). b) $\delta^2\text{H}$ (‰).

Capítulo 5: Discusiones

5.1. Mecanismos de recarga

La construcción de la piezometría muestra que el sentido de flujo de las aguas subterráneas va desde los valles laterales hacia el valle principal (Figura 13), lo cual va acorde con la topografía de la cuenca, dando una dirección de flujo general N-S. Las zonas de recarga identificadas en este estudio corresponden a los valles laterales, ya que recogen aguas lluvias que caen desde las más altas elevaciones, permitiendo que se infiltren a medida que recorren la superficie a través de las corrientes efímeras. Otra zona de recarga corresponde al sector sur, ya que es por donde circulan las aguas provenientes del Río Aconcagua. Además de flujos subterráneos propios de aguas que pueda originar este río al área de estudio, en este sector existen canales, los cuales son utilizados en su mayoría para riego, permitiendo que entren aguas superficiales a la subcuenca del Estero El Cobre desde el Río Aconcagua. Por otro lado, una zona de descarga natural corresponde al sector suroeste del área de estudio, ya que las aguas naturalmente pueden salir de la subcuenca por esta zona, al seguir el flujo subterráneo previamente estudiados por DGA (2020), además de las aguas superficiales que pueden seguir el cauce del río Aconcagua.

Sin embargo, hay sectores en donde existen curvas de isopieza cerradas y de menor elevación, correspondientes a la localidad de El Melón y entre Nogales y La Calera (Figura 12). Históricamente, en el segundo sector mencionado, se ha visto una disminución de la profundidad de las aguas subterráneas (Figura 10), lo que coincide con el aumento de la demanda del recurso (Figura 14). A su vez, en ambos sectores se ubican los derechos destinados al uso de la minería del área de estudio (Figura 18). Se interpreta que estos sectores en donde se ubican los conoides de descenso tuvieron una distorsión en sus niveles piezométricos, probablemente ocasionada por las extracciones efectivas en cuanto a los usos de la minería y agricultura (Figura 59).

Las zonas que presentan conoides de descenso, anteriormente mencionadas, no son las únicas cuya piezometría se ha visto distorsionada, ya que, si bien no se observan otras curvas de isopieza cerradas, sí se presentan sectores en donde las isopiezas acentúan sus curvaturas, posiblemente por de extracciones de aguas subterráneas, como los lugares en donde se ubican los pozos 3 y 16, la quebrada del Estero Pucalán, hacia el norte del Estero El Carretón, sector sur del área de estudio, entre otros. A esto se suma que, el gran número de derechos y los datos que se manejan de niveles piezométricos, dan lugar a interpretar la posible existencia de otra curva cerrada de mayor área en el sector sur de los depósitos aluviales, como se observa en la Figura 59.

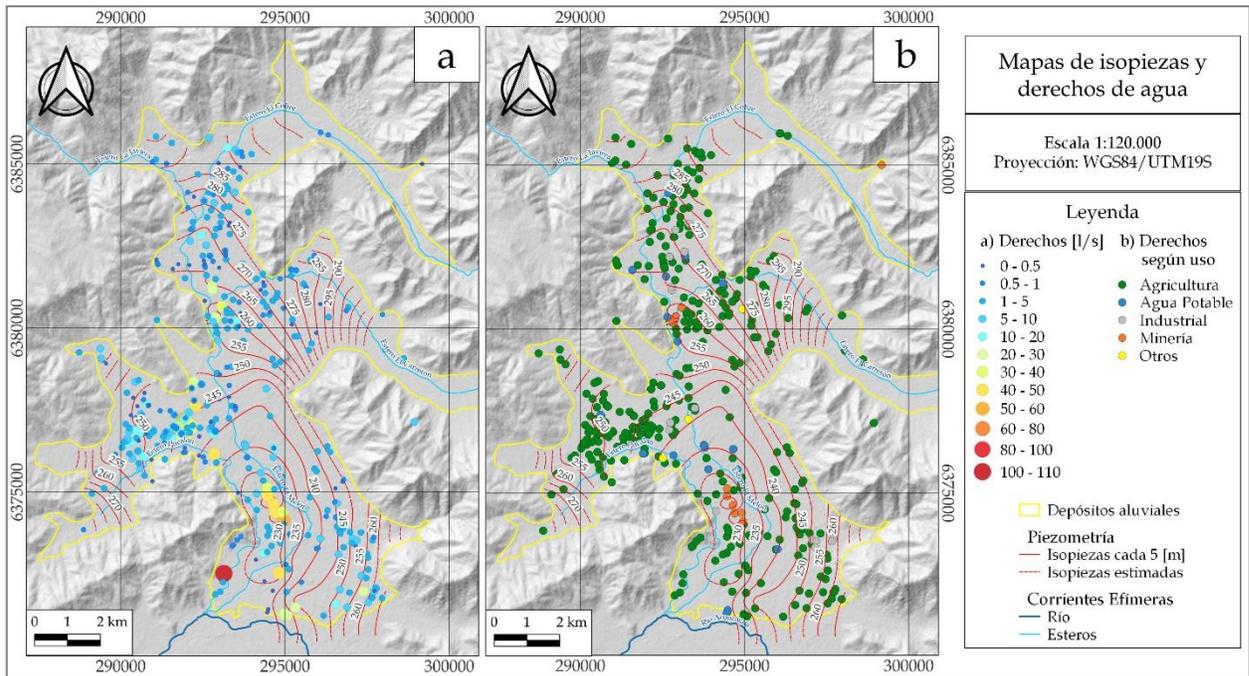


Figura 59: Mapa de isopiezas y derechos de agua. a) Según el caudal otorgado. b) Según el uso de derecho.

Junto con lo mencionado anteriormente, hacia el norte de la localidad El Melón, por el Estero El Cobre, las isopiezas podrían estar indicando que el acuífero recarga a los esteros, debido a sus curvaturas. Esto podría estar ocurriendo en ciertos momentos del año si el acuífero se ve recargado, puesto que con los datos con los que se cuenta en el estudio, los niveles piezométricos se encuentran a ~5 m de profundidad, con respecto a la topografía, aunque no se debe ignorar el número de derechos que existen en este sector, los cuales podrían estar distorsionando la piezometría, dándole esa forma a las isopiezas, sin necesidad de que el acuífero recargue el estero.

Es por esto que, debido al aumento de la demanda y de los derechos otorgados (Figura 19; Figura 21), bajo el contexto de la Megasequía (Garreaud *et al.*, 2019), posiblemente podría ocurrir una disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos a futuros.

Se desconoce si las formaciones aledañas a los depósitos aluviales poseen bajos o altos niveles de permeabilidad, por lo que no es posible interpretar con certeza si las aguas del acuífero poseen flujos asociados a estos límites. No obstante, en estudios previos dentro de la cuenca del Río Aconcagua (Taucare *et al.*, 2020b) y Chile central (Valenzuela-Díaz *et al.*, 2020) se ha concluido que, debido a la configuración morfotectónica de Chile central, el gran número de fracturas en las formaciones rocosas aledañas a estos depósitos aluviales permiten la conexión hidráulica entre ambos dominios. Se debe mencionar, además, que los depósitos aluviales presentes alrededor de la cuenca del Río Aconcagua que se encuentran interconectados en las diversas subcuenclas existentes estarían formando un

único acuífero aluvial, independiente de las divisiones administrativas que se realizan a nivel regional, explicadas en DGA (2020).

En cuanto a los isótopos estables, se logra observar que las muestras de este estudio se encuentran paralelas a la línea meteórica local y la global, por lo que no aprecia claramente una evaporación (Figura 59a). Por otro lado, las muestras de río de Medina-Sagredo (2023), en su mayoría, también muestran esta alineación, no obstante, algunas muestras se desvían de esta tendencia, debido a que sus concentraciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ son más liviana, lo que estaría indicando evaporación en los ríos (Jasechko, 2019), concordante con el clima semi-árido de la cuenca del río Aconcagua (Falvey y Garreaud, 2007).

Junto con esto, se puede ver que las muestras nro. 8, 11, 12, 18, 19 (Clúster 1 y 3) y la mayoría de las de río, analizadas en el estudio anteriormente mencionado, poseen concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ más pesadas en comparación al resto (Figura 59a), lo que podría estar indicando que fueron precipitadas en condiciones climáticas frías (Jasechko 2019). Al comparar estas muestras con la línea media de precipitación (Figura 56b), se tiene que fueron precipitadas sobre los 2000 m s.n.m., cotas que concuerdan con climas fríos a mayores elevaciones en la cuenca del río Aconcagua. Se debe destacar, además, que las muestras 18 y 19 no pertenecen al área de estudio y, al presentar composiciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ similares a las 8, 11 y 12, se puede deducir que tales muestras provienen de aguas arriba de la cuenca, las cuales posiblemente ingresaron al área de estudio mediante aguas superficiales, como el río o canales (Figura 60), generando así una recarga alóctona de aguas subterráneas.

