



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

HIDROGEOLOGÍA Y POTENCIAL DE LITIO EN EL SALAR DE LA ISLA, III REGIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

LORETO ANDREA VALDIVIA ORTIZ

PROFESOR GUÍA:
IGOR AGUIRRE ARANEDA

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
DOLORINDA DANIELE
GABRIEL VARGAS EASTON

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Comité Minería No Metálica CORFO

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geóloga
POR: Loreto Andrea Valdivia Ortiz
FECHA: 07/08/2018
PROFESOR GUÍA: Igor Aguirre Araneda

HIDROGEOLOGÍA Y POTENCIAL DE LITIO EN EL SALAR DE LA ISLA, III REGIÓN

La cuenca cerrada del Salar de La Isla está emplazada en la Puna al noreste de la región de Atacama, próximo a la frontera con Argentina, se caracteriza por una geología volcánica cenozoica y el desarrollo de un sistema salino, influenciada por las condiciones de aridez, y controlada estructuralmente por la Caldera volcánica Aguilar (Mioceno Inferior) y su Domo Resurgente. Su costra salina se compone de un núcleo de halita con textura rugosa, y una zona marginal; dominada por sulfatos en la parte norte, por cloruros al centro-sur, y terrígena y subacuosa alrededor de todo el salar.

La potencialidad hidrogeológica está condicionada por la permeabilidad primaria y secundaria de las unidades litológicas, siendo los abanicos aluviales, depósitos de avalancha volcánica, y las ignimbritas fisuradas, las de mayor potencial, que junto a los depósitos evaporíticos formarían un acuífero interconectado, donde los niveles piezométricos descenderían siguiendo la topografía, alcanzando niveles someros en el salar. La cuenca presenta un desarrollo menor de humedales; vertientes y lagunas, que se acotan a sectores con alto potencial hidrogeológico y pendientes menores a 15°, a partir de mediciones in situ se estima un caudal de ~127 L/s asociado a su afloramiento.

La campaña de terreno desarrollada para este estudio levanta nuevos datos de aguas superficiales especialmente del sur, con información de sus parámetros fisicoquímicos y densidad, consiguiendo una mayor representatividad del salar. Las aguas superficiales se caracterizan por una composición tipo clorurada sódica, siendo las muestras de vertientes menos salinas que las de lagunas y ojos de agua, aunque bien se observa que las aguas superficiales del norte son más diluidas con respecto a las del sur, y algo más alcalinas. Datos isotópicos de ^{18}O y ^2H confirman la evaporación como proceso de concentración de los elementos incorporados desde la geología volcánica, y además sugiere una posible mezcla con salmueras residuales en áreas que tienen un control estructural.

Se propone un modelo hidrogeológico conceptual en el que la recarga deriva de las precipitaciones estivales y los deshielos (~150 mm/año), teniendo como entradas, una recarga total por infiltración (205 a 214 L/s), escorrentía superficial (198 a 216 L/s), flujo lateral desde la cuenca Quebrada La Rossa (80-120 L/s) ubicada al norte, y como salida la evapotranspiración y evaporación desde el salar y superficies libres (~551 L/s), obteniendo un balance hídrico negativo que va desde -10,2 a -46,7 L/s.

Bajo dos escenarios de profundidad máxima de la salmuera, 170 y 120 metros, se estima un recurso inferido de alrededor de 767.006 ton de Li, 199.639 ton de B y 7.055.512 ton de K para el primer escenario, y 478.799 ton de Li, 124.104 ton de B y 4.401.210 ton de K para el segundo escenario, en todos los casos se tiene un error del orden del 30% asociado a las simplificaciones e inferencias en su estimación.

Se determina que el Salar de La Isla presenta condiciones que han favorecido concentraciones anómalas de Li, obteniendo un potencial que despierta un alto interés para una eventual explotación, aportando información relevante especialmente de humedales y medio físico para la generación de una línea base que sea considerada para garantizar un desarrollo sustentable de una minería no metálica en el salar.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todos quienes han contribuido en mi formación académica y me han acompañado todos estos años.

En especial a mi gran familia que sin su apoyo incondicional no lo hubiera logrado, por la entrega y confianza infinita, por acompañarme durante los buenos y malos momentos y por estar siempre cuando los necesité. Gracias por apañarme en el intercambio a Brasil, que sin duda me sirvió para crecer, para extrañarlos, quererlo y valorarlos aún más.

A todos los amigos y compañeros de plan común de geología que hicieron la vida universitaria mucho más agradable, en especial a la Bonnie, que desde el primer día nos acompañamos y animamos en los caminos de la vida y de la universidad.

A mi gente de Danza es Vida que, aunque por cosas de la vida nos separamos, me dieron la oportunidad de crear, imaginar y como muchos dicen volar con los pies, enfrentándome a otros desafíos y retos, siendo un espacio para sobrellevar las dificultades de mis primeros años de universidad.

Al Nico por el trabajo conjunto en nuestras memorias, por compartir ideas y opiniones, especialmente por la hazaña de trasladar nuestras muestras.

A Igor por la oportunidad de esta memoria, comprometerse con el desarrollo del terreno, y por las minuciosas correcciones y sugerencias. A los profesores Linda y Gabriel por sus comentarios y sugerencias.

Finalmente agradecer al Comité de Minería No Metálica de Corfo por la oportunidad, el desarrollo del terreno, y la gestión para los análisis químicos posteriores en laboratorios de Sernageomin, y al campamento minero de Golds Fields por su apoyo logístico.

DEDICATORIA

A quien amo su tierra y su campo

A quien recorrió tantos cerros y valles

A quien cabalgó por la extensa cordillera

Mi querido tata Don Segua

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CONSIDERACIONES GENERALES	1
1.2 ESTUDIOS ANTERIORES	1
1.3 FORMULACIÓN DEL TRABAJO	3
1.3.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	3
1.3.2 OBJETIVOS	3
1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	4
1.4.1 Recopilación de antecedentes	4
1.4.2 Caracterización geomorfológica.....	4
1.4.3 Caracterización geológica.....	4
1.4.4 Caracterización hidrológica.....	4
1.4.5 Caracterización hidrogeológica	4
1.4.6 Caracterización hidrogeoquímica e isotópica.....	5
1.4.7 Estimación potencial Litio.....	5
2 ANTECEDENTES GENERALES	7
2.1 MARCO TEÓRICO	7
2.1.1 Salares Inmaduros	8
2.1.2 Salares Maduros	8
2.1.3 Geoquímica depósitos de salmueras	9
2.1.4 Hidrogeología de las salmueras.....	9
2.2 ÁREA DE ESTUDIO	10
2.3 CLIMA.....	13
2.4 UNIDADES FISIOGRÁFICAS REGIONALES	13
2.4.1 Cordillera occidental.....	14
2.4.2 Puna de Atacama.....	14
2.5 GEOLOGÍA.....	14
2.5.1 Descripción de depósitos y rocas estratificadas.....	18
2.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	21
2.7 HIDROLOGÍA.....	23
2.8 HIDROGEOLOGÍA	23
3 RESULTADOS.....	25
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	25
3.1.1 Caracterización costra salina	25
3.1.2 Caracterización geomorfológica.....	31
3.1.3 Caracterización hidrológica.....	38
3.1.4 Caracterización hidrogeológica	47
3.1.5 Caracterización hidrogeoquímica.....	60
3.1.6 Caracterización isotópica	81
3.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	88
3.3 ESTIMACIÓN POTENCIAL DE LITIO	95
3.3.1 Metodología	95
3.3.2 Geometría y volumen.....	95
3.3.3 Parámetro Specific Yield (Sy)	97
3.3.4 Concentración de la salmuera.....	98
3.3.5 Potencial de litio en el Salar de La Isla	102

4	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	103
4.1	GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA.....	103
4.2	HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA.....	104
4.3	HIDROLOGÍA.....	107
4.4	LITIO.....	109
4.5	RECURSO Y SUSTENTABILIDAD.....	110
5	RECOMENDACIONES.....	114
6	CONCLUSIONES.....	115
7	BIBLIOGRAFÍA.....	118
8	ANEXOS.....	123
8.1	Anexo A: Base de datos.....	124
8.2	Anexo B: Resultados muestra campaña de terreno enero 2018.....	¡Error!
Marcador no definido.		
8.3	Anexo C: Metodología delimitación Cuenca del Salar de La Isla.....	128
8.3.1	Delimitación de cuenca en ArcMap 10.5.....	129
8.3.2	Delimitación de cuenca en Global Mapper v18.....	129
8.4	Anexo D: Metodología estimación precipitación anual.....	131
8.5	Anexo E: Metodología estimación escurrimiento.....	134
8.6	Anexo F: Estimación coeficiente de infiltración a partir condiciones de permeabilidad.....	134
8.7	Anexo G: Metodología estimación evaporación.....	134
8.8	Anexo H: Observaciones de campo.....	135
8.8.1	Descripción macroscópica muestra costra salina.....	135
8.8.2	Descripción puntos de muestreo hidroquímico campaña terreno 2018	139
8.8.3	Medición de caudales in situ.....	146
8.9	Anexo I: Cuenca Quebrada La Rossa.....	147
8.9.1	Esquema del balance hídrico preliminar de la cuenca Qda. La Rossa	147
8.9.2	Piezometría y química cuenca Quebrada La Rossa.....	148
8.10	Anexo J: Detalle instalación de lisímetros en el Salar de La Isla.....	150
8.11	Anexo K: Descripción calicata, estudio edafológico desarrollado por el proyecto 7 salares.....	153
8.12	Anexo L: Catastro de pozos.....	155
8.13	Anexo M: Metodología de muestreo de agua.....	156
8.13.1	Especificaciones de equipos.....	157
8.14	Anexo N: Validación de análisis químicos.....	159
8.14.1	Aplicación balance iónico.....	159
8.15	Anexo O: Índices hidrogeoquímicos.....	161
8.16	Anexo P: Relación entre Li y elementos traza -menores.....	163
8.17	Anexo Q: Resultados fase exploratoria de sondajes proyecto de Exploración Salares 7.....	167
8.18	Anexo R: Potencial y recursos en otros salares.....	169
8.19	Anexo S: Figuras amplificadas.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Control y distribución del litio en salares; a) Fuentes, recorrido y sumideros del litio, b) Distribución y ocurrencia latitudinal de las salmueras de litio modernas-	7
Figura 2: Esquemas tipos de salares.	8
Figura 3: Zona de estudio y accesos; a localidad de El Salvador desde Copiapó, y acceso al Campamento Salares Norte de Gold Fields y al Salar de La Isla.....	12
Figura 4: Perfil esquemático unidades fisiográficas a la latitud del segmento medio del Salar de La Isla, 23.73°S.....	14
Figura 5: Caracterización de los salares del Norte de Chile.....	15
Figura 6: Geología zona de estudio, en base a Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, región de Atacama, 1:100.000, Naranjo, et al., 2013.	16
Figura 7: Delimitación de calderas y arreglo estructural de la Puna.....	17
Figura 8: Química elementos mayores y contenidos de litio en ignimbritas localizadas en el área, a partir de Schnurr, et al., 2007, Brandmeier y Wörner, 2016.	19
Figura 9: Esquema del norte de Chile, noroeste de Argentina y sudoeste de Bolivia; ubicación de las principales fallas y lineamientos a escala regional.	22
Figura 10: Modelo conceptual del agua subterránea para la parte Norte del Salar La Isla (Ricketts y Hutcheon, 2012).	24
Figura 11: Fotografías costra salina del Salar de La Isla.....	27
Figura 12: Caracterización costra salina del Salar de La Isla: a) mineralógica y b) composicional.....	30
Figura 13: Cuenca Salar de La Isla definida en este estudio.	34
Figura 14: Curva hipsométrica unitaria de la Cuenca del Salar de La Isla e interpretación curvas hipsométricas.....	35
Figura 15: Geoformas presentes en la cuenca del Salar de La Isla.	37
Figura 16: Modelo conceptual de la recarga.	40
Figura 17: Áreas con monitoreo de caudal.....	44
Figura 18: Quebrada La Rossa y parte norte cuenca Salar de La Isla.....	46
Figura 19: Mapa del potencial hidrogeológico de la cuenca del Salar de La Isla. Elaboración propia.	49
Figura 20: Fotografías unidades hidrogeológicas.....	54
Figura 21: Perfil hidrogeológico A-A", indicando unidades hidrogeológicas y nivel freático inferido.....	55

Figura 22: Perfil hidrogeológico B-B", indicando unidades hidrogeológicas y nivel freático inferido.....	56
Figura 23: Catastro de humedales presentes en Salar de La Isla.....	58
Figura 24: Manto de pendientes en torno al salar.	59
Figura 25: Distribución frecuencia relativa del error asociado al balance iónico (%) muestras del Salar de La Isla.	61
Figura 26: Iones mayoritarios de las muestras con alto error balance iónico.....	61
Figura 27: Mediciones de terreno versus laboratorio; a) pH, b) Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	61
Figura 28: Mapa distribución base de datos hidrogeoquímica del Salar de La Isla, códigos ISL corresponden a las muestras de Risacher, et al. (1999), LIS-RT Troncoso, et al. (2013) y Troncoso y Ercilla (2016), y USL muestras recogidas durante la campaña de enero de 2018 de este estudio. Elaboración propia.	62
Figura 29: Distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de aguas del Salar de La Isla.....	65
Figura 30: Diagramas de caja y bigotes de los parámetros fisicoquímicos de los distintos tipos de muestra (ojo de agua/calicata, vertiente, canal y laguna).	66
Figura 31: Diagrama Piper muestras del Salar de La Isla.	67
Figura 32: Relaciones binarias elementos muestras del Salar de La Isla.	68
Figura 33: Distribución espacial índices hidrogeoquímicos, a) $r_{\text{Mg}/r_{\text{Ca}}$ b) $r_{\text{K}}/r_{\text{Na}}$ c) $r_{\text{Na}}/r_{\text{Ca}}$ d) $r_{\text{Na}}/r_{\text{(Ca+Mg)}}$	71
Figura 34: Distribución espacial índices hidrogeoquímicos, a) $r_{\text{Cl}}/r_{\text{CO}_3\text{H}}$ b) $r_{\text{SO}_4}/r_{\text{Cl}}$ c) $r_{\text{Ca}}/r_{\text{Mg}}$ d) r_{K}	72
Figura 35: Relación de elementos de interés Li, K y B y parámetros fisicoquímicos en muestras de vertientes.	73
Figura 36: Diagramas de caja y bigotes de los contenidos de elementos de interés económico, a) Litio b) Potasio c) Boro.....	74
Figura 37: Relación logarítmica entre elementos de interés Li, K y B y Cl en mg/L.	75
Figura 38: Elementos menores y traza en las aguas del Salar de La Isla.....	76
Figura 39: Distribución espacial de NO_3 mg/L.....	77
Figura 40: Secuencia y vía evolutivas.	78
Figura 41: Relación logarítmica entre a) Alcalinidad (meq/L) y Ca (meq/L), b) Ca+ Mg (meq/L) y Alcalinidad (meq/L), c) Alcalinidad + SO_4 (meq/L) y Ca (meq/L).	79
Figura 42: Distribución vía evolutiva de las aguas superficiales en el Salar de La Isla.	80
Figura 43: a) Composición isotópica durante el ciclo hidrológico. b) Relación desviaciones isotópicas para deuterio y oxígeno 18, Línea Meteórica Mundial y procesos fraccionadores.	82
Figura 44: Variaciones de $\delta^{34}\text{S}$ del azufre en compuestos de azufre.....	83

Figura 45: Distribución espacial de muestras con información isotópica.....	84
Figura 46: Composición isotópica de las aguas superficiales del Salar de La Isla.....	85
Figura 47: Variación isotópica de en función del contenido de Cl (mg/L).....	86
Figura 48: a) Variación isotópica con respecto a la altura de la muestra. b) Variación isotópica con respecto a la altura potencial de recarga.....	87
Figura 49: Relación entre contenido de SO ₄ y δ ³⁴ S, donde líneas indican muestras próximas.....	87
Figura 50: Esquema modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del Salar de La Isla.....	92
Figura 51: Modelo conceptual de la cuenca del Salar de La Isla, reconociendo entradas y salidas, junto con zonas de recarga. Elaboración propia.....	93
Figura 52: Organigrama modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca Salar de La Isla.....	94
Figura 53: Esquema de los escenarios de profundidad de la salmuera, y distribución de las facies dentro del salar.....	96
Figura 54: Concentración en superficie de Li a partir de Risacher, et al. (1999), Troncoso, et al. (2013), Troncoso y Ercilla (2016), y muestras de este estudio.	99
Figura 55: Concentraciones en profundidad de Li del Salar de La Isla (eje z en m.b.n.t) a partir de Talison Lithium Ltda. (2011).....	100
Figura 56: Relación entre profundidad y densidad en las salmueras del Salar de La Isla, escalado y coloreado según concentración de Li.....	100
Figura 57: Histograma concentraciones elementos de interés económico (mg/L) en cada zona del salar; a) Litio, b) Boro, c) Potasio.....	101
Figura 58: Tramas tróficas en cada compartimiento asociado a la fuente de recursos hídricos en las cuencas endorreicas (SAG, 2006).	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Aspectos morfométricos de la cuenca del Salar de La Isla descritos en estudios anteriores.	23
Tabla 2: Mineralogía primaria y secundaria encontrada en las muestras de costra salina.	28
Tabla 3: Características de las subcuencas definidas en la cuenca del Salar de La Isla.	31
Tabla 4: Caracterización morfométrica de la Cuenca del Salar de La Isla	33
Tabla 5: Precipitaciones anuales estimadas para la cuenca del Salar de La Isla.	39
Tabla 6: Estimación caudales de escorrentía para la cuenca del Salar de La Isla.	40
Tabla 7: Área para las distintas regiones de la cuenca según sus condiciones de permeabilidad.....	41
Tabla 8: Coeficiente de escorrentía e infiltración utilizados, para la estimación de la recarga por precipitación.....	41
Tabla 9: Recarga total estimada para la cuenca del Salar de La Isla.....	41
Tabla 10: Tasas de evaporación y caudal de evaporación estimado para las superficies de la cuenca Salar de La Isla.	43
Tabla 11: Cálculo flujo lateral mediante ley de Darcy desde la cuenca Quebrada La Rossa.....	45
Tabla 12: Derechos de agua concedidos en la cuenca del Salar de La Isla.	47
Tabla 13: Balance hídrico estimado para la cuenca del Salar de La Isla.	47
Tabla 14: Área cubierta por los humedales cartografiados.	56
Tabla 15: Estadística de la base de datos hidroquímica del Salar de La Isla, parámetros y elementos mayores.	63
Tabla 16: Matriz correlación Spearman de la base de datos hidrogeoquímica del Salar de La Isla.....	63
Tabla 17: Solubilidad de algunas sales.	77
Tabla 18: Isótopos de H, O y S, abundancia y peso atómico.	81
Tabla 19: Cálculo volumen para cada zona del salar, bajo dos escenarios de profundidad de la salmuera.....	97
Tabla 20: Volúmenes estimados para las distintas unidades sedimentarias bajo los escenarios de profundidad de la salmuera.....	97
Tabla 21: Valores de Specific Yield (Sy) determinados en otros trabajos.	98
Tabla 22: Estadística de la concentración de litio, boro y potasio para cada sector del salar (mg/L).	101
Tabla 23: Recurso inferido de litio, boro y potasio del Salar de La Isla.	102

INTRODUCCIÓN

1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

En los últimos años la demanda por el litio ha aumentado considerablemente gracias al avance de las tecnologías, donde Chile aporta un tercio de la oferta total de Li, teniendo el 47% de las reservas de carbonato de litio del mundo el según U.S.G.S, Mineral Commodity Summaries, de enero de 2018. Estos recursos se encuentran principalmente en depósitos salinos del norte de Chile correspondiendo a campos de nitratos y salares, que, en conjunto, se localizan en las cuatro regiones del norte del país, entre los 18° y los 27°S, y comprenden un área de unos 250.000 km², desde los 1.000 m.s.n.m. en el oeste, hasta casi 5.000 m s.n.m. en el este.

Se registran aproximadamente 60 salares conocidos en el norte del país, de acuerdo con su ubicación W-E son clasificados en salares de la Cordillera de la Costa, de la Depresión Central, Preandinos y Andinos, y en conjunto contienen, principalmente, sales de litio, potasio, boro y sodio. Éstos corresponden a depósitos salinos continentales localizados en cuencas endorreicas, generados por altas tasas de evaporación y bajas tasas de precipitación, compuestos por una costra salina, salmuera y fracción clástica, cuyas extensiones y profundidad pueden variar ampliamente.

Las cuencas endorreicas y los salares inmersos en ellas, son sistemas complejos, abiertos y dinámicos, en el que el agua es un factor determinante en la mayoría de sus componentes físicas; de orden hidrológico, hidrogeológico, geomorfológico, edáfico, y vegetacional, controlado a escala regional por el clima árido. Desde este punto de vista, su análisis conjunto se vuelve fundamental para la comprensión y entendimiento de los recursos hídricos y la interacción entre estos distintos componentes, de forma de garantizar un desarrollo sustentable y ordenamiento entorno a estos sistemas, más aún ante el creciente interés que han alcanzado gracias al escenario que representan para la industria del Li y minería no metálica. Por ello, dentro de este contexto, no solo es necesario la investigación y desarrollo de su forma de exploración y extracción de sus recursos no metálicos hospedados en las salmueras de los distintos salares, sino que también la información que permita una planificación y ejecución sustentable que reduzca los impactos sobre estos sistemas y sus ecosistemas.

De esta manera este trabajo apunta a caracterizar el sistema hidrogeológico del Salar de La Isla, ubicado en el Altiplano de la Región de Atacama, aportando información relevante para el entendimiento del contexto en que se desarrolla el litio; fuente y mecanismos de concentración con miras a estimar su potencial, y en especial el conocimiento de la dinámica y composición de sus aguas, que permitan establecer el escenario hídrico base sobre el cual se desarrollará el control de su demanda, de modo de satisfacer a los requerimientos que se generarán de una manera sostenible.

1.2 ESTUDIOS ANTERIORES

Geology Northern of Salars Chile, Stoertz y Ericksen, 1974: Primeros estudios de los salares del Norte de Chile y Bolivia, principalmente a través de fotografías aéreas,

teniendo como resultados la clasificación de los mismos y caracterización de su morfología. En particular para el Salar de La Isla, se observaron canales salinos y costas de antiguas lagunas muy próximas al margen del salar, indicando que las lagunas en tales cuencas pueden haber sido grandes y profundas.

Hoja Salar de La Isla, escala 1:250.000, Naranjo y Cornejo, 1992: Desarrollo y descripción de la litología y geología estructural presente en el área de estudio, caracterizado por un origen volcánico y un control estructural regional.

Geoquímica De Aguas En Cuencas Cerradas, I, II Y III Regiones– Chile, Risacher, et al., 1999: El salar de La Isla no presenta potencialidad como agua potable, debido a su salinidad, (>6,2 g/L). Mediante análisis químico se determinó que la mayoría de las aguas son del tipo Na-(Mg) /Cl- SO₄ y de vía evolutiva neutra sulfatada, que se relaciona con la presencia de importantes yacimientos de azufre al norte de la cuenca, e infiriendo además que la alta salinidad de los aportes se debería a la redisolución de salmueras residuales de tipo Na-(Mg) / Cl de un antiguo salar cubierto por formaciones volcánicas más recientes.

Technical report on the Salares 7 property, Region III, Chile, Taiga Consultants Ltda., 2009: Principales resultados de la primera fase de exploración del proyecto de Exploración Salares 7 impulsado por *Salares de Atacama Sociedad Contractual Minera (SCM)*, confirmando las anomalías geoquímicas de litio y potasio reportadas por estudios anteriores, los mayores valores de litio y potasio se presentan en el extremo norte del Salar Las Parinas y en el lado sureste del Salar de La Isla.

Anexo, Evaluación Preliminar de la Hidrogeología y la Recarga de los Salares, de Concesión Minera de, Salares de Atacama Sociedad Contractual Minera (SCM), Atacama, Norte de Chile, Ricketts y Hutcheon, 2012: desarrollo de informes más detallados acerca de la geomorfología, geología, e hidrogeología del área de estudio, sumado también datos de infraestructura, como parte de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), en el marco del desarrollo del proyecto de Exploración Salares 7, entre los que se encuentra el Salar de La Isla.

Reporte: Talison Lithium: The World's Only Pure Lithium Producer en MarketWired, Talison Lithium Ltda., 2011: descripción del proyecto de litio Salares 7, en el que se encuentra el Salar de La Isla y que consta de 117.904 hectáreas, reportando resultados geofísicos; TEM, aplicados en el norte del salar y en el salar contiguo Las Parinas, que incluye información de la profundidad de la salmuera (~170 m.b.n.t.) y volumen en su parte norte del salar; 2.459 km³ considerando una resistividad de 1 Ω/m y 5.393 km³ para 2 Ω/m de resistividad.

Reporte: Talison Lithium Reports Positive Results From Initial Drill Program at Salares 7 Project en Streetwisereports, Talison Lithium Ltda., 2011: resultados iniciales del programa de perforación (sónico) para reconocimiento superficial en Salar de La Isla y Salar Las Parinas, los análisis de salmuera de 26 sondajes en el Salar de la Isla indican, hasta 1.080 mg /L de litio y hasta 9.830 mg/L de potasio.

Salt lake deformation detected from space, Ruch, et al., 2012: Estudio de la evolución espaciotemporal durante el período 2003-2009 mediante técnicas de InSAR, de los salares Pajonales, Grande y de La Isla, concluyendo que las facies salinas pueden estar relacionadas con la deformación superficial (perfiles de velocidad y series

de tiempo), implicando un control hidrológico y sedimentológico subyacente, estimando tasas 0,5 a 1,5 cm/año en el núcleo del salar.

Estudio del Potencial De litio Salares Del Norte De Chile, Troncoso, et al., 2013: Se determinó que la composición mineral de la costra salina, en las zonas de borde del salar, está dominada por halita y yeso, presentando concentraciones de litio variables entre 153 y 500 ppm. Las concentraciones de litio en las muestras de agua analizadas se encuentran entre 13 y 1.150 mg/L, en tanto las concentraciones de boro se encuentran entre <0,06 y 384,1 mg/L.

Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, región de Atacama, Escala 1:100.000, Naranjo, et al., 2013: Información actualizada y de más detalle de la geología regional y estructural del area de estudio.

La información levantada y desarrollada previamente en el Salar de La Isla corresponde a un conocimiento referencial de su geología, hidrología, hidrogeoquímica e hidrogeología, sirviendo como base y una primera aproximación de lo que se busca en este trabajo, de modo que, su análisis conjunto se complementará con el levantamiento, procesamiento y análisis de nueva información generada a partir de observaciones, registro y muestreo en terreno, y el desarrollo de técnicas de teledetección.

1.3 FORMULACIÓN DEL TRABAJO

1.3.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO

La cuenca del Salar de La Isla presenta y ha presentado condiciones geológicas que han favorecido y permitido la concentración anómala de litio, siendo capaz de generar recursos económicamente atractivos y con un alto potencial de extracción.

1.3.2 OBJETIVOS

1.3.2.1 Objetivos generales

Caracterización hidrogeológica y estimación del potencial de litio en el Salar de La Isla, III Región.

1.3.2.2 Objetivos específicos

- Caracterización el salar en sus aspectos geomorfológicos, geológicos, e hidrológicos.
- Definición unidades hidrogeológicas y propuesta de parámetros hidrogeológicos relevantes.
- Propuesta delimitación de la recarga de humedales desde unidades acuíferas.
- Análisis posible relación con cuencas adyacentes.
- Elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual.
- Estimación el potencial de litio para el Salar de La Isla.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.4.1 *Recopilación de antecedentes*

Recopilación de antecedentes y estudios previos en el área del Salar de La Isla, incluyendo además estudios similares, para lo cual se consultan trabajos de investigación publicados principalmente en libros especializados, revistas científicas, congresos, memorias y tesis, y documentos publicados por entidades gubernamentales, tales como el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas, sumando además las Evaluaciones y Declaraciones de Impacto Ambiental de proyectos desarrollados en el área ingresados al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).

1.4.2 *Caracterización geomorfológica*

Identificación de unidades de relieve locales mediante el estudio e interpretación de imágenes satelitales Landsat, Rapideye ortorectificadas de nivel 3A y las proporcionadas por Google Earth y ArcMap 10.5.

1.4.3 *Caracterización geológica*

Análisis de los antecedentes geológicos recopilados, zonificación de las características y facies del salar a través del procesamiento de imágenes satelitales junto con los resultados de la química y mineralogía de la costra salina.

Se incluye además una reconstrucción la geología de subsuperficie a partir del catastro de los pozos construidos en el salar.

1.4.4 *Caracterización hidrológica*

Definición de la cuenca del Salar de La Isla, análisis de su hidrología y parámetros morfométricos en base al modelo digital de terreno, el DEM ALOS PALSAR que cuenta con resolución de 12,5 metros, procesado en el software Global Mapper 18 y ArcMap 10.5.

Determinación de las condiciones hidrológicas de la cuenca, siguiendo las metodologías de evaluación del balance hídrico desarrolladas para las cuencas altiplánicas.

Medición de caudales in situ de vertientes y riachuelos que bordean el salar, a partir de su área transversal y velocidad media.

1.4.5 *Caracterización hidrogeológica*

Definición de unidades hidrogeológicas en base a revisión bibliográfica, visualizado en un mapa hidrogeológico mediante ArcMap 10.5 y elaboración de perfiles

hidrogeológicos esquemáticos utilizando Illustrator CC 2018, considerando las convenciones para su leyenda.

Estudio de la dinámica entre acuíferos y humedales, a partir de bibliografía pertinente y de la caracterización hidrogeológica de la cuenca y el salar.

Elaboración modelo hidrogeológico conceptual en base a todos los antecedentes recopilados y generados para la cuenca del Salar de La Isla.

1.4.6 **Caracterización hidrogeoquímica e isotópica**

Teniendo como objetivos principalmente validar la información generada a partir del trabajo de gabinete y generación de nueva información; datos hidrogeoquímicos principalmente en el sur del salar, y nuevos datos isotópicos de δD (H_2O), $\delta^{18}O$ (H_2O) y $\delta^{34}S$ (SO_4), se desarrolla una campaña de terreno en el Salar de La Isla, durante los días 8 y 12 de enero del 2018, llevando a cabo:

- Registro de observaciones de campo.
- Registro de mediciones in situ parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura, conductividad eléctrica, con los equipos Hanna HI98191-H198192 y densidad, mediante picnómetro Gay Lussac y balanza.
- Recolección de un total de 16 muestras de agua superficiales y subsuperficiales, para análisis de elementos mayores y trazas, para su posterior análisis en los laboratorios de Sernageomin, con norma NCh-ISO 17025 OF. 2005, se disponen de las técnicas AAS para cationes, IC para aniones e ICP-MS para elementos traza, además se añaden análisis de isótopos ambientales mediante espectrómetro de masas que está complementado con un analizador elemental para el análisis isotópico de $d^{34}S$ en sulfatos. Se descarta el muestreo de aguas subterráneas debido a las condiciones aterradas de los pozos existentes. Se suman 5 muestras de costra salina para análisis de su mineralogía y química.

Con lo anterior se realiza un estudio de la hidrogeoquímica e isotopía incorporando a la base de datos existente los nuevos resultados obtenidos desde la campaña de terreno, utilizando el software AqQA v.15.

1.4.7 **Estimación potencial Litio**

La estimación de los recursos elementales en salares depende de un conocimiento detallado de la geometría del acuífero, la porosidad y el grado de salmuera. La geometría de los acuíferos puede evaluarse mediante técnicas geofísicas y de perforación, pero dado que el recurso es un fluido (salmuera), con procesos de mezcla e interacción entre acuíferos, se ha vuelto necesario adaptar los procesos exploratorios convencionales para las estimaciones de recursos y reservas. En ese sentido, es elemental que para la determinación del potencial del litio en salares se considere:

- Geometría del acuífero.
- Parámetros hidrogeológicos como: coeficiente de almacenamiento del acuífero o Specific Yield (Sy), conductividad hidráulica, transmisividad, y otros factores.
- Concentración de los elementos disueltos para caracterizar los tipos de salmuera.

La geometría del acuífero es una función tanto de la forma del acuífero como de la estructura interna y de las condiciones de borde, ya que afectan las posibles interacciones entre la salmuera y las aguas subterráneas circundantes. Hains (2011) plantea que se debe estimar el coeficiente de almacenamiento para las distintas capas de acuíferos si estos están separados por capas impermeables.

Teniendo como base las concentraciones de Li, su distribución espacial, geometría, volumen y porosidad efectiva. Houston, et al. (2011) propone que el producto del volumen, el coeficiente de almacenamiento y concentración del elemento determina el tonelaje de los recursos en salmueras.

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 MARCO TEÓRICO

El litio es muy soluble y, a diferencia del sodio, el potasio o el calcio, no produce fácilmente minerales evaporíticos cuando se concentra por evaporación, en su lugar, termina en salmueras residuales en el subsuelo superficial (Houston, et al., 2011; Munk, et al., 2016; Warren, 2016). Las salmueras económicas tienen concentraciones de Li en el intervalo de 200 a 4.000 (mg/L) (Gruber, et al., 2011; Kesler, et al., 2012). Otros elementos en solución, tales como boro y potasio, pueden ser recuperados como subproductos o coproductos.

Los depósitos de salmuera de litio comparten una serie de características de primer orden (Figura 1a): (1) clima árido; (2) cuenca cerrada que contenga una playa o salar; (3) subsidencia controlado por la tectónica; (4) actividad ígnea o geotérmica asociada; (5) fuentes de litio adecuadas; (6) uno o más acuíferos adecuados; y (7) tiempo suficiente para concentrar una salmuera. Se ha encontrado una relación espacial con el factor climático, de manera que existe una distribución bimodal entorno a los $\pm 30^\circ$ de latitud (Figura 1b).

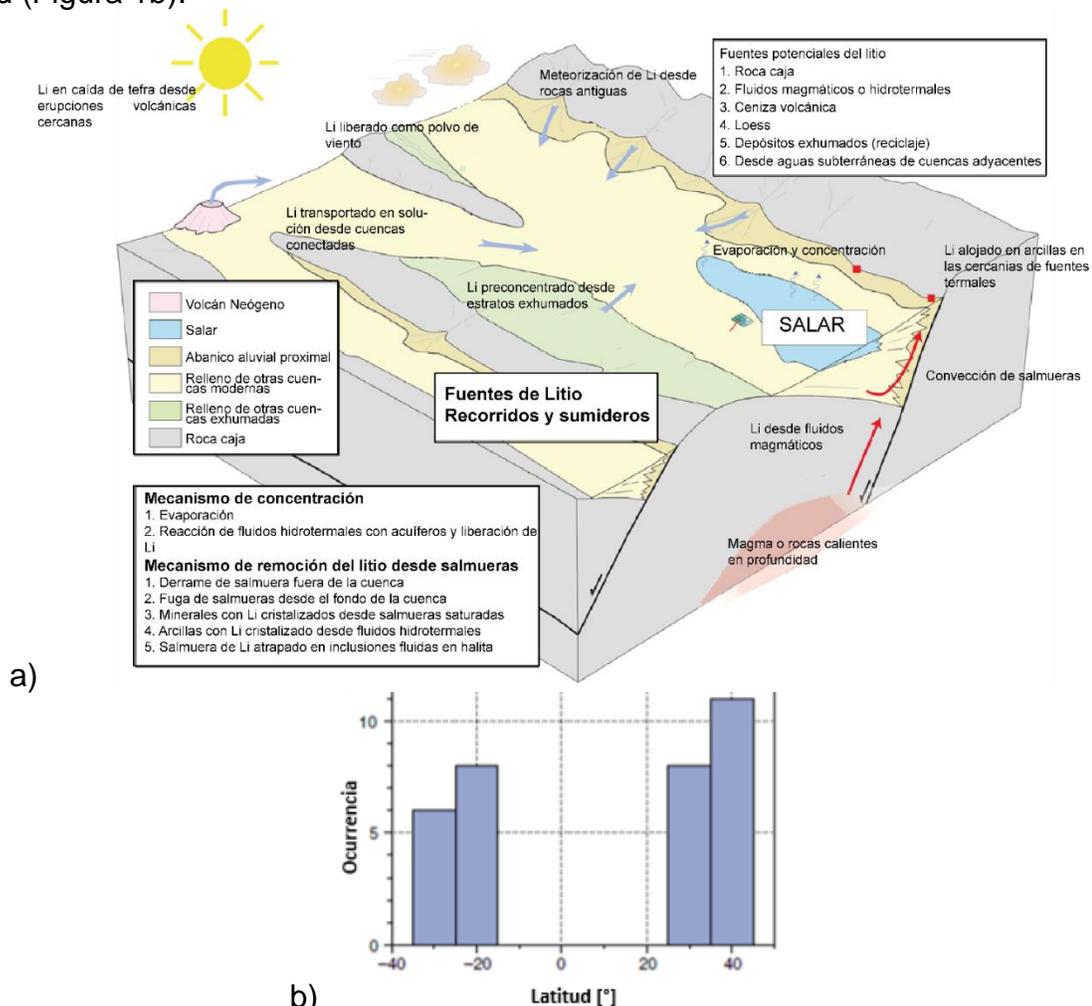


Figura 1: Control y distribución del litio en salmueras; a) Fuentes, recorrido y sumideros del litio (modificado Munk, et al., 2016), b) Distribución y ocurrencia latitudinal de las salmueras de litio modernas (Warren, 2016).

Las salmueras alojadas en salares muestran un aumento típico en la concentración desde sus márgenes hasta el núcleo (Houston, et al., 2011). Los gradientes de concentración más altos ocurren cuando la evaporación es más intensa, alcanzando frecuentemente una meseta en el núcleo, donde las tasas de evaporación son mínimas como resultado de la reducción del gradiente de presión de vapor de saturación sobre las salmueras.

Houston et al. (2011) clasificó a los salares de la región Altiplano-Puna de los Andes Centrales en términos de dos miembros finales (Figura 2), "clástico inmaduro" o "halita madura", de acuerdo principalmente (1) la cantidad relativa de sedimento clástico frente a los evaporíticos; (2) las influencias climáticas y tectónicas, relacionadas con la altitud y la latitud; y (3) la hidrología de la cuenca, que controla la afluencia de agua dulce.

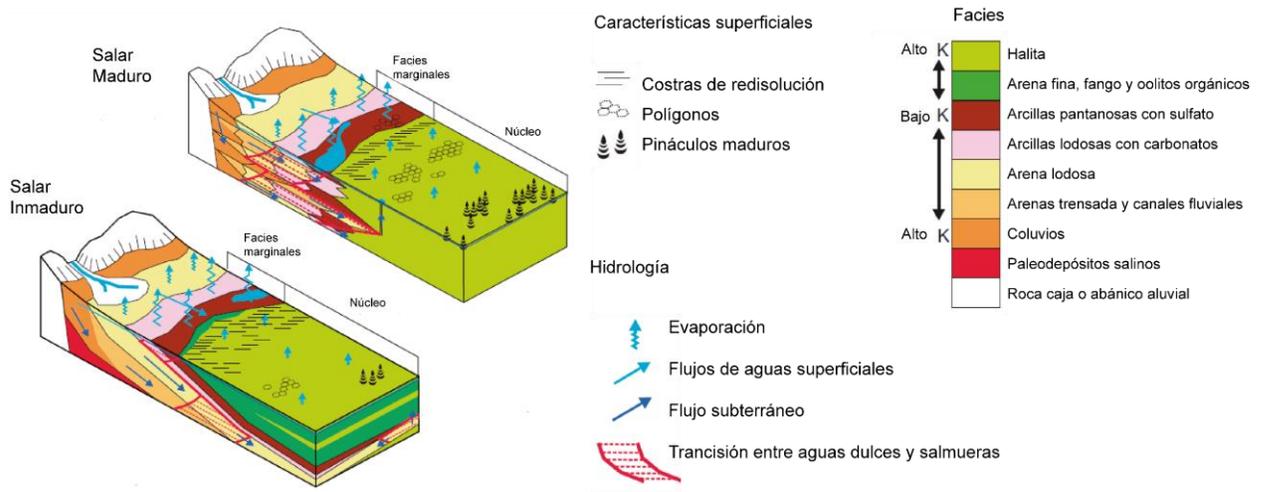


Figura 2: Esquemas tipos de salares (Houston, et al., 2011).