Continuando con las muestras nro. 1, 2, 5, 6 y 17, (Clúster 1 y 3) en primer lugar, se puede notar que no hay muestras de río de Medina-Sagredo (2023) con concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ similares (Figura 56). Por otro lado, las concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras 2, 5 y 17 evidencian que precipitaron a 1200 m s.n.m. aprox. cotas que sí son posibles encontrar en el área de estudio, en específico, hacia el E, aguas arriba por los esteros El Carretón y El Cobre (Figura 60). Las muestras 1 y 6 a precipitaron a 900 m s.n.m. aprox, igualmente pueden provenir del E del área de estudio, aunque igual es posible encontrar estas cotas hacia el N de la subcuenca. Teniendo en cuenta sus ubicaciones y que los canales de riego permiten el transporte de aguas superficiales no solo del río, sino que también de los esteros de la subcuenca, es posible que éstos pudieran transportar aguas hasta infiltrarlas en los alrededores de dichos pozos. Cabe destacar que las muestras 5, 6 y 17 poseen concentraciones de elementos mayores muy similares entre sí (Figura 32), por lo que las tres posiblemente provengan de la quebrada del Estero El Carretón. Bajo este supuesto, la recarga producida por estos canales correspondería a una recarga autóctona, puesto que tanto los esteros como los canales del área de estudio estarían favoreciendo la recarga de aguas subterráneas.

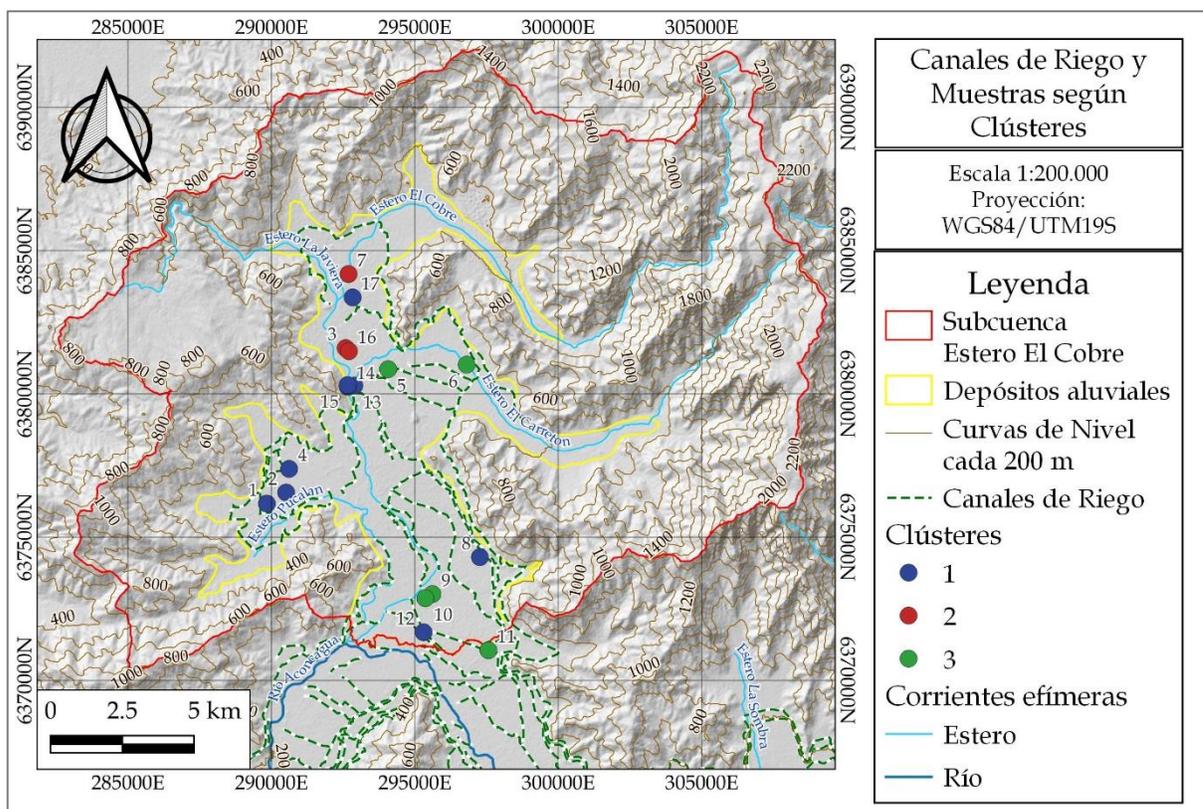


Figura 60: Mapa de canales de riego junto con las muestras del área de estudio según los clústeres jerárquicos.

Por otro lado, las concentraciones de $\delta^{18}\text{O}$ de muestras nro. 4, 9 y 10 indican que fueron precipitadas sobre los 1500 m s.n.m. (Figura 56b), lo que no coincide con las elevaciones presentes en los sectores donde se obtuvieron estas muestras (quebrada del Estero Pucalán y zona sur del área de estudio; Figura 60). Además, sus concentraciones de este isótopo poseen similitudes con las de algunas muestras de río de Medina-Sagredo (2023). Esto implica que estas muestras igualmente podrían provenir de aguas arriba de la cuenca, al igual que las muestras nro. 8, 11, 12, 18, 19, generando una recarga alóctona de aguas subterráneas, con la diferencia que provienen de elevaciones menores.

Pero esta no es la única posibilidad, debido a que tales elevaciones si se encuentran en el área de estudio, como se mencionó anteriormente, junto con no mostrar claramente evidencias de evaporación, como las muestras de río con concentraciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ similares en la Figura 56a. Por una parte, la hidroquímica de las muestras 9 y 10 se asemeja a las de las 5 y 6, en cuanto a concentración de elementos mayores y composición química bicarbonatada cálcica (Figura 32), por lo que existe la opción de que la procedencia de estas aguas igualmente sea de la quebrada del estero El Carretón, el cual es afluente del estero El Melón, estero ubicado muy cercano a los pozos de estas muestras. Asimismo, la muestra nro. 4 se ubica en el mismo sector que las 1 y 2, junto con poseer una hidroquímica muy similar entre sí (Figura 32), lo que permite deducir que las tres muestras

llegaron al sector de la misma manera. De ser este último caso la procedencia de las muestras 4, 9 y 10, la recarga sería autóctona.

Por último, las muestras nro. 3, 7, 13, 14, 15 y 16 (Clúster 1 y 2) son las que presentan las concentraciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ más livianas del área de estudio. Al comparar dichas concentraciones con la línea media de precipitación (Figura 56b), los resultados señalan que éstas precipitaron entre los 500 y 650 m s.n.m. aprox., lo que indicaría claramente una procedencia local de estas aguas. Teniendo en cuenta la ubicación de estas muestras, cercanas al cauce del estero El Cobre (Figura 60), probablemente fueron transportadas por dicho estero, hasta infiltrarse cerca de los respectivos pozos.

En resumen, en el área de estudio existe tanto recarga alóctona, producida por la infiltración de aguas superficiales proveniente del río Aconcagua y transportadas por canales y, por ende, con un efecto antrópico en cuanto a su transporte, como autóctona, ocasionada por aguas meteóricas precipitadas en las altas cotas de la subcuenca del Estero El Cobre. Estos mecanismos corresponden a recargas focalizadas que permiten distintos ingresos de aguas subterráneas.

Además, estos mecanismos pueden producir mezclas de aguas entre las precipitadas dentro de la subcuenca, como de los aportes de las aguas superficiales que ingresan a través de canales y del río Aconcagua. Se interpreta esto al observar el Clúster 1, cuyas muestras poseen orígenes diferentes y sus composiciones hidrogeoquímicas se asemejan bastante a la de los otros clústeres, dependiendo de cada sector.

Para definir con mayor certeza el origen de las aguas y los mecanismos que recargan aguas subterráneas, se requieren mayores datos para el estudio, por ejemplo, datos hidroquímicos e isotópicos de muestras de aguas superficiales de todos los esteros de la subcuenca y de aguas subterráneas de sectores que no fueron abarcados en este estudio, como las quebradas de los esteros La Javiera y El Cobre y los sectores del valle principal alrededor del estero El Melón, entre otros.

5.2. Origen de iones disueltos

El análisis exploratorio de datos determinó que la composición hidroquímica de las muestras de este estudio varía entre sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas (Figura 31; Figura 32), además permitió observar qué elementos tenían buenas o excelentes correlaciones entre sí (Figura 33), para posteriormente realizar el Análisis Estadístico Multivariante. Este análisis permitió agrupar las muestras en tres clústeres jerárquicos (Figura 41) y determinar dos factores acordes a las variables ingresadas (Tabla 7), para luego comparar ambos resultados (Figura 44). El AEM, junto con los análisis de interacción agua-roca (4.3.6.3) y de calidad de aguas (4.3.6.4) permiten interpretar con mayor certeza los posibles orígenes de los iones presentes en las aguas del acuífero aluvial del Estero El Cobre.

En la zona norte del área de estudio, en primer lugar, se encuentran las tres muestras del Clúster 2, cuya similitud geográfica es que sus respectivos pozos se encuentran bastante cercanos al estero El Cobre (Figura 60). Este estero nace aledaño al yacimiento de cobre El Soldado, por el cual lleva ese nombre. Los procesos asociados a estos yacimientos están ligados a las alteraciones hidrotermales y lixiviación natural de ciertos minerales (Wilson y Zentilli, 1999; Boric *et al.*, 2002), dando lugar a la existencia de diversas reacciones. Estas reacciones pudieron ser la clave para la incorporación de elementos traza en las aguas subterráneas del área de estudio. Bajo este contexto, las plagioclasas y calcitas, al reaccionar con CO_2 y el ácido sulfúrico proveniente de la oxidación de piritita, dieron origen a las grandes concentraciones de los elementos mayores SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ y Ca^{2+} a través de las disoluciones de calcita y plagioclasa cálcica en presencia de piritita, las cuales explican los valores de estos iones.