2.1.1 Salares Inmaduros

Se refiere a los salares que generalmente se localizan a mayores alturas siendo regiones más húmedas que se han secado recientemente o periódicamente, contienen secuencias alternantes clásticas finas y evaporitas sedimentarias dominadas por yeso, dado que en general no alcanza la saturación de halita, si presenta saturación de halita es indicativa de un reciclaje que lleva a su saturación. En superficie tiene una tendencia a presentar una mayor costra de redisolución, y menor de pináculos de halita (Figura 2). Las diferentes permeabilidades de sus unidades confinadas basales permiten el flujo de agua fresca desde los márgenes hacia el centro, desarrollando un flujo ascendente de la salmuera debido al contraste de densidad (Figura 2), demostrando que las capas confinadas tienen suficiente permeabilidad para permitir tal ascenso.

2.1.2 Salares Maduros

Hace referencia a salares presentes en climas áridos a hiperáridos con una menor influencia de la humedad, que ocurren en las elevaciones más bajas de la región, alcanzan la saturación de halita, presentando arcilla intercalada con limo y/o depósitos volcánicos, formando una secuencia potente y uniforme de halita (Figura 2). Se genera un transporte de aguas frescas desde fuera de la cuenca hasta los márgenes, donde se

desconfina por presión diferencial, generado por su nivel superior y el contraste de densidad.

2.1.3 **Geoquímica depósitos de salmueras**

El *litio* es un elemento litófilo que tiene una densidad baja de 0,53 g/cm³, carga iónica de +1 y un radio iónico de 0,79 Angstrom (Å), con respecto a otros elementos comunes en salmuera presenta algunas diferencias, por ejemplo, *Na* tiene una carga iónica de +1, pero un radio iónico mayor con 0,99 Å, el *Mg* tiene una carga iónica de +2 y un radio iónico de 0,72 Å. El carácter litófilo del *litio* y el hecho de que es un oligoelemento explican por qué se concentra en las fases tardías de los fluidos hidrotermales y de baja temperatura. En particular, para las salmueras continentales hay evidencia de que tanto la concentración evaporativa como el aporte hidrotermal tienen un impacto significativo en la concentración de *litio* en salmueras, dado su carácter incompatible y conservativo geoquímicamente en ambos sistemas (Houston, et al., 2011).

Las salmueras ricas en *litio* económicamente viables contienen cantidades variables de cationes y aniones principales (*Na, K, Mg, Ca, Cl, SO₄ y CO₃*) que pueden formar una gama de sales iónicas (Warren, 2010).

Las fuentes potencialmente importantes de *litio* que contribuyen a las salmueras incluyen rocas volcánicas de alto contenido de sílice, evaporitas y salmueras preexistentes, arcillas y fluidos hidrotermales. Risacher y Fritz (2009) infieren que el *Li* y *B* en los salares Andinos tienen su origen en la meteorización de ignimbritas. El dominio del rol relativo de los fluidos de baja-alta temperatura en la lixiviación del *Li* presente en las rocas versus el *Li* presente en fluidos magmáticos es aún desconocido (Houston, et al., 2011).

Hardie y Eugster (1970) proponen un modelo de evolución química en términos de una serie de divisiones que conduce a al menos seis rutas evolutivas alternas, aunque sólo dos son comunes en el Altiplano-Puna. El primer mineral en precipitar es la calcita, con concentraciones aproximadas 30 g/l de sólidos disueltos totales (densidad aproximada equivalente a 1,03 g/cm³). Seguido del yeso, típicamente a concentraciones de aproximadamente 200 g/l (densidad aproximada 1,15 g/cm³). La saturación de halita comienza sólo a concentraciones totales de sólidos disueltos de aproximadamente 280 g/l (equivalente aproximado de densidad 1,22 g/cm³), y se observa raramente una división de *Na – Cl* en concentraciones menores de 320 g/l. Una vez que la saturación de halita se alcanza comienza la precipitación de otras especies que pueden concentrarse más en la salmuera residual, llevando a altas concentraciones de *Li*.

2.1.4 **Hidrogeología de las salmueras**

Las características hidrogeológicas de estos sistemas son clave para determinar el movimiento y acumulación de las salmueras. La hidrología y la hidrogeología de las cuencas están ligadas a través de procesos deposicionales y tectónicos, teniendo importantes impactos sobre la geometría y la naturaleza de la subsuperficialidad. La permeabilidad del acuífero huésped para la salmuera desempeña un papel importante en el desarrollo y la explotación del recurso. En los salares inmaduros, la porosidad y

permeabilidad están condicionados por los procesos deposicionales primarios (Houston et al., 2011). Los salares maduros están dominados por depósitos evaporíticos con una porosidad primaria conectada menor, desarrollando una permeabilidad y porosidad significativas a profundidades de hasta 30 m.

Las salmueras en estos ambientes tienden a ser transportadas y alojadas en fracturas, que también se asocian a procesos de disolución. El agua dulce entra en estos acuíferos donde puede mezclarse hasta cierto punto con las salmueras más densas de la cuenca, pero sobre todo flota en la salmuera y es conducida a la superficie por convección forzada (Boutt, et al., 2014). Las condiciones áridas dan lugar a un gradiente de humedad ascendente que causa la pérdida de peso por evaporación y concentración de los constituyentes disueltos. El balance de masa de agua en las cuencas que albergan salmueras de litio es también de gran importancia para comprender las fuentes de Li y el potencial de regeneración de las salmueras a lo largo del tiempo (Corenthal, et al., 2014).

Muchas cuencas cerradas se encuentran conectadas a través de flujos subterráneos y pueden actuar como sumideros para el transporte regional de aguas subterráneas. Los grandes sistemas de fallas pueden formar trayectorias de flujo preferenciales, permitiendo que el Li sea suministrado a través de fluidos derivados del magma y donde el agua superficial afecta la dinámica subterránea.

2.2 ÁREA DE ESTUDIO

El Salar de La Isla pertenece a unos de los 60 salares conocidos en el norte de Chile, y según los criterios de Sernageomin corresponde a unos de los salares de la zona sur, se encuentra rodeado al norte por el Salar Agua Amarga, al este por el Salar Las Parinas, al sur por el Salar Grande y al oeste por el Salar de Aguilar (Figura 3). El Salar de La Isla se ubica en la comuna de Diego de Almagro, provincia de Chañaral en la Región de Atacama, aproximadamente a 150 km al este de la localidad homónima y a 10 km de la frontera entre Chile y Argentina. Desde el norte se accede desde Chañaral o Antofagasta por la Ruta 5 Norte, tomando un desvío hacia el este a unos 9 Km al norte de Agua verde, pasando por el Salar Agua Amarga y siguiendo hacia el sur, o bien se puede acceder desde el sur desde la localidad de El Salvador, cruzando el salar de Pedernales y Salar Grande, entrando al salar por su parte sur. Al noroeste de la cuenca que contiene al salar se encuentran importantes yacimientos de azufre.

Para la campaña de terreno de este año se accedió por su parte sur desde Copiapó teniendo como base de operaciones el Campamento Minero GoldFields, ubicado al noreste del Salar de Pedernales y sur del Aguilar.

La costra salina propiamente tal se orienta en dirección N-S, teniendo su extensión máxima de 23,5 km en esa dirección, sufriendo un angostamiento aproximado de 2,4 km en la zona central, siendo más ancha en la zona norte con 13,4 km. Cubre una superficie de 157 km², representando el 20% de la cuenca. De acuerdo con la cartografía y las otras referencias revisadas, existen algunas lagunas de extensión variable dentro del salar, que son alimentadas por afloramientos permanentes en el borde del área del salar.

Entre las alturas importantes que le otorgan el carácter endorreico a la cuenca que contiene el salar se encuentran (Figura 3):

- Norte del salar: Volcán Dos Cráteres (4.460 m.s.n.m.), Cerro Bayo (Volcán Naranja) (4.560 m.s.n.m.).
- Sur del salar: Volcán Puntigudo de La Isla (5.000 m.s.n.m.)
- Oeste del salar: Volcán Manchado (4.900 m.s.n.m.), Volcán Cono de La Isla (5060 m.s.n.m.) y Volcán de La Isla (5.060 m.s.n.m.).
- Este del salar: Volcán Colorado (4.682 m.s.n.m.).
- Noroeste del salar: Volcán Agua Amarga (5.000 m.s.n.m.).
- Noreste del salar: Volcán Las Parinas (5.280 m.s.n.m.) y Volcán Aguas Blancas (5.660 m.s.n.m.).

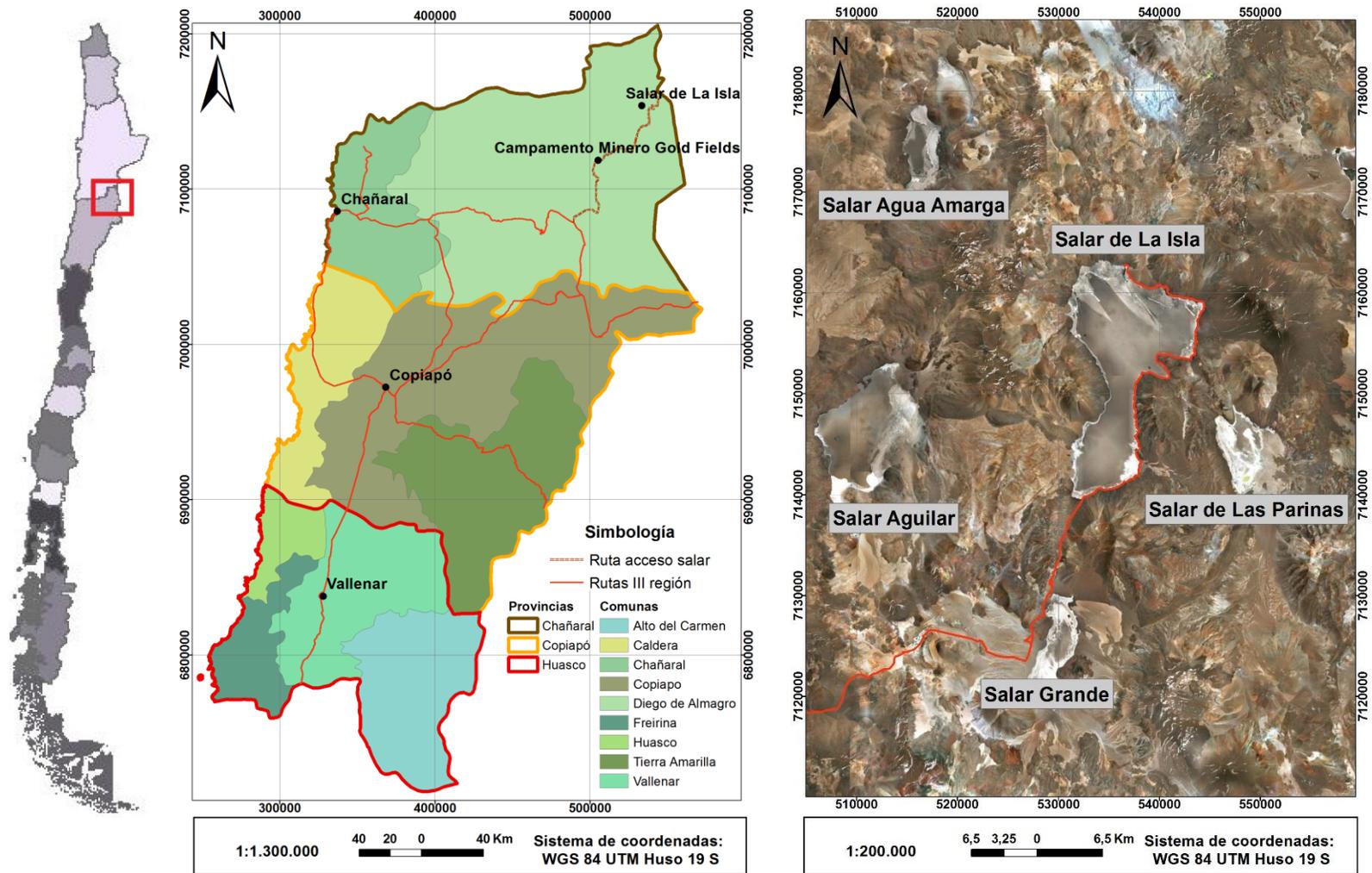


Figura 3: Zona de estudio y accesos; a localidad de El Salvador desde Copiapó, y acceso al Campamento Salares Norte de Gold Fields y al Salar de La Isla.

2.3 CLIMA

Según la clasificación de Köppen en el área se desarrolla el *Clima de Tundra de Alta Montaña*, caracterizado por escasas precipitaciones, nival en invierno y pluvial en la temporada estival, influenciada por la entrada de humedad desde el oriente. Las temperaturas, generalmente bajas, se caracterizan por su fuerte oscilación diaria. El viento incrementa su intensidad a partir del mediodía y, durante grandes tormentas, tiene una dirección NW predominante, manifestada por extensas cubiertas salinas constituidas de material de los salares, las que tiñen de gris las laderas de los volcanes ubicados al sur de los salares.

Entre los principales rasgos que determinan el clima de la región, se encuentran el cinturón de vientos Alisios provenientes de la vertiente amazónica, cinturón de vientos del oeste de latitudes templadas, y las bajas migratorias provenientes del suroeste, modulado por la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (Garreaud et al. 2003), sumado a la corriente fría de Humboldt y la Cordillera de Los Andes. Estos factores establecen que la región altiplánica se caracterice por temperaturas relativamente bajas, valores reducidos de presión y de densidad del aire, baja humedad atmosférica, y niveles relativamente elevados de radiación solar y de radiación ultravioleta durante los días despejados. Adicionalmente el menor espesor óptico de los gases de efecto invernadero favorece un mayor enfriamiento radiactivo nocturno de la superficie (Aceituno, 1996).

La acción combinada de la corriente de Humboldt junto al anticiclón subtropical del Océano Pacífico suroriental (Lettau y Lettau, 1978) en una zona subtropical de altura condiciona la hiperaridez de la región. La Cordillera de los Andes actúa como una barrera que detiene las masas de aire húmedo provenientes de la cuenca amazónica y Argentina central, generando una sombra de lluvias y favoreciendo la condición de hiperaridez (Hartley, 2003, Houston y Hartley, 2003). Garreaud, et al. (2010) sugirieron que las condiciones hiperáridas actuales son consecuencia de un proceso paulatino de desecación climática, gracias al refuerzo de la corriente de Humboldt desde finales del Mioceno y particularmente durante el Plioceno/Pleistoceno.

Lliboutry (1956) señala como límite de equilibrio glaciar los 5.000 m.s.n.m. aún cuando este valor puede variar por condiciones locales de exposición, este límite ha subido en las últimas décadas provocando la reducción de los cuerpos de hielo.

2.4 UNIDADES FISIAGRÁFICAS REGIONALES

En la región ubicada entre los 20°S - 28°S se reconocen seis provincias morfogenéticas en el territorio chileno, distinguiéndose de oeste a este: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko, Depresión Pre-Andina, y Altiplano-Puna con el cordón volcánico en su borde occidental o Cordillera Occidental (Figura 4).

El Salar de La Isla se encuentra en el borde occidental de la franja altiplánica, se ubica entre los altos topográficos de origen volcánico que componen la Cordillera Occidental en este sector. Las cuencas intramontañas como la del Salar de La Isla, se caracterizan por estar delimitada y presentar depósitos evaporíticos en sus áreas topográficamente más bajas.

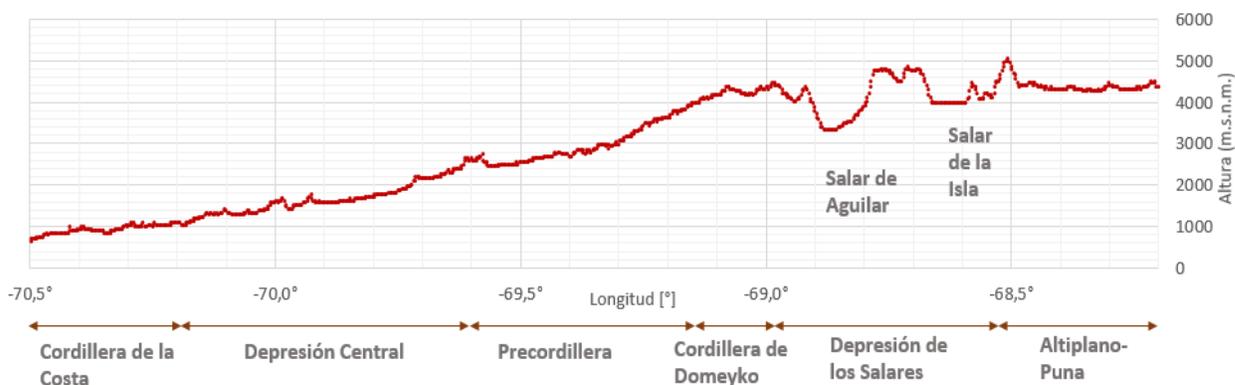


Figura 4: Perfil esquemático unidades fisiográficas a la latitud del segmento medio del Salar de La Isla, 23.73°S.

A continuación, se detallan aquellas unidades fisiográficas relacionadas con el área de estudio:

2.4.1 **Cordillera occidental**

Constituye el arco volcánico actual y describe a la actividad volcánica desarrollada durante el Mioceno - Reciente. Esta cordillera está constituida por un conjunto de edificios volcánicos que forman parte del Complejo Volcánico de los Andes Centrales (de Silva, et al., 1988), y se encuentra con una fuerte delimitación de los estratovolcanes que lo componen, extendiéndose paralelo al margen oeste del continente, y a unos 200 - 250 km al este de la fosa Chile Perú (Isacks, 1988).

2.4.2 **Puna de Atacama**

Plateau altiplánico, segundo más alto del mundo, después del Tíbet, y el más alto de origen no colisional (Isacks, 1988). Corresponde a una meseta con alturas de 3.700 a 4.200 m.s.n.m., que se extiende por unos 1.800 km en forma paralela al margen continental, y tiene un ancho que varía entre los 350 y 400 km. Esta unidad guarda una relación espacial y temporal con el magmatismo del arco andino, en tanto su alzamiento estaría en una primera instancia relacionado con el engrosamiento cortical en respuesta al acortamiento horizontal de una litosfera de menor densidad y mayor temperatura, donde también procesos como el adelgazamiento de la litosfera, hidratación del manto superior, o un underplating tectónico, podrían contribuir significativamente al engrosamiento (Allmendinger, et al., 1997).

Esta unidad de plateau de acuerdo a sus características morfológicas, estructurales, y edades de alzamiento se divide en dos secciones: una al norte de los 22°S que se denomina Altiplano,alzada a hace unos 25 Ma y otra al sur, que se denomina Puna, cuyo alzamiento comienza hace unos 5-10 Ma después del segmento norte (Allmendinger, et al., 1997).

2.5 **GEOLOGÍA**

El Salar de La Isla se encuentra dentro de los salares Andinos y lagunas Andinas (Figura 5) propuestos por Sernageomin (2014), localizados en cuencas controladas por el volcanismo Plio-Cuaternario, en la Alta Cordillera Andina y Altiplano, a más de 4.000

m.s.n.m., y afectados por la pluviosidad. Son los depósitos salinos más jóvenes y presentan salmueras subsaturadas en cloruro de sodio que contienen Na, Ca, Mg y Li como principales cationes, además contienen importantes concentraciones de sales de boro en su costra. Se caracterizan por ser sistemas muy dinámicos y muy frágiles, debido a su ubicación, características geológicas, climáticas y ambientales.

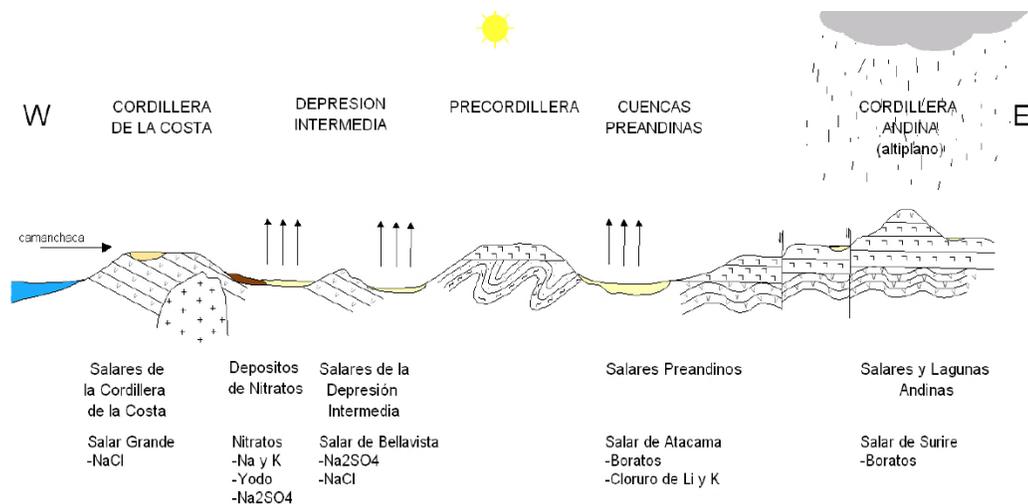


Figura 5: Caracterización de los salares del Norte de Chile (SERNAGEOMIN, 2014).

El área de estudio se encuentra en la Zona Volcánica Central (ZVC) (Stern, 2004), caracterizándose por una geología volcánica cenozoica (Figura 6), incluyendo desde grandes calderas hasta pequeños conos piroclásticos y domos, con edades comprendidas entre el Oligo- Mioceno y el Holoceno, sin existir registros históricos de actividad volcánica. El salar como tal corresponde al principal depósito sedimentario, que cubre cerca del 20% de la geología superficial de la cuenca del Salar de La Isla.

No hay evidencia de afloramientos del basamento en la cuenca que incluye al salar, sin embargo, en el borde oriental del Salar Las Parinas, la Formación La Tabla y algunos intrusivos forman parte de él con edad Paleozoica superior (Figura 6).

En general, se reconocen estructuras volcánicas constructivas y destructivas, y formas originadas por procesos exógenos. Debido a la escasez de secciones y perfiles naturales producto de las condiciones de aridez y la excelente conservación superficial de las estructuras volcánicas, Naranjo y Cornejo (1992) y Naranjo et al. (2013) definen unidades sobre la base de pequeñas diferencias en grados de erosión o preservación, juntamente con el apoyo de caracterizaciones litológicas y petrográficas, geoquímica, y dataciones radiométricas. Se distinguen seis fases o pulsos volcánicos, incluyendo grandes estratovolcanes, complejos volcánicos, conos piroclásticos menores, domos, campos de lavas y secuencias estratificadas de lava. Los conjuntos volcánicos más nuevos presentan una distribución circunscrita y definida, cubriendo parcialmente a los conjuntos volcánicos antiguos.

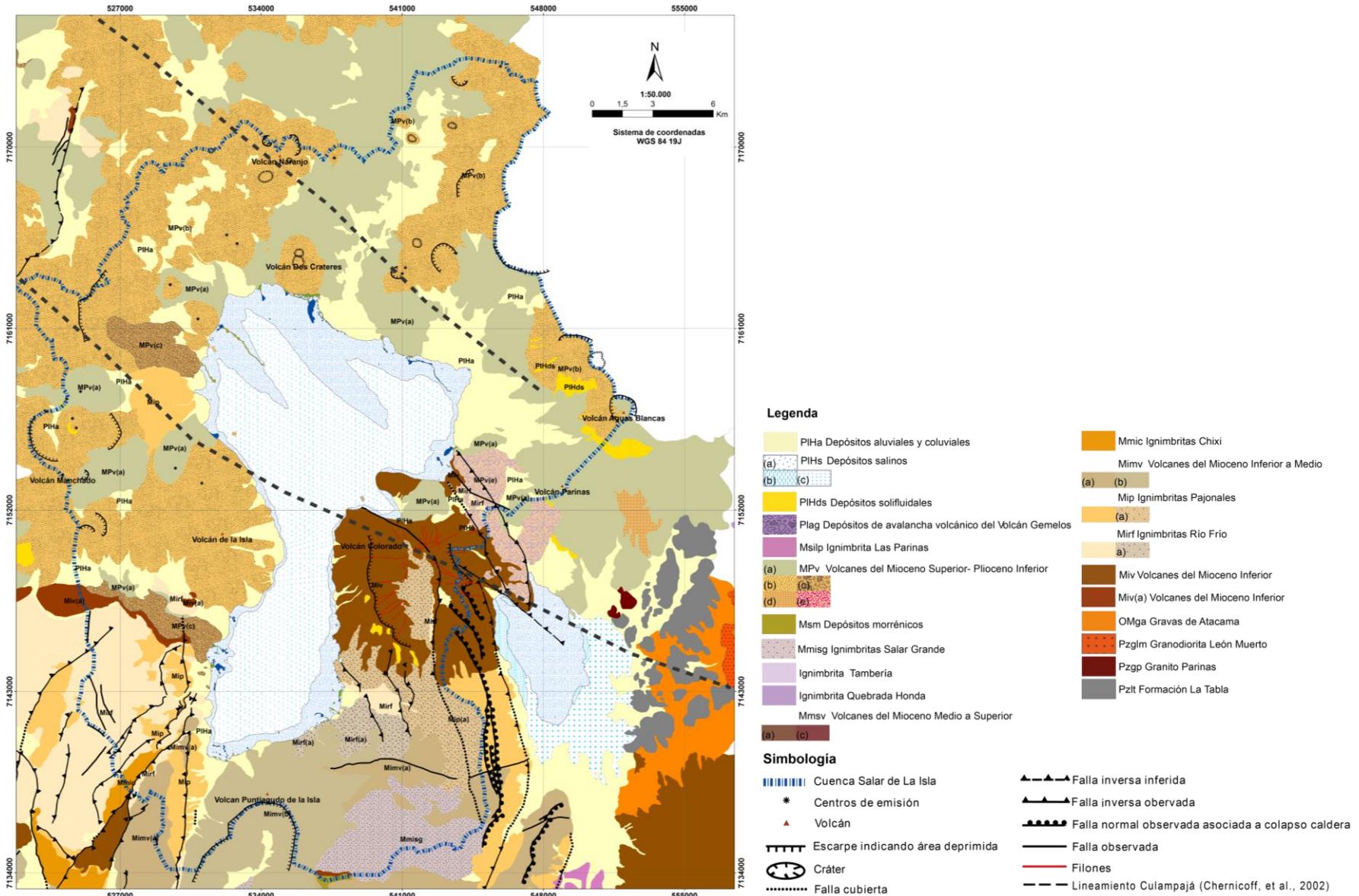


Figura 6: Geología zona de estudio, en base a Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, región de Atacama, 1:100.000, Naranjo, et al., 2013.

Naranjo y Cornejo (1992) y Naranjo et al. (2013) identifican una caldera de colapso, la Caldera Aguilar (Figura 7), correspondiente a una cuenca volcánica bastante obliterada por procesos tectónicos y volcánicos, teniendo aproximadamente 40 kilómetros de diámetro. Un domo resurgente y las cuencas Salar del Aguilar y de La Isla se formarían posteriormente dentro de la caldera. Asociado a la actividad de la caldera se tiene la emisión de las ignimbritas Río Frío y Pajonales, siendo los principales constituyentes del domo, que afloran en la región sur de la cuenca (Figura 6). Otras dos calderas se reconocen al sur del salar, Caldera Juan de La Vega y Salar Grande (Figura 7), cuyos productos ignimbríticos afloran escasamente al sur del área de estudio.

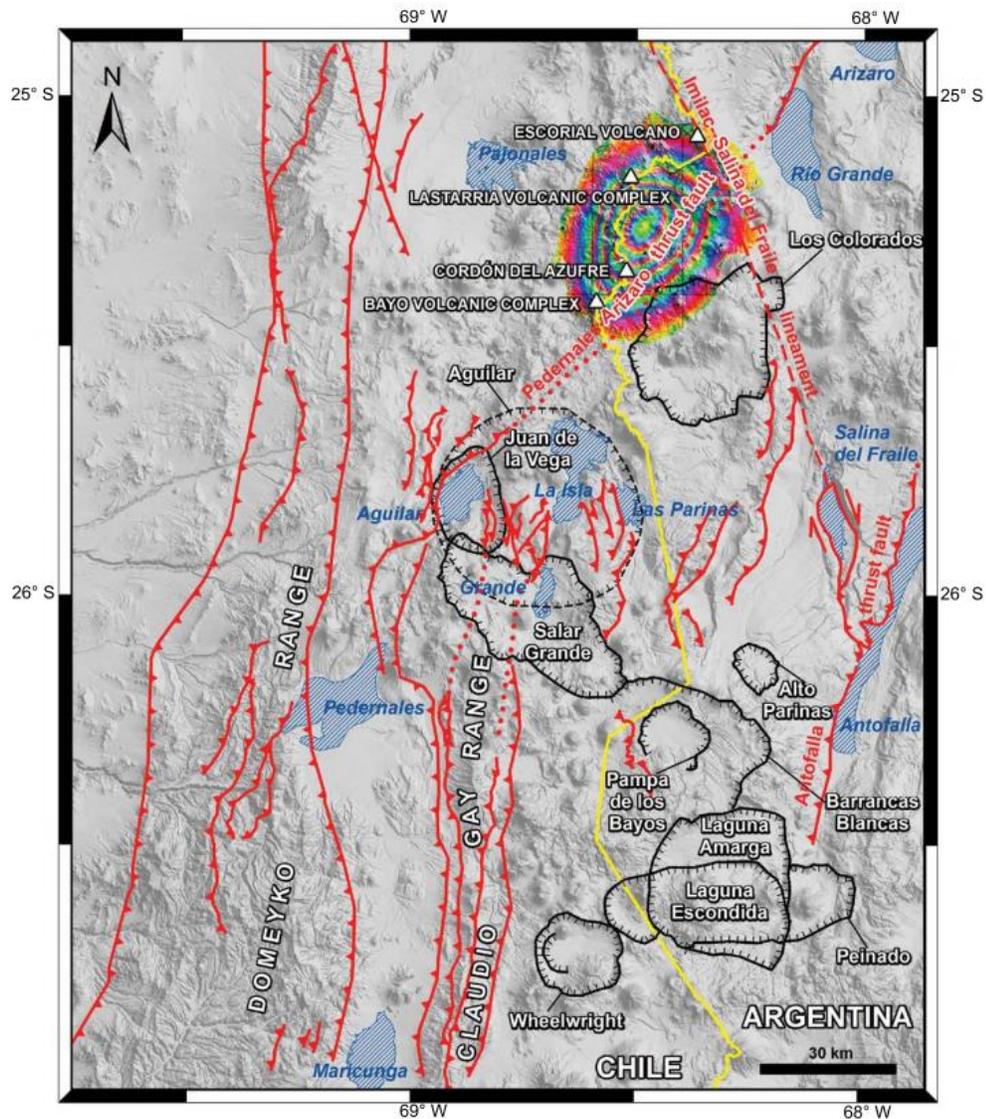


Figura 7: Delimitación de calderas y arreglo estructural de la Puna (Naranjo, et al., 2018). Sistemas de fallas asociados al levantamiento andino en rojo, calderas en negro, anillos concéntricos interferograma de intumescencia del área de elevación que incluye los complejos volcánicos Lastarria, Cordón del Azufre y Bayo.

2.5.1 *Descripción de depósitos y rocas estratificadas*

2.5.1.1 *Miv, Volcanes del Mioceno inferior*

Corresponde a un conjunto de estratovolcanes, secuencias de lavas estratificadas y cuellos volcánicos, intensamente erosionados, cuyos remanentes son cubiertos discordantemente por la unidad de Ignimbritas Río Frío, las Gravas de Atacama, y las subsecuentes unidades de rocas, en el área de estudio se encuentra asociado al Volcán Colorado ubicado al centro este del salar (Figura 6). En los núcleos erosionados de estos centros volcánicos se encuentran sistemas de filones radiales, cuellos y domos centrales de estructuras columnares y, en algunos casos, zonas de alteración hidrotermal (Naranjo et al., 2013). Su edad es contemporánea con los productos de denudación de relieves generados por el alzamiento andino (Gravas de Atacama) del Oligoceno superior - Mioceno medio.

2.5.1.2 *Mirf, Ignimbrita Río Frío (Mioceno Inferior)*

Conjunto de unidades de flujos ignimbríticos separadas en el tiempo que presentan un alto grado de soldamiento, siendo rosadas y grises. Algunos de sus flujos subyacen y otros cubren al conjunto volcánico anterior y al del Mioceno Inferior a Medio (Mimv). En torno a los volcanes Colorado y Puntigudo de La Isla, se encuentra una facie de brecha piroclástica residual o “lag breccia” de tamaño lapilli a bloques, correspondiente a la reincorporación de material volcánico asociada al colapso de la caldera.

Los trabajos de Schnurr, et al., 2007 y de Brandmeier y Wörner, 2016 estudian la geoquímica de las ignimbritas distribuidas ampliamente en los Andes Centrales, caracterizando entre ellas la Ignimbrita Río Frío, la Figura 8 detalla los resultados químicos obtenidos, incluyendo además otras ignimbritas presentes en la cuenca y cuencas adyacentes.

2.5.1.3 *Mip, Ignimbrita Pajonales (Mioceno Inferior-Medio)*

Presentan una menor extensión que las anteriores, sobreyacen a lavas del Mioceno Inferior (Miv) y se engranan con lavas del Mioceno Inferior a Medio (Mimv), caracterizadas por presentar alteración y falta de soldamiento, siendo principalmente depósitos ricos en pumita interdigitado con horizontes de “lag breccia”. Esta unidad junto a la unidad Mirf se ubica principalmente bordeando la parte sur del salar (Figura 6).

2.5.1.4 *Mimv, Volcanes del Mioceno Inferior a Medio*

Se encuentran estratovolcanes medianamente erosionados, lavas y brechas que presentan morfologías superficiales parcialmente preservadas. En ellos se distinguen ocasionalmente cráteres, calderas y depósitos de avalanchas. Estos volcanes y lavas sobreyacen a las Ignimbritas Río Frío (Mirf) y son cubiertos, localmente, por las unidades volcánicas posteriores. La mayoría de los volcanes incluidos en esta unidad conservan sus estructuras primarias, distinguiéndose sus cráteres o formas dómicas.

2.5.1.5 *Mmic, Ignimbrita Chixi (Mioceno Medio)*

Depósitos de flujo piroclástico gris oscuro de bombas corteza de pan escoráceas con un nivel superior rojizo, ricos en líticos. Sobreyacen a las unidades Mip y Mimv. Aflora en las inmediaciones del Domo Resurgente Aguilar, particularmente al SW de la

cuenca del Salar de La Isla (Figura 6), y su origen se asocia a una explosión de la Caldera Juan de la Vega de carácter hidromagmática.

2.5.1.6 Mmisg, Ignimbrita del Salar Grande (Mioceno Medio)

Naranjo et al., (2013) la describe como un conjunto de unidades de flujo ignimbrítico, rosáceas, blancas y amarillas, con soldamiento variable, se localiza principalmente al sureste del área de estudio (Figura 6), correspondiente al Salar Grande. Se disponen sobre la unidad Mimv y se encuentran parcialmente cubiertas por las unidades MPv. Su origen estaría asociado a colapsos sucesivos de la caldera Salar Grande, pudiendo formar parte de la vía de despresurización del Domo Resurgente Aguilar.

2.5.1.7 Msm, Depósitos Morrénicos (Mioceno Superior)

Depósitos no consolidados, diamícticos e inmaduros, con bolones y bloques volcánicos, subangulosos, matriz soportados de gravas subangulosas a subredondeadas, arenas y limos. Corresponde a una morrena lateral ubicado localmente al este del cerro Puntiguado de La Isla, parte sur de la cuenca del salar (Figura 6), de orientación este-oeste, teniendo un largo de 1,7 km y espesor de hasta 15 m.

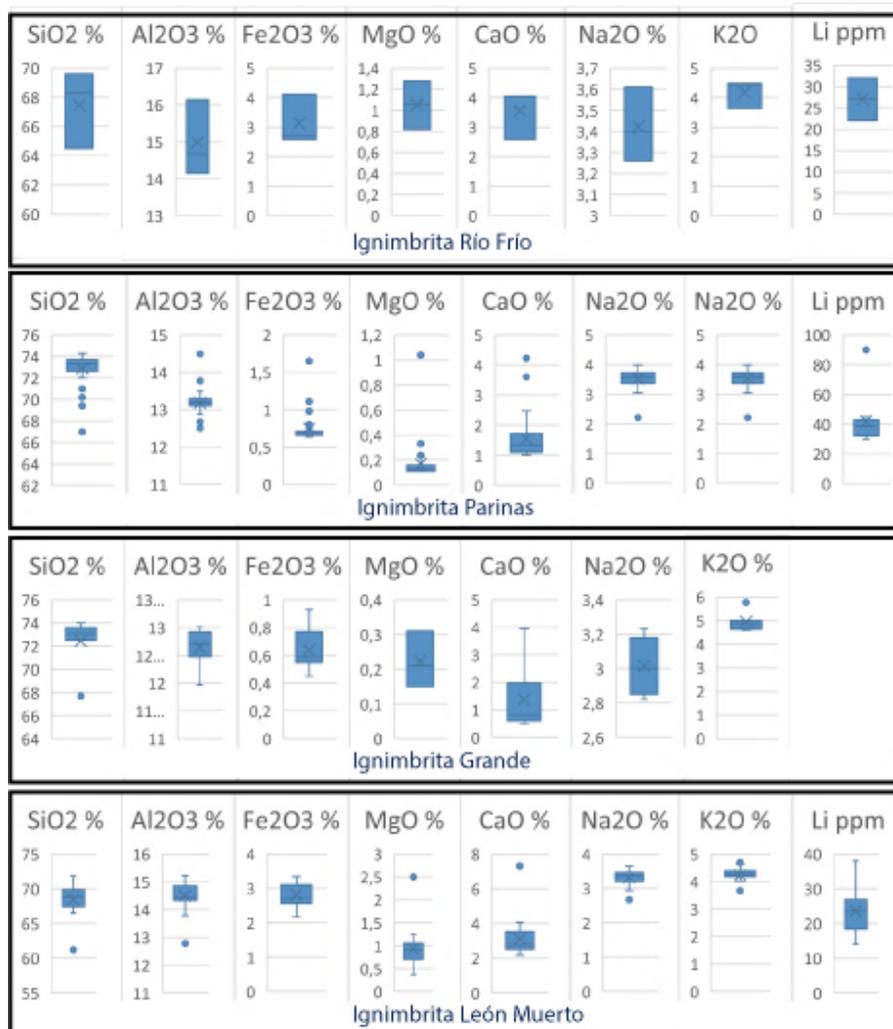


Figura 8: Química elementos mayores y contenidos de litio en ignimbritas localizadas en el área, a partir de Schnurr, et al., 2007, Brandmeier y Wörner, 2016.