El gran contenido de Ca^{2+} y SO_4^{2-} en estas muestras puede deberse a reacciones ocurriendo en simultáneo, como por ejemplo disolución de plagioclasas sódicas (o intermedias) en presencia de CO_2 y disolución de estas mismas en presencia de piritita. No obstante, hay que tener en consideración que aguas arriba al estero El Cobre se encuentra la faena minera División El Soldado, operando tanto a rajo abierto como con sus tranques de relave, cuyas actividades podrían estar infiltrando aguas con concentraciones de ciertos elementos a las aguas del acuífero, tales como aniones (SO_4^{2-} , Cl^- ; Figura 26), cationes (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} ; Figura 27) y elementos trazas. Para corroborar que esta suposición, es necesario contar con mayor información para determinar una conexión hidráulica entre los tranques de relave y el acuífero aluvial, donde es necesario conocer los niveles freáticos en estos lugares, la conductividad del acuífero, pozos de monitoreo dentro de los relaves como a sus alrededores que permitan realizar análisis de la calidad del agua y de niveles piezométricos, estudios geofísicos que incluyan pruebas de resistividad eléctrica o perfiles sísmicos, entre otras opciones.

Por otro lado, el Clúster 3 posee muestras que provienen de diversas cotas, al igual que el Clúster 1 (Figura 56b), pero su diferencia radica en que las composiciones

hidroquímicas corresponden a bicarbonatadas cálcicas, al contrario que los otros clústeres, sus concentraciones iónicas tienden a ser menores y que en este clúster se encuentran agrupadas las muestras de aguas superficiales extraídas desde la subcuenca del estero Catemu (Figura 32; Figura 41). Los resultados obtenidos en el análisis de los isótopos estables y de los posibles mecanismos de recarga que tuvieron estas aguas, al ser provenientes de aguas superficiales y de la quebrada del estero El Carretón, se puede inferir que las interacciones agua-roca de estas muestras pudieron ser bastante menores, predominando la disolución de calcita.

Sumado a que los pozos de los cuales se tomaron las muestras nro. 5, 6, 9, 10 y 11 se encuentran bastante cercanas a los esteros y canales, se puede interpretar que, debido a los bajos valores de NO_3^- , estas muestras fueron afectadas en menor medida por el efecto antrópico asociado a fertilizantes por el uso de la agricultura. Según el análisis de interacción agua-roca, en este clúster predomina la disolución de plagioclasas cálcicas a intermedias y calcita en presencia de CO_2 y la disolución de plagioclasas tanto cálcicas como sódicas junto con calcita en presencia de pirita. Las similitudes hidroquímicas entre las muestras de este clúster indican que, aunque tengas distintos orígenes y diferentes mecanismos de infiltración, los procesos por los que pasaron en sus recorridos pudieron ser bastante similares.

En cuanto al Clúster 1, partiendo por la zona norte, es posible observar que las concentraciones de iones e isotópicas en las muestras nro. 13, 14 y 15 son muy similares a las del Clúster 2 (Figura 32; Figura 56), pero, aunque los valores de los iones en general son menores, los de NO_3^- son mucho más elevados. La muestra nro. 17, como se mencionó previamente, es similar en términos de concentraciones iónicas e isotópicas a las muestras del Clúster 3, aunque el valor de SO_4^{2-} y NO_3^- incrementa, además, los isótopos indican un origen similar a la muestra nro. 5 (Figura 32; Figura 56). Las muestras de la quebrada del estero Pucalán (nro. 1, 2, 4) poseen una hidroquímica similar entre sí y a las muestras nro. 13, 14 y 15, pero sus concentraciones iónicas son más bajas, junto con esto, concentraciones isotópicas muestran que sus procedencias son similares a las muestras del Clúster 3 (Figura 32; Figura 56). Las muestras nro. 8 y 12, ubicadas al sur del área de estudio, poseen una hidroquímica diferente en comparación a las otras muestras de este sector, ya que su composición es sulfatado cálcico, aunque sus altos niveles de bicarbonato y sus concentraciones isotópicas son similares a las muestras del Clúster 3, junto con esto, se debe mencionar la cercanía de estas muestras a los canales de riego y al estero El Melón (Figura 32; Figura 56).

Al observar lo anteriormente mencionado, como la cercanía de los pozos los canales de regadío y esteros (Figura 60), que los isótopos estables poseen un amplio rango de valores (Figura 56) y que la composición hidroquímica de estas muestras en ciertos sectores tiende a parecerse a la de los otros clústeres, se puede ver evidenciar mezclas de aguas provenientes de flujos de rocas y de canales. Las reacciones principales que estarían resultando en las muestras de este clúster es la disolución de plagioclasas en presencia de

CO₂ y de calcita y albita en presencia de pirita. Además, poseen los mayores niveles de nitrato, en comparación a los otros clústeres, lo que implica un mayor efecto antrópico en cuanto a los usos agrícolas tanto de suelos como de aguas.

Los factores arrojados en el análisis factorial (Figura 44; Figura 45) indican que las variables pertenecientes al Factor 1, están controladas por las interacciones agua-roca de la posible disolución de minerales asociados a las formaciones geológicas del sector, junto con las provenientes del yacimiento mineral del área de estudio. El Factor 2, por otro lado, está controlado únicamente por los aniones HCO₃⁻ y NO₃⁻, lo que implica un mayor control antrópico debido al uso de fertilizantes agrícolas y de los derechos de aguas existentes en esos sectores, al igual que por la disolución de plagioclasas y calcitas en presencia de CO₂. De ser así, sería esperable que en este factor también se incluyera al catión Ca²⁺, pero esto no ocurre debido a que las concentraciones estequiométricas de este ion son mayores a las de HCO₃⁻, lo que se explica por la existencia de diversas reacciones químicas ocurriendo en simultáneo, además de las ya mencionadas, lo que no permite tener buenas correlaciones entre estos iones.

En cuanto a la calidad del agua, se estudiaron las concentraciones de algunas variables relevantes según las normativas chilenas NCh409/1 y NCh1333. Se puede ver que se ha visto afectada en ciertos sectores debido a los altos niveles de SO₄²⁻ y NO₃⁻, destacando muestras de los Clúster 1 y 2 que sobrepasan ciertos límites de concentraciones permitidos por estas normas (Figura 53; Figura 54). Esto podría explicarse por la componente natural de disoluciones en presencia de pirita junto con componentes antrópicas que estén ligadas tanto a la minería (concentraciones de SO₄²⁻) como a la agricultura (niveles de NO₃⁻).

Si es el factor antrópico asociado a la minería el encargado de elevar las concentraciones de ciertos elementos en las aguas subterráneas, esto podría deberse por procesos relacionados procesos metalúrgicos y tratamientos de rocas (Agheli et al., 2018), donde se utilizan varios aditivos para lograr la extracción del mineral valioso en una solución acuosa (flotación). Estos reactivos químicos son utilizados para regular el pH de la solución y como depresores de minerales de ganga (ej.: pirita). Según Wills y Finch (2016), estos aditivos pueden ser la cal (CaO), hidróxido de sodio (NaOH), carbonato de sodio (NaCO₃), ácido clorhídrico (HCl), dióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfúrico (H₂SO₄). Si se llegara a comprobar conexiones hidráulicas entre el acuífero aluvial y los tranques de relaves, estos procesos podrían estar dando lugar a los incrementos de concentraciones de elementos como el sulfato, cloruro, calcio y sodio en el área de estudio, en específico, hacia la zona norte.

5.3. Modelo hidrogeológico conceptual

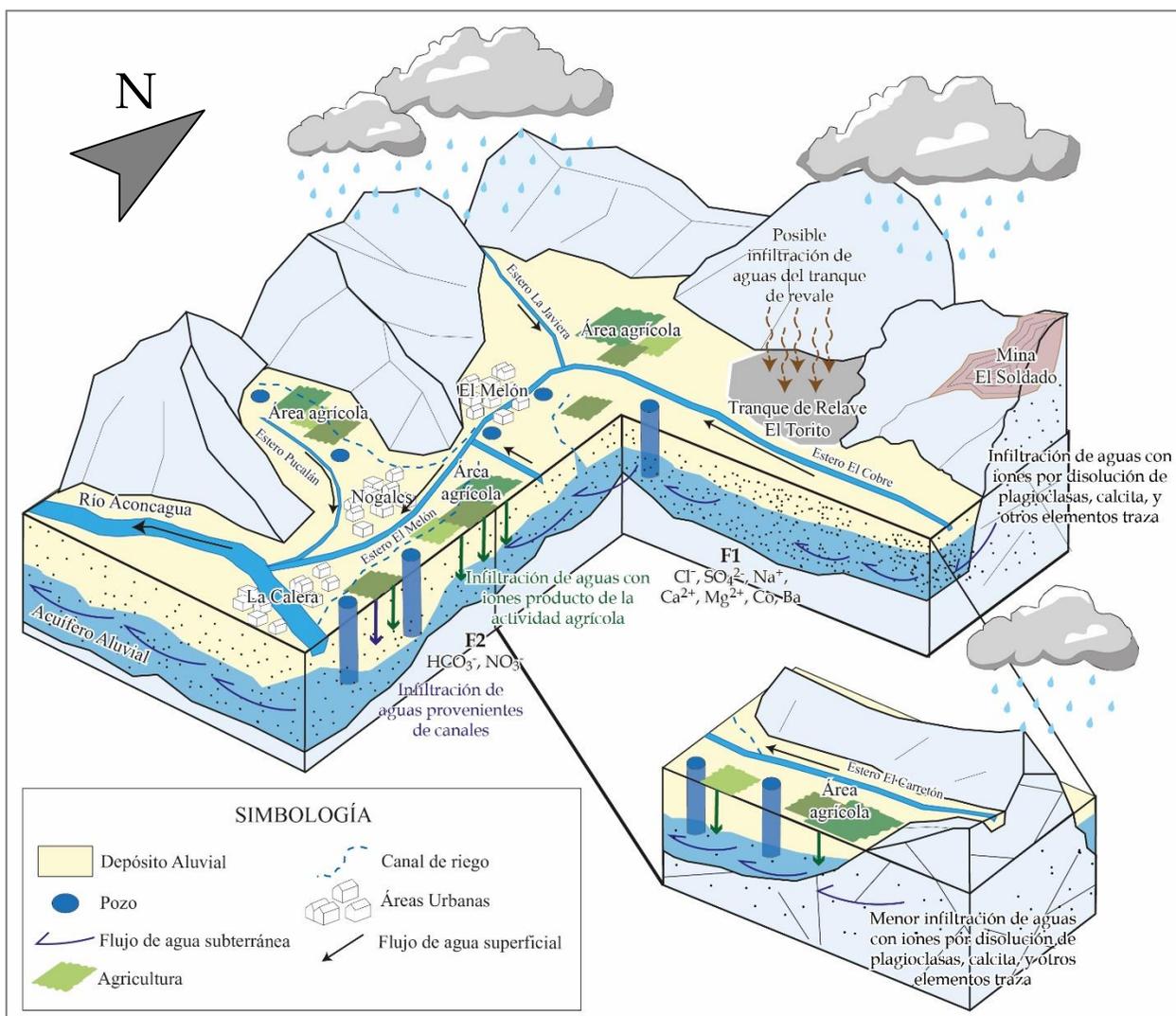


Figura 61: Modelo hidrogeológico conceptual: representación esquemática de los procesos e interacciones principales en el acuífero y en superficie. No se encuentra escalado.

Las principales fuentes de recarga de aguas subterráneas en el acuífero aluvial del Estero El Cobre corresponden a las precipitaciones, siendo ésta un tipo de recarga autóctona de tipo focalizada. Estas aguas, al infiltrarse y al fluir por el acuífero, se ven afectadas por distintos procesos. Las provenientes de la zona norte interactúan con las rocas existentes y se produce una gran incorporación de iones a las aguas que infiltran por procesos naturales asociados a la geología local y, en menor manera, por los riegos agrícolas. A su vez, estas aguas podrían verse afectadas en parte por componentes procedentes de los depósitos minerales en el área de estudio. Estos procesos, tanto naturales como antrópicos, explicarían las concentraciones elevadas de ciertos elementos (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Co , Ba , entre otros) en los sectores adyacentes al estero El Cobre, y se asocian al

Factor 1, sobre todo para las muestras del Clúster 2 y en menor medida a las del Clúster 1, caracterizado por las interacciones agua-roca, los depósitos minerales y el transporte de aguas a través de los canales de riego, lo que podría estar favoreciendo las mezclas de aguas en el último clúster mencionado.

A su vez, por el sector sur del área de estudio, igualmente se produce una recarga focalizada procedente de infiltraciones de las aguas superficiales del Río Aconcagua, las cuales provienen incluso de altitudes superiores a 2000 m s.n.m. (recargas alóctonas). Además de generarse esta recarga natural, debido al cauce principal, en la superficie existen canales de regadío que permiten el ingreso de aguas hacia el interior del área de estudio. Estas aguas poseen un predominio de iones de bicarbonato y nitrato, lo que las asocia con el Factor 2, el cual representa los procesos producidos por las interacciones agua-roca existentes tanto dentro como fuera del área de estudio, junto con un componente antrópico en cuanto a la infiltración de aguas superficiales a través de los canales, observado en los Clústeres 1 y 3, junto con infiltraciones de aguas con concentraciones de nitrato procedentes de la actividad agrícolas y de otros elementos, ligado primordialmente a muestras del Clúster 1.

Por otro lado, las aguas pertenecientes al sector este, adyacentes al estero El Carreton, no se asocian a ningún factor, lo que sugiere que los procesos que afectaron a estas aguas y que les proporcionaron los iones disueltos son diferentes a los ya descritos. Estas aguas suelen ser bicarbonatadas cálcicas y tener concentraciones iónicas bajas, por lo que la predominancia de los iones de estas aguas proviene por disoluciones naturales de minerales como plagioclasas y calcita, tanto en presencia de CO_2 como de pirita, como en la zona norte. La componente antrópica ligada al uso de sustancias por parte de la agricultura es menor, debido a las bajas concentraciones de nitratos. Estas aguas pueden desplazarse por superficie hasta ser infiltradas en las inmediaciones del estero El Melón, lo que les da un carácter de recarga autóctona y corresponden principalmente al Clúster 3.

Por último, las aguas pertenecientes al sector oeste, ubicadas en la quebrada del Estero Pucalán, poseen valores positivos para ambos factores, los que las asocian con mezclas de aguas provenientes tanto de canales como de esteros, complementando así su hidroquímica. Además, los niveles de nitratos de estas muestras se asocian a un mayor efecto antrópico en estas aguas, pues esto implica que el uso agrícola, dado por los canales de riego y el uso de fertilizantes u otras sustancias, han ayudado a incorporar ciertos elementos al acuífero en este sector. Estos procesos están asociados a las muestras del Clúster 1, cuyas aguas, al ser mezclas, pueden tener su procedencia tanto por precipitaciones dentro de la subcuenca como por aguas superficiales provenientes de canales de riego asociados a aguas arriba del río Aconcagua, por lo que la componente antrópica asociada a este sector es mayor.

Capítulo 6: Conclusiones

En el acuífero aluvial del Estero El Cobre, las actividades antrópicas han tenido un efecto relevante en cuanto a nivel y calidad de las aguas subterráneas. Los niveles piezométricos se han visto distorsionados en varios sectores del área de estudio e incluso se han generado curvas de isopiezas cerradas debido al gran aumento de la demanda de los recursos hídricos subterráneos, sobre todo por parte de la agricultura y la minería.

La calidad del agua se ha visto afectada en específico en la zona norte del área de estudio. Las aguas analizadas se caracterizan por ser de tipo sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas y, si bien, el origen de los iones corresponde principalmente a las interacciones agua-roca, en específico la disolución de plagioclasas en presencia de CO_2 y pirita, las zonas más críticas corresponden a los próximos al Estero El Cobre, ya sea por interacciones agua-roca asociadas al yacimiento mineral en sí, como a las actividades mineras que posiblemente han proporcionado iones a las aguas, destacando principalmente la presencia de sulfato. De comprobarse conexión hidráulica entre los tranques de relave y el acuífero, es posible que la minería esté afectando la calidad de las aguas.

Por otro lado, los resultados de este estudio revelan una clara influencia de la actividad agrícola y el uso de fertilizantes en la calidad de las aguas subterráneas. Se ha observado que la presencia de aniones de nitrato en las muestras de agua subterránea junto con la actividad agrícola en el área de estudio está relacionada, puesto que los sectores cuyas muestras poseen las mayores concentraciones de este ion están ligados a esta actividad económica, en cuanto al uso de suelos, derechos de aguas y la existencia de canales de riego. Estos hallazgos sugieren que la agricultura, con la aplicación de fertilizantes u otras sustancias y con la incorporación de infraestructuras para el riego en el área de estudio, han ejercido un impacto en la composición química de las aguas subterráneas.

Los mecanismos de recarga del área de estudio son de tipo focalizado. Los datos isotópicos reflejan similitudes entre ciertas muestras de este trabajo con muestras de río extraídas aguas arriba en la cuenca, lo que permite inferir ingresos de aguas superficiales a la subcuenca estudiada a través del río Aconcagua y canales de riego, siendo este un tipo de recarga alóctono. A su vez, las composiciones isotópicas y las concentraciones iónicas han permitido mostrar que existen además recargas autóctonas en el área de estudio, proveniente de aguas meteóricas que se han infiltrado mediante su paso por los esteros y su movilidad por los canales de riego.

En resumen, el efecto antrópico ha tenido efectos tanto positivos como negativos. En primer lugar, las infraestructuras creadas han permitido mayor ingreso de aguas al acuífero, lo que se traduce en un aumento de la piezometría y de las aguas superficiales existentes en la subcuenca, pero a su vez, las extracciones de aguas subterráneas han distorsionado los niveles piezométricos a lo largo de la subcuenca, llegando incluso a generar

conoides de descenso. Por otro lado, las actividades antrópicas, en específico la agricultura, han proporcionado iones disueltos a las aguas subterráneas, alterando las concentraciones químicas de ciertos elementos, como por ejemplo el nitrato. Además, puede que la minería haya afectado a las concentraciones de ciertos elementos en el área de estudio, pero se requiere más información para corroborar este supuesto.