2.5.1.8 MPv, Volcanes del Mioceno Superior a Plioceno Inferior

Estratovolcanes y numerosos conos de escoria que tienen, en su mayoría, dimensiones pequeñas. Su grado de erosión es débil a muy débil. También se distinguen depósitos de avalancha asociados a escarpes de colapso bien definidos, y a lavas de grandes volúmenes cuyas morfologías superficiales se muestran bien conservadas. La fuente de estas lavas se encuentra al este, emplazándose sobre las estructuras y depósitos de las unidades volcánicas más antiguas.

Esta unidad constituye una franja volcánica de distribución aproximadamente N-S, con anchos variables entre 7,5 y 37 km. en el territorio chileno. En la parte sur, esta estructura está interrumpida por una estructura mayor, la Caldera Aguilar, lo que tiene lugar al norte del Salar de La Isla (Figura 6).

2.5.1.9 PIHds, Depósitos Solifluviales (Pleistoceno- Holoceno?)

Se localizan de manera aislada principalmente sobre el Volcán Aguas Blancas y Volcán Colorado, estos depósitos se encuentran relacionados a la mayor acumulación de nieve y hielo. De forma lobulada se distribuyen principalmente sobre superficies no consolidadas aptas para la formación de permafrost como son los depósitos piroclásticos de caída, y los depósitos aluviales- coluviales, gracias a la acción de procesos de soliflucción, que corresponde a un desplazamiento que afecta a una masa de fango desplazada sobre una superficie de permafrost influenciado por la saturación de agua.

2.5.1.10 PIHa, Depósitos coluviales y aluviales (Pleistoceno -Holoceno)

Distribuidos ampliamente en la cuenca se caracterizan por ser depósitos sedimentarios heterogéneos generados por la denudación e incisión de las unidades preexistentes, se observa algo de estratificación en los sedimentos más finos (Naranjo, et al., 2013).

Los depósitos aluviales se localizan principalmente en los bordes del salar, mostrando su relación con el drenaje, en tanto los depósitos coluviales se distribuyen en zonas de escarpes y quebradas, siendo generalmente monomícticos y angulosos, gradando lateralmente a depósitos aluviales transportados por distintos flujos. Los procesos asociados a la denudación del paisaje y generadores de estos depósitos se desarrollan durante el Mioceno, sin embargo, localmente hay registros de actividad.

2.5.1.11 Caracterización de los depósitos salinos del Salar de La Isla PIHs

Stoertz y Ericksen (1974) a partir de imágenes aéreas caracterizaron una costra salina rugosa al centro del salar, y una superficie suave húmeda a seca en sus bordes, ésta última se distribuye principalmente en el norte y sur, con anchos variables. Naranjo y Cornejo (1992) adiciona que ambas se componen principalmente por halita, además de sulfatos en la costra suave.

Estudios en el norte del salar (Ruch, et al., 2012) analizan la variación vertical del núcleo y las facies marginales durante el período 2003-2008, estimando razones desde 0,5 a 1,5 cm/año de acreción vertical.

Naranjo et al. (2013) reconoce un primer miembro PIHs(a) caracterizado por una superficie suave, húmeda a seca, inundadas o frecuentemente inundables, compuestas principalmente por halita y otros minerales provenientes de las costras salinas adyacentes en períodos de inundación, los que luego son depositados y forman una

superficie suave. Suma además un segundo miembro PIH(b), costra salina compuesta principalmente de halita, con una tonalidad más oscura y de superficie rugosa con abundantes cavidades, las que permiten la circulación de fluidos en su interior.

2.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

A nivel regional en la zona del Altiplano y la Puna se han reconocido una serie de lineamientos con orientación NW (Figura 6 y Figura 9), caracterizados por ser profundos y en algunos casos ser de carácter translitosféricos (Salfity, 1985), Chernicoff, et al.(2002) propone que estas discontinuidades antiguas; preandinas, representan zonas de deformación frágil de varios kilómetros de ancho que han favorecido la reactivación periódica acompañado de eventos tectónicos-magmáticos. El lineamiento Culampajá (Salfity, 1985; Chernicoff, et al., 2002) compuesto de dos segmentos se extiende por la Puna con rumbo NW-SE, atravesando la zona norte de la cuenca del Salar de La Isla (Figura 6 y Figura 9).

A las estructuras anteriormente descritas a nivel regional también se identifican dos dominios morfoestructurales, el oriental marcado por el arco volcánico cenozoico superior, relacionado al desarrollo de espacios estructurales conjugados en relación con las estructuras inversas compresivas. Para este dominio Riller, et al. (2001) estableció una relación genética entre la dinámica de las calderas y el volcanismo ignimbrítico en la meseta de la Puna y la actividad de primer orden de zonas de transtensión lateral-izquierdo de orientación NW-SE a escalas local y regional, evidenciando que las edades de colapso de las calderas indican la actividad de estas zonas de falla que se iniciaron alrededor de 10 Ma en la meseta de la Puna.

Un segundo dominio, el occidental que comprende la Cordillera de Domeyko, formada entre el Oligoceno y el Mioceno Medio-Superior (Naranjo y Paskoff, 1985), que queda en evidencia por la presencia de conglomerados y gravas (Mga) del piedemonte, generados por la erosión de los terrenos alzados inmediatamente al oeste. En términos generales este dominio corresponde a un orógeno invertido de elongación N-S que fue sometido a un acortamiento EW con evidencia de deformación en el rumbo de poca relevancia, controlado por fallas extensionales del Triásico-Jurásico Superior-Cretácico Inferior invertidas de rumbo NNE-SSW, que da origen a la formación de un antiforme de inversión, destacando que en este sistema se emplazaron los pórfidos del Eoceno–Oligoceno (Amilibia, 2002).

A nivel más local Naranjo, et al. (2013) han reconocido fallas inversas de bajo ángulo que afectan la cubierta volcánica Miocena que han obliterado el escarpe morfológico de la Caldera Aguilar (Figura 6). Al NW del Salar del Aguilar, se encuentra una falla de 22 km de longitud con una orientación NNE que afecta a la unidad Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior (MPv), con un movimiento inverso y vergencia al este, según sus rasgos morfológicos superficiales. Los niveles superficiales de la parte sur del Domo Resurgente (parte sur de la cuenca del Salar de La Isla) se encuentran afectados por fallas inversas con vergencia al este en el flanco occidental y al oeste en el flanco oriental. Al sureste del domo se ubica un horst de hasta 500 m de rechazo, cuyo flanco oriental sobre-escurre la ladera oeste del volcán Punttiagudo de La Isla (Figura 6). Entre los salares de La Isla y Las Parinas, se tiene un conjunto de fallas inversas de orientación NW-SE y vergencia al este, con rechazos de hasta 500 m en el

frente, el que además presenta fallas normales menores asociadas a la parte alta del escarpe, donde los niveles de ignimbrita se encuentran deformados con 15° al suroeste.

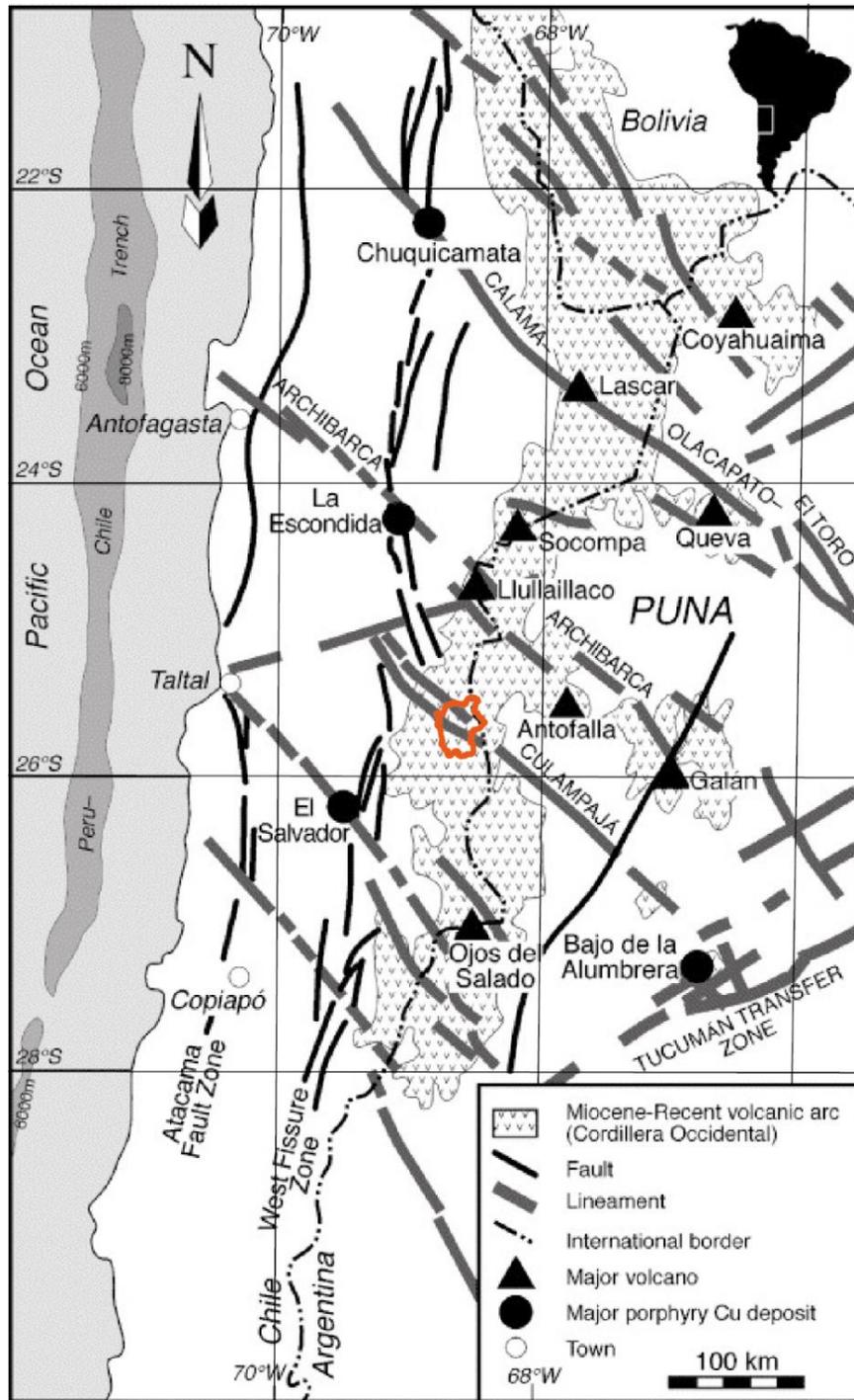


Figura 9: Esquema del norte de Chile, noroeste de Argentina y sudoeste de Bolivia; ubicación de las principales fallas y lineamientos a escala regional. En naranja se ha señalado la ubicación de la cuenca del Salar de La Isla (modificado Chernicoff, et al., 2002).

2.7 HIDROLOGÍA

La cuenca de drenaje del Salar de La Isla se caracteriza por su origen volcánico y carácter endorreico, formando parte del conjunto de cuencas cerradas altiplánicas. La delimitación de la cuenca ha sido realizada en varios estudios con diferentes escalas de trabajo, a continuación, se presentan algunos de los principales aspectos morfométricos descritos en aquellos trabajos:

Tabla 1: Aspectos morfométricos de la cuenca del Salar de La Isla descritos en estudios anteriores.

Estudio	UTM	UTM	ALT	ALT	ALT	AREA	Perímetro
	Este	Norte	Max(m)	Mín(m)	Med (m)	Cuenca (km ²)	km
Risacher, et al. (1999)	535415	7159675	5761	-	-	858	-
DICTUC (2009)	536212	7154111	5750	3940	4321	736,4	196
Aquaterra (2013)	536434	7153905	5755	3945	4322,7	758,4	157,4

Respecto de su alimentación, la gran mayoría de sus tributarios provienen del sector norte y sur, descendiendo desde los cordones montañosos existentes que presentan un mayor grado de erosión, un menor aporte se evidencia al centro del salar, donde se angosta el salar y se presenta un relieve de mayor pendiente.

2.8 HIDROGEOLOGÍA

El estudio realizado por la DGA en 1986 expone las principales unidades hidrogeológicas a nivel nacional a una escala 1: 2.500.000, en particular para el área altiplánica de la III Región, se define solo una unidad hidrogeológica; rocas volcánicas de muy bajas condiciones de permeabilidad y muy bajo potencial hidrogeológico. Estos primeros resultados para el área de estudio a pesar de su falta de detalle permiten tener una primera aproximación y base hacia la determinación de las características hidrogeológicas de la cuenca.

El trabajo realizado por Ricketts y Hutcheon (2012) describen las características hidrogeológicas de varias cuencas endorreicas de la región de Atacama, entre ellas la del Salar de La Isla, concluyendo que los depósitos no consolidados de abanicos aluviales y coluviales presentan el mayor potencial junto con las ignimbritas fisuradas.

Ricketts y Hutcheon (2012) proponen un modelo hidrogeológico (Figura 10), en el que reconocen líneas de flujo superficial, y subterránea; local poco profundo y regional algo más profundo, se suman también un posible flujo a través de fallas y una posible convección impulsada por gradientes térmicos y/o densidad. Indicadores de evaporación y precipitación representan alternaciones de condiciones relativamente húmedas y áridas.

Plantean, además un posible flujo subterráneo desde la cuenca del Salar de la Isla, hacia la cuenca adyacente del Salar de Las Parinas, teniendo como referencia la topografía, características del drenaje, geometría y definición de acuíferos y acuitardes, sumado a las fallas permeables que se encuentran en la zona y el modelo conceptual de una posible "corriente subfluvial" entre cuencas de salares adyacentes como es el caso entre los salares de Michincha (4.120 m.s.n.m.) y Coposa (3.730 m.s.n.m.) en el Altiplano chileno, distanciados a 33 km (Montgomery, et al., 2003). Cuestión que carece

de sustento más allá del hecho de su cercanía y características composicionales de dichos salares.

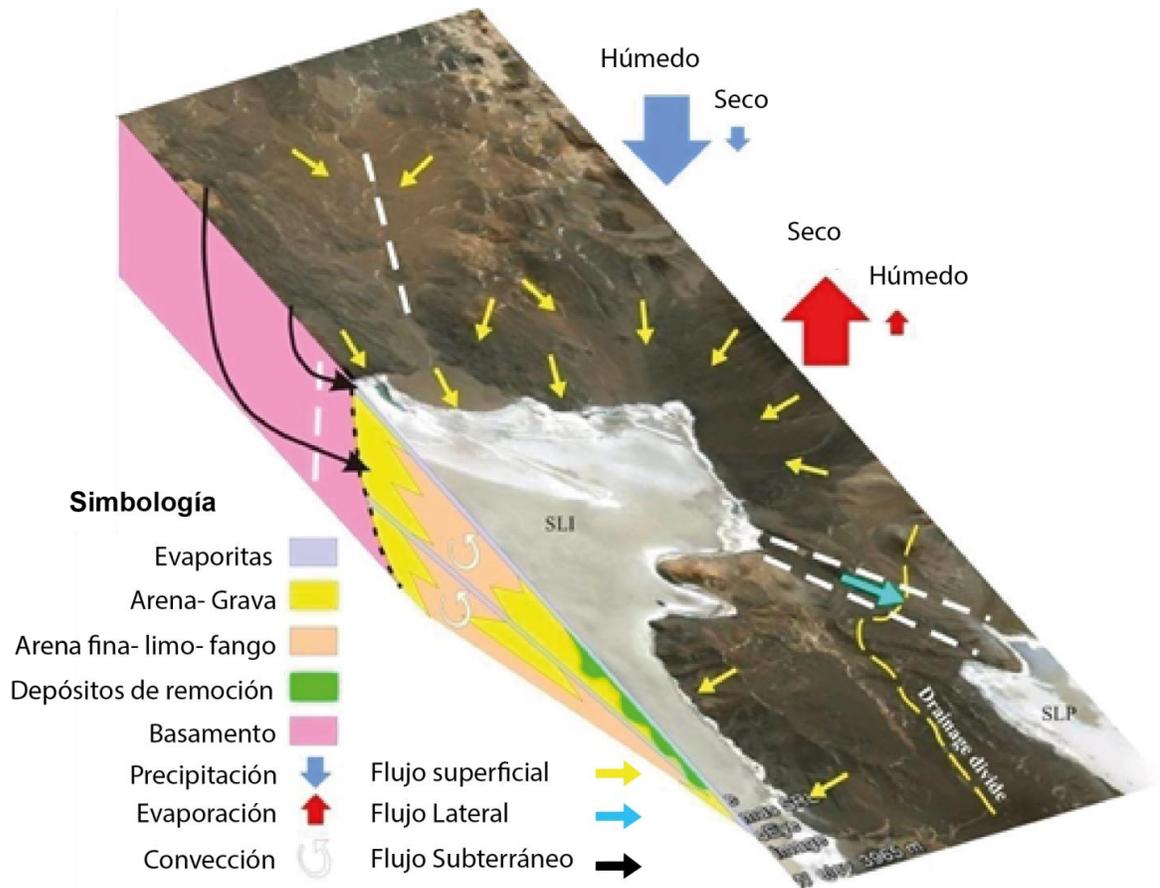


Figura 10: Modelo conceptual del agua subterránea para la parte Norte del Salar La Isla (Ricketts y Hutcheon, 2012).

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

3.1.1 *Caracterización costra salina*

A partir de lo observado en terreno es posible complementar la geología local descrita por Naranjo y Cornejo (1992) y Naranjo et al. (2013), describiendo principalmente la costra salina, la que presenta diferencias texturales notorias, siendo un rasgo fácilmente observable la diferencia de color que presenta (Figura 11a,b y c, Figura 12); marrón en su núcleo, y blanca en las facies marginales ubicadas en el borde del salar, teniendo ésta última una distribución variable, más desarrollada en la parte norte, y siendo en el centro bastante limitada. Esta distribución de color se correlaciona con la textura de la costra, de manera que la blanquesina se relaciona a una costra más suave (Figura 11d) con halita más compacta y cristalina, en tanto, la marrón con una costra más rugosa (Figura 11e) caracterizada por una morfología superficial irregular que sobresale por sobre la anterior unos cuantos centímetros. Texturas más locales se logran identificar una halita más fangosa entorno a las lagunas que se desarrollan en el sureste del salar (Figura 11f) y donde existe una importante actividad faunística, una halita cristalina (Figura 11g) se desarrolla en la costra suave del sector suroeste del salar, montículos de yeso (Figura 11h) que alcanzan hasta 1,5 metros de altura reconocibles desde el camino por su brillo, desarrollados en el sector del salar más próximo al Salar Las Parinas formando bandas de hasta 150 metros de ancho paralelo al borde del salar, en sus valles existen sales de halita. Estas últimas unidades de yeso podrían representar un tercer miembro PIHs(c) de facie lacustre de salares antiguos que afloran ampliamente en el salar contiguo Las Parinas dada su cercanía y ubicación, y en el que la tectónica-volcanismo habrían generado el aislamiento de este miembro.

Entre las estructuras que se encuentran en el salar son grietas de desecamiento con distinto grado de avance, en algunas las aristas están bien desarrolladas (Figura 11i), en otras éstas son más rasas (Figura 11j), y algunas se encuentran cubiertas por agua gracias al avance de una laguna (Figura 11k). Dentro del salar existen lagunas desarrolladas en las facies marginales de profundidades variables, aunque algo más profundas en la zona norte del salar, donde también se han descrito el desarrollo de ojos de agua conectados a algunas lagunas. En torno al salar también se observan vertientes con aporte de aguas más diluidas, algunas de ellas asociadas a vegetación. Cerros islas correspondientes a depósitos volcánicos no cubiertos existen en la parte norte del salar, alcanzando unos 200 metros de diámetro, y varios metros de altura.





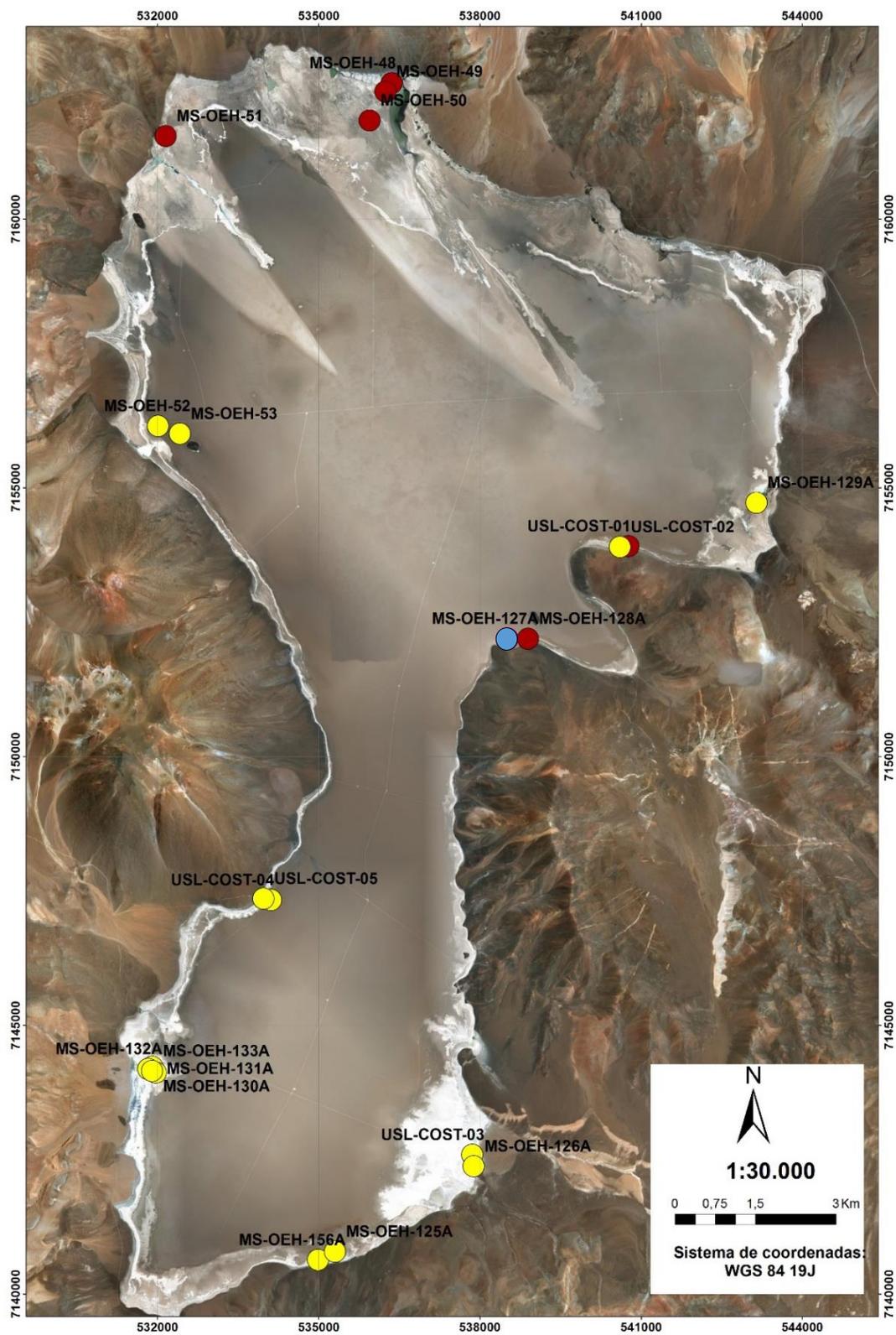
Figura 11: Fotografías costra salina del Salar de La Isla; a) Vista general del salar, b) Zona sur del salar, c) Zona norte del salar, d) Costra suave, e) Costra rugosa, f) Halita fangosa, g) Halita cristalina, h) Montículos de yeso, i) Grietas de desecamiento en estado avanzado, j) Grieta de desecamiento rasa, k) Grieta de desecamiento como base de una laguna, l) Laguna ubicada al centro este del salar de unos 10 cm de profundidad.

Durante la campaña de terreno fueron recogidas 5 muestras de costra salina, que se suman a 16 muestras anteriormente obtenidas por Troncoso, et al., 2013 y Troncoso y Ercilla, 2016 para estudios desarrollados por Sernageomin. Los resultados de difracción de rayos X (Anexo A y Anexo B) arrojan principalmente peaks de halita y yeso, lo que no difiere de lo que se observa macroscópicamente, sin embargo, permite reconocer además de cloruros y sulfatos, la presencia de boratos, nitratos y silicatos (Tabla 2). La Figura 12a y Figura 12b muestra los resultados de la mineralogía y composición de las muestras de costra salina respectivamente, lo que permite caracterizar un dominio de sulfatos en la parte norte del salar siendo equitativa el resto de los componentes, caso particular es el de la muestra MS-OEH-48 donde se tiene que $Mg > Ca$. Al sur desde la zona de máxima extensión se reconoce una tendencia principalmente clorurada a excepción de la muestra MS-OEH-52, que presenta una distribución de $Na > SO_4 > Cl > Ca$, pudiendo representar el límite entre estos dominios. Las muestras MS-OEH-127A y MS-OEH-128A (Figura 12b) muestran la química de los montículos de yeso, predominando los sulfatos y el Ca. La química de elementos mayores se correlaciona con la mineralogía mayoritaria descrita de halita y yeso (Figura 12).

Tabla 2: Mineralogía primaria y secundaria encontrada en las muestras de costra salina.

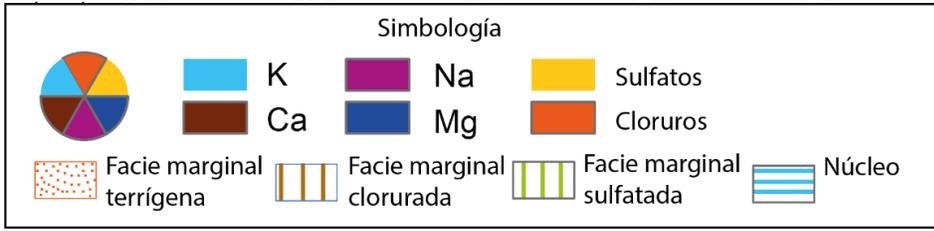
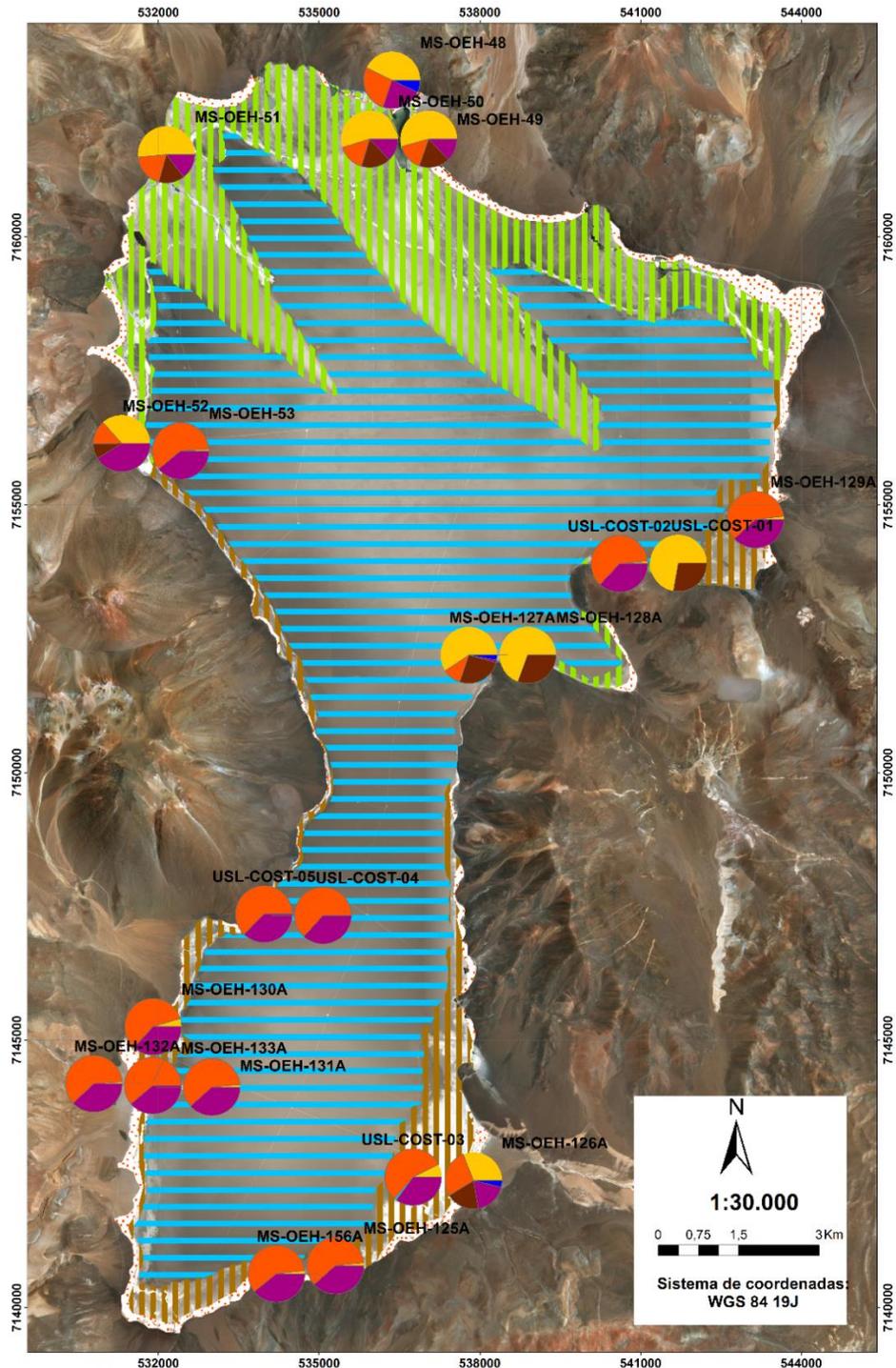
Mineral	Fórmula		
Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	Hilgardita	$Ca_2B_5O_9Cl \cdot H_2O$
Bloedita	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Inyoita	$CaB_3O_3(OH)_5 \cdot 4H_2O$
Borax	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	Korzhinskita	$Ca(B_2O_4) \cdot 0,5H_2O$
Calcita	$CaCO_3$	Metahalloysita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Niter	KNO_3
Cristobalita	SiO_2	Silvita	KCl
Epsomita	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Singenita	$K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$
Halita	$NaCl$	Tamarugita	$NaAl(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Hexahidrita	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Las descripciones anteriores permiten establecer que el núcleo del salar corresponde a la unidad PIH(b) con halita dominante, caracterizado por ser rugoso y marrón, con desarrollo de polígonos remanentes, donde la halita precipita por evaporación capilar y el nivel de aguas teóricamente se encontraría a unas decenas de centímetros (Warren, 2016). En cuanto a la facie marginal, ésta corresponde al miembro (a) de la misma unidad, la que se caracteriza por presentar menor altura con respecto al núcleo, presentar eflorescencias efímeras y ser heterogénea en cuanto a sus componentes, así en el norte es principalmente sulfatada (Figura 12b), con desarrollo local de polígonos y que difiere de los montículos de yeso con textura selenítica y/o especular identificados que se habrían formado con anterioridad según lo propuesto por (Naranjo Y Cornejo, 1992, Naranjo, et al., 2013), en tanto la centro-sur es clorurada (Figura 12b), con deposición de halita tipo chevron y cristalina, con mayor desarrollo de polígonos de desecación y una película de agua sobre la costra, para estas facies el nivel de agua se encontraría a unos pocos centímetros (Warren, 2016). A la facie marginal también se suma una subaérea de lodo fangoso con componente terrígeno (Figura 12b), que en este caso se asocia principalmente a las vegas, vertientes con vegetación, y depósitos aluviales y coluviales, y en el que el nivel de aguas se encontraría a unas decenas de centímetros pudiendo llegar a valores métricos (Warren, 2016), también se añade una facie subacuosa compuesta por las lagunas y canales, donde su desarrollo se asociaría a la disolución de halita y representarían afloramiento superficial del nivel de agua.



Simbología	
Mineral principal	
● Anhidrita	● Halita
	● Yeso

a)



b)

Figura 12: Caracterización costra salina del Salar de La Isla: a) mineralógica y b) composicional. Elaboración propia.

3.1.2 Caracterización geomorfológica

3.1.2.1 Cuenca y parámetros morfométricos

Los límites de la cuenca (Figura 13) en que se encuentra el Salar de La Isla han sido redefinidos dado el mayor detalle de este trabajo con respecto a los trabajos anteriores en la zona, la delimitación de la cuenca y su drenaje es resultado del procesamiento de un modelo digital de elevación (Anexo C), sirviendo como base los límites propuestos por la DGA y la DICTUC (2009). Además, se ha determinado la jerarquización del drenaje siguiendo la clasificación propuesta por Strahler en 1957, de igual manera según la topografía y el tipo de drenaje; principalmente dendrítico, radial y paralelo, se zonifican 15 subáreas dentro de la cuenca que tienen un patrón similar y drenarían en un sector particular del borde del salar mediante un abanico aluvial o ladera, la superficie del salar es una de ellas donde drenarían de manera superficial y subterránea el resto de las subáreas, la Tabla 3 describe sus principales características.

Tabla 3: Características de las subcuencas definidas en la cuenca del Salar de La Isla.

Subcuencas	Área (km ²)	Perímetro (km)	Características
1	101,046	54,385	Drenaje de tipo dendrítico a subparalelo asociado a gran abanico aluvial derivado desde edificios volcánicos del este, presenta la línea de drenaje más extensa con segmentos hasta el 4° orden.
2	87,129	45,744	Generado en las laderas oeste de los volcanes Parinas y Aguas Blancas, drenaje tipo dendrítico a radial, asociado a abanicos aluviales.
3	11,444	18,006	Drenaje paralelo con escaso desarrollo de líneas de drenaje.
4	6,872	16,010	Limitada en sus lados por el Cerro La Isla y volcán Colorado, con un drenaje dendrítico escaso.
5	20,864	19,378	Subárea cerrada con salida probable hacia el sur. Líneas de drenaje convergente dentro del área.
6	9,595	15,765	Drenaje paralelo en la ladera oeste del volcán Colorado.
7	44,677	34,167	Red dendrítica proveniente desde el límite con la cuenca adyacente Las Parinas y paralela en la ladera sur del volcán Colorado alcanzando el borde sureste del salar con un abanico aluvial.
8	51,716	31,772	Drenaje paralelo que cubre la ladera norte y este del volcán Puntiaugado de La Isla, siendo más difuso en esta última.
9	18,610	17,574	Patrón dendrítico bastante encajonado que drena en el extremo sur del salar.
10	43,058	30,483	Desarrollo de drenajes dendríticos que alcanzan el borde suroeste del salar formando una serie de abanicos aluviales
11	34,424	26,553	Características similares a la número 7, patrón dendrítico y paralelo que termina en un abanico, ahora en el borde centro-sur oeste del salar.
12	25,293	24,767	Drenaje paralelo en la ladera este del volcán de La Isla.
13	87,813	48,374	De similares características a la subárea número 10, drenando con una serie de abanicos en el borde noroeste del salar, teniendo en su parte alta en torno al volcán Manchado un drenaje cerrado de poca extensión.
14	59,076	36,972	Drenando en el extremo norte del salar, con desarrollo de un drenaje dendrítico en su parte más occidental y paralelo a radial alrededor de los volcanes Dos Cráteres y Naranja en su margen más oriental.
15	158,163	82,177	Sumidero de todas las demás subcuencas.

A partir de la cuenca y la red definida, se realiza una caracterización de la misma en términos morfométricos, para lo cual se han calculado los siguientes parámetros, que se encuentran resumidos en la Tabla 4:

- 1) Área y perímetro de la cuenca a partir del nuevo límite.
- 2) Cotas Máxima, Mínima y Media de la cuenca, según el área que cubre la cuenca en el DEM utilizado.
- 3) Centro de Gravedad de la cuenca, definiendo sus coordenadas norte y este.
- 4) Longitud del cauce principal, corresponde a la distancia que abarca el cauce principal, en este caso dado el carácter endorreico de la cuenca se considera el cauce más largo dentro de la misma, éste se ubica en la zona noreste específicamente en la subcuenca n° 1.
- 5) Ancho Equivalente, referida a la relación entre el área y la longitud del cauce principal.
- 6) Coeficiente de Gravelius, se define como la relación entre el perímetro y el perímetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca hidrográfica:

$$K = 0,282 * \frac{\text{Perímetro}}{\sqrt{\text{Área}}} \text{ Ec. 1}$$

Valores cercanos a la unidad, indican una aproximación hacia una forma circular de la cuenca, para este caso el valor supera ampliamente uno (Tabla 4) lo que se correlaciona con la forma elongada de la cuenca en la dirección N-S.

- 7) Rectángulo Equivalente, supone una superficie rectangular de lados L y l de igual área y perímetro de la cuenca, de manera que las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas a los lados menores del rectángulo (l), de acuerdo con lo anterior esta cuenca rectangular teórica tendría el mismo coeficiente de Gravelius (K), por lo tanto:

$$L = \frac{K^2 \sqrt{\text{Área}} * (1 + \sqrt{1 + (\frac{1,128}{K})^2}}{1,128}, \text{ lado mayor Ec. 2}$$

$$l = \frac{K^2 \sqrt{\text{Área}} * (1 - \sqrt{1 - (\frac{1,128}{K})^2}}{1,128}, \text{ lado menor Ec. 3}$$

- 8) Pendiente media de la cuenca, corresponde a un índice que hace referencia a la caída en superficie, por la velocidad que adquiere y la erosión que produce. Se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante:

$$S_{\text{cuenca}} = 100 \frac{\sum Li * E}{\text{Área}} \text{ Ec. 4}$$

Donde,

Li = Longitud de cada una de las curvas de nivel

E = Equidistancia de las curvas de nivel

Para este caso se utilizaron curvas de nivel de 100m, cuyas longitudes suman 1.409,713 km.

- 9) Pendiente media del cauce principal, desnivel entre los extremos del tramo, dividido por la longitud horizontal de dicho tramo.
- 10) Densidad de drenaje, se determina dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total. En general, una mayor densidad de escurrimientos

indica mayor potencial de erosión, y asociado a regiones de suelos impermeables, con poca vegetación, de relieve montañoso. El resultado obtenido para cuenca del Salar de La Isla arroja un próximo a uno, relativamente alto consistente con un suelo más impermeable asociado a las unidades volcánicas y al relieve que presenta.

- 11) Curva Hipsométrica, representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca, indicando su grado de madurez. Describe la relación entre la propiedad altimétrica de la cuenca en un plano y su elevación. Se grafica proyectando la altura en función del área drenada a una determinada altitud, pudiendo normalizarse con respecto a sus máximos de manera de obtener una curva adimensional. Para el caso de la cuenca estudiada se elaboran curvas hipsométricas (Figura 14) procesando el DEM que incluye solo a la cuenca en la herramienta *Reclassify* de *ArcMap 10.5*, indicando un drenaje con una tendencia más bien a la fase de vejez según Figura 14.

Tabla 4: Caracterización morfométrica de la Cuenca del Salar de La Isla

Parámetros morfométricos		
Área cuenca (km²)		759,77
Perímetro (km)		153,17
Cota (m.s.n.m.)	Máxima	5.786
	Mínima	3.981
	Media	4.363,14
Centroide (WGS 84)	Este	536.383,04
	Norte	7.154.012,44
Longitud cauce principal (km)		17,82
Ancho equivalente (km)		42,63
Coefficiente de Gravelius		1,56
Rectángulo equivalente (km²)	L (km)	64,87
	L (km)	11,71
Pendiente media de la cuenca		18,55
Pendiente media del cauce principal		48,14
Densidad de drenaje		0,98

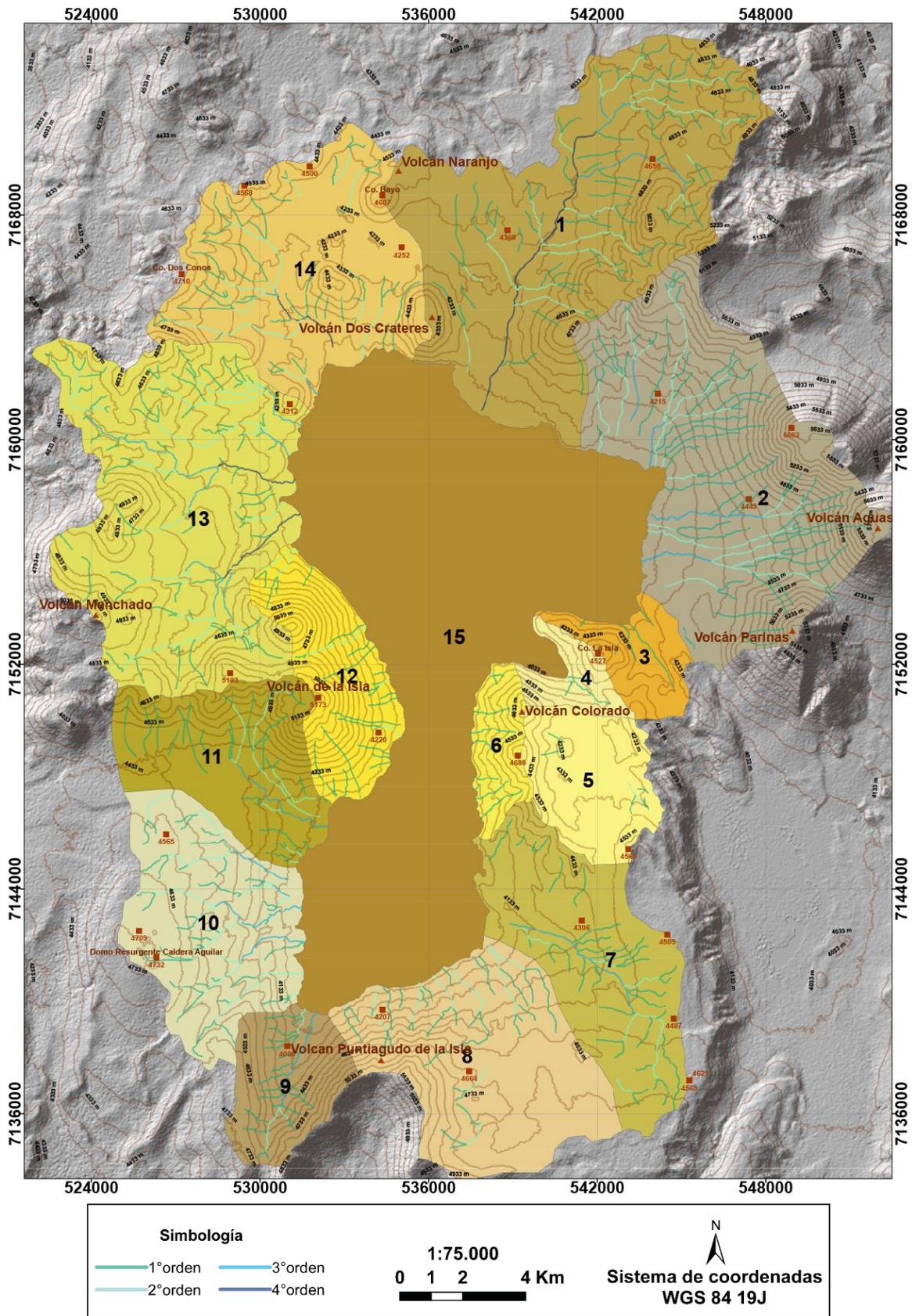


Figura 13: Cuenca Salar de La Isla definida en este estudio; red drenaje jerarquizada y distinción de subcuencas (áreas coloreadas y numeradas). Elaboración propia.

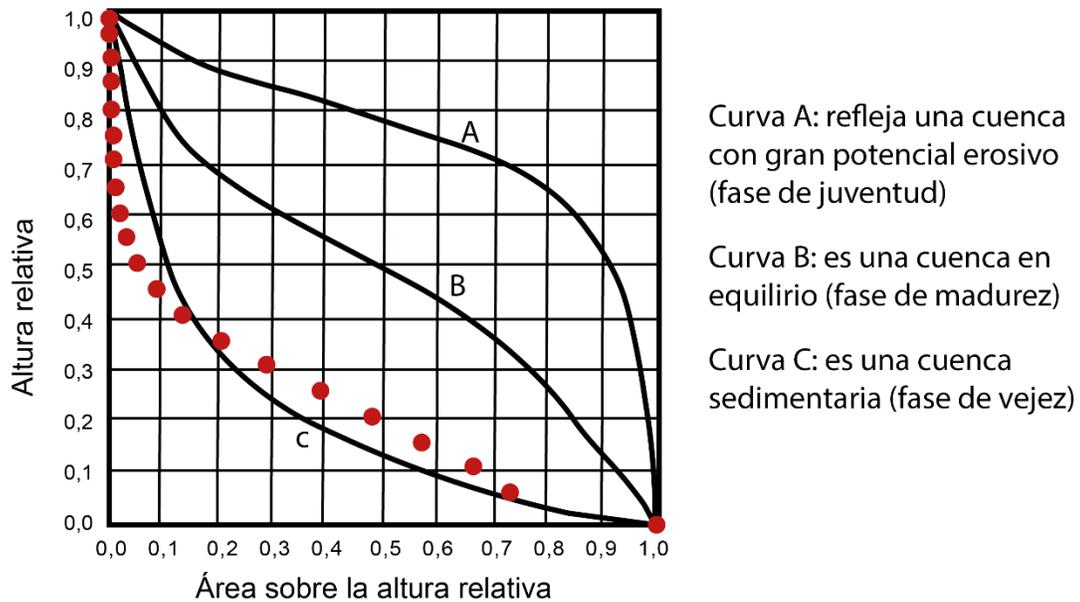


Figura 14: Curva hipsométrica unitaria de la Cuenca del Salar de La Isla e interpretación curvas hipsométricas.

3.1.2.2 Unidades geomorfológicas de la cuenca del Salar de La Isla

El principal rasgo geomorfológico de la cuenca es su carácter cerrado, gracias al alzamiento andino, el volcanismo, y las condiciones climáticas áridas que ha permitido el desarrollo de sistemas evaporíticos en esta región, en el caso particular del Salar de La Isla, este carácter cerrado se evidencia en que la cota media del salar se encuentra entorno a los 4.000 m.s.n.m. mientras que los altos topográficos que lo rodean superan los 5.000 m.s.n.m. en su mayoría.

Los edificios volcánicos que en general mantienen su morfología original se distribuyen ampliamente en la cuenca y la han modelado, siendo la proyección en intersección de sus laderas, los depocentros que han dado origen al salar, se reconocen formas de volcanes compuestos, complejos, simple, domos y conos de escoria (Figura 15), junto a ellas también geoformas de cráteres y escarpes. Avalanchas volcánicas se encuentran en torno a los Volcanes Manchado y Agua Amarga, donde solo sus laderas orientales afloran dentro de la cuenca, el colapso de los edificios volcánicos estaría acotado entre los 5,8 a 5,2 Ma según lo señalado por Naranjo et al. (2013) basado en las unidades cubiertas por este fenómeno, todo lo anterior evidencia condiciones de desestabilización posterior al desarrollo de extensas calderas en la zona. Los volcanes de La Isla y Colorado (subcuencas n°s 6 y 12) muy próximos entre sí, ubicados al centro de la cuenca donde se estrecha el salar, presentan las mayores pendientes con valores cercanos a los 70° de inclinación, condiciones que no habrían permitido un mayor desarrollo del salar en esa zona.

Otro rasgo distinguible que ha servido de aporte clástico en este gran depocentro son los abanicos aluviales presentes alrededor de todo el salar, generados por la pérdida de capacidad de transporte asociado a un cambio en el nivel base, favorecidos por la topografía montañosa y la tectónica. En general éstos se desarrollan más en la parte norte de la cuenca, con una mayor extensión, situación que habría permitido un mayor aporte terrígeno al salar en su parte norte.

Como aporte clástico también se tiene el generado por la acción de la gravedad, los depósitos coluviales, los que se generan y asocian principalmente a las laderas de los volcanes con mayores pendientes, como es el caso de los volcanes de La Isla, Colorado, Las Parinas, Aguas Blancas y Cerro Puntagudo de La Isla (Figura 15).

Hacia el sur de la cuenca, principalmente hacia el oeste se desarrolla el Domo Resurgente del Aguilar, mediante estructuras que han expuesto grandes afloramientos de ignimbritas, y que podrían llegar a formar parte del relleno de los depocentros, en especial el del sur.

Se distinguen de forma local en las cumbres de los volcanes (Figura 15 a) crioformas de *protalus lobe*, correspondientes a una mezcla de roca y contenido de nieve variable, junto con *taluses* de geliflujión formados por una saturación en el suelo y permafrost, dando cuenta de procesos periglaciares en la cuenca, con ciclos de congelamiento y descongelamiento repetitivos. Estudios de los registros de la estación meteorológica más cercana al salar del proyecto Salares Norte de Goldfields, establece que la isoterma cero se encontraría a los 4.589 m.s.n.m., por tanto, toda la superficie sobre esta cota sería potencialmente afecta a estos tipos de procesos, donde se tiene como agente el agua en estado sólido. De carácter aún más local se ha descrito una morrena lateral junto al volcán Puntagudo de La Isla, aunque no hay registro de glaciares en el área.

En el abanico aluvial ubicado en la ladera oeste del volcán Aguas Blancas se han identificado alrededor de 18 dolinas alineadas paralelo al borde del salar, con diámetros que van desde los 10 a los 26 metros, y profundidades máximas de los 2-5 metros. Estas depresiones indican procesos de subsidencia y dado sus dimensiones serían dolinas tipo *suffosion* (Warren, 2016), asociado a un proceso de disolución rápida de depósitos evaporíticos que presentan niveles de cubierta clástica, demostrando la acción de aguas diluidas; subsaturadas que están entrando al sistema salino. Se reconocen dos frentes, en el que el más próximo al borde del salar presenta algunas cubiertas de sales (Figura 15b).

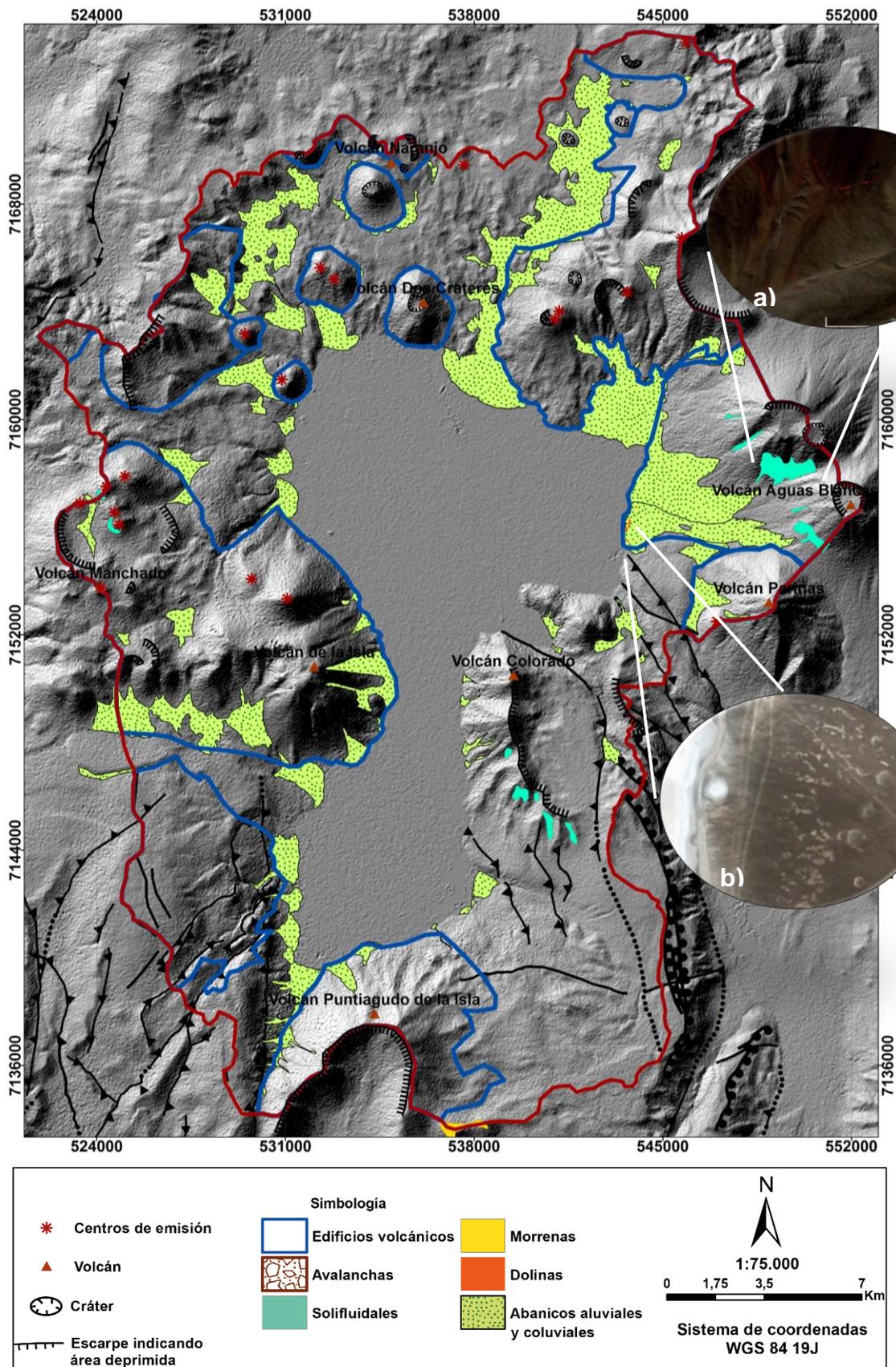


Figura 15: Geoformas presentes en la cuenca del Salar de La Isla. a) Crioformas protalus lobe ubicadas en la ladera sur del volcán Aguas Blancas. b) Dolinas ubicadas en el borde este del salar. Elaboración propia.

3.1.3 **Caracterización hidrológica**

Numerosos han sido los estudios que han apuntado a la caracterización de las cuencas endorreicas del Altiplano y la Puna chilena desde el punto de vista hidrológico, de manera cualitativa y cuantitativa, desarrollando distintas metodologías para su estimación y cuya principal limitación es la falta de registro histórico de los distintos parámetros hidrológicos junto a la no existencia de estaciones de monitoreo en sectores de alta montaña, que para el caso de la cuenca del Salar de La Isla tiene como consecuencia una alta incertidumbre de sus resultados.

Es por esta razón que los estudios más recientes han instalado estaciones a mayores alturas en el norte de la región de Atacama, donde el registro es prácticamente nulo, la estación meteorológica del proyecto Salares Norte es la más cercana y se ubica a 49 km aproximadamente del centro de la cuenca, y solo ha sido incluido su análisis en el estudio desarrollado por Amphos 21 (2016) investigación en la que además se incluye la instalación de 7 lisímetros y una estación meteorológica en el Salar de La Isla y Salar Grande, lo que permitirá tener información más certera de las variables en esta área, aunque bien, los datos de éstas últimas estaciones no pueden ser incluidos puesto que aún no existe un levantamiento y procesamiento de la información registrada por los instrumentos, por lo que se desarrolla un mayor detalle de las condiciones hidrogeológicas de las unidades geológicas junto con un mayor conocimiento y delimitación de los componentes que constituyen la cuenca, de manera de reajustar las estimaciones para esta cuenca, teniendo como referencia las metodologías anteriormente desarrolladas para las cuencas altiplánicas.

3.1.3.1 *Precipitaciones*

Como ya se describió en la sección que hace referencia al clima, las precipitaciones de esta zona se caracterizan por ser escasas; siendo de carácter sólido en invierno y pluvial durante el verano, esto último por la fuerte influencia de la altura gracias a un sistema convectivo proveniente desde el oriente, que en general provoca tormentas de corta duración y de poca extensión territorial, que además se caracterizan por ser muy variable de un año a otro, lo que dificulta su representación.

Esta variable constituye la principal entrada al sistema en cuencas Alto Andinas, donde la precipitación nival durante el invierno y su posterior fusión tiene un mayor aporte sobre las lluvias estivales debidas al denominado "Invierno Boliviano o Altiplánico" DICTUC (2009). En general se tiene que las escasas mediciones que se tiene del área de influencia de este fenómeno tienen una alta variabilidad y muchas veces no considera la precipitación sólida, lo que significa una importante fuente de error en las estimaciones.

La precipitación anual para la cuenca del Salar de La Isla ha sido determinada de manera indirecta mediante la interpolación de distintas isoyetas elaboradas (

Tabla 5), el Anexo D detalla la metodología aplicada en cada estudio. A excepción de las propuestas por ARCADIS, las que presentan gran variación entre sí, se tiene que en general las precipitaciones medias anuales estimadas por los distintos estudios se encuentran en torno a 150 ± 15 (mm/año), mostrando cierta correlación entre ellos.

Tabla 5: Precipitaciones anuales estimadas para la cuenca del Salar de La Isla.

PRECIPITACIÓN MEDIA SEGÚN ESTUDIO	Unidad	Valor
Pp media B. Hídrico Chile (1987)	(mm/año)	150
Pp media DICTUC (2009)	(mm/año)	150
Pp media Aquaterra (2013)	(mm/año)	157
Pp media II Región ARCADIS (2015)*	(mm/año)	118
Pp media Huasco ARCADIS (2015)*	(mm/año)	209
Pp media ARCADIS (2015)*	(mm/año)	164
Pp media Isoyetas (Amphos 21, 2016)	(mm/año)	144

*Los valores fueron obtenidos desde los antecedentes expuestos en el estudio de Amphos 21, 2016.

3.1.3.2 Escorrentía

Si bien durante la campaña de terreno no se identificó ningún escurrimiento superficial, existen algunas incisiones que mostrarían su actividad, ejemplo de ello en el sector sureste de la cuenca. La escorrentía superficial que se genera en este tipo de cuencas tiene su origen en la fracción de precipitación no infiltrada sobre superficie impermeable, de esta manera se tiene que durante el período estival, ésta se alimenta principalmente de los deshielos de la precipitación sólida caída durante el invierno anterior y, en menor medida, por eventos de precipitación líquida asociadas al denominado Invierno Altiplánico. Por su parte, durante el invierno, la escorrentía se explica en eventos de precipitación pluvial, asociados a contracciones de la isoterma cero, los cuales saturan los estratos superficiales del suelo, generando el escurrimiento superficial en los cauces (Aquaterra, 2013).

La siguiente relación se propone para estimar la escorrentía superficial neta:

$$Q = CE * A_L * Pp \text{ Ec. 5}$$

Donde,

Q = caudal medio anual

CE = coeficiente de escorrentía

A_L = área lateral o no acuífera de la cuenca

Pp = precipitación media anual

El coeficiente de escorrentía se puede determinar de manera referencial en base a la literatura, mediante regresión lineal de la relación caudales observados y precipitaciones, o mediante la relación con la geometría de la cuenca que depende de parámetros geomorfológicos; longitud del cauce principal, área aportante y factor de forma de la cuenca.

En particular Aquaterra (2013) propone una correlación del coeficiente con el factor de forma de la cuenca, a partir de los coeficientes determinados para estaciones con control pluvial (Anexo E), obteniendo:

$$CE = 0,23 \cdot F \text{ Ec. 6}$$

Con F el factor de forma de la cuenca, dado por:

$$F = \frac{M}{L} \text{ si } M < L \text{ ó } F = \frac{L}{M} \text{ si } L < M \text{ Ec. 7}$$

Donde,

L = longitud del cauce principal

M = ancho equivalente de la cuenca

A continuación, se muestran los resultados de la aplicación de la metodología poniendo como escenarios de precipitaciones los determinados por los trabajos anteriores, y donde los parámetros geomorfológicos y el área lateral de baja permeabilidad han sido determinados en la sección 3.1.4:

Tabla 6: Estimación caudales de escorrentía para la cuenca del Salar de La Isla.

Parámetros	Unidad			
Área Cuenca	(km ²)			759,78
Área de baja permeabilidad	(km ²)			452,65
L	(km)			17,82
M	(km)			42,63
F				0,42
CE				0,09
Escenario precipitación * (mm/año)			Caudal de escorrentía estimada	(m ³ /s) (L/s)
1	150		Q1	0,207 207,03
2	157		Q2	0,217 216,69
3	144		Q3	0,199 198,75

*Escenario 1 B. Hídrico Chile (1987) y DICTUC (2009). Escenario 2 Aquaterra (2013). Escenario 3 Amphos 21 (2016).

Dado que la estimación de escorrentía es proporcional a la precipitación, entre los estudios mantienen la misma distribución, se tiene que los caudales por escorrentía estimados se encuentran en torno a los 200 (L/s).

3.1.3.3 Recarga

De igual manera se procede según la metodología desarrollada por DARH (2009), DICTUC (2009), Aquaterra (2013) y Amphos 21 (2016) que toma en consideración la litología y el comportamiento hidráulico de la misma. Así la recarga total del sistema (Figura 16) se compone de una recarga directa desde la precipitación, para unidades permeables, y por una recarga lateral, sobre unidades impermeables en el que primero se tiene escurrimiento y luego infiltración tras alcanzar zonas de mayor permeabilidad.

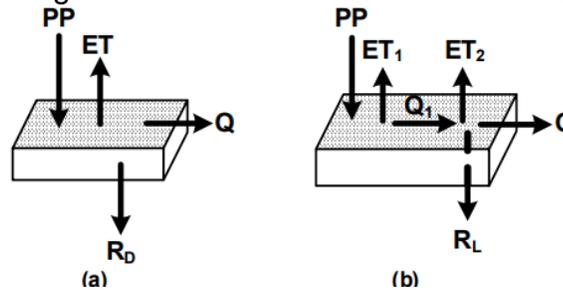


Figura 16: Modelo conceptual de la recarga: a) Recarga directa sobre superficie permeable, b) Recarga lateral sobre superficie semipermeable e impermeable.

Los coeficientes de escorrentía e infiltración para todas las unidades hidráulicas son necesarios para determinar ambos componentes, el primero se obtiene de acuerdo con la correlación con el factor de forma F, en tanto el de infiltración se determinan a partir de lo señalado en los estudios de DICTUC (2009), obtenido de los trabajos Xu et al. (2005) y Wang et al. (2008) (Tabla 8, Anexo F) que considera las propiedades permeables de las unidades litológicas.

De esta manera se tienen las siguientes relaciones:

$$R_T = R_L + R_D \text{ Ec. 8}$$

$$R_D = CI * Pp * A_p \text{ Ec. 9}$$

$$R_L = CE * Pp * \sum_i CI_i \cdot A_{L_i} \text{ Ec. 10}$$

Donde,

Pp = precipitación media anual en la cuenca

A_p = área permeable

A_{L_i} = área impermeable o semipermeable

CE = coeficiente de escorrentía

CI_i = coeficiente de infiltración para cada área impermeable o semipermeable

La tercera relación ha sido modificada puesto que se ha analizado y descrito con mayor detalle todas las unidades litológicas, pudiendo clasificar en un mayor rango la potencialidad hidrogeológica de las mismas. De esta manera la recarga lateral corresponde a la suma de éstas para áreas de permeabilidad media y baja, donde Pp y CE son constantes e independientes.

Tabla 7: Área para las distintas regiones de la cuenca según sus condiciones de permeabilidad.

Regiones de la cuenca	Área (km ²)
Unidades impermeables	3,123
Unidades rocosas de baja permeabilidad	400,71
Unidades permeabilidad moderada	48,81
Unidades de alta permeabilidad	148,95
Salares y entorno	156,389
Bofedales y vegetación	0,35
Lagunas y riachuelos	1,29

Tabla 8: Coeficiente de escorrentía e infiltración utilizados, para la estimación de la recarga por precipitación.

Coeficientes	
CE	0,096
CI alta permeabilidad	0,250
CI media permeabilidad	0,200
CI baja permeabilidad	0,100
CI impermeable	0,050

De acuerdo con los parámetros obtenidos señalados en la Tabla 7 y Tabla 8, se han obtenido los valores de recarga total en la cuenca del Salar de La Isla:

Tabla 9: Recarga total estimada para la cuenca del Salar de La Isla.

Escenario	Recarga Directa (m ³ /s)	Recarga Lateral (m ³ /s)	Recarga total (m ³ /s)	Recarga total (L/s)
1	0,177	0,037	0,214	214,288
2	0,185	0,039	0,224	224,288
3	0,170	0,036	0,206	205,717

En promedio se estima una recarga total sobre la superficie en torno a 210 (L/s).

3.1.3.4 Evaporación

El proceso de evaporación corresponde al principal mecanismo de descarga del sistema, teniendo una amplia cobertura dentro de la cuenca, desarrollándose desde superficies libres como lagunas, el salar propiamente tal y desde la cobertura vegetal mediante la evapotranspiración.

Los estudios elaborados por DICTUC (2009) y Aquaterra (2013) desarrollan una metodología que logra de mejor manera estimar la evaporación desde los distintos cuerpos sujetos a evaporación, correspondiente:

3.1.3.4.1 Tasa evaporación superficie libre

Se considera directamente la evaporación potencial que se aplica a las superficies libres; lagunas y riachuelos, que se encuentran en el salar, correspondiente a la relación:

$$E_{pot} = K_t * E_{tanque} \text{ Ec. 11}$$

Donde,

E_{tanque} = evaporación de tanque obtenida de las isolíneas de evaporación elaboradas por la DGA en el Balance hídrico de Chile 1987.

K_t = el coeficiente de tanque, que de acuerdo con lo desarrollado por DICTUC (2009) un valor de 0,6 se ajusta a las condiciones de la zona de estudio; cuenca cerrada y clima árido.

3.1.3.4.2 Tasa evapotranspiración

La relación entre la evapotranspiración de referencia y la que experimenta un suelo con vegetación está dominada por un factor de corrección conocido como coeficiente de cultivo (K_c), el cual depende del tipo de cultivo y de su etapa de desarrollo, entre otros factores, de esta manera se obtiene la relación:

$$ET = K_c * E_{pot} \text{ Ec. 12}$$

Donde,

K_c= coeficiente de cultivo, que se obtiene a partir de la distribución de grupos vegetacionales de un bofedal tipo, y sus coeficientes K_c asociados, presentados en “Estimación de Requerimientos Hídricos de Humedales del Norte de Chile” (DGA, 2001) (Anexo G), en él se caracterizaron los diferentes grupos vegetacionales que conforman un sistema bofedal ubicado en la cuenca de Isluga, identificándose 7 unidades a las que se le asignaron coeficientes de cultivo en función del período del año.

En el presente trabajo sólo se caracterizó todo solo como una unidad vegetacional, escogiendo un K_c representativo correspondiente a la razón entre la suma de la ponderación del área y K_c promedio de cada unidad vegetacional descrita (Anexo G), y el área total de esas unidades, que resulta en un K_c de 0,785.

3.1.3.4.3 Tasa evaporación directa salares y entorno

DICTUC (2009) desarrolla mediciones de la evaporación directa mediante el método del Domo, que consiste en la captura y registro del incremento del vapor de agua derivado desde de la napa freática de poca profundidad mediante una cámara semiesférica de acrílico que permite el paso de radiación solar, proponiendo la siguiente relación compuesta para la evaporación normalizada con respecto a la tasa de evaporación de cuerpo libre en la región de Atacama:

$$E_n = e^{-11,09z} \text{ para } z < 0,15 \text{ Ec. 13}$$

$$E_n = 0,065 * z^{-0,575} \text{ para } z > 0,15 \text{ Ec. 14}$$

Donde,

E_n= evaporación normalizada

Z= profundidad nivel freatico (m)

Se ha determinado la evaporación desde la superficie del salar utilizando la medición de evaporación directa en función de la profundidad del nivel freático, siguiendo las relaciones propuestas para la región de Atacama y ponderándola por la evaporación potencial (tasa evaporación cuerpo libre, condición de borde), se consideran las características generalizadas del nivel freático descritas por Warren (2016) de las facies del salar junto con las observaciones de campo realizadas, así en los bordes del salar se encuentran las facies marginales, dominadas por cloruros y sulfatos (Figura 12) donde se estima un nivel freático decimétrico (0,15 m.b.n.t.)

inferidos a partir del desarrollo de calicatas para la obtención de muestras durante la campaña de terreno, en tanto para el núcleo del salar, se determina un nivel algo mayor (0,5 m.b.n.t.) dado que en general la superficie del núcleo es más elevada, ampliando la distancia al nivel de aguas, y para la facie marginal terrígena (Figura 12) se estima un nivel métrico en base a los perfiles de suelo levantados por Amphos 21 (2016) durante la instalación de los lisímetros en el borde del salar, donde el nivel no sobrepasaba el metro. Se ha añadido superficie aluvial próximo y paralela al borde debido a que el nivel se encontraría somero y expuesto a la evaporación, para lo cual se determina una profundidad de 2,5 (m.b.n.t), correspondiente a la profundidad de extinción de las curvas de evaporación, y que se justifica por un aumento del relieve.

3.1.3.4.4 Evaporación de la cuenca Salar de La Isla

En base a lo anteriormente descrito se determina la tasa de evaporación de todas las superficies potencialmente sujeta a evaporación (Tabla 10), que al multiplicar por las áreas que involucra se obtiene el caudal asociado.

Tabla 10: Tasas de evaporación y caudal de evaporación estimado para las superficies de la cuenca Salar de La Isla.

E potencial	Tasa evaporación			Caudal por evaporación	
	(mm/año)	(m ³ /s)		(L/s)	(L/s)
	814,2		Ev cuerpo libre	0,033	33,381
E salares	FM dominada por cloruros y sulfatos	0,15	2,49E-09		0,262
	Núcleo	0,5	4,996E-09	(m/s)	0,227
	FM dominada por sedimentos terrígenos	1	1,68E-09	Ev salares DICTUC 2009	505,429
	FM clástica (aluvial)	2,5	9,9088E-10		0,010
E bofedales	639,147		Ev bofedales	0,012	12,365

Se tiene que la superficie que más experimenta evaporación es el propio salar, especialmente el núcleo y facie marginal dominada por cloruros y sulfatos, seguido de los cuerpos con superficie libre correspondiente a la facie marginal constituida por las lagunas y canales.

3.1.3.5 Estimación de caudales

Durante la campaña de terreno de igual manera se realiza un monitoreo de caudales asociados a vertientes y riachuelos, estimando áreas transversales y velocidad media del flujo (Anexo H); en el que las estimaciones del área noreste (Figura 17a) indican caudales de vertientes entorno a los 4 (L/s), que al considerar cerca de 12 vertientes similares en el área suman un total de 48 (L/s) que alcanzarían la laguna en que derivan; algo más al sur se registra un caudal de 0,960 (L/s) (Figura 17b), que al ponderar nuevamente por 12 vertientes similares suma un caudal total de 11,82 (L/s); en el sector de la laguna en las faldas del volcán Aguas Blancas, se observan vertientes más difusas, de hecho en el sentido del flujo se estima un aumento progresivo desde 0,56 (L/s) – 2,25 (L/s) – 4,4 (L/s), teniendo como caudal total similar a las vertientes del sector noreste (Figura 17a), formando una laguna de menor superficie y profundidad; estimaciones del sector suroeste (Figura 17d), un riachuelo con un caudal de 3,24 (L/s) indica condiciones aún más difusas, que forma una laguna de características similares a la anterior.

Complementando con los caudales estimados por Risacher et al. (1999) para vertientes de la zona noroeste, se observa un mayor aporte desde el noreste (Figura 17a y Figura 17b), siendo más difusas hacia el sur, de manera que para el norte del salar se estima un caudal total de 94,72 (L/s), en tanto para el sur si se consideran 10

áreas similares a la monitoreada al suroeste (Figura 17d) se tiene un caudal de 32,4 (L/s), con lo que finalmente se obtiene un caudal total de 127,12 (L/s) asociado al aporte desde vertientes localizadas alrededor del salar.

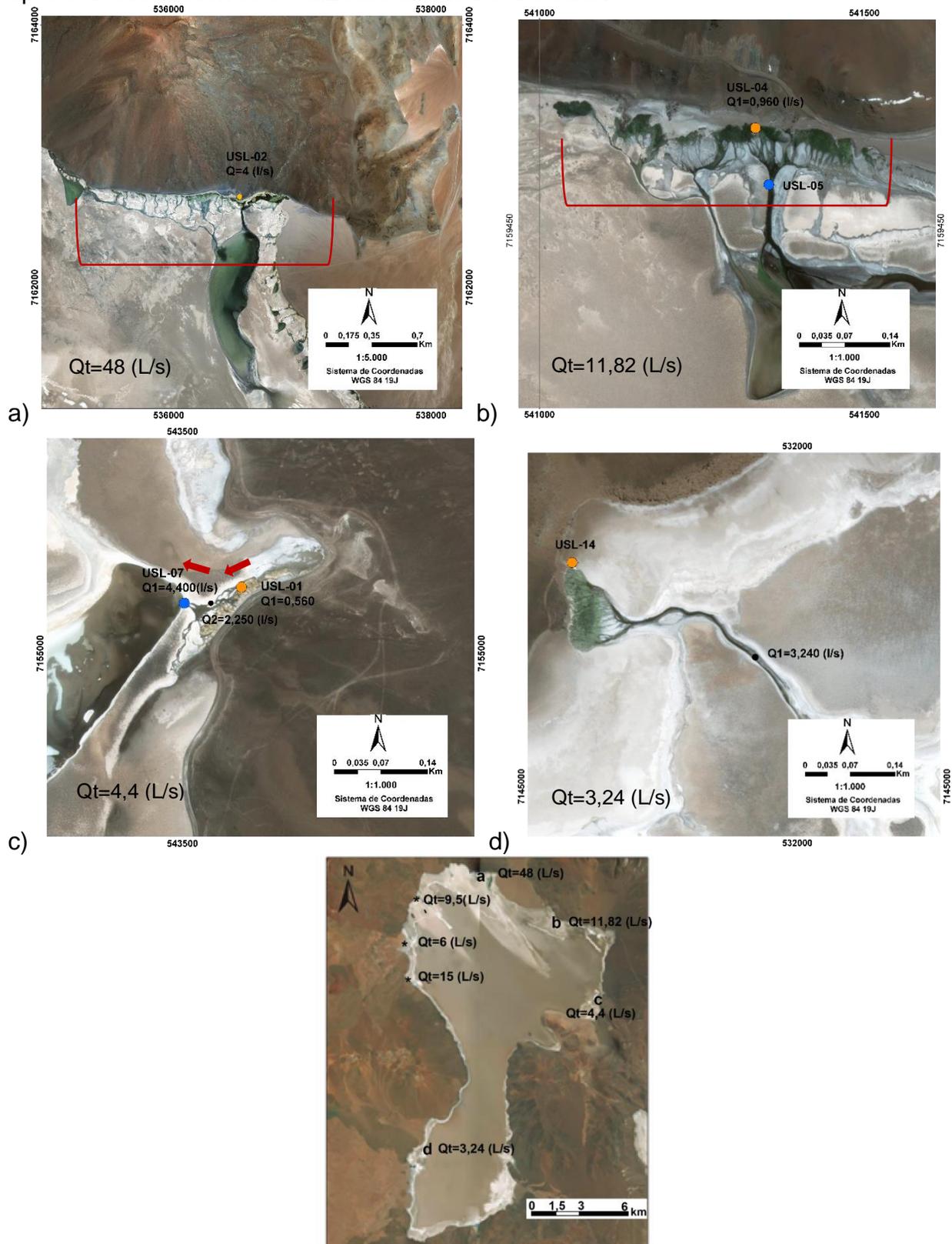


Figura 17: Áreas con monitoreo de caudal: a) Próximo a USL-02, b) Próximo a USL-04 Y USL-05, c) Cercano a USL-01 y USL-07, d) Riachuelo entre USL-14 y USL-15.

3.1.3.6 Flujo subterráneo lateral

Amphos 21 (2016) propone un aporte por infiltración subterránea desde la cuenca Qda la Rossa (Anexo I) ubicada al norte, y que antiguamente se encontraba dentro de los límites de la cuenca del Salar de La Isla según los primeros límites definidos por DGA, igualmente endorreica, aunque bien su límite norte sobrepasa en algunos cientos de metros el límite sur (Figura 18), de manera que la pendiente muestra una tendencia hacia el sur (perfiles Figura 18b). Está constituida por dos acuíferos que presentan un flujo subterráneo de E a W, la recarga del acuífero oriental se produce desde las zonas más altas, esencialmente, desde el NE, mientras que la del acuífero occidental; desde el NW. Se ha estimado una recarga entre 80 y 120 L/s desde esta cuenca de acuerdo con una metodología similar a la desarrollada para este trabajo, y que como carece de cuerpos de agua o con potencial de evaporación, por lo que favorecido por el gradiente topográfico su flujo sería hacia el sur; la cuenca del Salar de La Isla.

A partir de la información piezométrica disponible en ambas cuencas (Anexo L), y notando que el flujo sería solo posible en el segmento oeste del límite sur (perfil 5 Figura 18c), puesto que en ese sector se tendría un gradiente en dirección al salar de La Isla, se puede aplicar la ley de Darcy, determinando:

- Una sección transversal por el que circularía dicho flujo, cuyo largo correspondería a la sección oeste de límite sur de 12 km, y poniendo tres escenarios de espesor saturado de 50, 100 y 200 metros (perfil 5 Figura 18c).
- Un gradiente hidráulico entre los pozos ubicados próximos al límite (perfil 5 Figura 18c), teniendo un escenario 1 con respecto al pozo BAX-1, y un escenario 2 con respecto al pozo CPB-3, ambos ubicados en la cuenca Salar de La Isla, tal como lo muestra el perfil 2 de la Figura 18b.
- Permeabilidad de las unidades volcánicas que constituyen esta zona (Figura 6) de potencial bajo a moderado con 10^{-2} (m/día) de acuerdo con lo señalado en la sección 3.1.4 y en el perfil 5 de la Figura 18c.

En consideración de lo anterior, se obtiene un flujo promedio que va desde los 36,1 a 170,126 L/s para los distintos escenarios (Tabla 11), similar a los órdenes de magnitud determinado por Amphos 21 (2016), siendo la configuración bajo un espesor saturado de 100 metros la que más se aproxima.

Tabla 11: Cálculo flujo lateral mediante ley de Darcy desde la cuenca Quebrada La Rossa.