Es de suma importancia profundizar en la comprensión y evaluación de cómo las actividades humanas, como la agricultura y la minería, afectan los recursos hídricos subterráneos. Esto es especialmente relevante en regiones donde estas actividades son fundamentales para la economía y la subsistencia de las comunidades locales, como es el caso de la subcuenca del Estero El Cobre, en la región de Valparaíso.

En cuanto a recomendaciones, se sugiere que, para un mejor análisis hidroquímico y piezométrico, se involucren muestreos de aguas superficiales a lo largo de los valles laterales y el valle principal, junto con nuevas mediciones de los niveles de aguas subterráneas en sectores como en valle del Estero La Javiera, aguas arriba por el Estero El Cobre e incluir que se realicen nuevos muestreos los sectores aledaños a la localidad de nogales, lo cual ayudaría para tener una comprensión más global de lo que ocurre en todo el acuífero aluvial del Estero El Cobre. También, se recomienda realizar monitoreos continuos para evaluar la calidad de las aguas subterráneas y añadir nuevas metodologías a los análisis, como, por ejemplo, análisis geoestadísticos y estudios geofísicos.

Bibliografía

- Agheli, S., Hassanzadeh, A., Hassas, B. V., & Hasanzadeh, M., 2018. *Effect of pyrite content of feed and configuration of locked particles on rougher flotation of copper in low and high pyritic ore types*. International Journal of Mining Science and Technology, 28(2), 167-176.
- Al-Taai, S. H. H., 2021. *Water pollution Its causes and effects*. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 790, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- Angermann, D., Klotz, J., Reigber, C., 1999. *Space-geodetic estimation of the nazca-south America euler vector*. Earth Planet Sci. Lett. 171, 329-334.
- Appelo, C. A. J., & Postma, Dieke., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema.
- Arancibia, G., 2004. *Mid-cretaceous crustal shortening: evidence from a regional-scale ductile shear zone in the Coastal Range of central Chile (32°S)*. J. S. Am. Earth Sci. 17, 209-226.
- Arriagada, C., Ferrando, R., Córdova, L., Morata, D., Roperch, P., 2013. *El Oroclino del Maipo: un rasgo estructural de primer orden en la evolución geodinámica Mioceno a Reciente en los Andes de Chile central*. Andean Geol. 40, 419-437.
- Barrett, B.S., Garreaud, R.D., Falvey, M., 2009. *Effect of the Andes Cordillera on precipitation from a midlatitude cold front*. Mon. Weather Rev. 137, 3092-3109.
- Bartlett, M. S., 1950. *Tests of significance in factor analysis*. British Journal of Psychology, 3, 77-85.
- Boric, R., Holmgren, C., Wilson, N., Zentilli, M., 2002. *The geology of the El Soldado manto type Cu (Ag) deposit, central Chile*. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective, Volume 2; PGC Publishing, Adelaide, pp 185-205.
- Boyce, D., Charrier, R., & Farías, M., 2020. *The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and Structural Analysis of Mid-Cretaceous Deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50' S)*. Tectonics, 39(2), e2019TC005825.
- Cahill, T., Isacks, B.L., 1992. *Seismicity and shape of the subducted Nazca plate*. J. Geophys. Res. 97, 503-520.
- Canales, A. I., & Canales-Cerón, M., 2016. *Población y territorio en el modelo económico chileno. El caso de la comarca del Aconcagua*. Papeles de población, 22(88), 9-46.
- Castro, L. M., Díaz, Á. J. Á., & Escobar, Y. C., 2012. *Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos*.
- Cembrano, J., Lara, L., 2009. *The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review*. Tectonophysics 471, 96-113.

- Cembrano, J., Lavenue, A., Yáñez, G., Riquelme, R., García, M., González, G., Hérail, G., 2007. *Neotectonics., the Geology of Chile*.
- Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia de Chile (CR)²., 2021. *Explorador Web*. Recuperado en 2023, de <https://explorador.cr2.cl/>
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, S., Flynn, J.J., Iturra, N., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R., Wyss, A.R., 2005. *The Abanico Extensional Basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion, and relation to shallow seismic activity and Andean uplift*, *Neues Jahrb. Geol. Palaeontol. Abh.* 236, 43–47.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. *Tectonostatigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile*. In: Moreno, T., Gibbons, W. (Eds.), *The Geology of Chile*. Geological Society of London, pp. 21–114.
- Clark, I., 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. 1st ed. 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*, 353(3–4), 294–313.
- Congreso Nacional de Chile, 1981. *Decreto con fuerza de ley no. 1122: Código de aguas*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Chile.
- Congreso Nacional de Chile, 2019. *Resolución 1238 exenta: Determina las condiciones técnicas y los plazos a nivel nacional para cumplir con obligación de instalar y mantener un sistema de monitoreo y transmisión de extracciones efectivas en las obras de captación de aguas subterráneas*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Chile.
- Congreso Nacional de Chile, 2022. *Ley 21435: Reforma el código de aguas*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Chile.
- Corporación Nacional Forestal, 2019. *Catastros de Uso de Suelo y Vegetación*. Flora y Fauna. Infraestructura de Datos Geoespaciales. Ministerio de Bienes Nacionales. Recuperado en 2023 de <https://www.ide.cl/index.php/flora-y-fauna/item/1513-catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion>
- Custodio, E. Llamas, J., 1983. *Hidrología Subterránea*. Vol. 1, pp. 1005-1091. Barcelona: Omega.
- Daniele, L., 2007. *Aplicación de sistemas de información geográfica al estudio de acuíferos costeros complejos. Caso del campo de Dalías*. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.
- DGA, 2022. *Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA* [Búsqueda y descarga de archivos]. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. Obtenido de https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx

- DGA, 2015. *Determinación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas en el Valle del Río Aconcagua*. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.
- DGA, 2021. *Monitoreo de extracciones efectivas* [Búsqueda y descarga de archivos]. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. Obtenido de <https://snia.mop.gob.cl/cExtracciones2/#/busquedaPublica>
- DGA, 2020. *Plan estratégico de gestión hídrica en la Cuenca de Aconcagua*. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.
- Falvey, M., & Garreaud, R., 2007. *Wintertime precipitation episodes in central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences*. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171-193.
- Famiglietti, J. S., & Ferguson, G., 2021. *The hidden crisis beneath our feet*. *Science*, 372(6540), 344-345.
- Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., David, C., Tassara, A., Tapia, F., Fock, A., 2010. *Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: implications for Andean Mountain building*. *Tectonics* 29.
- Fock, A., Charrier, R., Farías, M. & Muñoz, M., 2006. *Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile central: Inversión de la cuenca de Abanico (33°–34°S)*, Ser. Publ. Espec. 6, pp. 48–55, Asoc. Geol. Argent., Buenos Aires.
- Frengstad, B., Banks, D., 2007. *Universal controls on the evolution of groundwater chemistry in shallow crystalline rock aquifers: The evidence from empirical and theoretical studies*. In: Krásný, J., Sharp, J.M. (Eds.), *Groundwater in Fractured Rocks: IAH Selected Paper Series*. CRC Press, pp. 275–289.
- Fuentes, F., Aguirre, L., Vergara, M., Valdebenito, L., Fonseca, E., 2004. *Miocene fossil hydrothermal system associated with a volcanic complex in the Andes of Central Chile*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 138 (1–2), 139–161.
- Garreaud, R., D., 2009. *The Andes climate and weather*. *Advances in geosciences*, 22, 3-11.
- Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. *The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 (12), 6307–6327.
- Garreaud R., D., Boisier J., P., Rondanelli R., Montecinos A., Sepúlveda H., H., Veloso-Aguila D., 2019. *The Central Chile Mega Drought (2010–2018): a climate dynamics perspective*. *Int J Climatol*.
- Giambiagi, L., Tassara, A., Echaurren, A., Julve, J., Quiroga, R., Barrionuevo, M., Liu, S., Echeverría, I., Mardóñez, D., Suriano, J., Mescua, J., Lossada, A., Spagnotto, S.,

- Bertoa, M., Lothari, L., 2022. *Crustal anatomy and evolution of a subduction-related orogenic system: Insights from the Southern Central Andes (22-35°S)*. Earth-Sci. Rev
- Gutscher, M.A., Spakman, W., Bijwaard, H., Engdahl, E.R., 2000. *Geodynamics of flat subduction: seismicity and tomographic constraints from the Andean margin*. Tectonics 19, 814–833.
- Horton, B.K., Capaldi, T.N., Perez, N.D., 2022. *The role of flat slab subduction, ridge subduction, and tectonic inheritance in Andean deformation*. Geology.
- IBM Corporation, 2021. *Test de KMO y Bartlett*. IBM Knowledge Center. <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/28.0.0?topic=detection-kmo-bartletts-test>
- Infraestructura de Datos Geográficos, 2021. *Canales*. <https://www.ide.cl/index.php/aguas-continentales/item/1507-canales>
- Instituto Nacional de Estadísticas, 2021. *Número y superficie (ha) de Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) por categoría de uso del suelo a nivel nacional, regional y comunal, para el año agrícola de referencia 2020/2021*. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>
- Instituto Nacional de Normalización, 2005. *Norma chilena NCh 409/1. Agua potable parte 1: requisitos*. Chile, p 14.
- Instituto Nacional de Normalización, 1987. *Norma Chilena 1333, Of78. Requisitos de Calidad del agua para diferentes usos*. Modificada en 1987.
- Jara, J. J., Barra, F., Reich, M., Leisen, M., Romero, R., & Morata, D., 2021. *Episodic construction of the early Andean Cordillera unravelled by zircon petrochronology*. Nature communications, 12(1), 4930.
- Jasechko, S., 2019. *Global isotope hydrogeology—review*. Reviews of Geophysics, 57, 835-965.
- Jayakumar, R., & Siraz, L., 1997. *Factor analysis in hydrogeochemistry of coastal aquifers—a preliminary study*. Environmental Geology, 31, 174-177.
- Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendinger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A., Ando, C.J., 1983. *Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate*. GSA Bulletin. 94, 341–361.
- Kaiser, H. F., 1958. *The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis*. Psychometrika, 23(3), 187-200.
- Kaiser, H.F., 1970. *A second generation little jiffy*. Psychometrika 35, 401–415.
- Kay, S. M., & Abbruzzi, J. M., 1996. *Magmatic evidence for Neogene lithospheric evolution of the central Andean “flat-slab” between 30°S and 32°S*. Tectonophysics, 259(1-3), 15–28.

- Klohn, E., Holmgren, C., & Ruge, H., 1990. *El Soldado, a Stratabound Copper Deposit Associated with Alkaline Volcanism in the Central Chilean Coastal Range*. *Stratabound Ore Deposits in the Andes*, 435–448.
- Lerman, A., & Wu, L., 2008. *Kinetics of Global Geochemical Cycles*. *Kinetics of Water-Rock Interaction*, 655–736.
- Manzur, M.I., 2005. *Situación de la biodiversidad en Chile: desafío para la sustentabilidad*. In: Programa Chile Sustentable, 208 pp.
- Martinod, J., Husson, L., Roperch, P., Guillaume, B., Espurt, N., 2010. *Horizontal subduction zones, convergence velocity and the building of the Andes*. *Earth Planet Sci. Lett.* 299, 299–309.
- Medina-Sagredo, A. M., 2023. *Efecto antrópico en el acuífero aluvial de San Felipe, Región de Valparaíso*. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile.
- Merlet, H., 2016. *Diagnóstico para desarrollar plan de riego en Cuenca de Aconcagua*. Centro de Información de Recursos Naturales (CRN), Santiago, Chile.
- Molina, P. X., Rodríguez, B. X., Aránguiz, A. A. (2010). *Análisis de la composición fisico-química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua*. Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). Santiago, Chile, p. 69
- Montecinos, A., Aceituno, P., 2003. *Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies*. *J. Clim.*
- Mpodozis, C., Ramos, V.A., 1990. *The Andes of Chile and Argentina*. In: Ericksen, G.E., Cañas Pinochet, M.T., Reinemund, J.A. (Eds.), *Geology of the Andes and Its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources: Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources*. *Earth Science Series*, vol. 11. pp. 59–90.
- Olson, C. F., 1995. *Parallel algorithms for hierarchical clustering*. *Parallel computing*, 21(8), 1313-1325.
- Parada, M.A., Levi, B., Nyström, J.O., 1991. *Geochemistry of the Triassic to Jurassic plutonism of central Chile (308 to 338 S); petrogenetic implications and a tectonic discussion*. *Geological Society of America, Special Paper 265*, 99–112.
- Pardo-Casas, F., Molnar, P., 1987. *Relative motion of the nazca (farallon) and south American plates since late cretaceous time*. *Tectonics* 6, 233–248.
- Pérez-Soto, F., 2017. *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile*. Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros LTD (UTP). Santiago, Chile.
- Peters, N. E., & Meybeck, M., 2000. *Water quality degradation effects on freshwater availability: impacts of human activities*. *Water International*, 25(2), 185-193.

- Piracés, R., 1976. *Estratigrafía de la Cordillera de la Costa, entre la Cuesta El Melón y Limache*. In Congreso Geológico Chileno, No. 1, Actas, Vol. 1, p. A65-82. Santiago.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O., Pérez, D.J., 2002. *The pampean flat-slab of the central Andes*. J. S. Am. Earth Sci. 15, 59–78.
- Reich, M., Deditius, A., Chryssoulis, S., Li, J. W., Ma, C. Q., Parada, M. A., Barra, F., & Mittermayr, F., 2013. *Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 104, 42-62.
- Ribbe, L., Delgado, P., Salgado, E., & Flügel, W.-A., 2008. *Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pochochay watershed, Chile*. Desalination, 226(1-3), 13–20.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., 1991. *Hoja Illapel, Región de Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 69, 1 mapa 1:250.000.
- Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Boric, R.; Espiñeira, D., 1993. *Hoja Quillota y Portillo. V Región*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile 73, 1 mapa escala 1:250.000. Acompaña Informe Inédito 7644.
- Rodríguez, M. P., Charrier, R., Brichau, S., Carretier, S., Farías, M., de Parseval, P., & Ketcham, R. A., 2018. *Latitudinal and longitudinal patterns of exhumation in the Andes of north-central Chile*. Tectonics 37, 2863-2886.
- Rossel, P., Oliveros, V., Ducea, M. N., Charrier, R., Scaillet, S., Retamal, L., & Figueroa, O., 2013. *The Early Andean subduction system as an analogue to island arcs: Evidence from across-arc geochemical variations in northern Chile*. Lithos, 179, 211–230.
- Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, S., Réveillet, M., Yáñez, E., Valois, R., 2019. *Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes*. Reg. Environ. Chang. 19 (5), 1263–1279.
- Servicio de Impuestos Internos, 2023. *Estadísticas de Empresas por Comuna y Actividad económica*. https://www.sii.cl/sobre_el_sii/estadisticas_de_empresas.html
- Servicio Nacional de Geología y Minería, 2014. *Sistema de Información de Yacimientos Minerales de Chile, Ficha del Yacimiento N° 5684: Santa Emiliana*.
- Sheikhy Narany, T., Ramli, M. F., Aris, A. Z., Sulaiman, W. N. A., Juahir, H., & Fakharian, K., 2014. *Identification of the hydrogeochemical processes in groundwater using classic integrated geochemical methods and geostatistical techniques, in Amol-Babol Plain, Iran*. The Scientific World Journal, 2014.
- Shen, H., Leblanc, M., Tweed, S., & Liu, W., 2015. *Groundwater depletion in the Hai River Basin, China, from in situ and GRACE observations*. Hydrological Sciences Journal, 60(4), 671-687.

- Shiker, M. A., 2012. *Multivariate statistical analysis*. British Journal of Science, 6(1), 55-66.
- Somoza, R., 1998. *Updated azca (Farallon) – south America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region*. J. S. Am. Earth Sci. 11, 211–215.
- Stern, C.R., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J.E., Lara, L.E., Naranjo, J.A., Parada, M.A., Alexandra Skewes, M., 2007. *Chilean volcanoes*. The Geo Chile.
- Tassara, A., Götze, H.-J., Schmidt, S., Hackney, R., 2006. *Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin*. J. Geophys. Res. Solid Earth. -]111, 9404.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguier, B., Vallejos, A., Arancibia, G., 2020a. *Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile*. Sci. Total Environ. 722, 137824.
- Taucare, M., Viguier, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G., Leonardi, V., 2020b. *Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile)*. Hydrogeol. J.
- Taucare, M., Roquer, T., Heuser, G., Pérez-Estay, N., Arancibia, G., Yáñez, G., Viguier, B., Figueroa, R., Daniele, L., 2022. *Selective reactivation of inherited fault zones driven by stress field changes: Insights from structural and paleostress analysis of the Pucuro Fault Zone, Southern Central Andes (32.8°S)*. Journal of South American Earth Sciences, 118, 103914.
- Taucare, M., Viguier, B., Figueroa, R., & Daniele, L., 2024. *The alarming state of Central Chile's groundwater resources: A paradigmatic case of a lasting overexploitation*. Science of The Total Environment, 906, 167723.
- Thomas, H., 1958. *Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta de Barriga*. Inst, Invest. Geolog. Boletín No. 2. p.86. Santiago. Chile.
- Treskow Guzmán, V. A., 2019. *Drenaje ácido natural: el caso de Campos de Ahumada, Chile Central*. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile.
- Valenzuela-Díaz, M. J., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M. A., McPhee, J., Garcia, A., Correa-Burrows, J. P., & Navarro-Valdivia, L., 2020. *Hydrogeochemical and environmental water quality standards in the overlap between high mountainous natural protected areas and copper mining activities (Mapocho river upper basin, Santiago, Chile)*. Journal of Hydrology, 588, 125063.
- Vergara, M., Levi, B., Nyström, J. O., & Cancino, A., 1995. *Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile*. Geological Society of America Bulletin, 107, 1427–1440.