Segmento transversal (m)	Potencia (m)	Promedio gradiente hidráulico 1	Promedio gradiente hidráulico 2	Promedio flujo (L/s) 1	Promedio flujo (L/s) 2
11.485	50	0,026	0,022	42,531	36,100
	100			85,063	72,200
	200			170,126	144,401

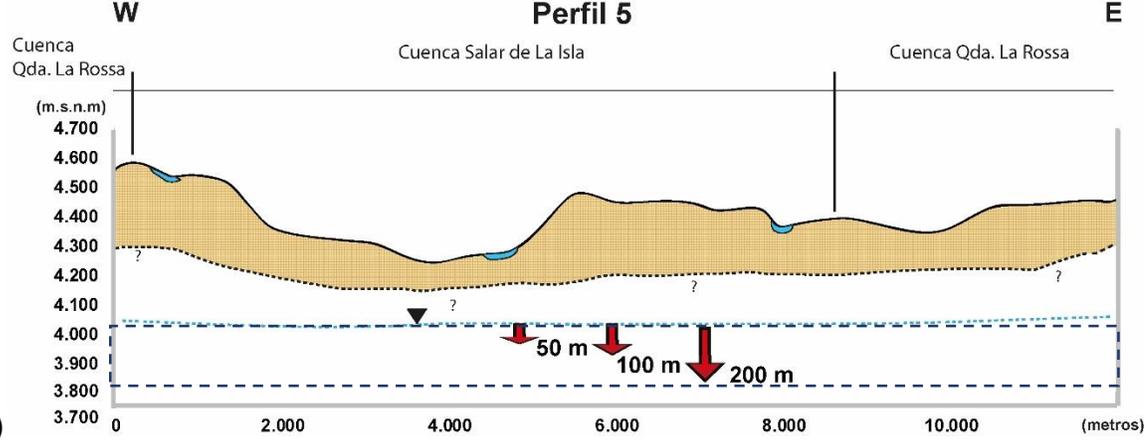
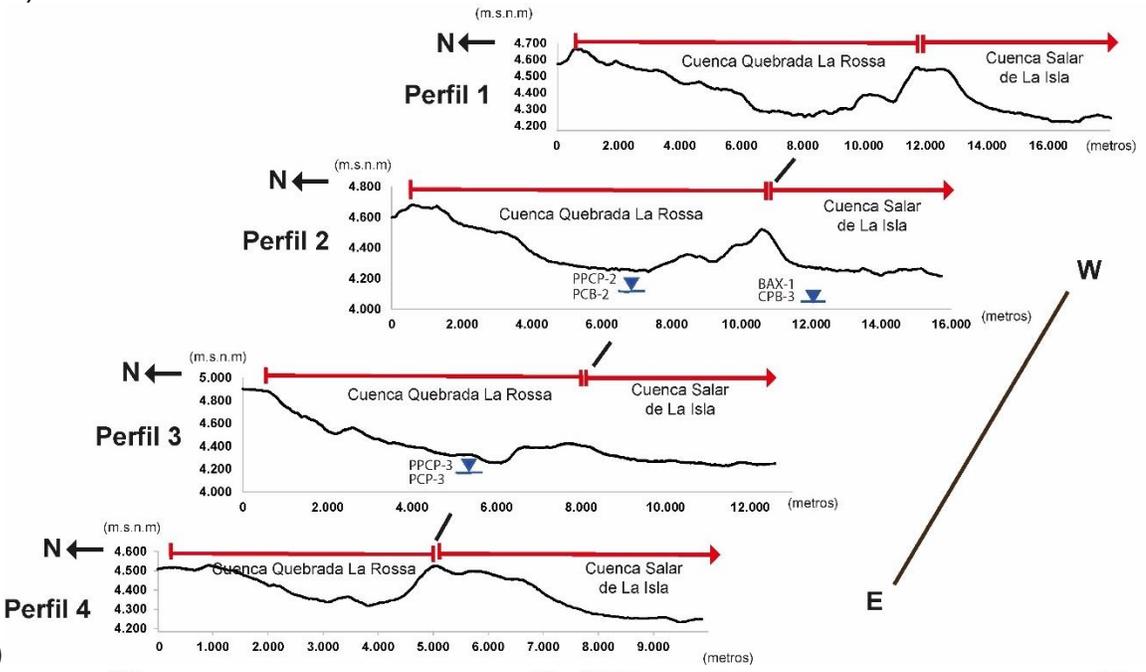
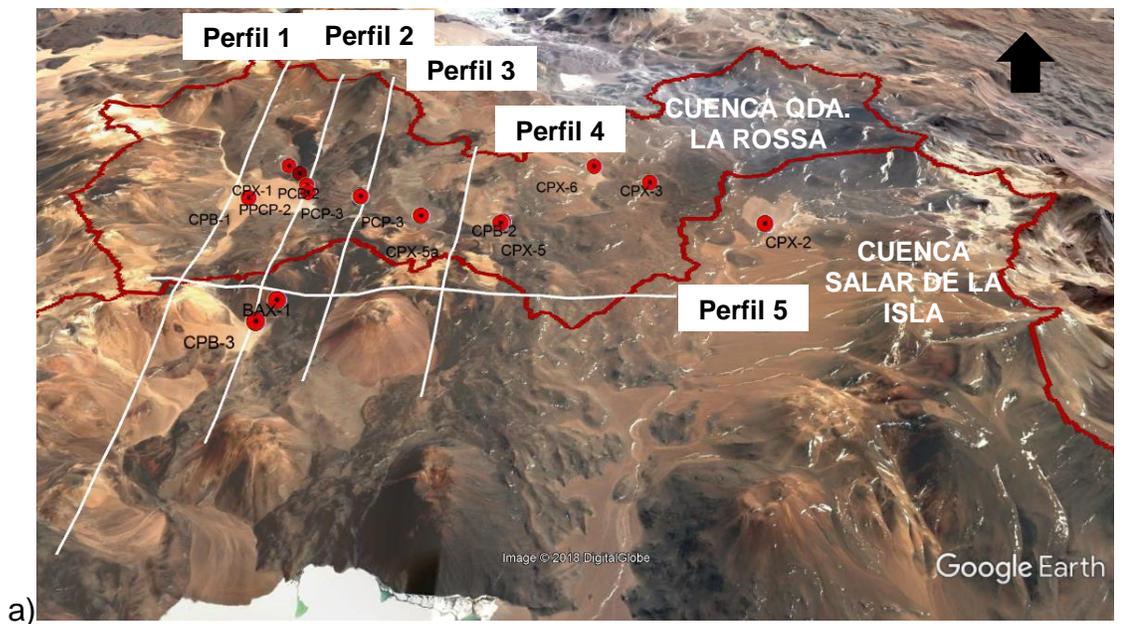


Figura 18: Quebrada La Rossa y parte norte cuenca Salar de La Isla: a) Ubicación perfiles topográficos entre las cuencas y pozos, b) Perfiles topográficos orientado N-S, c) Perfil topográfico orientado W-E.

3.1.3.7 Balance hídrico

Para la estimación del balance hídrico generalizado de largo plazo, se reconocen como entradas los caudales asociados a la recarga total y escurrimientos, sumando el flujo lateral proveniente de la cuenca Quebrada La Rossa según lo determinado por Amphos 21 (2016) que desarrolla una metodología similar a la realizada en este estudio para el Salar de La Isla, en tanto como descarga los procesos de evaporación.

Si bien existen derechos de agua concedidos (Tabla 12) con un caudal total de 116 L/s, no hay registro de bombeos, por lo tanto, se desestiman como una salida constante del sistema.

Tabla 12: Derechos de agua concedidos en la cuenca del Salar de La Isla.

Nombre	Código Expediente	Caudal	Año	Correcciones
Amx De Chile S.A.	ND-0301-715	35,00 (L/s)	2007	27 (L/s)
Cerro Pudiera S.A.	ND-0301-768	27,00 (L/s)	2007	27 (L/s)

Finalmente, definido las entradas y salidas, y estimado sus caudales, se determina el balance hídrico para la cuenca del Salar de La Isla (:

Tabla 13), considerando cada escenario de precipitación media anual:

Tabla 13: Balance hídrico estimado para la cuenca del Salar de La Isla.

Escenario	Q recarga total (L/s)	Q escorrentía (L/s)	Flujo lateral promedio (Amphos 21, 2016) (L/s)	Descarga por evaporación (L/s)	Balance (L/s)
1	214,288	207,028			-29,860
2	224,288	216,689	100	551,176	-10,198
3	205,717	198,747			-46,712

Considerando como efectivo el flujo lateral desde la cuenca Quebrada La Rossa, los valores obtenidos indican un balance negativo en todos los escenarios de las precipitaciones estimadas, indicando que la evaporación supera la recarga y escorrentía, en el que el escenario 3 presenta el valor más cercano a cero, y el 4 el menor. En cuanto a los caudales estimados in situ, éstos representarían de un tercio a un cuarto de las entradas consideradas en el balance bajos los distintos escenarios.

3.1.4 Caracterización hidrogeológica

3.1.4.1 Características subsuperficiales

La información disponible de subsuperficie es bastante escasa y discreta espacialmente, abarcando sólo el extremo norte de la cuenca y el borde norte del salar, la Figura 19 muestra los puntos que cuentan con información relevante; registro de estratigrafía, y niveles de agua.

3.1.4.1.1 Estratigrafía

Se cuenta con información de nueve puntos que abarcan el borde norte del salar, con profundidades superficiales que alcanzan como máximo los 43 m.b.n.t.. La información proviene de sondajes de exploración y una calicata realizados por el proyecto de Exploración Salares 7 (2011), y del levantamiento durante la instalación de lisímetros por parte de Amphos 21-DGA (2016) (Anexo J, Anexo K y Anexo L). La Figura 19 muestra el levantamiento estratigráfico de los distintos puntos, pudiendo distinguir que en el borde del amplio abanico aluvial donde se realizó la calicata, se tiene un gran dominio gravoso de alta permeabilidad, y en torno al cual se desarrolla un

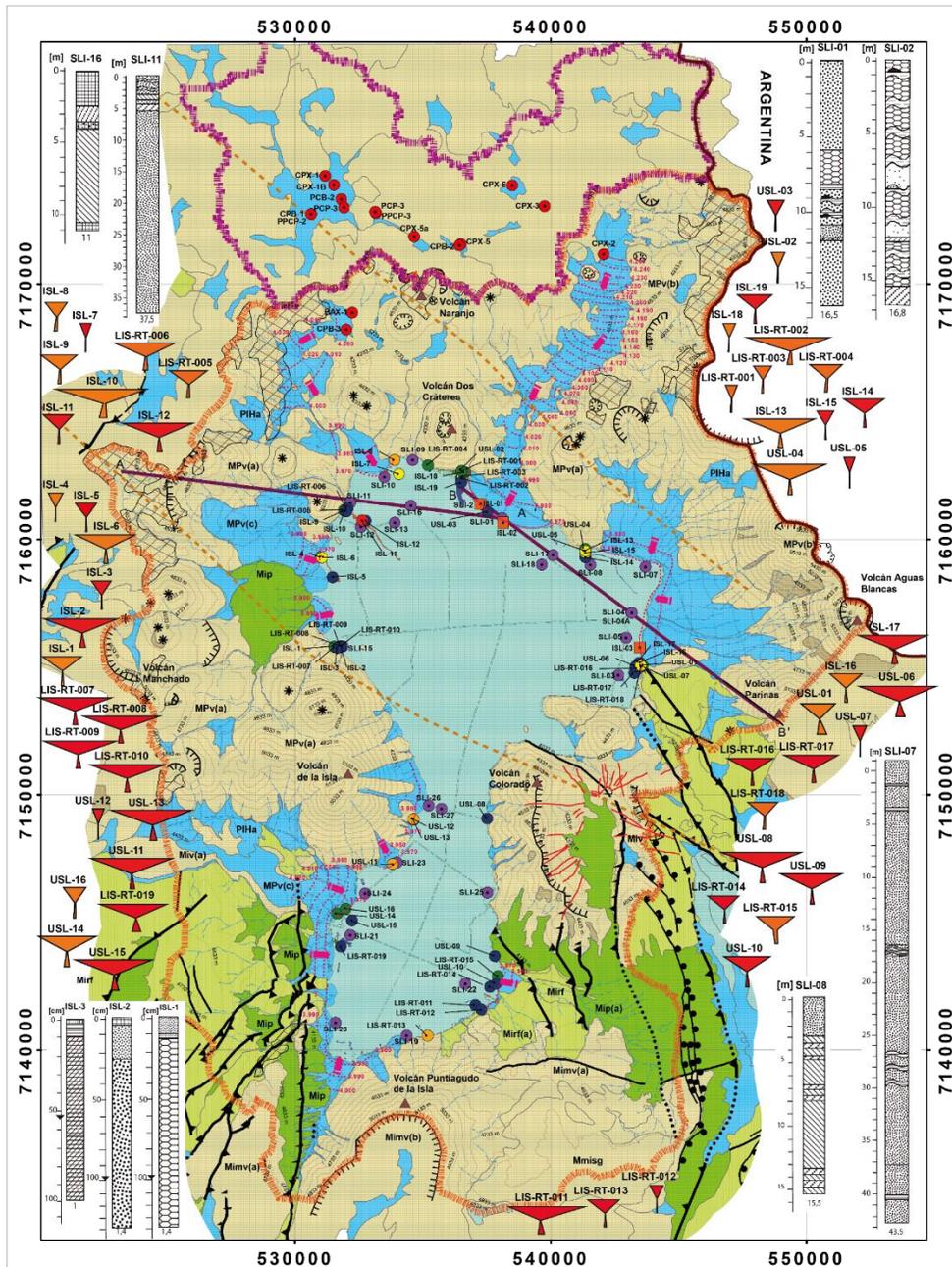
frente de pequeñas lagunas paralelo a su borde (SLI-01, SLI-02, ISL-1, ISL-2), en tanto para el abanico que se ubica al noreste en las faldas del volcán Parinas y Aguas Blancas, se tiene el registro más profundo (SLI-07), teniendo el predominio de material clástico tamaño arena fino de permeabilidad moderada, con intercalaciones de material arcilloso en sus primeros metros (ISL-3) y también a lo largo de la columna. El sondaje SLI-11 logra describir el borde noroeste, ubicándose en el límite del salar y una unidad de depósitos volcánicos, presenta un predominio de depósitos evaporíticos en su parte más superficial de alta permeabilidad, y clástico de tamaño arena fina de permeabilidad media. El sondaje SLI-16 ubicado ya en el núcleo del salar, confirma el predominio de depósitos evaporíticos en sus 11 metros de largo. Analizando la información disponible en la facie marginal del salar, se reconoce una fuerte influencia de material clástico proveniente principalmente del desarrollo de procesos de transporte que desencadenan los abanicos aluviales y coluviales, y que en general presentan altas condiciones de permeabilidad permitiendo también así el aporte de agua al sistema salino.

3.1.4.1.2 Piezometría

Se dispone de la información de solo seis puntos, tres de ellos ubicados en el extremo norte de la cuenca; BAX-1, CPB-3, CPX-2 (Figura 19), los que presentan niveles freáticos de 159,12 161,06 y 195,29 m.b.n.t respectivamente, la información de los lisímetros indican niveles freáticos superficiales en el borde del salar, en torno a los 0,5 y 1 m.b.n.t.. De la información anterior y observaciones de campo se ha inferido la dirección del flujo subterráneo y piezometría en las unidades aluviales principales, en especial la ubicada en la subcuenca n°1, que muestra una tendencia generalizada hacia el salar de las isopiezas siguiendo la topografía descendente, alcanzando niveles someros entorno al salar (Figura 19).

3.1.4.2 Unidades hidrogeológicas

Una unidad hidrogeológica se define como un conjunto de rocas o depósitos sedimentarios, que por su petrografía, textura o estructura poseen propiedades hidrogeológicas uniformes y límites específicos, de acuerdo con lo propuesto por Struckmeier y Margat (1995). Sánchez (2014) establece que un análisis conjunto de éstas, una o más unidades hidrogeológicas pueden conformar acuíferos, acuitardos, acuícludos y acuífugos, dependiendo de su capacidad de almacenar y transmitir agua. Dado la falta de información en profundidad de las unidades hidrogeológicas, y la conexión entre las mismas, se ha procedido solo a definir la potencialidad hidrogeológica de las rocas y de los depósitos presentes en el área, teniendo como base su extensión y sus características geológicas e hidrológicas (estudiados y descritos por Naranjo, et al. (2013), junto a la escasa estratigrafía desarrollada en el proyecto de Exploración Salares 7.



SIMBOLOGÍA

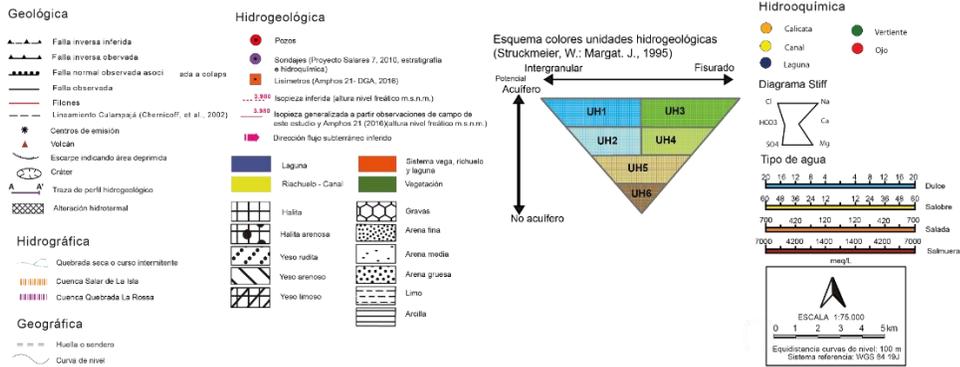


Figura 19: Mapa del potencial hidrogeológico de la cuenca del Salar de La Isla. Elaboración propia. Mayor detalle Anexo S.

La Figura 19 exhibe la clasificación del potencial hidrogeológico que posee cada unidad litológica, siendo los depósitos aluviales y coluviales con un flujo subterráneo de tipo intergranular, junto con las ignimbritas fisuradas las que presentan condiciones hidrogeológicas más favorables, un potencial menor representan las lavas y brechas, que forman parte de las unidades volcánicas Miv, Mimv y MPv, con inferior capacidad de drenar y almacenar agua subterránea. A partir de los trabajos de Heath (1983), Struckmeier y Margat (1995), Zhang (2017) en los que se determinan parámetros de conductividad hidráulica (K) y porosidad (η) se estima un rango de valores referenciales encontrando:

3.1.4.2.1 Unidad hidrogeológica 1, UH1 (Figura 19)

Principalmente relacionados a los depósitos aluviales y coluviales PIHa (Figura 20a), probablemente acuíferos libres, semiconfinados y múltiples, ubicados en áreas de progradación de los sistemas principalmente en el borde del salar. De gran extensión siendo mayor en la zona norte del salar. Recarga desde las zonas apicales producto de la temporada de deshielos. Presenta un muy alto a alto potencial hidrogeológico, asociado al carácter granular del acuífero dado su alta granulometría, distribuidos en zonas proximales y medias.

Volcanes del Mioceno Superior – Plioceno Inferior, MPv miembro (c) (Figura 20b y Figura 20c), correspondiente a depósitos de avalancha volcánica ubicados al oeste del salar. Su recarga principalmente ocurre desde los deshielos desde las cumbres de los volcanes que derivan. Posee una porosidad intergranular primaria, con megabloques y secundaria principalmente en sus zonas distales, asociado al diaclasamiento, de acuerdo con lo anterior se infiere un muy alto potencial hidrogeológico.

En base a lo anterior se asigna una permeabilidad alta $K=10^1-10^2$ m/día a esta unidad.

3.1.4.2.2 Unidad hidrogeológica 2, UH2 (Figura 19)

Depósitos salinos, PIHs, probable acuífero salino y libre, de potencia de algunas decenas de metros de potencia, según lo interpretado desde la prospección geofísica desarrollado por el proyecto de Exploración Salares 7, correspondiente al principal nivel de descarga del sistema dada las características topográficas de la cuenca y carácter endorreico (Figura 13). Presenta una recarga principalmente subterránea desde las unidades granulares engrandadas lateralmente. A pesar de presentar de que los depósitos evaporíticos presentan valores muy bajos de conductividad hidráulica $10^{-3} - 10^{-9}$ (m/día) (Beauheim y Roberts, 2002), se estima un moderado potencial hidrogeológico, dado el aumento estacional de la permeabilidad debido a su disolución y variación del nivel freático, añadiendo condiciones de permeabilidad muy alta (10^2 m/día) y moderada (1 a 10 m/día) asociada a la fracción clástica de la facie marginal del salar (Ricketts y Hutcheon, 2012).

Depósitos morrénicos, Msm, altamente localizado y de poca extensión. Su alta granulometría sumado a una zona de alta pendiente, le otorgan una baja capacidad de almacenamiento, caracterizándolo como una unidad en tránsito, con un bajo potencial hidrogeológico.

En base a lo anterior se asigna una permeabilidad media – alta $K=1- 10^2$ m/día a esta unidad.

3.1.4.2.3 Unidad hidrogeológica 3, UH3 (Figura 19)

Unidad compuesta por las ignimbritas Mip de gran extensión y distribuidos principalmente hacia el sur de la cuenca. Igualmente, fracturado, asociado al resurgimiento del Domo de la Caldera Aguilar, con la salvedad que sus componentes se encuentran con un menor grado de soldamiento, de moderado a débil que tiene asociado una porosidad media alta en promedio de 34% según Dobson, et al. (2003), por lo tanto, presenta una alta permeabilidad primaria siendo mayor en comparación con la Ignimbritas Río Frío (Mirf), asignando así un alto potencial hidrogeológico con una permeabilidad muy alta $K=10^2-10^4$ m/día.

3.1.4.2.4 Unidad hidrogeológica 4, UH4 (Figura 19)

Unidades volcánicas no consolidadas y fracturadas compuestas por:

Volcanes del Mioceno Superior – Plioceno Inferior, MPv miembro (e), ubicado en el límite norte de las cuencas del Salar de La Isla y Las Parinas, se encuentra afectado por fallas mayores y está constituido por depósitos piroclásticos de tamaño variable, condiciones que determinan un moderado potencial hidrogeológico.

Ignimbrita Chixi, Mmic (Figura 20d y Figura 20e), aflora escasamente en el límite SW de la cuenca, en niveles basales e intermedios presenta mayores propiedades hidrogeológicas debido a que se compone de depósitos de caída tamaño lapilli y posee un nivel tobáceo no consolidado escoriáceo, sin embargo, en niveles superiores se tiene una disminución ya que se encuentra localmente soldado. A las características anteriores se suma un comportamiento frágil vinculado a las fallas que lo afectan, por lo que a pesar de sus características primarias y secundarias se determina solo un moderado a alto potencial hidrogeológico debido a su poca extensión dentro de la cuenca.

Ignimbrita Río Frío, Mirf, de gran extensión distribuidos principalmente hacia el sur de la cuenca, presenta un intenso soldamiento por tanto carece de propiedades hidrogeológicas primarias favorables, sin embargo, presenta un fuerte fracturamiento, con fallas mayores asociados al resurgimiento del Domo Resurgente de la Caldera Aguilar, presentando así un régimen frágil y una alta permeabilidad secundaria. Las condiciones anteriores le otorgan un moderado a alto potencial hidrogeológico.

En base a lo anterior se asigna una permeabilidad media – alta $K= 10^{-1}-10$ m/día a esta unidad.

3.1.4.2.5 Unidad hidrogeológica 5, UH5 (Figura 19)

Unidades ampliamente distribuidas y de mayor cobertura, corresponden principalmente a depósitos volcánicos:

Volcanes del Mioceno Superior – Plioceno Inferior, MPv miembro (a) y (b) (Figura 20f, Figura 20g y Figura 20h), Volcanes del Mioceno Inferior a Medio, Mimv; miembro (a) y (b), correspondiente a miembros de los estratovolcanes y conos débilmente erosionados del Mioceno- Plioceno, representan las mayores alturas con mayores pendientes, características que reducen su capacidad de almacenamiento, permitiendo cierto grado de infiltración y que le otorgan el carácter endorreico a la cuenca. Las máximas elevaciones de estas unidades representan además las áreas de aporte de la precipitación nival.

Volcanes del Mioceno Inferior, Miv miembro (a), ubicados en la zona media de la cuenca, corresponden a depósitos volcánicos moderadamente erosionados y con aspecto macizo, en su parte este se encuentra intruído por diques de distinto rumbo y extensión, que añade características impermeables para un posible flujo lateral.

Ignimbrita Salar Grande, Mmsig, debido a los distintos grados de soldamiento, y la relativamente baja superficie que aflora en el extremo sureste de la cuenca, esta unidad presentaría una reducida capacidad de almacenamiento y transmisividad. Su recarga se debería principalmente a los deshielos provenientes desde el Volcán Puntigudo de La Isla.

En base a lo anterior se asigna una permeabilidad baja $K=10^{-4}$ - 10^{-2} m/día a esta unidad.

3.1.4.2.6 Unidad hidrogeológica 6, UH6 (Figura 19)

PIHds, unidad con prácticamente nula capacidad de transmitir agua localizada principalmente en la zona este de la cuenca y de poca superficie, asociado a los altos relieves, su carácter impermeable se debe a la fracción fina arcillosa que la compone en su base. Se determina una permeabilidad muy baja $K<10^{-4}$ m/día.



a)



b)



c)



d)



Figura 20: Fotografías unidades hidrogeológicas; a) UH1 con un alto contenido de gravas, b) y c) UH1 de alta permeabilidad MPv(c), compuesta de megabloques, y asociado al desarrollo de vertientes con vegetación en el límite con el salar (ej. área roja), d) UH4 Mic de media a alta permeabilidad (Naranjo, et al., 2018), e) UH4 Mirf, afectada por fallas asociadas al resurgimiento del domo (Naranjo, et al., 2018), f) y g) UH5 unidad de permeabilidad baja MPv(a) y afloramiento de vertiente, flecha indica recarga subterránea mediante vertientes, h) UH5 MPv(a) de baja permeabilidad con evidencia de meteorización.

3.1.4.3 Secciones hidrogeológicas

Se han construido dos perfiles hidrogeológicos cuyas trazas se encuentran detalladas en la Figura 19, a partir de la información estratigráfica disponible, a partir de la estratigrafía de los sondajes del proyecto de Exploración Salares 7 (Figura 19) se infiere que la potencia de los depósitos evaporíticos bordea las decenas a centenares de metros, y la proyección de la pendiente de las laderas de los volcanes, asumiendo que estas se mantienen relleno abajo. En los perfiles también se ha proyectado el nivel freático considerando como nivel mínimo prácticamente la superficie del salar, y el comportamiento de la piezometría salar arriba (pozos BAX-1, CPB-3, CPX-2). Cabe destacar que como la descripción estratigráfica no alcanza mayores profundidades y está muy distanciada, no es posible una mayor correlación lateral e identificación de evapofacies.

3.1.4.3.1 Perfil A-A''

Orientado prácticamente transversal al salar en su extremo norte, los sondajes y lisímetros que intersecta dan cuenta de material clástico en los bordes, lo que se proyecta en profundidad.

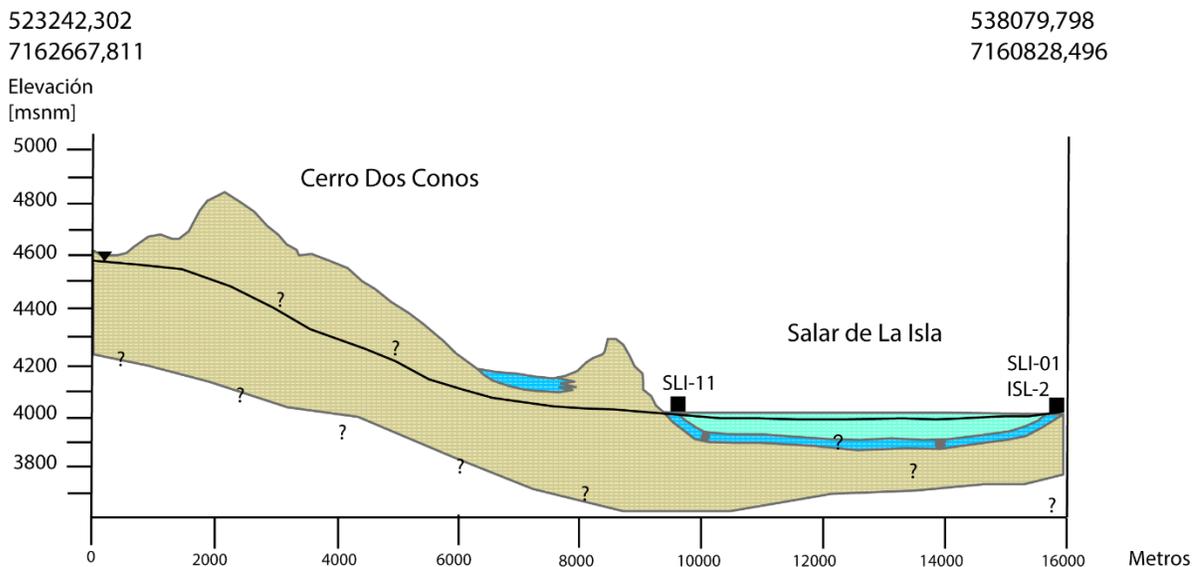


Figura 21: Perfil hidrogeológico A-A'', indicando unidades hidrogeológicas y nivel freático inferido.

3.1.4.3.2 Perfil B-B''

Este perfil se orienta casi en el rumbo del sistema de fallas NW que afecta al Salar de La Isla y Las Parinas en el límite norte que comparten, evidencia la influencia del abanico aluvial que corta, además se infiere la proyección lateral de una unidad fisurada correspondiente a depósitos volcánicos piroclásticos MPv(e) que afloran próximo a la traza.

536462,918
7162068,679

548910,251
7152817,785

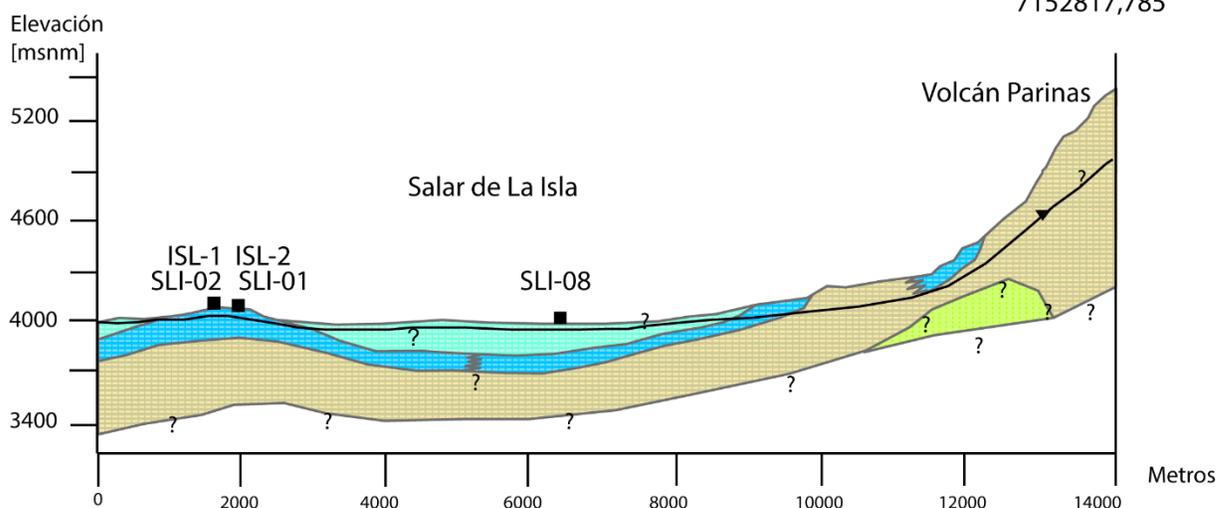


Figura 22: Perfil hidrogeológico B-B", indicando unidades hidrogeológicas y nivel freático inferido.

3.1.4.4 Desarrollo de humedales

La Convención sobre Humedales Ramsar define a los humedales como "las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros". En la zona se reconocen estas condiciones dentro del salar, caracterizando al ambiente acuático como interior con el desarrollo de lagunas, riachuelos, vertientes, bofedales y vegas, los que han sido delimitados aplicando herramientas de procesamiento de imágenes satelitales y análisis del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).

Con el levantamiento cartográfico y visita a terreno se ha categorizado en lagunas, riachuelos, sistema de vega, riachuelo y/o laguna, y vegetación azonal¹, obteniendo la superficie que cubren dentro del salar, representando menos del 1% de la superficie del salar:

Tabla 14: Área cubierta por los humedales cartografiados.

Categoría	Área cubierta km ²
Lagunas	1,0172
Riachuelo	0,011
Sistema vega, Riachuelo y/o laguna	0,265
Vegetación azonal	0,345

Se puede describir un régimen semipermanente, con profundidades máximas de los órdenes de metros, caracterizándose por aguas saladas, en torno al área se reconocen como actividad humana, la minería de exploración, con el desarrollo de sondajes y

¹ Como no se dispone de las herramientas para clasificarlos en bofedal o vegas, se consideran como un conjunto; vegetación azonal.

caminos, y monitoreo con la instalación de una estación meteorológica y lisímetros. En cuanto a flora y fauna sólo se puede categorizar como común (21 a 100 individuos observados o estimados) la abundancia de flamencos puesto que fueron las más visibles durante el terreno, dado que la estimación y observación se escapaban de los objetivos del terreno.

De la Figura 23 se desprende cierta relación espacial entre el desarrollo de humedales con las unidades hidrogeológicas descritas con una mayor potencialidad (PIHa, MPv (c), MPv (e), Mip, Mirf) para el caso de la zona sur del salar, éstos se desarrollan en los límites que guardan directa relación con las unidades no consolidadas provenientes del aporte aluvial, de las avalanchas volcánicas e ignimbritas fisuradas, favorecidos por los sistemas de fallas que lo limitan y que dan origen al Domo Resurgente Caldera del Aguilar. En cuanto a la zona norte se tiene una mayor relación espacial con la forma de la facie marginal de la costra salina PIHs(a), asociándose tanto a las unidades hidrogeológicas no consolidadas como a las de origen volcánico, teniendo especial correspondencia de éstas últimas con las principales y más grandes lagunas (Figura 23; zona a, zona b, zona e, zona h).

La fFigura 24 permite condicionar el desarrollo de los humedales a pendientes menores a 15°, lo que explica el escaso desarrollo de humedales a nivel superficial en el sector centro del salar, donde se tiene una estrechez del salar por la presencia de dos edificios volcánicos con altas pendientes teniendo un aporte sedimentario menor.

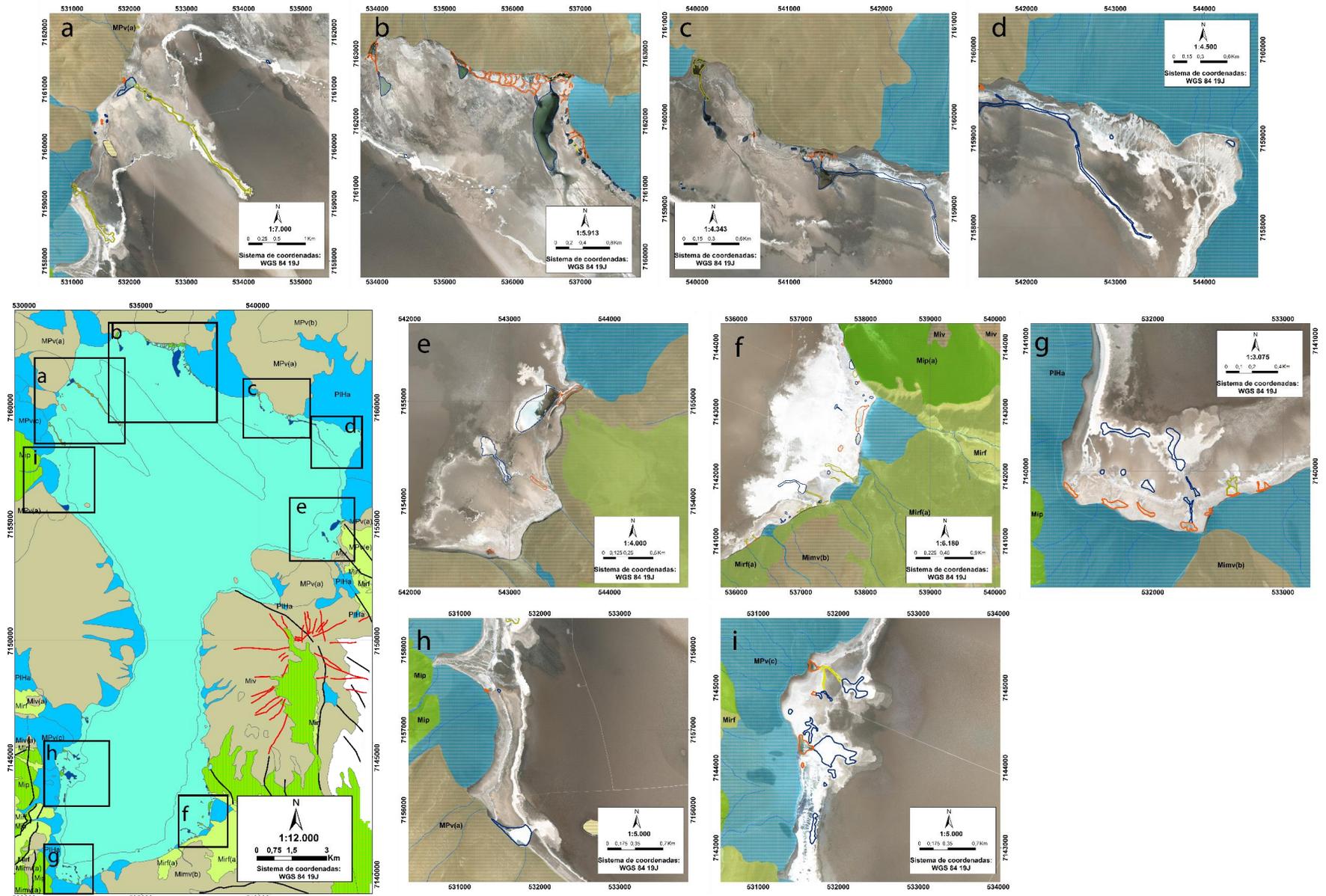


Figura 23: Catastro de humedales presentes en Salar de La Isla. Elaboración propia. Mayor detalle Anexo S.

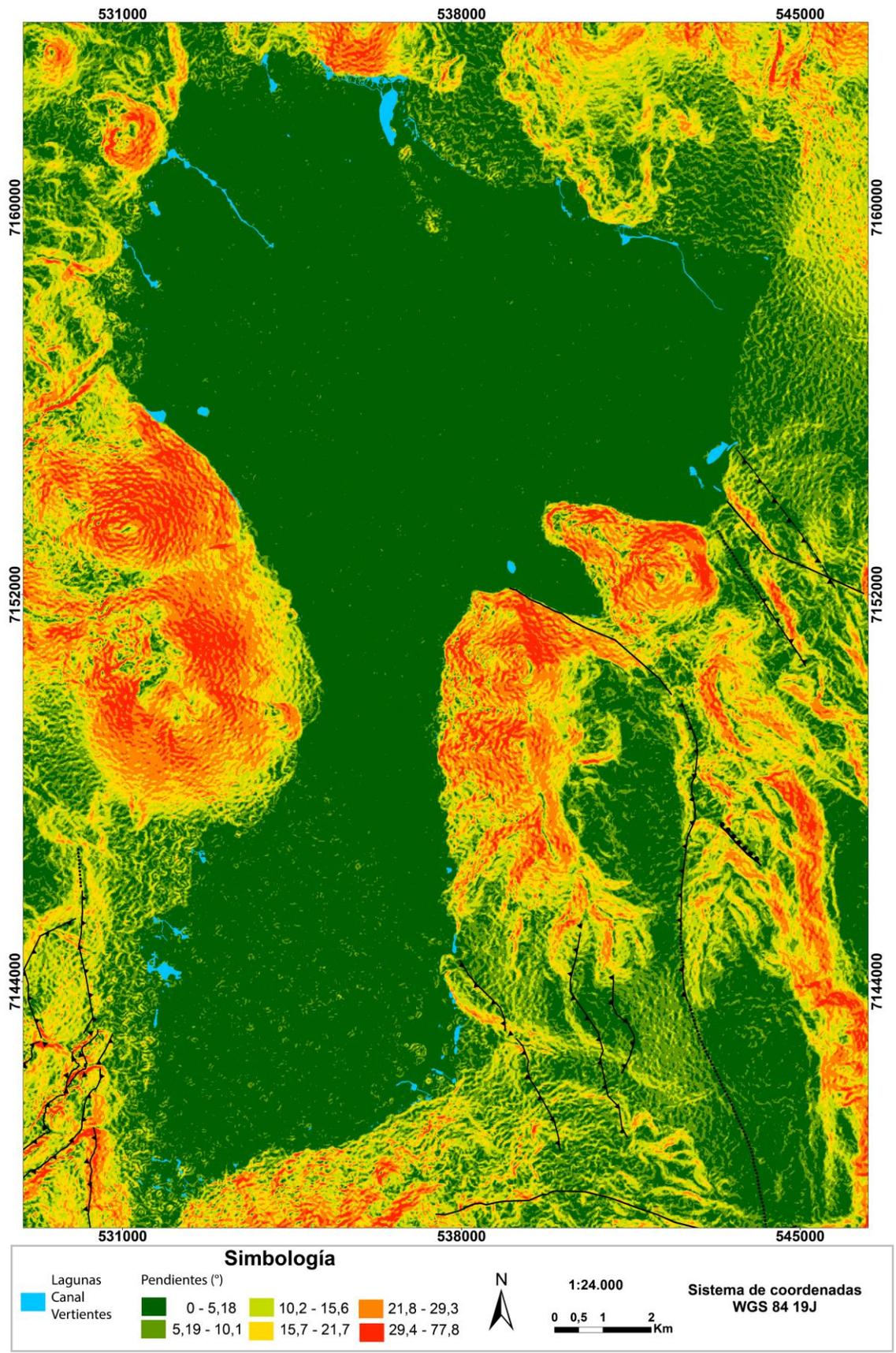


Figura 24: Manto de pendientes en torno al salar. Elaboración propia.