- Viale, M., & Garreaud, R., 2015. *Orographic effects of the subtropical and extratropical Andes on upwind precipitating clouds*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(10), 4962-4974.
- Wang, S., Yu, H., Zhang, Q., Zhao, Y., 2018. *Absolute plate motions relative to Deep mantle plumes*. *Earth Planet Sci. Lett.* 490, 88–99.
- Warnaars, F. W., Holmgren D, C., & Barassi F, S., 1985. *Porphyry copper and tourmaline breccias at Los Bronces-Rio Blanco, Chile*. *Economic Geology*, 80(6), 1544-1565.
- Wills, B., A., & Finch, J., 2016. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (Vol. VIII)*. Canada.
- Wilson, N. S., & Zentilli, M., 1999. *The role of organic matter in the genesis of the El Soldado volcanic-hosted manto-type Cu deposit, Chile*. *Economic Geology*, 94(7), 1115-1135.
- Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C., Selles, D., 2002. *The Challenger-Juan Fernández-Maipo major tectonic transition of the Nazca-Andean subduction system at 33-34°S: geodynamic evidence and implications*. *J. S. Am. Earth Sci.* 15, 23–38.
- Yáñez, G., Ranero, C.R., Von Huene, R., Díaz, J., 2001. *Magnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°-34°S): the role of the Juan Fernández Ridge in the late Tertiary evolution of the margin*. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 106, 6325–6345.

Anexos

Anexo A: Actividades económicas

Tabla 10: Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Extraído de Servicio de Impuestos Internos (2023).

1. Cultivo de plantas no perennes
Cultivo de trigo Cultivo de maíz Cultivo de porotos Cultivo de otras legumbres (excepto porotos y lupino) Cultivo de semillas de cereales, legumbres y oleaginosas (excepto semillas de raps y maravilla) Cultivo de papas Cultivo de semillas de hortalizas Cultivo de hortalizas y melones Cultivo de flores Cultivos forrajeros en praderas mejoradas o sembradas; cultivos suplementarios forrajeros
2. Cultivo de plantas perennes
Cultivo de frutas tropicales y subtropicales (incluye el cultivo de paltas) Cultivo de cítricos Cultivo de frutas de pepita y de hueso Cultivo de otros frutos y nueces de árboles y arbustos Cultivo de plantas con las que se preparan bebidas (incluye el cultivo de café, té y mate) Cultivo de otras plantas perennes
3. Propagación de plantas
Cultivo de plantas vivas incluida la producción en viveros (excepto viveros forestales)
4. Ganadería
Cría de ganado bovino para la producción lechera Cría de ganado bovino para la producción de carne o como ganado reproductor Cría de aves de corral para la producción de huevos Apicultura Cría de otros animales n.c.p.
5. Cultivo de productos agrícolas en combinación con la cría de animales
Cultivo de productos agrícolas en combinación con la cría de animales (explotación mixta)
6. Actividades de apoyo a la agricultura y la ganadería y actividades poscosecha
Actividades de apoyo a la agricultura Actividades poscosecha
7. Silvicultura y otras actividades forestales
Explotación de viveros forestales
8. Extracción de madera
Extracción de madera
9. Servicios de apoyo a la silvicultura
Servicios de corta de madera a cambio de una retribución o por contrata

Tabla 11: Número y superficie de Unidades Productivas Agropecuarias (UPA) por categoría de uso del suelo en la comuna de Nogales, año agrícola de referencia 2020/2021. Extraído de INE (2021).

	Número de UPA	Superficie (ha)	Superficie (km ²)
Total	237	19,651.28	196.51
Cereales	10	42.30	0.42
Leguminosas y tubérculos	35	71.39	0.71
Cultivos industriales	0	0.00	0.00
Hortalizas, hongos, aromáticas, medicinales y condimentarias	44	96.96	0.97
Frutales	115	2,575.35	25.75
Vides para vinificación y uvas pisqueras	1	0.40	0.00
Flores de corte	19	15.74	0.16
Semilleros	4	61.70	0.62
Viveros y césped alfombra	20	24.38	0.24
Forrajeras	37	105.55	1.06
Plantaciones forestales	2	853.89	8.54
Bosque nativo	11	4,244.62	42.45
Praderas mejoradas	0	0.00	0.00
Praderas naturales	6	1,380.40	13.80
Terrenos productivos no trabajados	133	2,419.85	24.20
Matorrales	4	1,301.25	13.01
Terrenos no productivos	20	4,983.31	49.83
Infraestructura	183	1,474.20	14.74

Tabla 12: Actividad minera en la comuna de Nogales. Extraído de DGA (2020).

Nombre Empresa	Nombre Referencia	Recurso Productivo	Nombre Instalación	Tipo de Instalación
Alejandro Jaime López Aliaga	Planta de flotación Veta del Agua	Cobre	Cancha de concentrado	cancha de acopio
			Chancado primario	planta chancado
			Chancado secundario	planta chancado
			Flotación	planta concentradora
			Molienda	planta molienda
			Sala eléctrica molienda y flotación	subestación eléctrica
			Taller de mantenimiento	talleres y maestranza
Anglo American Sur S.A.	División El Soldado	Cobre		estación de compresores
				muestrera y/o laboratorio
				piscinas de emergencia
				planta chancado
				planta concentradora
				planta molienda
				subestación eléctrica
				talleres y maestranza
			Instalaciones administrativas	
			Mina El Soldado/Botadero El Carmen	
			Mina El Soldado/Botadero El Sauce	
			Mina El Soldado/Botadero San José	
			Mina El Soldado/Rajo El Soldado	mina rajo abierto
			Mina El Soldado/Rajo Veta Blanca	mina rajo abierto
			Mina El Soldado/Taller Portezuelo	mina rajo abierto
			Piscina de agua recuperada y agua industrial	planta concentradora
			Planta de flotación de arenas	planta concentradora
Planta de óxidos/Planta de chancado	planta chancado			
Tranque El Torito/Estación de ciclones	equipos de bombeo			
Tranque El Torito/Taller de mantenimiento	talleres y maestranza			
Molino de Minerales Pla LTDA.	Planta Moliplas	Carbonatos de Calcio	Chancado	planta chancado
			Envasado de carbonato	planta molienda
			Molienda	planta molienda

Anexo B: Datos piezométricos

Tabla 13: Datos piezométricos de pozos de este trabajo.

Código	mE	mN	Altitud [m s.n.m.]	Profundidad [m]	Cota Hidráulica [m s.n.m.]
1	289842	6376174	261	8.00	253.00
2	290514	6376563	257	5.75	251.25
3	292588	6381601	272	7.50	264.50
4	290618	6377386	254	5.85	248.15
5	294069	6380866	276	8.36	267.64
6	296808	6381023	307	7.51	299.49
7	292690	6384185	287	7.38	279.62
8	297267	6374307	257	5.24	251.76
9	295612	6373019	243	5.03	237.97
10	295368	6372873	243	5.30	237.70
11	297565	6371060	275	12.76	262.24
12	295305	6371686	247	1.50	245.50
13	292894	6380292	267	9.00	258.00
14	292665	6380248	267	8.00	259.00
15	292657	6380314	266	2.30	263.70
16	292704	6381495	273	6.50	266.50
17	292832	6383370	279	6.97	272.03

Tabla 14: Datos piezométricos de pozos DGA.

Código DGA	mE	mN	Altitud [m s.n.m.]	Profundidad [m]	Cota hidráulica [m s.n.m.]
05424010-4	296559	6373022	247	2.31	244.69
OB-0504-344	292962	6380118	263	7.00	256.00
OB-0504-357	293135	6379531	264	8.90	255.10
OB-0504-358	293239	6378845	262	9.65	252.35
OB-0504-359	292662	6380318	266	7.61	258.39
OB-0504-360	292731	6380081	262	10.00	252.00
OB-0504-361	292878	6380338	269	19.50	249.50
OB-0504-362	292806	6380201	266	9.40	256.60
OB-0504-363	294913	6374397	244	9.48	234.52
OB-0504-364	294959	6374152	244	14.40	229.60
OB-0504-365	294700	6374384	246	13.20	232.80
OB-0504-366	294643	6374634	244	21.80	222.20
OB-0504-368	294470	6375147	246	17.97	228.03
OB-0504-628	290216	6376426	257	5.64	251.36
OB-0504-632	295660	6375065	245	5.56	239.44
OB-0504-818	294973	6371311	248	11.57	236.43
OB-0504-819	294983	6371240	247	10.19	236.81

OB-0504-932	293390	6384760	297	8.47	288.53
OB-0504-1015	289135	6374904	276	2.97	273.03
OB-0504-1059	295976	6382682	302	7.91	294.09
OB-0504-1066	294972	6380645	285	10.63	274.37
OB-0504-1067	290075	6375685	263	8.86	254.14
OB-0504-1068	289282	6375585	266	7.85	258.15
OB-0504-1070	290087	6377340	256	4.36	251.64
OB-0504-1073	293465	6383993	290	4.69	285.31
OB-0504-1074	296232	6381915	296	9.03	286.97
OB-0504-1075	295714	6380288	296	14.72	281.28
OB-0504-1115	295020	6372860	242	10.20	231.80
OB-0504-1116	294818	6372504	242	13.40	228.60
OB-0504-1185	292539	6377315	257	13.33	243.67
OB-0504-1422	294425	6378146	272	29.33	242.67
OB-0504-1566	297248	6373205	258	4.80	253.20

Tabla 15: Ubicación de pozos DGA para el análisis de niveles anuales.

Pozo	mE	mN
Fundo El Carmen	296559	6373022
Pucalan de Nogales	293890	6377998
Asentamiento Nogales	293894	6377974

Tabla 16: Niveles anuales en [m] de pozos DGA, durante el periodo 1983-2021.

Pozo	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Fundo El Carmen	0.60	0.55	0.60	0.48	0.66	0.63	0.77	0.61	0.94	0.72	0.86	0.79	0.73
Pucalan de Nogales	0.44	0.56	0.80	0.89	0.96	0.85	0.98	1.01	0.81	0.67	0.76	0.81	0.87
Asentamiento Nogales	2.32	2.22	3.36	4.09	2.48	4.45	5.36	4.36	5.67	2.04	4.32	3.28	5.18

Pozo	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Fundo El Carmen	0.57	0.92	0.31	0.36	0.48	0.61	0.91	1.05	0.74	0.50	0.66	0.85	0.87
Pucalan de Nogales	1.06	1.09	0.90	1.10	0.90	0.70	0.60	0.48	2.11	3.61	3.23	3.03	1.75
Asentamiento Nogales	5.65	5.28	3.98	5.61	4.84	5.26	5.70	3.95	5.71	4.89	4.55	4.05	4.42

Pozo	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Fundo El Carmen	0.78	0.72	0.98	1.15	1.27	1.27	2.10	1.20	1.65	1.51	1.80	1.87	2.39
Pucalan de Nogales	1.46	0.77	0.68	1.92	4.23	1.59		5.29		6.55	7.77		
Asentamiento Nogales	5.12	5.24	6.90	5.51	6.10	6.74	8.18	4.82	5.32	6.86	8.21	7.31	7.65

Anexo C: Datos hidrogeoquímicos

Tabla 17: Ubicación de las muestras de este estudio.

Muestra	mE	mN	Cota [m]	Tipo
1	289842	6376174	208.00	Pozo
2	290514	6376563	235.00	Pozo
3	292588	6381601	250.00	Pozo
4	290618	6377386	233.00	Pozo
5	294069	6380866	248.00	Pozo
6	296808	6381023	276.00	Pozo
7	292690	6384185	263.00	Pozo
8	297267	6374307	227.00	Pozo
9	295612	6373019	215.00	Pozo
10	295368	6372873	216.00	Pozo
11	297565	6371060	242.00	Pozo
12	295305	6371686	229.00	Pozo
13	292894	6380292	247.00	Pozo
14	292665	6380248	239.00	Pozo
15	292657	6380314	215.00	Pozo
16	292704	6381495	245.00	Pozo
17	292832	6383370	246.00	Pozo
18	315485	6372934	448.00	Río
19	319421	6377129	453.00	Canal

Tabla 18: Elementos mayores y sílice en [ppm].

Muestra	Cl-	SO42-	HCO3-	NO3-	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	SiO2
1	66.98	170.22	157	48.42	28.0	0.7	88.79	36.08	34.2
2	59.24	171.96	148	62.73	31.4	1.39	84.28	34.58	36.4
3	49.32	441.03	139	22.3	37.6	1.12	151	49.3	16.0
4	32.69	167.50	185	78.31	24.0	1.12	96.14	31.04	37.0
5	10.06	65.75	162	33.6	13.7	1.88	41.32	21.66	28.0
6	8.13	46.58	161	17.85	16.0	0.34	46.23	12.79	44.4
7	68.89	674.74	140	22.72	59.2	1.32	205.6	71.7	24.4
8	28.87	179.77	213	42.81	23.1	7.23	78.88	42.35	42.4
9	10.70	77.44	152	15.55	17.9	1.41	46.51	17.84	47.0
10	11.47	81.43	193	22.38	18.85	1.53	55.22	21.38	46.0
11	15.07	105.87	181	23.72	20.3	1.45	56.93	25.72	41.2
12	28.25	220.3	321	55.02	29.2	1.17	160	27.68	29.2
13	41.84	323.16	140	32.19	31.0	1.10	114	43.75	25.6
14	48.44	290.53	181	39.84	31.8	1.00	119.3	43.75	29.2
15	48.46	270.25	186	44.95	31.8	1.08	116.9	42.05	33.6

16	51.22	434.89	135	27.32	35.2	0.93	147.3	52.4	24.8
17	27.73	150.06	141	43.36	25.4	0.71	60.27	31.77	37.2
18	22.97	143.70	245	15.20	16.90	4.55	81.80	31.18	27.20
19	13.80	91.61	170	12.70	18.50	2.60	70.69	11.65	18.00

Tabla 19: Elementos menores (Li, Be, B, Al, V, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu) en [ppb].

Muestra	Li	Be	B	Al	V	Cr	Fe	Mn	Co	Ni	Cu
1	1.1	0.001	18.85	4.17	2.72	0.01	10	1.94	0.39	5.55	2.14
2	1.17	0.001	34.51	5.15	3.21	0.01	13	2.43	0.35	5.09	3.5
3	0.41	0.001	67.76	0.03	2	0.01	29	4.59	0.73	10.63	14.17
4	1.24	0.001	45.43	2.58	5.81	0.01	11	0.47	0.39	5.65	5.32
5	0.28	0.001	83.47	13.13	2.93	0.01	13	4.04	0.18	2.55	5.11
6	0.6	0.001	64.99	7.94	6.23	0.01	4	1.99	0.19	2.76	7.9
7	0.33	0.001	71.49	31.21	2.5	0.01	53	7.78	1	14.25	9.79
8	0.64	0.001	71.23	4.42	6.06	0.01	10	1.05	0.33	4.76	4.0
9	0.69	0.001	41.83	4.89	8.13	0.01	10	0.9	0.18	2.63	0.025
10	1.66	0.001	40.37	3.55	9.18	0.01	8	0.66	0.22	3.24	13.97
11	0.39	0.001	34.74	6.7	5.18	0.01	23	2.18	0.23	3.4	0.6
12	1.67	0.001	165.14	4.18	2.7	0.01	4	0.78	0.79	11.22	18.41
13	0.43	0.001	69.01	9.79	2.6	0.01	25	2.08	0.57	8.21	1.84
14	0.84	0.001	65.47	6.27	2.9	0.01	16	1	0.59	8.14	1.97
15	1.38	0.001	60.68	11.34	3.2	0.01	14	1.57	0.6	8.19	1.76
16	0.42	0.001	64.26	10.79	1.9	0.01	19	3.71	0.79	16.81	4.82
17	0.39	0.001	33.63	3.44	1.31	0.01	9	34.99	0.26	3.71	1.99
18	0.30		81.38		6.18		6.93	7.69	0.36	4.88	1.59
19	3.34		91.42		2.18		9.12	4.66	0.33	3.85	8.48

Tabla 20: Elementos menores (Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb) en [ppb].

Mues- tra	Zn	As	Se	Rb	Sr	Zr	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb
1	23.6	0.4	1.08	0.7	300.92	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
2	153.6	0.5	1.16	0.48	342.08	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
3	151.7	0.38	1.17	0.71	401.69	0.001	0.001	0.0005	0.047	0.002	0.0015
4	20.8	0.56	0.8	0.94	350.08	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
5	117.9	0.21	0.04	0.61	132.84	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
6	146.9	0.66	0.04	0.11	127.15	0.001	2.3	0.0005	0.031	0.002	0.0015
7	345.5	0.55	1.58	0.74	580.95	0.001	0.001	0.0005	0.06	0.002	0.0015
8	56.2	1.66	0.3	0.66	408.62	0.001	0.001	0.0005	0.03	0.002	0.0015
9	92.8	1.79	0.04	0.22	145.94	0.001	1.51	0.0005	0.0005	0.002	0.0015

10	46.1	2.92	0.04	0.12	217.75	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
11	67	0.68	0.04	0.42	197.77	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
12	89.2	1.26	2.83	0.66	812.79	0.001	2.05	0.0005	0.031	0.002	0.0015
13	84.5	0.48	1.03	0.32	343.43	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
14	43.3	0.63	1.02	0.69	404.55	0.25	0.001	0.128	0.152	0.14	0.0015
15	66.8	0.68	0.99	0.93	453.54	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
16	126.6	0.34	1.17	0.69	397.77	0.001	0.001	0.0005	0.048	0.002	0.0015
17	33.4	0.16	0.84	0.12	226.81	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.002	0.0015
18	17.72	1.19	0.04	0.58	349.39						
19	10.25	3.78	0.04	1.30	359.04						

Tabla 21: Elementos menores (Cs, Ba, W, Pb, U) en [ppb].

Muestra	Cs	Ba	W	Pb	U
1	0.0002	48.23	0.002	0.001	0.084
2	0.0002	55.53	0.002	0.001	0.087
3	0.0002	57.56	0.002	0.709	0.241
4	0.0002	76.72	0.002	0.001	0.169
5	0.0002	6.72	0.002	0.179	0.043
6	0.0002	15.02	0.002	0.32	0.135
7	0.0002	52.75	0.002	0.419	0.163
8	0.0002	82.86	0.002	0.001	0.205
9	0.0002	15.38	0.002	0.112	0.123
10	0.0002	10.99	0.002	0.128	0.233
11	0.0002	30.94	0.002	0.11	0.254
12	0.0002	27.93	0.002	0.302	1.494
13	0.0002	35.14	0.002	0.12	0.291
14	0.1330	50.5	0.002	0.18	0.64
15	0.0002	43.51	0.002	0.001	0.682
16	0.0002	54.54	0.002	0.302	0.238
17	0.0002	16	0.002	0.001	0.054
18		24.70		0.001	0.89
19		24.72		0.001	0.99