3.1.5 **Caracterización hidrogeoquímica**

3.1.5.1 *Base de datos*

El análisis hidroquímico del Salar de La Isla contempla los resultados de estudios anteriores, que son complementados con muestras obtenidas de la campaña de terreno de este estudio (metodología detallada Anexo M) desarrollada durante enero del presente año que logra añadir 16 nuevos puntos de aguas superficiales y 5 de costra salina, enfocados en caracterizar la parte sur del salar, cuyas observaciones de campo se encuentran en el Anexo H. Se incluyen además un total de 38 puntos de monitoreo de aguas superficiales de estudios anteriores (Anexo A), los que principalmente caracterizan la parte norte del salar. Se ha descartado el análisis de resultados químicos de los sondajes realizados por el proyecto de Exploración Salares 7, puesto que no se tiene acceso a la metodología utilizada y además no cuenta con el análisis de todos los elementos mayores (sin contenido de HCO_3). Estos estudios corresponden a:

- Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II Y III Regiones– Chile (Risacher, et al., 1999), muestras recogidas durante marzo 1996.
- Estudio del Potencial De litio Salares Del Norte De Chile (Troncoso, et al., 2013), muestras recogidas durante marzo 2013.
- Caracterización geoquímica superficial de aguas y sales de los principales salares andinos ($22^{\circ}50'-26^{\circ}05'S$), Regiones de Antofagasta y Atacama. (Troncoso y Ercilla, 2016), muestras recogidas durante marzo 2014.

Se realiza el balance iónico de las muestras (Anexo N) de modo de validar la los resultados y reconocer errores analíticos, asumiendo la neutralidad de las cargas y permitiendo un error admisible del 5% (Freeze & Cherry, 1979), teniendo presente también que para las altas conductividades eléctricas $>2000 \mu\text{S/cm}$ Custodio y Llamas (1996) proponen un error del 4%.

En consideración de lo anterior, se tiene que alrededor de un 90% de las muestras presenta un error del balance iónico inferior a dicho valor (Figura 25), de manera que todas las muestras del trabajo de Risacher, et al. (1999) presentan un error menor al admisible (Anexo N) no superando el 1,5%, en tanto, las últimas muestras obtenidas algunas superan levemente el 5% de error; USL-01, USL-12 y USL-14 (Anexo N). La muestra LIS-RT-009 presenta un error de 7%, que al comparar con muestras próximas no presenta mayores diferencia en cuanto a la distribución de sus elementos mayores (Figura 26a), en tanto la muestra LIS-RT-011 presenta un error de 19% debido al alto contenido de K (Figura 26b), y la muestra de vertiente LIS-RT-015 presenta un error del 13%, asociado al alto contenido de CO_3 (Figura 26c), cuestión que no se registra en muestras cercanas a estas últimas dos, de manera que estos altos valores generarían el desbalance iónico. No se puede determinar la causa de estos altos errores iónicos debido a que se desconoce la metodología y observaciones realizadas de estas muestras durante su obtención y análisis, por lo que son tratadas con especial cuidado.

De esta manera se construye una base de datos que contiene antecedentes de condiciones fisicoquímicas, tales como; densidad² y temperatura² con mediciones de terreno, total de sólidos disueltos registrado en el laboratorio, y conductividad eléctrica² y pH² con mediciones de terreno y laboratorio, la Figura 27 muestra una variación de

² Registro incompleto de estas mediciones.

hasta 0,5 para el pH, y una mayor variabilidad para conductividades elevadas entre lo obtenido en terreno y laboratorio. A lo anterior se suman resultados hidrogeoquímicos de elementos mayoritarios y minoritarios, teniendo información de un total de 54 muestras de aguas superficiales (Figura 28).

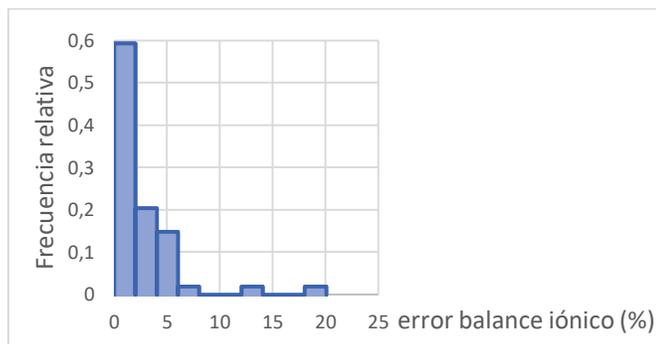


Figura 25: Distribución frecuencia relativa del error asociado al balance iónico (%) muestras del Salar de La Isla.

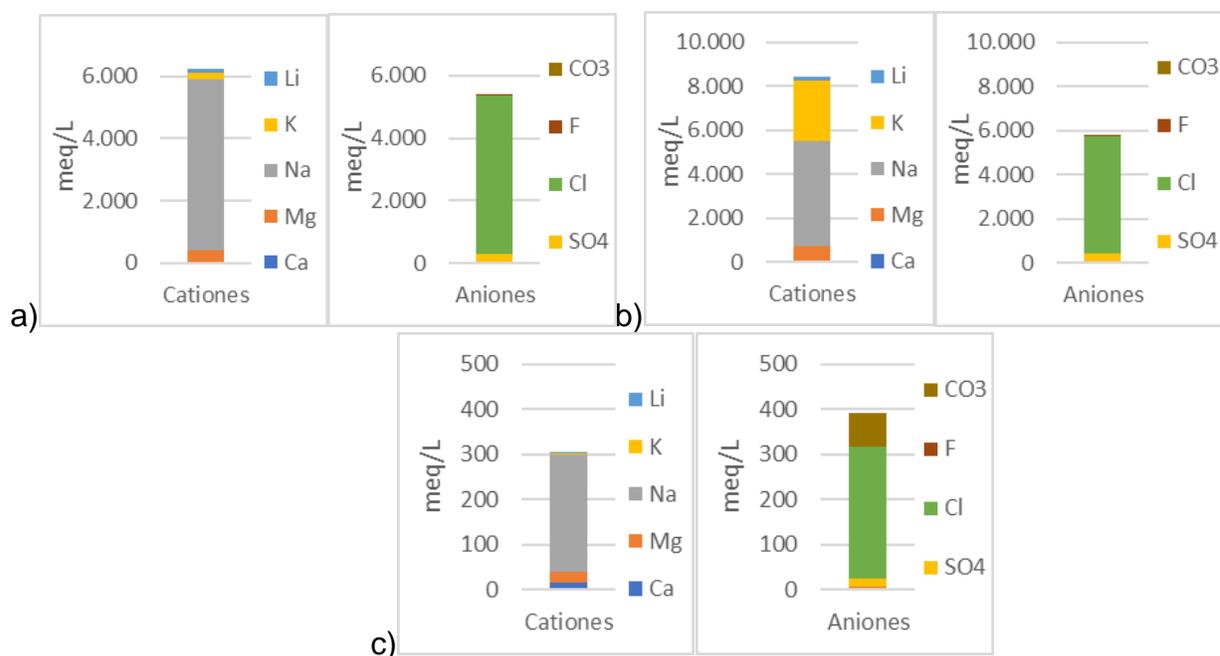


Figura 26: Iones mayoritarios de las muestras con alto error balance iónico; a) LIS-RT-009, b) LIS-RT-011 y c) LIS-RT-015.

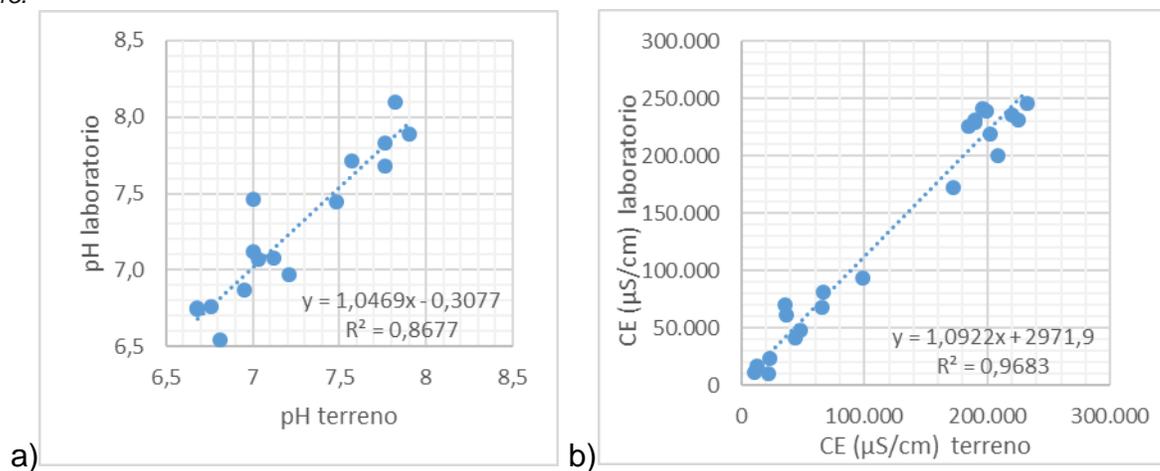
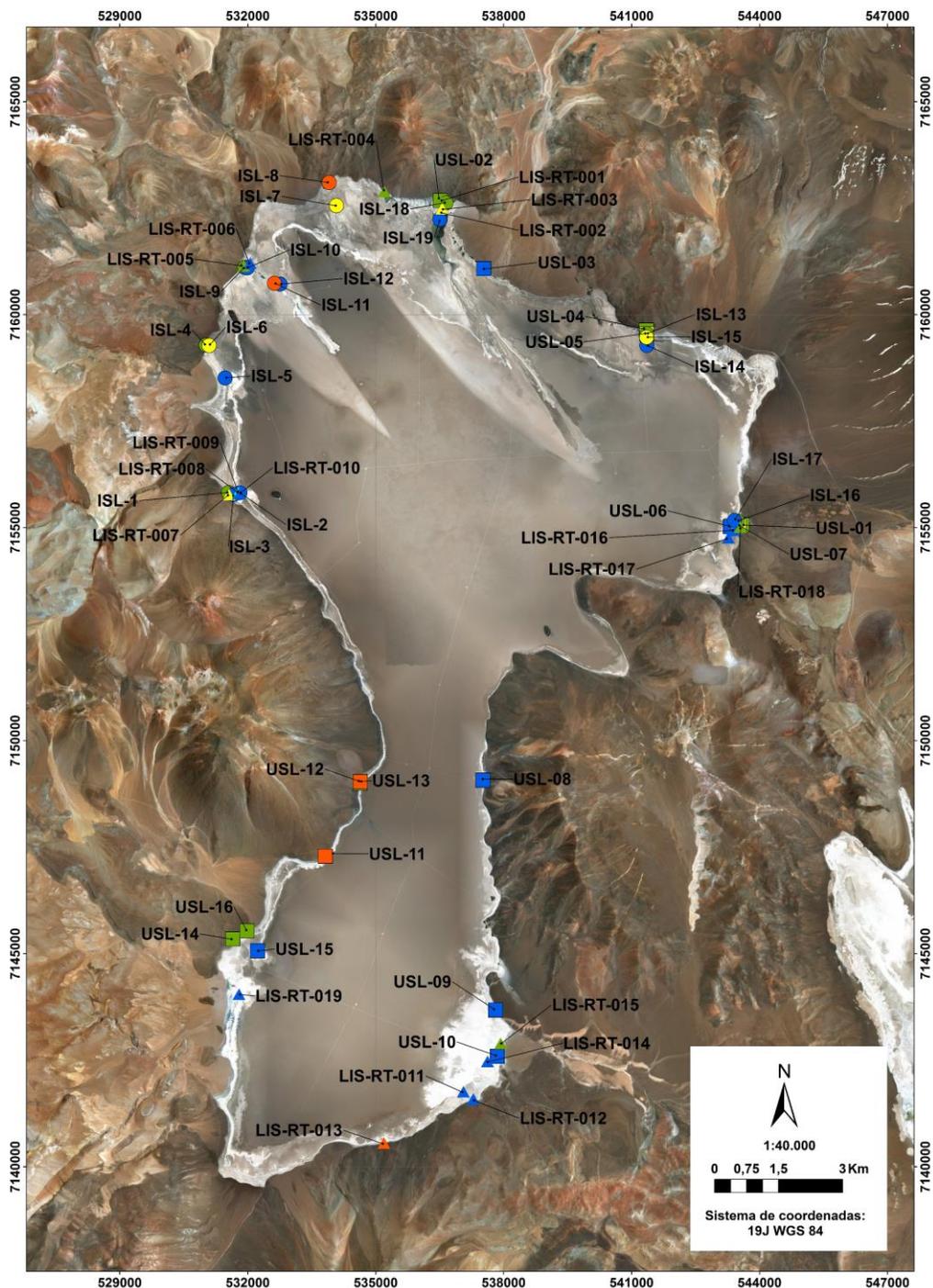


Figura 27: Mediciones de terreno versus laboratorio; a) pH, b) Conductividad eléctrica (µS/cm). Solo se dispone de condiciones de terreno de las muestras de este estudio.



Simbología		Fuente dato	
Tipo muestra			
Canal	Calicata	Vertiente	Risacher, et al., 1999
Laguna	Ojo	Troncoso, et al., 2013- Troncoso y Ercilla, 2016	Campaña terreno 2018

Figura 28: Mapa distribución base de datos hidrogeoquímica del Salar de La Isla, códigos ISL corresponden a las muestras de Risacher, et al. (1999), LIS-RT Troncoso, et al. (2013) y Troncoso y Ercilla (2016), y USL muestras recogidas durante la campaña de enero de 2018 de este estudio. Elaboración propia.

3.1.5.2 Correlación de los datos

La Tabla 15 muestra la estadística general de la base de datos generada para este estudio, en la que la mayoría de las especies químicas presentan una diferencia de dos órdenes de magnitud entre el valor máximo y mínimo, a excepción del litio y potasio, que presentan variaciones de tres y cuatro órdenes de magnitud respectivamente. Para estudiar la relación que presentan los distintos componentes y parámetros fisicoquímicos entre sí se ha construido una matriz de correlación de Spearman (definida en 1904) (Tabla 16), considerando que un salar representa una anomalía con valores extremos desde el punto de vista geoquímico, y luego de estudiar que las variables no presentan una distribución probabilística normal según sus histogramas.

Tabla 15: Estadística de la base de datos hidroquímica del Salar de La Isla, parámetros y elementos mayores.

	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Alc (meq/l)	0,07	2.735,91	126,56	400,90
B (mg/L)	2,7	670,4	158,92	153,61
Ca (mg/L)	37,2	1.880	405,92	345,04
CE (µS/cm) laboratorio	10140	246.000	119.061,67	90.825,95
Cl (mg/L)	3130	197.717	77.396,15	75.428,61
Densidad	1,01	1,22	1,09	0,08
HCO ₃ (mg/L)	23,4	2.130	214,89	367,42
K (mg/L)	35	108.000	5.699,83	14.729,74
Li (mg/L)	3,5	4.200	548,52	836,58
Mg (mg/L)	57,1	9.175	2.378,81	2.650,65
Na (mg/L)	1970	130.000	45.602,69	45.156,70
pH laboratorio	6,54	8,53	7,46	0,52
SO ₄ (mg/L)	285	26.200	6.405,65	6.490,17
TSD (mg/L)	6029	353.965	136.742,22	133.523,42
T° C	4,4	29,5	18,11	5,71

Tabla 16: Matriz correlación Spearman de la base de datos hidrogeoquímica del Salar de La Isla.

	SO ₄	Cl	HCO ₃	Li	K	Ca	Na	Mg	B	Alc	pH	CE
SO ₄	1											
Cl	0,962	1										
HCO ₃	0,725	0,703	1									
Li	0,937	0,946	0,663	1								
K	0,965	0,963	0,679	0,943	1							
Ca	0,644	0,568	0,436	0,468	0,558	1						
Na	0,956	0,993	0,692	0,937	0,962	0,572	1					
Mg	0,960	0,958	0,703	0,928	0,946	0,537	0,949	1				
B	0,893	0,890	0,747	0,850	0,861	0,542	0,878	0,885	1			
Alc	0,598	0,610	0,648	0,560	0,535	0,370	0,621	0,603	0,547	1		
pH	-0,477	-0,524	-0,252	-0,488	-0,535	-0,220	-0,531	-0,535	-0,486	-0,421	1	
CE	0,955	0,991	0,696	0,935	0,956	0,581	0,998	0,949	0,879	0,645	-0,527	1
TSD	0,947	0,978	0,687	0,927	0,954	0,548	0,979	0,950	0,895	0,578	-0,558	0,975

*Coloreado correlaciones cercanas a 1. Dado que un gran número de muestras no registran temperaturas medidas se omite esta variable, para el caso del pH y conductividad eléctrica se ha optado por las mediciones de laboratorio puesto que este registro esta para todas las muestras.

De la Tabla 16 se desprende que: las especies químicas SO₄, Cl, Li, K, Na, Mg y B, junto a los parámetros de conductividad eléctrica (de laboratorio) y total sólidos disueltos (TSD), presentan una alta correlación entre sí, siendo mayor entre Na y la conductividad eléctrica con una correlación de 0,998, y algo menor la del B con el resto de las variables entorno a los ~0,8. Para el caso de HCO₃ la mayor correlación descrita como moderada de ~0,7 la tiene con B y Mg. Una observación importante es con respecto al pH (de laboratorio) que presenta una correlación negativa con todas las

variables, siendo de moderada a baja. En el caso del litio, elemento de especial interés, presenta una mayor correspondencia con K y Cl, y en menor medida con el B.

3.1.5.3 *Análisis de parámetros fisicoquímicos*

Las muestras presentan temperaturas que van desde los 4,4°C a los 29,5°C, la Figura 29a muestra la distribución espacial de esta variable, teniendo que en el borde norte se encuentran valores mayores hasta 24°C correspondiendo tanto a vertientes, lagunas y canales. La muestra de laguna ISL-2 presenta la máxima registrada obtenida en marzo de 1996 a las 12:40 hrs, que más bien daría cuenta de una relación con las condiciones atmosféricas, lagunas del sur también superan los 20 °C. Al evaluar las temperaturas para los distintos tipos de muestras superficiales (Figura 30a) se desprende que no existe una tendencia clara, así calicatas, ojos y lagunas tienen mayor variabilidad, siendo más altas para estas últimas. De especial atención es el punto delimitado por el recuadro (Figura 29a) correspondiente a una vertiente que, durante las tres campañas de muestreo, es decir, desde 1996 ha presentado temperaturas en torno a 25°C, evidenciando una influencia termal en esa área donde afloran varias vertientes y se desarrolla vegetación tipo pajonal.

Los valores de pH (laboratorio) se encuentran entorno a la neutralidad de las aguas estando en un intervalo entre 6,4 y 8,6, su distribución espacial (Figura 29b) indica que los máximos valores se ubican al sureste del salar, junto al sector noroeste donde también se observa una tendencia algo más básica superando valores de pH 8. De acuerdo con la Figura 30b, las muestras que guardan cierta uniformidad son las obtenidas desde calicatas y ojos con valores en torno a los 6,5-7 de pH, en tanto desde una vertiente hasta el paso de una laguna el intervalo 6,5-8,5 se mantiene entre de todas ellas.

En cuanto a la conductividad eléctrica (laboratorio), ésta presenta una alta variabilidad en términos cuantitativos (Figura 29c), sin embargo, en el sur del salar se desarrollan salmueras, lagunas y vertientes con mayores valores de conductividad eléctrica. Al analizar su evolución con respecto al tipo de muestra (Figura 30c), se tiene un aumento significativo desde el paso de vertiente, canal, a laguna, pasando de valores en torno a los 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los que superan los 250.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el caso de las calicatas y ojos de agua, este valor varía altamente entre sí, lo que se encuentra influenciado a que se obtuvo acceso tanto a aguas alimentadoras del salar como salmueras presentes en la costra salina con este tipo de muestra.

Tendencias similares a la conductividad eléctrica presentan los valores de TDS (total sólidos disueltos), en cuanto a su distribución espacial (Figura 29d) y siendo más notoria la diferencia de las aguas del extremo norte con respecto a las del centro y sur, su evolución con respecto al tipo de muestra (Figura 30d), indica una mayor variabilidad de las muestras subsuperficiales; calicatas y ojos de agua.

Para el caso de la densidad de las muestras, mayores valores se encuentran hacia el sur del salar, presentando además una distribución similar a la conductividad eléctrica y TSD (Figura 30e) para los distintos tipos de muestras.

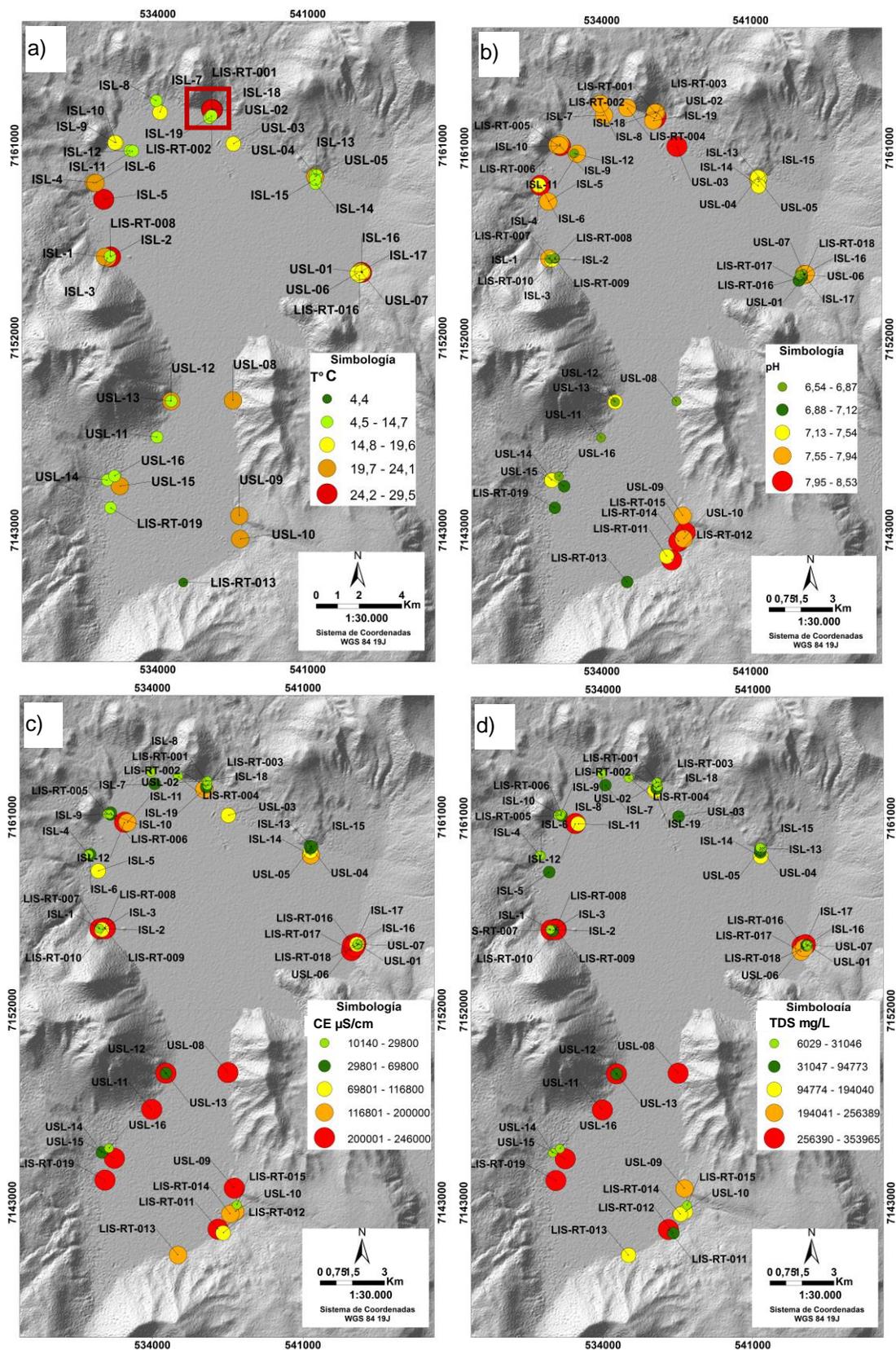


Figura 29: Distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de aguas del Salar de La Isla: a) Temperatura (°C) de terreno b) pH de laboratorio c) Conductividad eléctrica (μS/cm) de laboratorio d) Total sólidos disueltos (mg/L) de laboratorio.

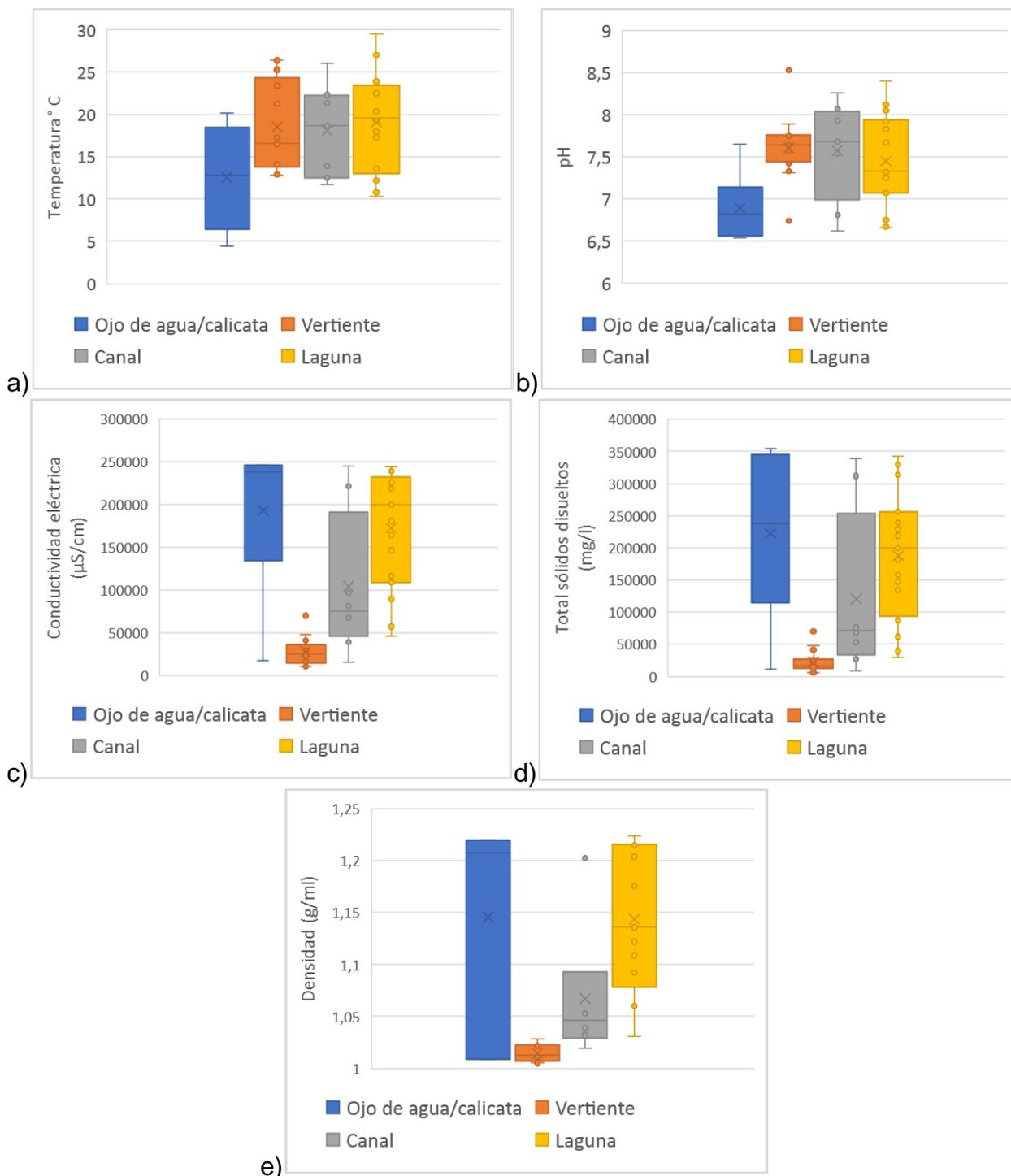


Figura 30: Diagramas de caja y bigotes de los parámetros fisicoquímicos de los distintos tipos de muestra (ojo de agua/calicata, vertiente, canal y laguna): a) Temperatura (°C) de terreno b) pH de laboratorio c) Conductividad eléctrica (μS/cm) de laboratorio d) Total sólidos disueltos TSD (mg/L) de laboratorio e) Densidad (g/cm³) de terreno.

3.1.5.4 Análisis elementos mayores

Aquellos elementos que presentan concentraciones superiores a 1 mg/L, se consideran como mayoritarios, siendo comunes los cationes Na, K, Mg y Ca, y los aniones SO_4 , Cl, HCO_3 , y para el caso del Salar de La Isla el Li se incorpora puesto que supera ampliamente dicho límite dado su enriquecimiento dentro del sistema salino.

3.1.5.4.1 Tipos de agua

Las aguas superficiales muestreadas en el borde del Salar de La Isla presentan valores de TSD que varían desde 6.029 a 353.965 (mg/L), de manera que corresponden principalmente a aguas saladas y salmueras (Santibañez, 2000). La Figura 31 clasifica los tipos de aguas presentes a partir de los elementos mayores comunes, teniendo como resultado que prácticamente todas las aguas son del tipo cloruradas sódicas (Piper, 1944) independientes de su salinidad, teniendo que la muestra de vertiente USL-01 (Figura 31) se escapa levemente de la tendencia teniendo un mayor contenido de Mg.

Los diagramas Stiff presentados en la Figura 19, presentan una distribución tipo T de sus componentes, es decir, con predominio de los iones Na y Cl, confirmando lo descrito anteriormente. Los colores rojo y naranja determinan el tipo de agua y la escala a partir del eje horizontal en meq/L; salmuera y salada respectivamente, teniendo como principal tendencia que las aguas de la zona norte ubicadas en la facie marginal dominada por sulfatos, se encuentran más diluidas con respecto al centro y sur, lo que se evidencia al comparar el grado de salinidad de las lagunas del norte (TDS 94.162,38 mg/L en promedio) y ubicadas más hacia el sur (TDS 258.385,47 mg/L en promedio). A lo anterior se suma la generalidad de que las lagunas mantienen la relación entre las especies iónicas, de las vertientes y canales de las que derivan, teniendo sólo una mayor concentración, con leves variaciones en las razones de SO_4 y Mg.

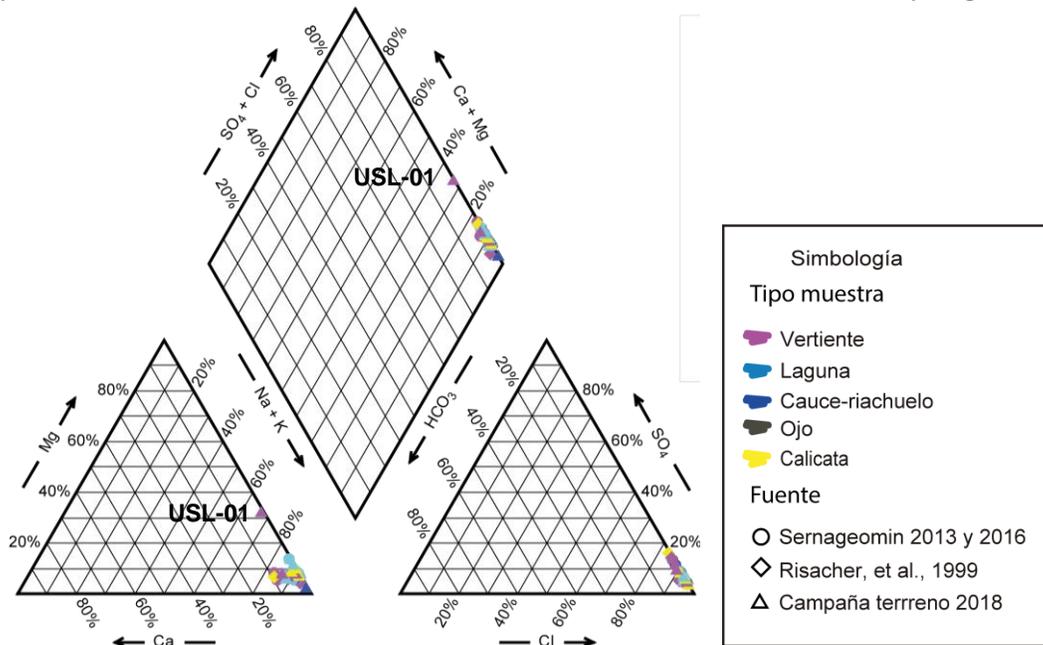


Figura 31: Diagrama Piper muestras del Salar de La Isla. En círculo las muestras del Sernageomin Troncoso, et al. (2013) y Troncoso y Ercilla (2016, en rombo las de Risacher, et al., (1999) y en triángulo la de este estudio. En morado las muestras de vertiente, celeste las de laguna, azul las de canal-riachuelo, en rojo los ojos del salar y amarillo calicatas.

3.1.5.4.2 Relaciones binarias

La Figura 32a muestra una relación de equimolaridad entre Na y Cl prácticamente de todas las aguas independientemente del tipo de muestra, teniendo un aumento progresivo de ambos elementos al pasar de vertientes hacia lagunas, lo que indicaría probablemente disolución de halita como fuente de estos iones. Para el caso de SO_4 y Ca se reconoce una tendencia algo más dispersa y paralela a la equimolaridad entre estos componentes (Figura 32b), teniendo un mayor contenido de SO_4 por sobre Ca hasta de 34 veces más, pudiendo indicar disolución de yeso aquellas muestras más próximas a la recta de equimolaridad ubicadas principalmente al norte (Figura 32c).

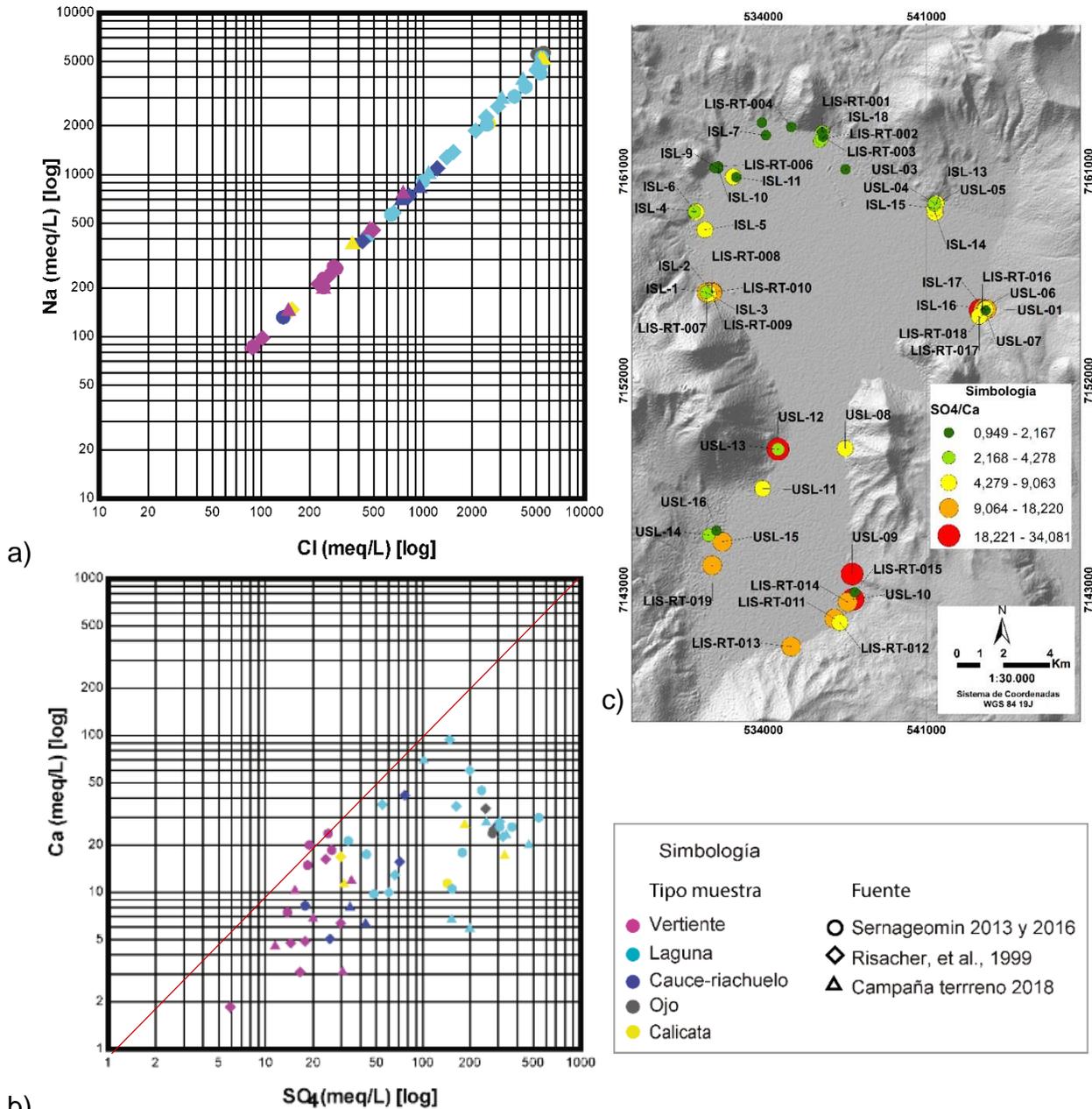
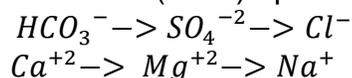


Figura 32: Relaciones binarias elementos muestras del Salar de La Isla; a) Relación logarítmica entre Na (meq/L) y Cl (meq/L), b) Relación logarítmica entre SO_4 (meq/L) y Ca (meq/L), colores indican tipo de muestra y formas la fuente. c) Distribución espacial relación entre SO_4 /Ca.

3.1.5.4.3 Índices hidrogeoquímicos

El agua experimenta numerosas reacciones durante su recorrido, gracias a procesos como la precipitación, infiltración, escurrimiento y evaporación, en los que la tendencia general es el aumento de su mineralización hasta saturarse en los diferentes iones, siguiendo la secuencia de Chevotareb (1955) que en general desarrollan las aguas de circulación regional:



Las relaciones entre los iones disueltos permiten interpretar la evolución de la composición química del agua, de manera que se han calculado índices de relación entre los distintos elementos mayores teniendo como objetivo estudiar la influencia de la química del terreno atravesado y algunos procesos sobre la relación de los iones disueltos, entendiendo que las aguas superficiales muestreadas derivan del sistema subterráneo y que afloran en las inmediaciones del salar. En base a lo propuesto por Custodio y Llamas (1996), y Fernández (2006) de los índices obtenidos (Anexo O y Figura 34) se desprende lo siguiente:

3.1.5.4.3.1 Relación rMg / rCa

Esta relación está fuertemente condicionada por la capacidad de cambio de base de los terrenos, y en el salar la mayoría presenta índices mayores a uno indicativo que el Mg es el catión dominante, LIS-RT-001, LIS-RT-004 y ISL-08, ubicados en el extremo norte del salar presentan valores menores a uno, en las que Ca predomina. Se tiene como tendencia general que las aguas de vertientes presentan menores valores en comparación a las lagunas en un orden de magnitud, y que en el norte tanto lagunas y vertientes presentan bajas diferencias entre ambos cationes (Figura 33a), a excepción de la vertiente USL-01 presenta un valor elevado (31,251) en comparación al resto de estas que tienen 4 en promedio.

3.1.5.4.3.2 Relación rK / rNa

En general se obtienen valores del orden de las centésimas y milésimas, a excepción de la muestra USL-03 con 0,135 ubicada en el abanico del noreste, descartando la representatividad de LIS-RT-011 con 0,57, puesto que esta última presenta un alto error en su balance iónico. En los diferentes sectores muestreados las distintas aguas no presentan grandes diferencias, teniendo en promedio 0,058 (Figura 34b). Sus valores relativamente bajos se pueden relacionar al aumento de la salinidad, o al mayor tiempo de residencia debido al intercambio selectivo de K por Na de las arcillas. Para el caso de la muestra USL-03 el índice podría indicar un menor tiempo de residencia dado que presenta una alta salinidad y el índice es mayor en comparación a otras salinidades similares y cercanas, lo que podría estar relacionado a una mayor transmisividad de la unidad aluvial de la que proviene.

3.1.5.4.3.3 Relación rNa / rCa

Como tendencia general se tiene que las vertientes presentan los menores valores hasta en un orden de magnitud con respecto a las lagunas, siendo menores (<10) las vertientes ISL-08 y LIS-RT-004 localizadas en el extremo norte (Figura 33c), sector donde además de forma generalizada las muestras presentan valores relativamente bajos (<137,671) considerando que el máximo es 653,706, lo que se debe a que todas

ellas presentan un mayor contenido de Ca, reflejado en el ancho del segmento medio de los diagramas Stiff (Figura 19).

3.1.5.4.3.4 Relación $rNa / r(Ca+Mg)$

Corresponde a la relación entre iones alcalinos y alcalinos térreos, donde contrastes fuertes de esta relación entre sectores cercanos indican variaciones litológicas bruscas o presencia de fracturas profundas, en general los índices obtenidos para la mayoría de las muestras presentan valores similares con promedio 9, sin embargo, para el sector de la laguna ubicada a los pies del volcán Aguas Blancas, se registran grandes variaciones alrededor de 15 veces (Figura 33d), teniendo el mínimo valor para la muestra de vertiente USL-01 (1,961) y el mayor valor la muestra del riachuelo USL-07 (33,931) en que deriva, lo que podría estar asociado las fallas que afectan esa zona (Figura 19).

3.1.5.4.3.5 Relación rCl / rCO_3H

Bajo el supuesto que HCO_3 se mantiene constante bajo condiciones de presión y temperatura dadas al entrar al sistema subterráneo, se tiene que este índice es indicativo de concentración de sales o intrusión salina. Al analizar las secuencias de vertiente, canal y laguna muestreados se observa un claro incremento de hasta tres órdenes de magnitud, indicando la progresión de los procesos concentradores (Figura 34a).

3.1.5.4.3.6 Relación rSO_4 / rCl

Igualmente, indicativo de concentración de sales, siendo SO_4 constante en condiciones saturadas, a presión y temperatura dadas. En general se tienen valores relativamente bajos mostrando la intensidad y progresión de la concentración, en el que lagunas presentan los menores valores por aumento de los cloruros. Valores mayores predominan en el extremo norte debido al aporte generado por la disolución de la costra salina dominada por sulfatos (Figura 34b).

3.1.5.4.3.7 Índice de cambio de bases (icb)

Definido como:

$$i_{cb} = \frac{rCl - r(Na+K)}{rCl} \text{ Ec. 15, desequilibrio entre iones cloro y alcalinos.}$$

Los índices negativos se encuentran relacionados a terrenos formados por rocas ígneas, y en aguas poco salinas puede ser tanto positivo como negativo, al ir aumentando la salinidad de un agua, el valor icb tiende a crecer lentamente. Se obtienen valores negativos para vertientes y algunas lagunas del salar evidenciando la interacción que tendrían las aguas con las distintas unidades volcánicas de la cuenca. Los valores positivos de lagunas se deberían al aumento de la salinidad.

3.1.5.4.3.8 Valor K_r

El índice K_r , se define como:

$$K_r = \sqrt[3]{rCa(rCO_3H)^2} \text{ Ec. 16}$$

El aumento de este índice se encuentra asociado a la reducción de sulfatos o aporte de CO_2 al sistema, mientras que la disminución produciría la precipitación de CO_3Ca , siendo buen indicador procesos de disolución y precipitación de CO_3Ca , el valor del índice estaría controlado por la simple disolución de calcita en función de la litología

local y del tiempo de residencia del agua en el acuífero. Las relaciones obtenidas varían desde valores cercanos a 1 hasta 21,311. Valores próximos a uno predominan en el extremo norte (Figura 34d) en tanto lagunas con mayores valores predominan al sur.

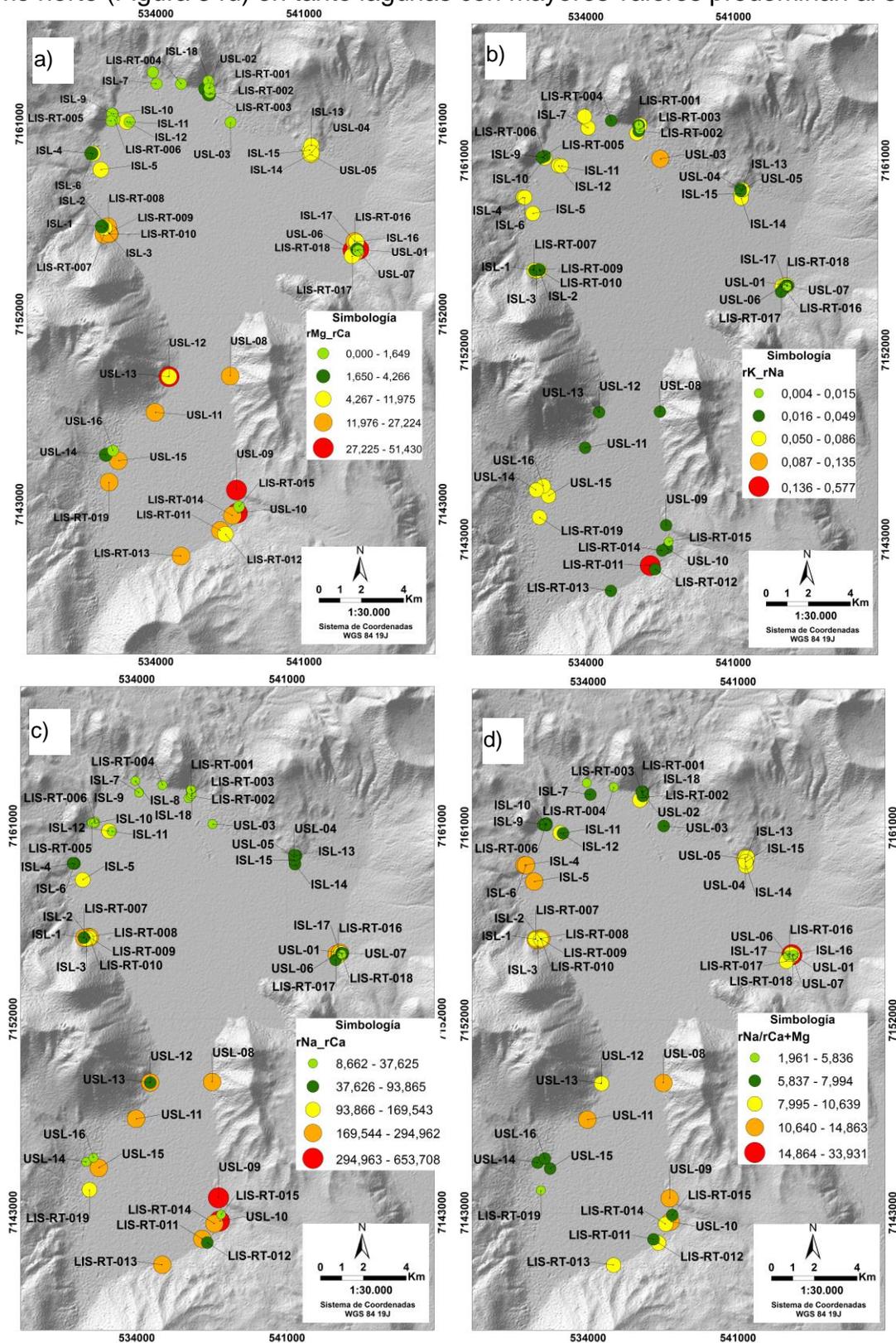


Figura 33: Distribución espacial índices hidrogeoquímicos, a) rMg/rCa b) rK/rNa c) rNa/rCa d) $rNa/(Ca+Mg)$.

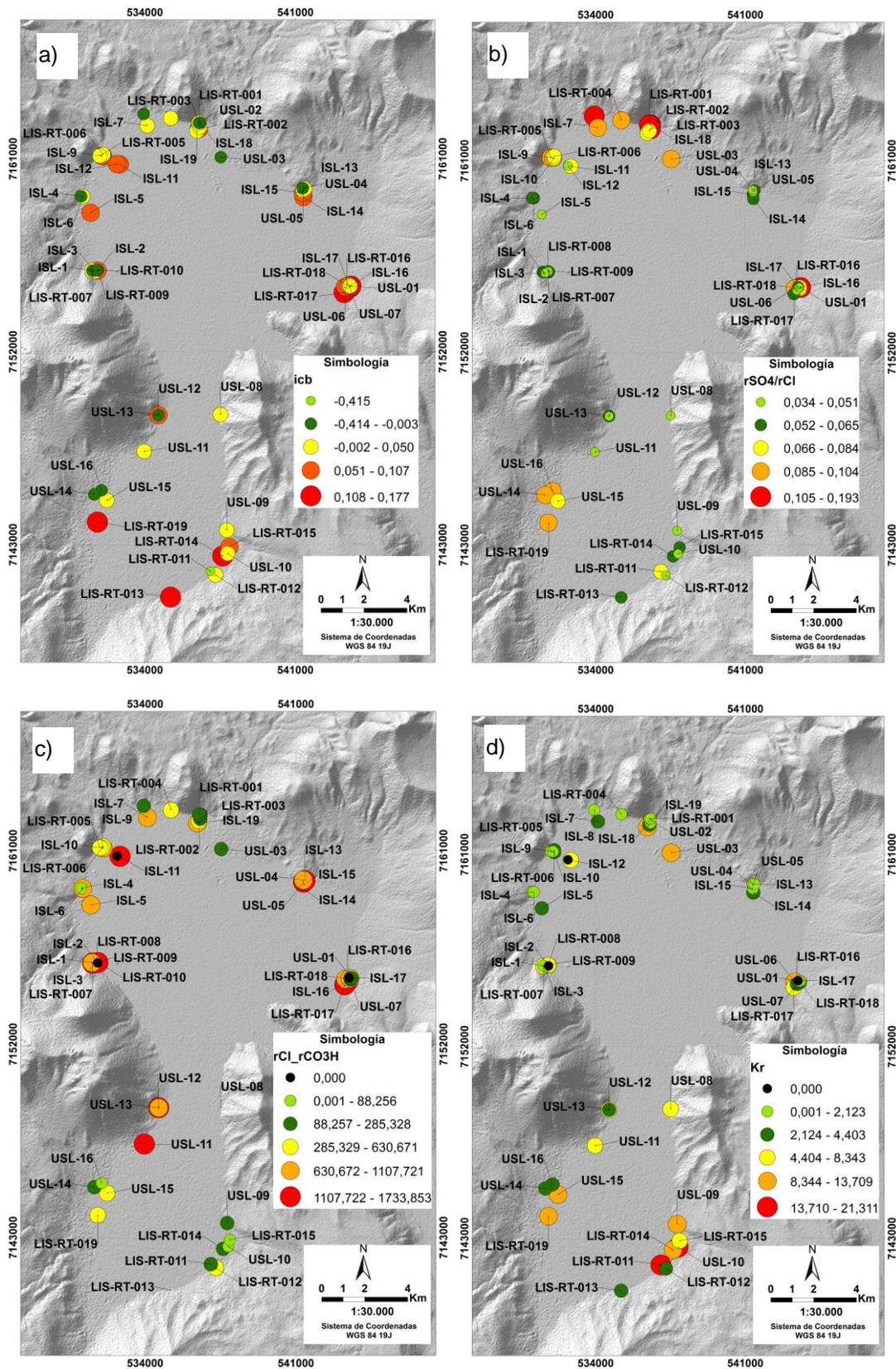


Figura 34: Distribución espacial índices hidrogeoquímicos, a) rCl/rCO_3H b) rSO_4/rCl c) icb d) Kr .

3.1.5.4.4 Litio, Boro y Potasio

Para estudiar el comportamiento del litio y otros elementos de interés como el boro y potasio, se ha buscado alguna relación simple con los parámetros fisicoquímicos, seleccionando solo las muestras de vertientes con el fin de evaluar algún enriquecimiento diferente del originado por la evaporación. Notando que no existe un enriquecimiento asociado a la temperatura (Figura 35a), y que la relación con la conductividad eléctrica y la densidad es prácticamente lineal (Figura 35b y Figura 35b) que deriva en un enriquecimiento progresivo.

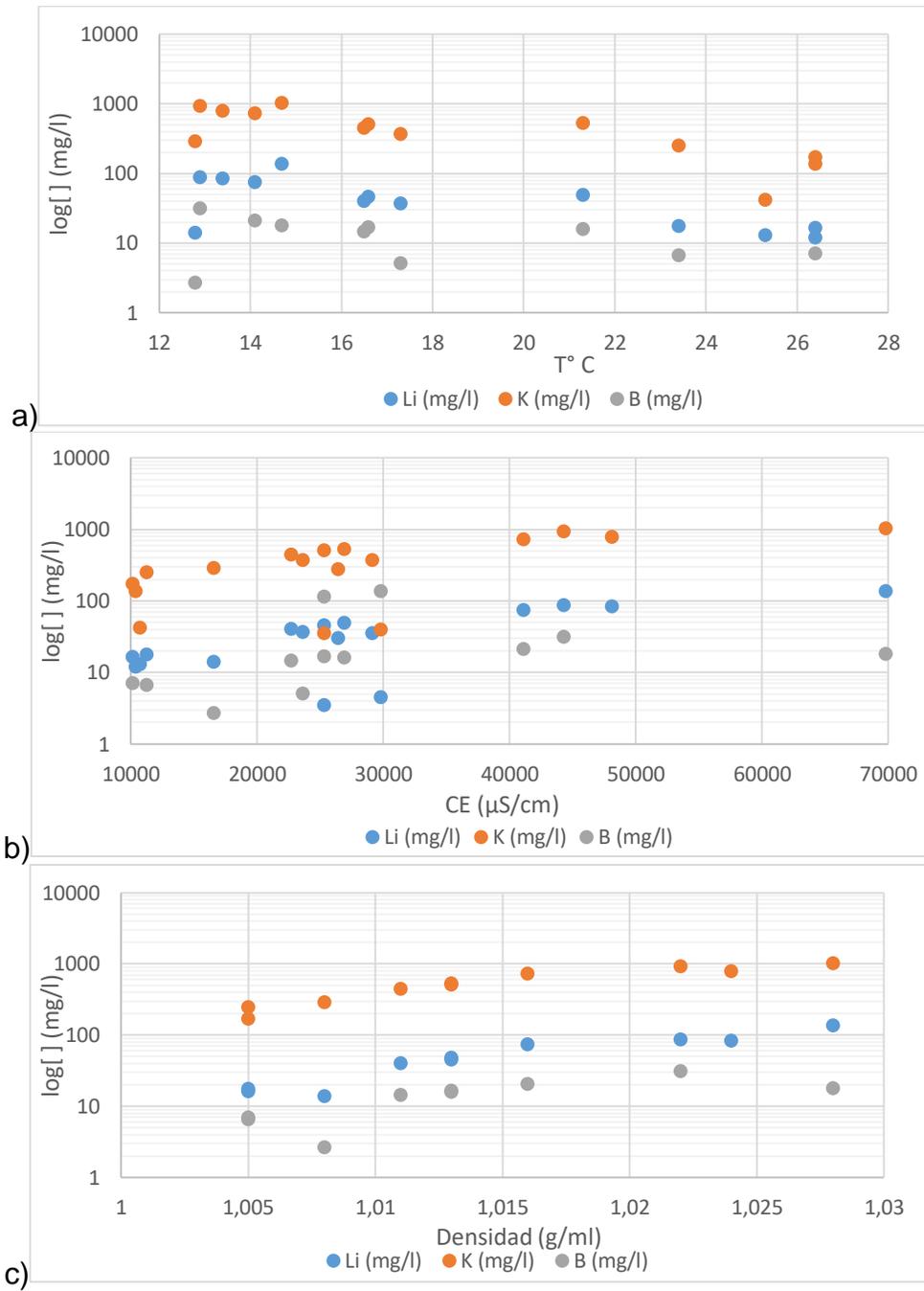


Figura 35: Relación de elementos de interés Li, K y B y parámetros fisicoquímicos en muestras de vertientes: a) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b) Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$), c) Densidad (g/ml).

Al analizar las tendencias que siguen los elementos de interés económico Li, K y B (Figura 36a, Figura 36b y Figura 36c), se observa un claro enriquecimiento de las salmueras de acuerdo con su evolución, con incrementos hasta de tres órdenes de magnitud para el caso Li y K, y uno del B, que en el caso de las muestras subsuperficiales; calicatas y ojos de agua presentan mayor variabilidad. Las vertientes en promedio presentan concentraciones de Li de 41,32 mg/L, en tanto las lagunas 804,7 mg/L, con un enriquecimiento de más de 19 veces. Estas observaciones evidenciarían la potencialidad de concentrar salmueras con contenidos de litio superior los miles de mg/L, favorecidos por la evaporación desde la superficie libre y terreno, la Figura 37 muestra los efectos de dicho proceso, para lo cual Houston et al. (2011) establece que alcanzado la estabilidad del Cl, se tiene la saturación de la halita con un incremento del Li.

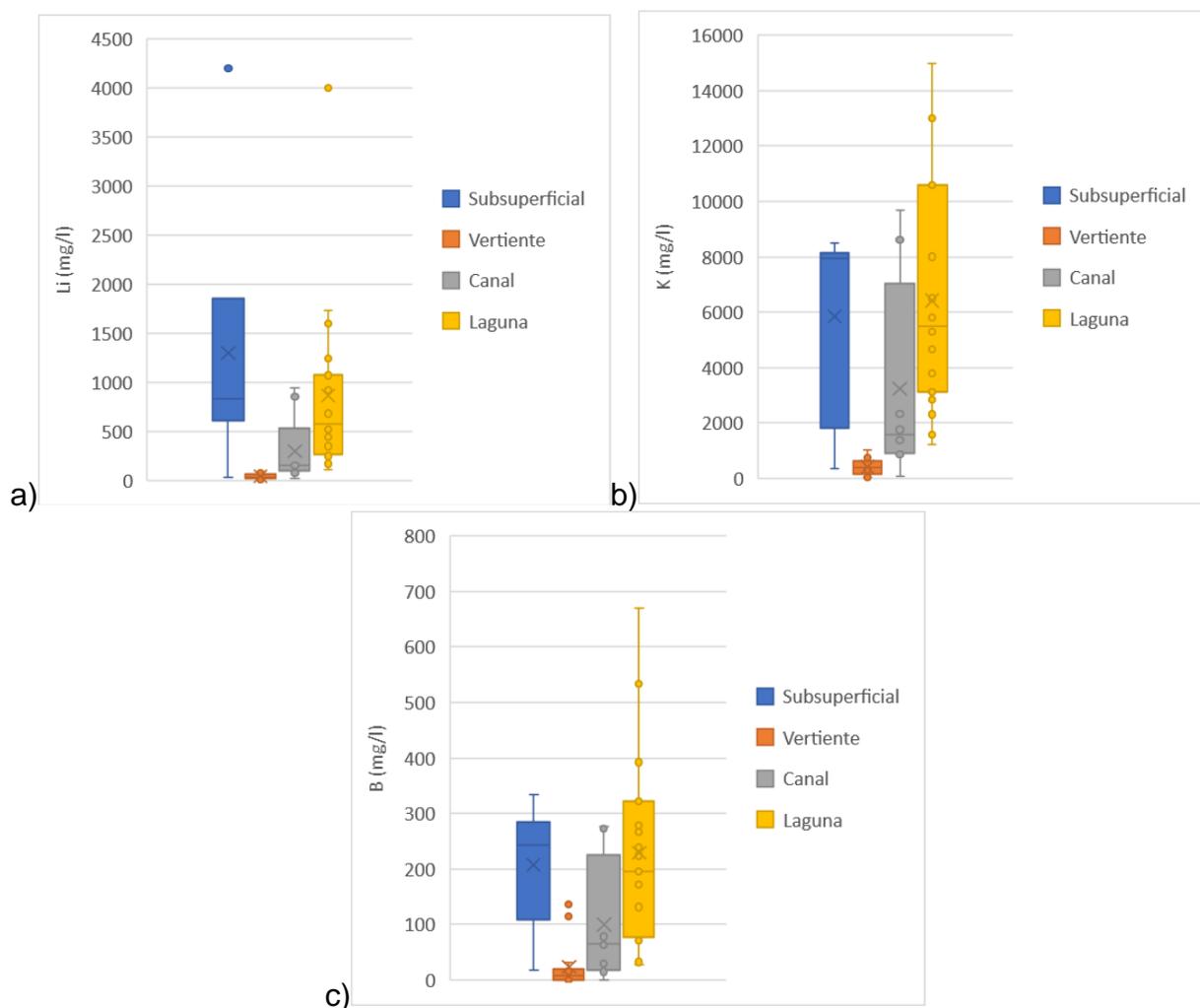


Figura 36: Diagramas de caja y bigotes de los contenidos de elementos de interés económico, a) Litio b) Potasio c) Boro.

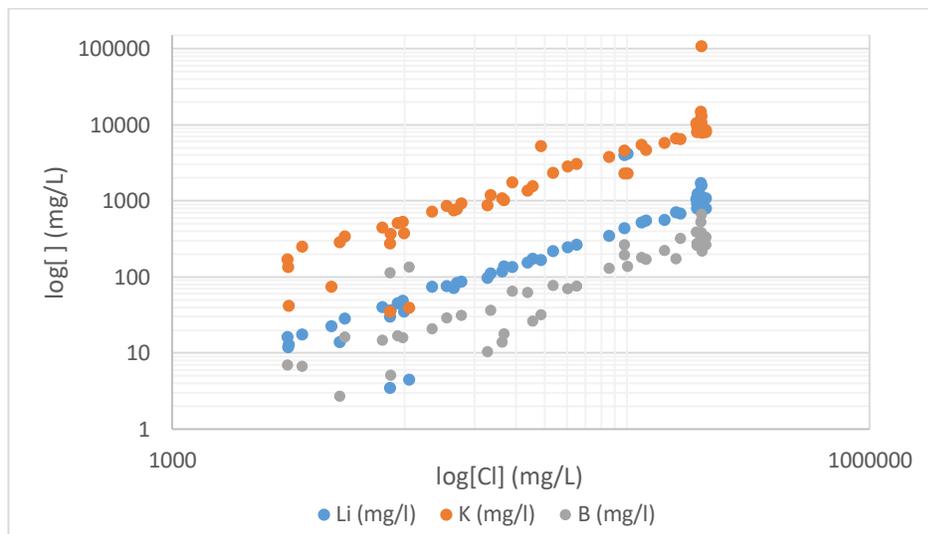


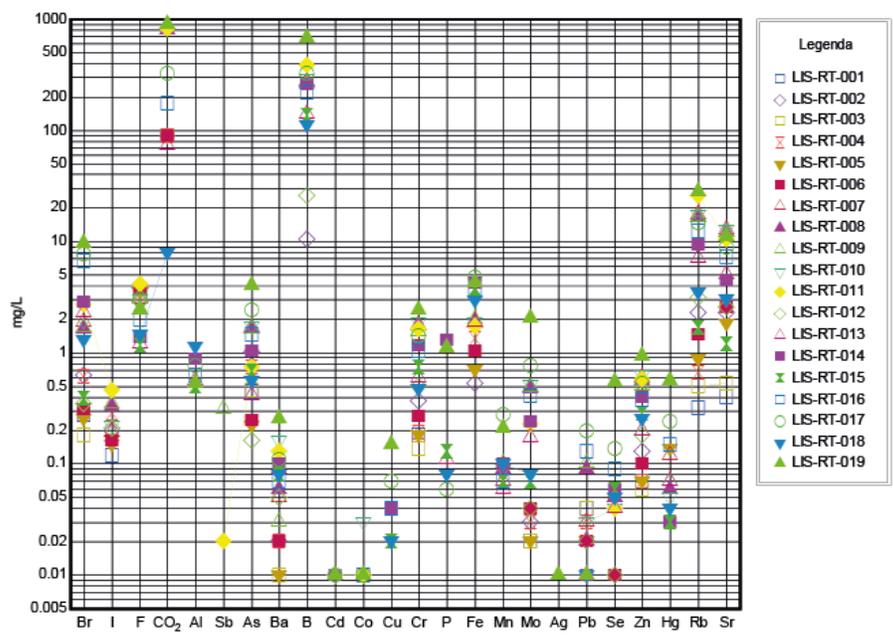
Figura 37: Relación logarítmica entre elementos de interés Li, K y B y Cl en mg/L.

3.1.5.5 Análisis elementos menores y traza

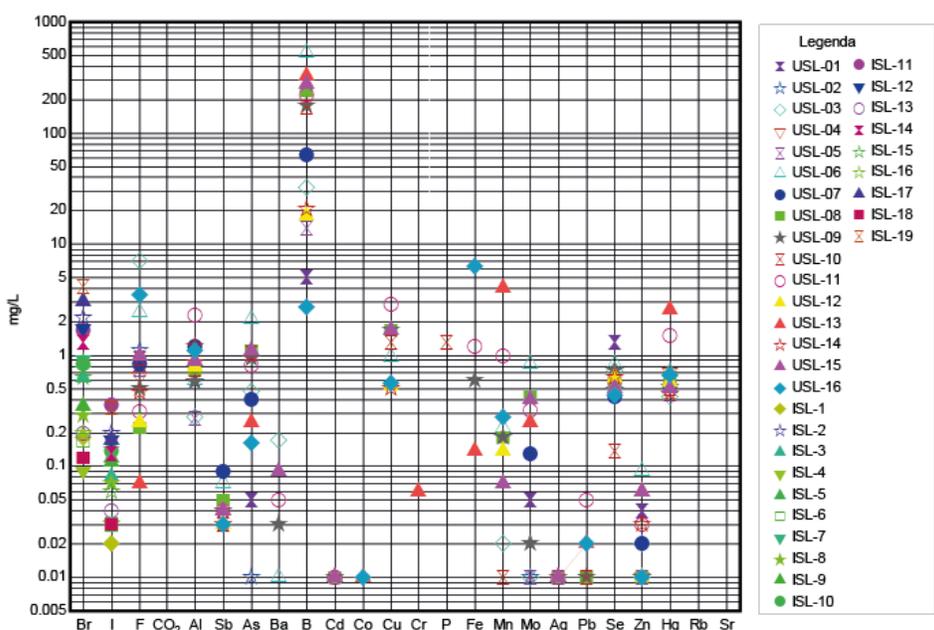
Los elementos minoritarios, son aquellos que se encuentran en concentraciones entre 0,1–1 mg/L, en tanto los elementos traza son los que se encuentran en cantidades muy inferiores, menores a 0,1 mg/L.

La Figura 38 muestra la concentración de aquellos elementos considerados menores y traza, descartando aquellos valores próximos a los límites de detección (<0,01 mg/L) (detalle Anexo A y Anexo B). En particular, las concentraciones de As, Br, CO₂, Cr, Cu, F, Fe, Mo, Mn, Rb, Sr alcanzan y mantienen concentraciones superiores o en torno a 1 mg/L.

La presencia de arsénico guardaría relación con la actividad volcánica, en especial con los yacimientos de azufre ubicados al norte de la cuenca, asociado a sulfuros comunes como la arsenopirita. En el caso del bromo éste se comporta de manera similar a los cloruros, pero con una menor abundancia, la razón entre Cl/ Br alcanza valores muy superiores a 6.000, lo que indicaría disolución de halita y/o yeso (Custodio y Llamas, 1996). El ion flúor se relacionaría con la alteración de rocas plutónicas, las que afloran fuera de los límites de la cuenca del Salar de La Isla. El contenido de Fe está influenciado por el pH, contenido de oxígeno y dependiendo a menudo del contenido de otros iones como carbonatos y sulfatos, siendo los procesos como oxidación-reducción, y precipitación-disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros, controladores de su equilibrio, características similares presenta el Mn con respecto a los procesos redox. El CO₂ disuelto es importante en el sistema carbonato-bicarbonato, controlando la acidez de las aguas, éste puede ser de origen atmosférico, biogénico, inorgánico (desgasificación al precipitar carbonatos) o endógeno (relacionado con procesos magmáticos). Analizando la geoquímica de las ignimbritas (Schnurr, et al., 2007, Brandmeier y Wörner, 2016) los contenidos de Cu y Mo podrían derivar de su lixiviación, al igual que los elementos Rb y Sr.



a)



b)

Figura 38: Elementos menores y traza en las aguas del Salar de La Isla, a) Diagrama Schoeller muestras LIS-RT b) Diagrama Schoeller muestras ISL y USL.

Los nitratos en las aguas derivan naturalmente de la descomposición, por microorganismos, de materiales nitrogenados orgánicos como las proteínas de las plantas, animales y excretas de animales. En el salar su contenido varía en categoría de mayores, menores y traza, cuya distribución (Figura 39) muestra que los mayores contenidos se asocian a la vegetación y descomposición presente en las zonas de muestreo, principalmente al sur (fotografías Anexo H).

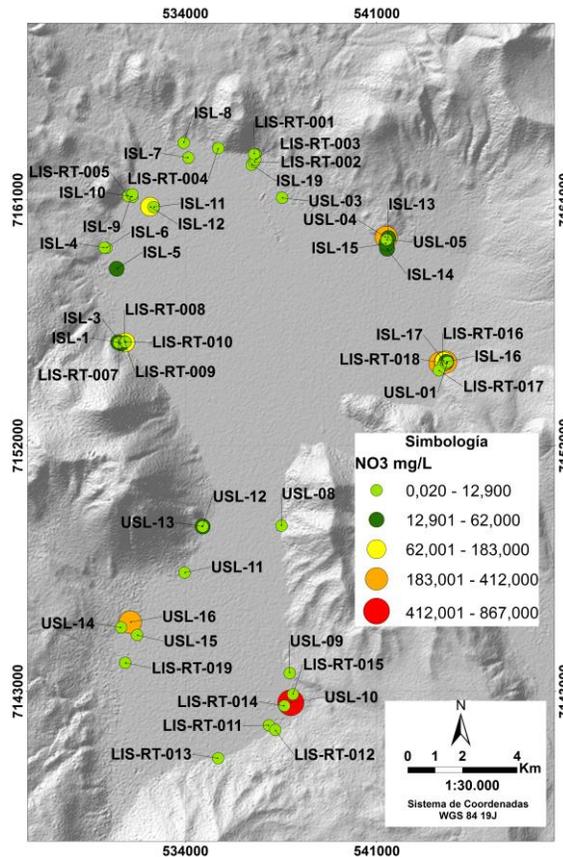


Figura 39: Distribución espacial de NO₃ mg/L.

En vertientes los elementos B, Cs, Rb y Sr muestran una relación creciente para contenidos de Li <4000 mg/L (Anexo P), sumando el Ar, Cr y Hg, para todo el conjunto de las muestras.

3.1.5.6 Vía evolutiva

Los componentes disueltos en las aguas se van concentrando y precipitando en secuencia según el orden creciente de solubilidades a causa de los procesos concentradores, de manera que el primer mineral que precipita en un agua natural es la calcita (CaCO₃) debido a su baja solubilidad (Tabla 17), seguido de los minerales magnésicos, sulfatos y finalmente los cloruros (Hardie y Eugster, 1970). Lo anterior se encuentra condicionado por la concentración inicial que finalmente determinará la vía evolutiva que seguirá un agua en particular.

Tabla 17: Solubilidad de algunas sales.

Sales		(gr/100 ml)
Carbonato de Calcio	CaCO ₃	0,0013
Carbonato de Magnesio	MgCO ₃	0,10
Sulfato de Calcio	CaSO ₄	0,20
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	11,11
Sulfato de Sodio	Na ₂ SO ₄	16,83
Carbonato de Sodio	Na ₂ CO ₃	19,39
Cloruro de Potasio	KCl	32,95
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄	35,43
Cloruro de Sodio	NaCl	35,86
Cloruro de Magnesio	MgCl ₂	55,81
Cloruro de Calcio	CaCl ₂	73,19

Risacher et al. en 1999 comparando contenidos de calcio, sulfato y alcalinidad determinó la vía evolutiva de un gran número de muestras de los salares del norte de Chile. A partir del concepto de alcalinidad, concentraciones iniciales y secuencia de minerales según solubilidad. La alcalinidad se define como la capacidad que tiene el agua de neutralizar un ácido fuerte, y se expresa como:

$$\text{Alcalinidad} = [\text{CO}_3^{-2}] + [\text{HCO}_3^{-}] + [\text{OH}^{-}] + [\text{boratos}] + [\text{silicatos}] - [\text{H}^{-}] \text{ Ec. 17}$$

Que, combinado con el balance iónico resulta:

$$[\text{Alc}] = \{[\text{Na}^{+}] + [\text{K}^{+}] + [\text{Li}^{+}] + [\text{Mg}^{+2}] + [\text{Ca}^{+2}]\} - \{[\text{Cl}^{-}] + [\text{SO}_4^{-2}] + [\text{NO}_3^{-}]\} \text{ Ec. 18}$$

Siendo esta última expresión dependiente de los principales componentes presentes en las aguas, que al ir variando el valor de alcalinidad en función de los minerales que van precipitando, se obtienen las siguientes condiciones que determinan la vía evolutiva de las aguas (Figura 40):

- Vía carbonatada si $\text{alc} > \text{Ca}$ y $\text{alc} > (\text{Ca} + \text{Mg})$
- Vía sulfatada alcalina o directa si $\text{alc} > \text{Ca}$ y $\text{alc} < (\text{Ca} + \text{Mg})$
- Vía sulfatada neutra si $\text{alc} < \text{Ca}$ y $(\text{alc} + \text{SO}_4) > \text{Ca}$
- Vía cálcica si $\text{alc} < \text{Ca}$ y $(\text{alc} + \text{SO}_4) < \text{Ca}$

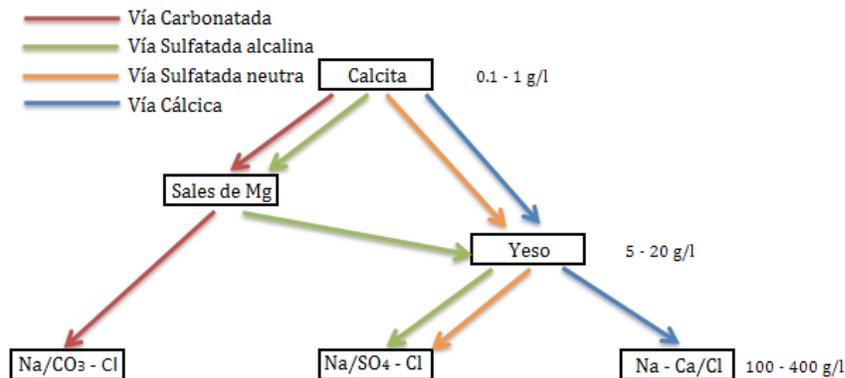


Figura 40: Secuencia y vía evolutivas.

Aplicando las condiciones anteriores a las muestras obtenidas desde el salar se tiene que, para la relación entre Ca y alcalinidad existen muestras que cumplen con ambas condiciones (Figura 41a), abriendo paso a las cuatro posibles vías (Figura 40). Considerando ahora la razón entre alcalinidad y Ca+Mg, para todos los casos es menor a 1 (Figura 41b), apuntando hacia la vía sulfatada alcalina o directa. Se descarta la vía cálcica para las aguas del salar puesto que se tiene que todas las muestras se encuentran bajo la recta $\text{Ca} = \text{Alc} + \text{SO}_4$ (Figura 41c), indicando la vía sulfatada neutra.

Combinando las condiciones y relaciones aplicadas se obtiene que las vías evolutivas de las aguas muestreadas del Salar de La Isla son; la vía sulfatada neutra, y la sulfatada alcalina o directa. La Figura 42 muestra la distribución espacial de la vía evolutiva que siguen las aguas, solo las aguas de aporte del extremo noroeste siguen la vía sulfatada alcalina o directa, existiendo también lagunas del sureste que siguen esta misma vía. Estos resultados guardan directa relación con la litología volcánica predominante de la cuenca según lo planteado por Risacher et al. (1999), donde la vía sulfatada neutra en particular se relacionaría a una litología volcánica con mayor azufre o mineralizada, puesto que la concentración del sulfato es proporcional a la intensidad del proceso de oxidación de sulfuros o del azufre.

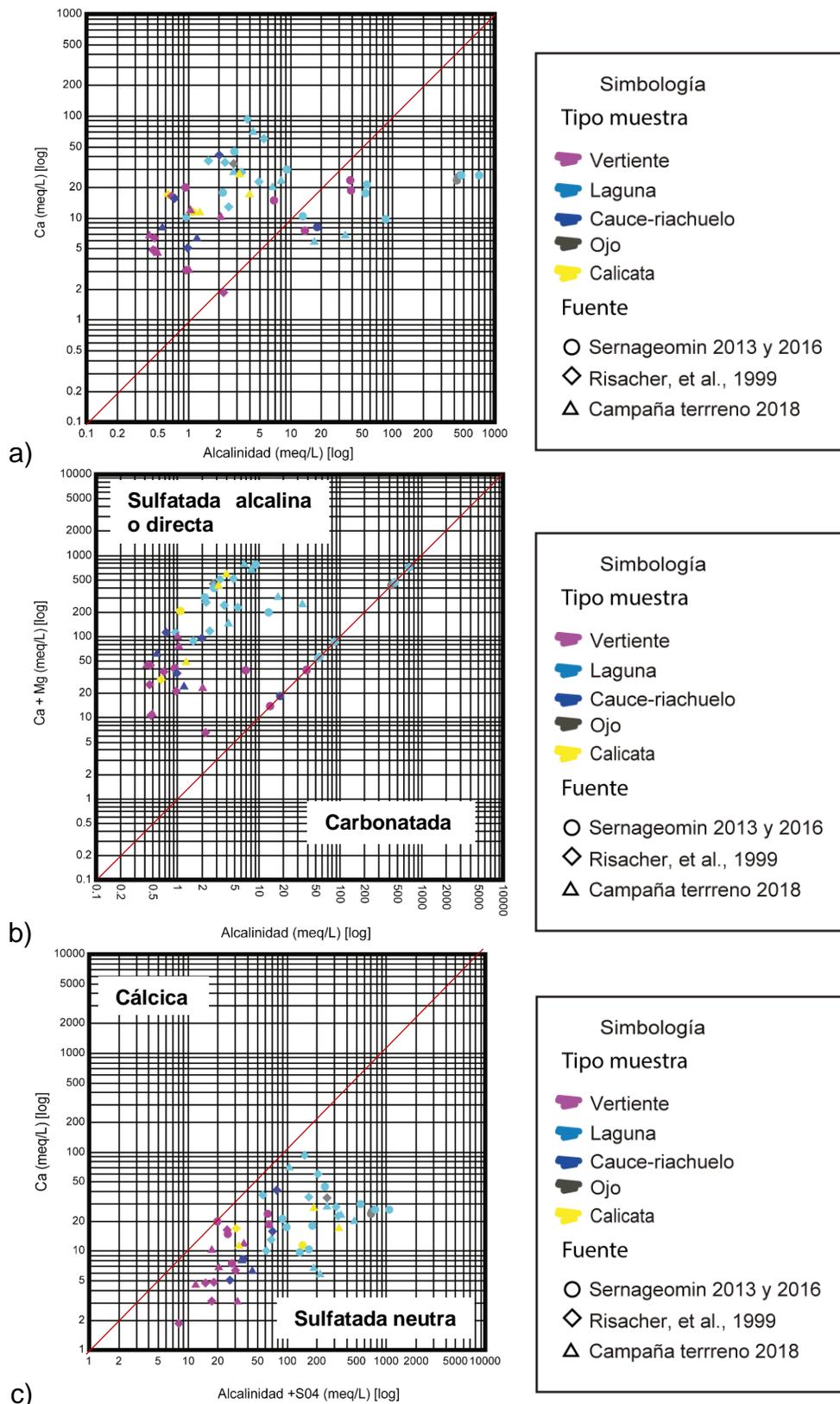


Figura 41: Relación logarítmica entre a) Alcalinidad (meq/L) y Ca (meq/L), b) Ca+ Mg (meq/L) y Alcalinidad (meq/L), c) Alcalinidad +SO4 (meq/L) y Ca (meq/L). Colores indican tipo de muestra y formas la fuente.

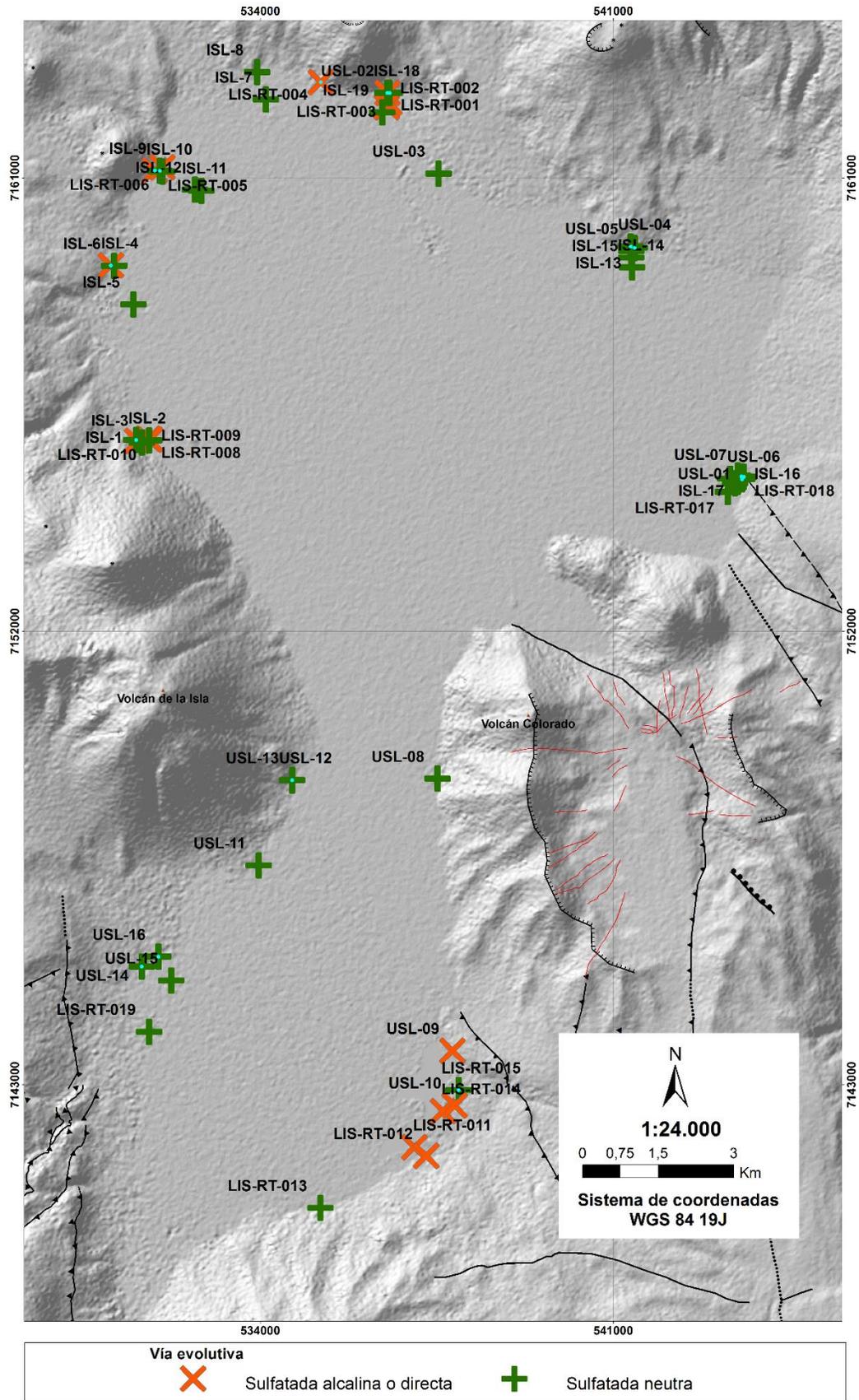


Figura 42: Distribución vía evolutiva de las aguas superficiales en el Salar de La Isla. Elaboración propia.

3.1.6 Caracterización isotópica

El estudio de los isótopos ambientales en las aguas subterráneas permite trazar el movimiento de estas e identificar algunos de los procesos de fraccionamiento natural durante su ciclo, que hacen variar sus razones isotópicas. Para la molécula de agua las variaciones isotópicas analizadas son en base a los isótopos hidrógeno (^1H), deuterio (^2H) y tritio (^3H), siendo el ^1H el más abundante de estos, y del oxígeno que presenta isótopos desde ^{14}O al ^{20}O . Isótopos de azufre y de oxígeno son estudiados de los sulfatos disueltos, en base a los contenidos de ^{32}S y ^{34}S , siendo el primero de ellos el más abundante. La Tabla 18 expone la abundancia relativa y el peso atómico de los principales isótopos del H, O y S.

Tabla 18: Isótopos de H, O y S, abundancia y peso atómico.

Isótopo	Abundancia (%)	Peso atómico (uma)
^1H	99,984	1,007825
^2H (Deuterio)	0,015	2,0140
^{16}O	99,76	15,99491
^{18}O	0,1	17,99916
^{32}S	95,02	31,97207
^{34}S	4,21	33,96786

La metodología consiste en establecer razones isotópicas entre el isótopo menos abundante respecto del más abundante, lo que se compara con respecto a estándares de referencia internacionales, relación que se conoce como desviación isotópica y se expresa como:

$$\delta = \frac{R_{(\text{muestra})} - R_{(\text{Estandar})}}{R_{(\text{Estandar})}} * 1000 \text{ Ec. 19}$$

Donde,

R es la razón entre el isótopo menos abundante con respecto al más abundante.

De modo que valores positivos de esta relación indica un enriquecimiento del isótopo menos abundante con respecto al patrón de referencia, relación contraria se tiene para valores negativos.

3.1.6.1 Patrón de Referencia VSMOW y Relación $\delta D - \delta^{18}O$

El estándar de referencia para los isótopos de agua se define a partir del Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), con valores medios para el agua oceánica, representando gran porcentaje de agua en la Tierra, que forma parte del ciclo hidrológico. Las relaciones de abundancia isotópicas para el deuterio y ^{18}O son respectivamente; $R_{VSMOW-D} = (155,75 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$ y $R_{VSMOW-18O} = (2005,20 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$.

Los contenidos de deuterio y ^{18}O en el agua natural experimentan un fraccionamiento durante su ciclo hidrológico, asociado principalmente a procesos de cambio de estado (Figura 43a), teniendo que una vez que forman parte del sistema subterráneo se consideran conservativos y no se ven afectados por la interacción agua roca, lo que permite trazar su evolución (Figura 43b). En general las aguas de mar son más pesadas que las aguas dulces, y en el caso de la composición isotópica de las aguas de lluvia, ésta se encuentra fuertemente influenciada por la temperatura, teniendo efectos por la latitud y la altitud (disminución al aumentar estos factores) y efecto de continentalidad (disminuyen tierra adentro desde la costa).

Todos los procesos anteriores se pueden identificar a partir de la relación existente entre las desviaciones isotópicas de deuterio y oxígeno 18, en donde la mayoría de las precipitaciones se sitúan en la Línea Meteorológica Mundial (Figura 43b), definida por Craig (1961) como:

$$\delta D = 8 * \delta^{18}O + 10 \quad \text{Ec. 20}$$

$$d = \delta D - 8 * \delta^{18}O \quad \text{Ec. 21}$$

Donde d se conoce como exceso de deuterio, y refleja las condiciones imperantes durante la evolución y la interacción o mezcla de masas de aire que conducen la precipitación (Clark y Fritz, 1997).

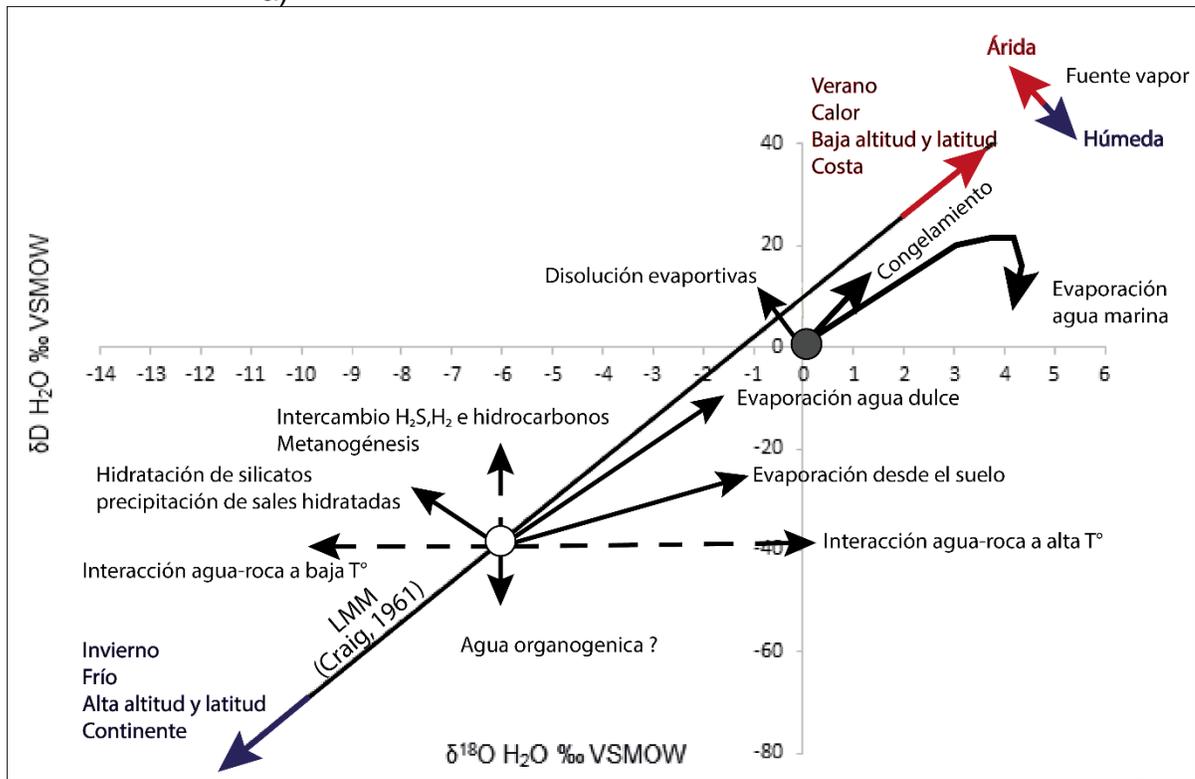
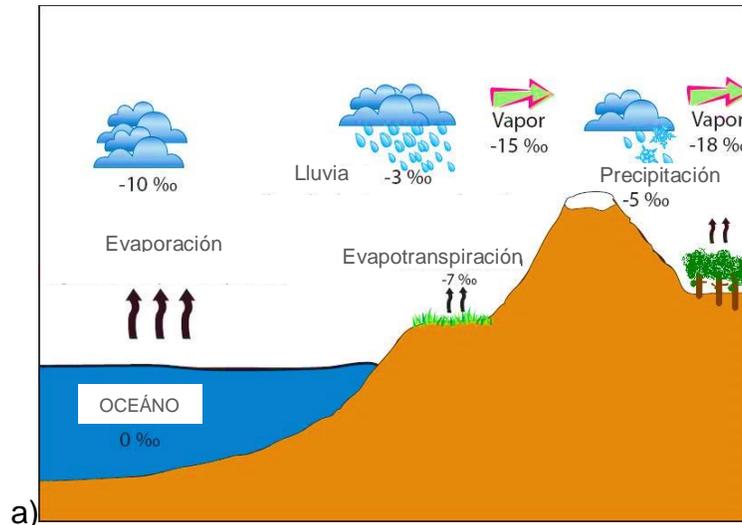


Figura 43: a) Composición isotópica durante el ciclo hidrológico. b) Relación desviaciones isotópicas para deuterio y oxígeno 18, Línea Meteorológica Mundial y procesos fraccionadores (Horita, 2005).

3.1.6.2 Patrón de referencia Cañón del Diablo Troilite (FeS) y $\delta^{34}\text{S}$

El meteorito Troilita (FeS) del Cañón del Diablo (USA) representa el valor inicial del ciclo del azufre, cuyo valor referencial para el azufre 34 con respecto al 32 corresponde a $R_{CTD} = 22,22$.

La composición isotópica de azufre del sulfato disuelto se ve afectada notablemente por las reacciones de oxidación y reducción, en tanto la reactividad de oxígeno en las aguas subterráneas es despreciable, siendo prácticamente nulo el intercambio de oxígeno entre el sulfato y agua. Las composiciones isotópicas de sulfatos disueltos en aguas dulces reflejan generalmente la de sus fuentes. El sulfato disuelto en el agua del mar presenta una composición isotópica uniforme, tanto en azufre, como de oxígeno, cuyos valores medios son: $\delta^{34}\text{S} = +20 \pm 0,5\text{‰}$ respecto al CDT y $\delta^{18}\text{O} = +9,5 \pm 0,5\text{‰}$ respecto al VSMOW). Los valores de azufre 34 presente en los sulfatos disueltos muestran valores generalmente más ligeros, a no ser que correspondan a sulfatos marinos reciclados en tanto los que derivan de la oxidación o de origen orgánico varían en el rango de 0‰ a -20‰, la Figura 44 relaciona los valores con la fuente que les da origen.

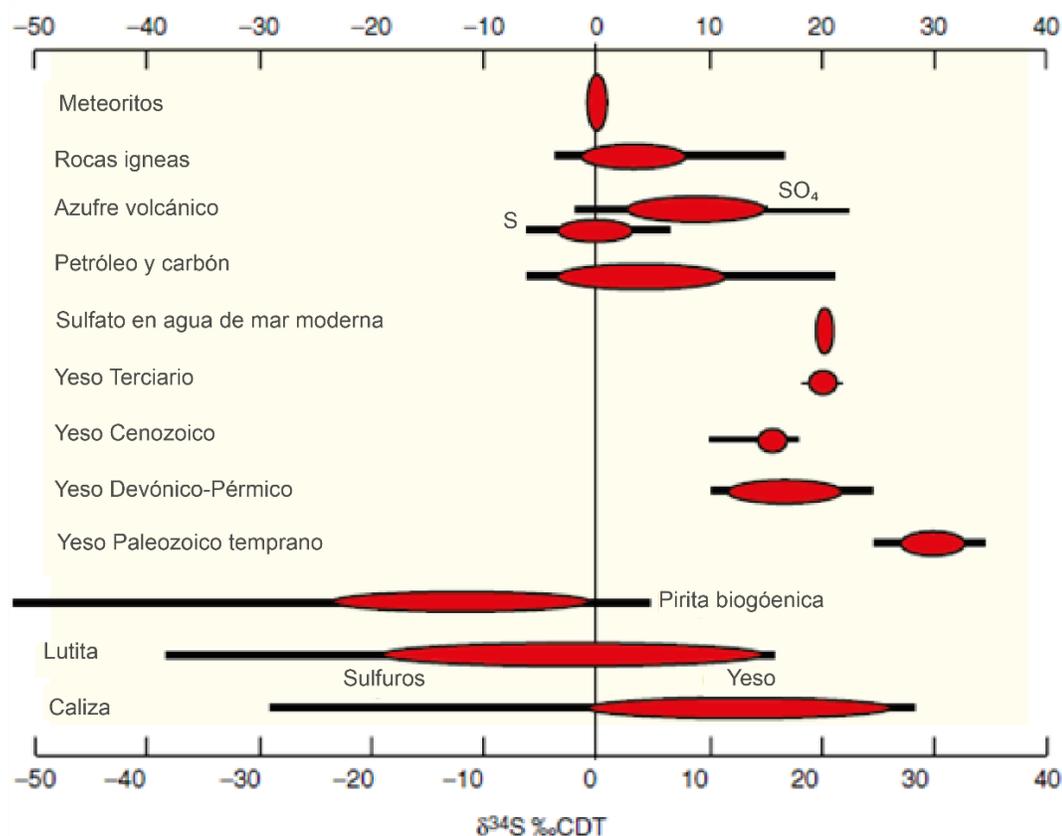


Figura 44: Variaciones de $\delta^{34}\text{S}$ del azufre en compuestos de azufre (extraído de Warren, 2016).

3.1.6.3 Análisis Isotópico

Se cuenta con datos isotópicos de 19 muestras (Anexo A y Anexo B), δD y $\delta^{18}\text{O}$ para todas, y de $\delta^{34}\text{S}$ para siete de ellas, la Figura 45 detalla la ubicación de estas, diferenciándolas de acuerdo a su salinidad.

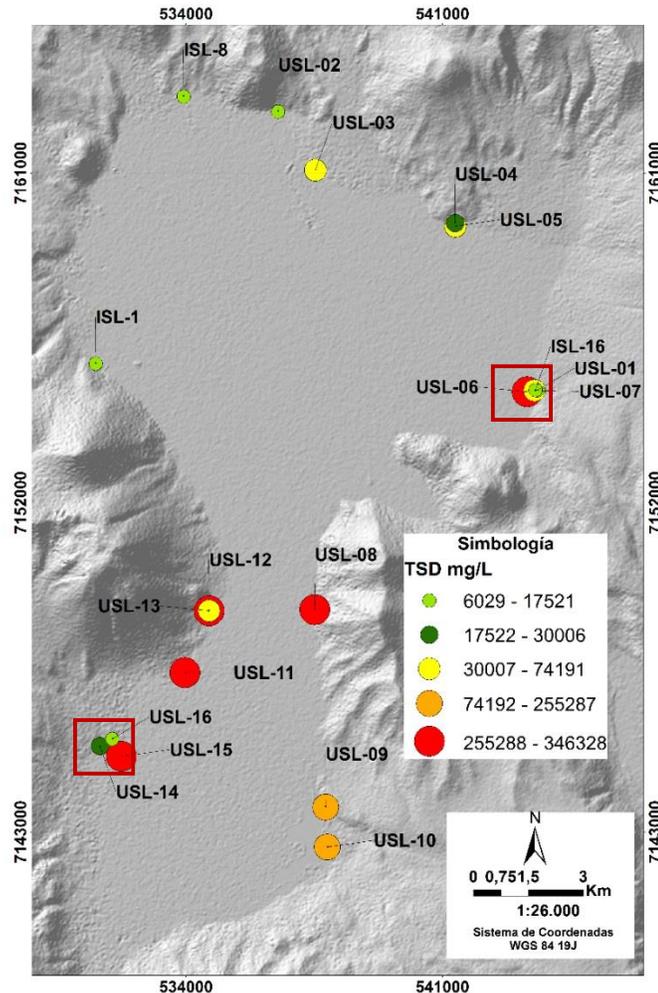


Figura 45: Distribución espacial de muestras con información isotópica. Escalado según su salinidad.

Para la molécula de agua los valores de $\delta^{18}\text{O}$ varían entre $-11,58\text{‰}$, y $7,59\text{‰}$, mientras que los de δD entre $-74,9\text{‰}$, y $14,3\text{‰}$, la Figura 46 muestra su representación gráfica, escalando a partir de la salinidad y diferenciando según tipo de muestra, identificando:

Las vertientes USL-02 y USL-04 ubicadas próximas al abanico del norte y subcuenca n°1, presentando valores muy próximos a la recta meteórica mundial, evidenciando el origen meteórico de las aguas superficiales alrededor del salar, y de que se trata de aguas relativamente jóvenes.

Las aguas experimentan evaporación siguiendo la recta local $\delta\text{D} = 4,8923 * \delta^{18}\text{O} - 26,536$ con $R^2 = 0,9815$, lo que es esperable en este contexto de cuenca cerrada y condiciones de aridez, notando que, desde vertientes hasta lagunas se tiene un enriquecimiento de isótopos pesados y un aumento considerable de la salinidad pasando de 6.029 y alcanzando 255.287 mg/L, que evidencia que vertientes y riachuelos corresponden a aguas relativamente jóvenes con un menor progreso de la evaporación. Excepción de lo anterior es la vertiente ISL-8 y calicata ISL-16 (Amphos 21, 2016, Anexo A), lo que puede estar influenciado por la fecha de muestreo, todas en marzo, tras el verano, que puede llevar a una mayor evaporación y las lluvias del Invierno Boliviano enriquecidas en isótopos pesados.

En tanto las lagunas USL-06 y USL-015 igualmente salinas se encuentran más próximas al origen con un mayor enriquecimiento de deuterio, al analizar las secuencias de acuerdo con el sentido de flujo vertiente-canal-laguna, por ejemplo, USL-01, USL-07 y USL-06 (recuadro Figura 45), su proyección es paralela a LMM desplazada a la derecha ($\delta D = 8,4837 \cdot \delta^{18}O + 2,3699$ y $R^2 = 0,9757$), tendencia similar se tiene para el caso de USL-14 y USL-15 (recuadro Figura 45), cuya proyección es $\delta D = 7,8112 \delta^{18}O - 0,8821$. Se descarta que correspondan a rectas meteóricas bajo condiciones más húmedas, puesto que se trata de muestras altamente salinas, pudiendo representar una mezcla con salmueras residuales o disolución de evaporitas con minerales hidratados como el yeso.

Las muestras más salinas, ubicadas en el centro del salar caen a la izquierda de la recta meteórica, donde se han descrito interacciones agua-roca a bajas temperaturas ($<100^\circ\text{C}$), teniendo lugar reacciones secundarias de intercambio de isótopos, como la hidratación de los silicatos primarios, y la formación de minerales arcillosos, que lleva a la reducción de ^{18}O en los fluidos debido a una gran dependencia de la temperatura de muchos factores de fraccionamiento, con variaciones menores de deuterio debido al bajo contenido de hidrogeno en las rocas. El intercambio isotópico con H_2S , H_2 e hidrocarburos a bajas temperaturas pueden aumentar valores de δD debido al fraccionamiento entre el agua y estos compuestos.

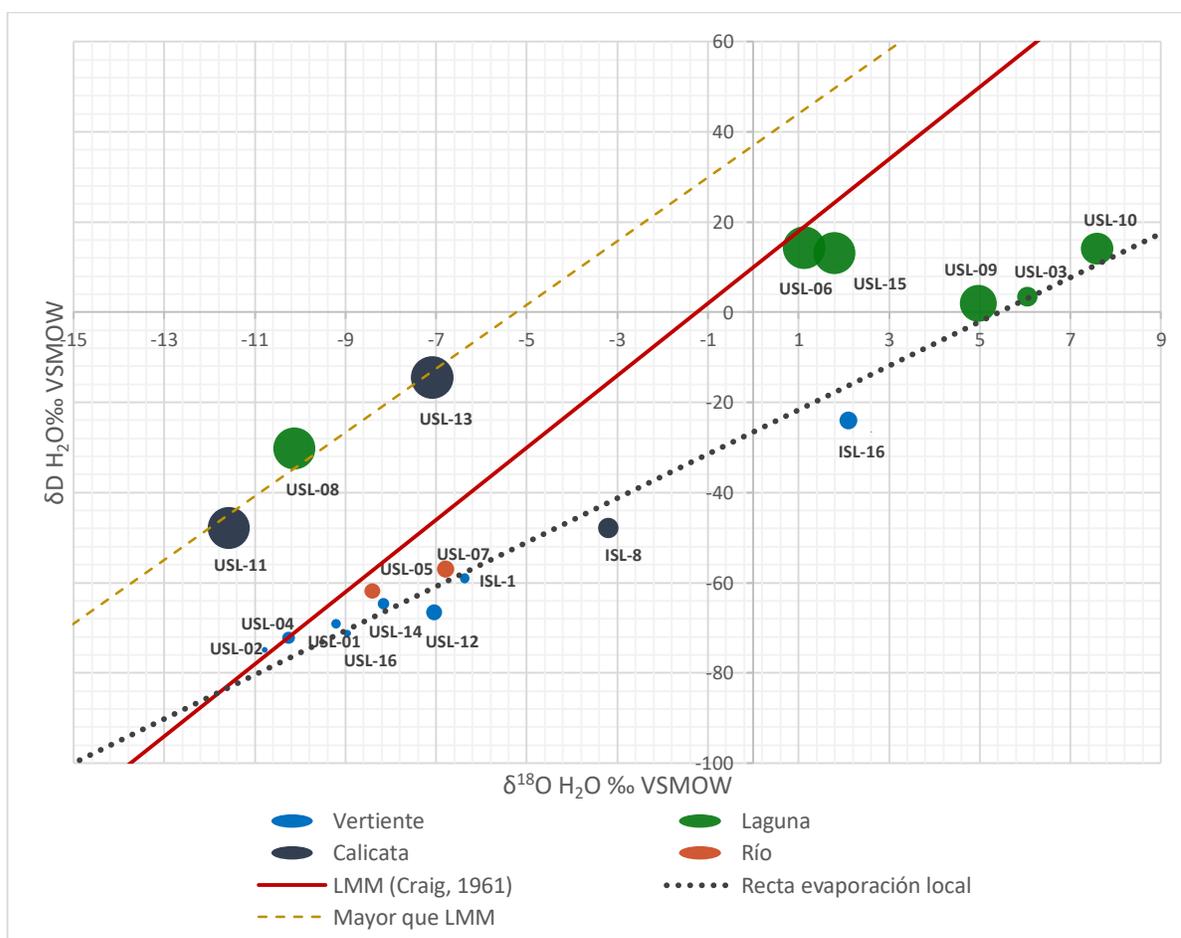


Figura 46: Composición isotópica de las aguas superficiales del Salar de La Isla, diferenciadas de acuerdo al tipo de muestra y salinidad.

De la Figura 47 que relaciona la isotopía con el ion conservativo Cl (mg/L), se observa que para contenidos <5.000 mg/L de Cl y valores isotópicos negativos se tienen las aguas más jóvenes de origen meteórico, que evolucionan hasta salmueras siguiendo la curva de evaporación (flecha roja) alcanzando contenidos cerca de 150.000 mg/L de Cl. Para contenidos superiores de Cl se identifica; una tendencia de enriquecimiento de los isótopos pesados lo que podría representar alguna mezcla con salmueras residuales o disolución de evaporitas (flecha azul), y una tendencia deprimida de $\delta^{18}\text{O}$ y δD , asociada a interacción agua-roca (flecha verde).

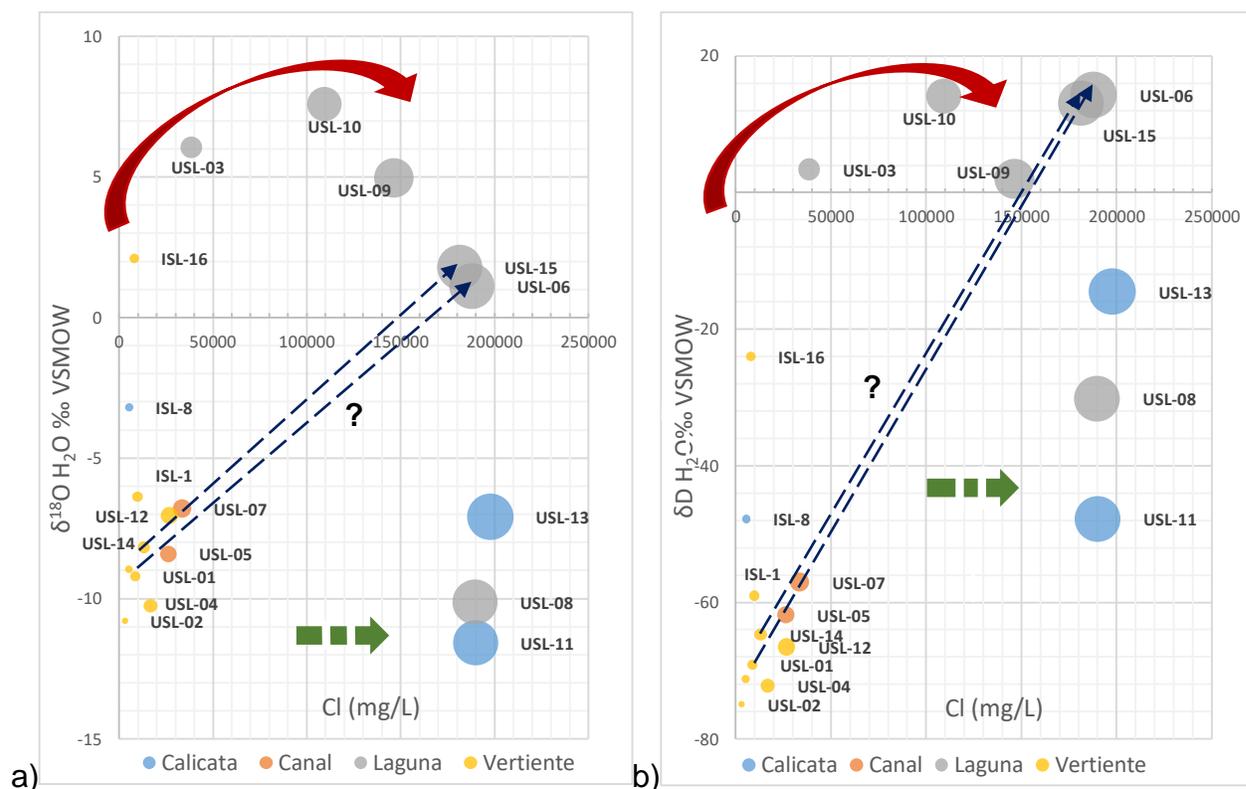


Figura 47: Variación isotópica de en función del contenido de Cl (mg/L); a) $\delta^{18}\text{O}$ y b) δD . Flecha roja indica evaporación, azul mezcla ?, y verde disolución o interacción roca?. Tamaño según salinidad.

Para evaluar el efecto de la altitud, se estudia la relación de los valores isotópicos obtenidos para vertientes con respecto a altura (Figura 48a), no teniendo una correspondencia clara dado lo acotado de la altura entorno al salar, no obstante, al analizar la variación particular en la zona suroeste del salar (USL-16, USL-14 y USL-12) se observa un empobrecimiento de las aguas con la altura, siendo las aguas de mayor altura más ligeras y menos salinas, y teniendo una mejor correlación con $\delta^{18}\text{O}$. Si se estima la probable altura de recarga de las vertientes a partir del relieve próximo a ellas (Figura 48b) no se obtiene una correlación clara entre las variables estudiadas.

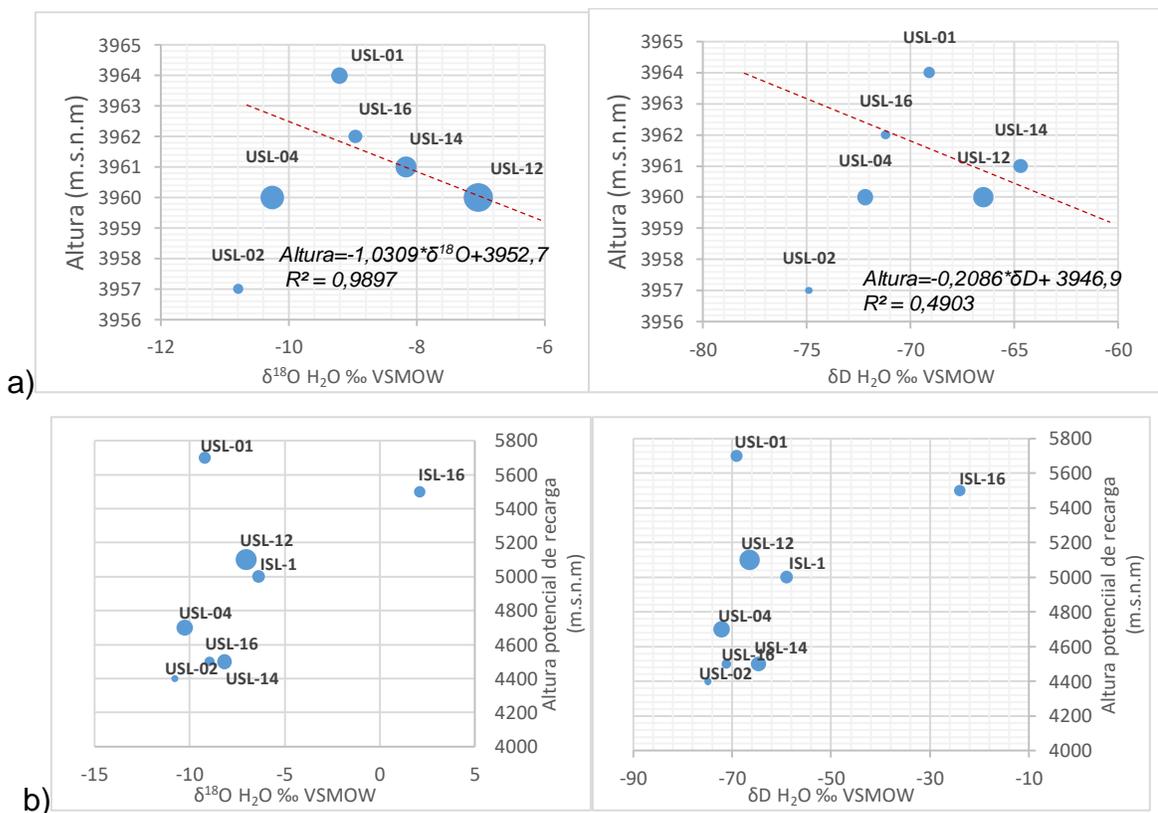


Figura 48: a) Variación isotópica con respecto a la altura de la muestra. b) Variación isotópica con respecto a la altura potencial de recarga. Tamaño según salinidad.

En cuanto a los resultados isotópicos de $\delta^{34}\text{S}$, en promedio se obtiene 4,25‰, indicando que la fuente de los sulfatos estaría relacionado a rocas ígneas, azufre volcánico y evaporitas terrestres principalmente (Figura 44). La Figura 49 muestra la relación entre el contenido isotópico de $\delta^{34}\text{S}$ y sulfato disuelto, considerando la evolución de la salinidad entre muestras cercanas se observa una leve disminución de la composición isotópica con el aumento salinidad, encontrándose en todos los casos en la composición isotópica del yeso continental (Risacher, et al., 2011).

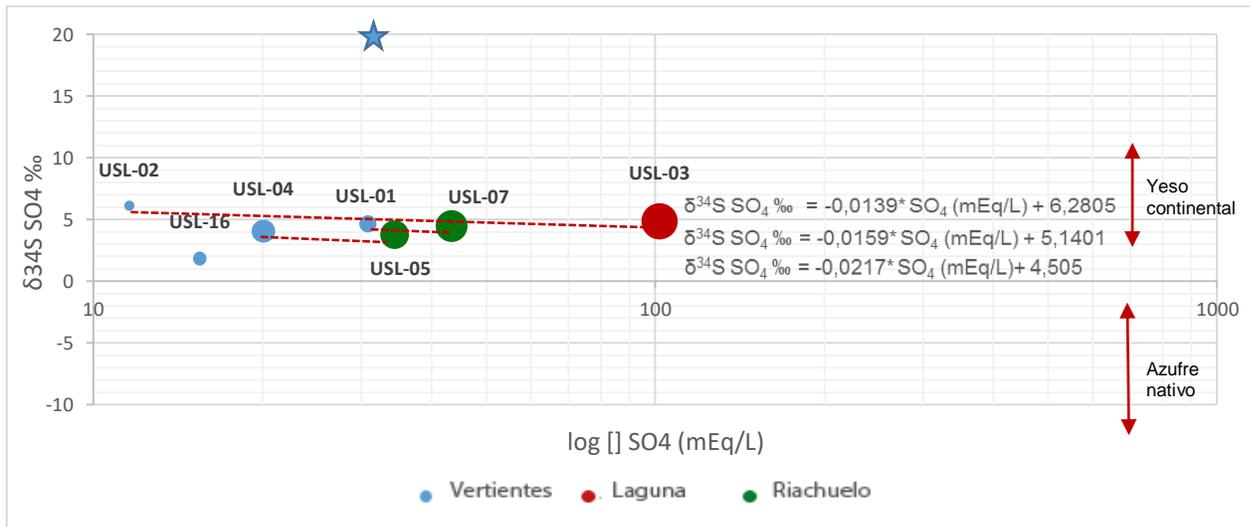


Figura 49: Relación entre contenido de SO_4 y $\delta^{34}\text{S}$, donde líneas indican muestras próximas. Tamaño según salinidad.

3.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

La cuenca del Salar de La Isla corresponde a cuenca endorreica altiplánica que cuenta con 759,78 km², cuyo relieve define una cuenca sedimentaria en estado de vejez, con bajo potencial erosivo de la red de drenaje, que se caracteriza por ser paralela y dendrítica, y que define 15 subcuencas, siendo la del salar en la que confluyen con una cota media 3.960-3.970 (m.s.n.m.).

Se caracteriza por una geología volcánica compuesta de andesitas, andesitas basálticas, daciandesitas y tobas dacíticas (ignimbritas), depósitos abanicos aluviales y evaporíticos se desarrollan como relleno sedimentario al centro de la cuenca, probablemente mediante dos grandes depocentros que se unen donde el salar se estrecha. El salar se compone de una costra salina, en la que se reconoce un núcleo de halita que sobresale por sobre; facies marginales sulfatada al norte, y una dominada por halita hacia el centro sur, sumando también facies terrígenas y subacuosas en el perímetro del salar. En la cuenca se desarrollan dos sistemas estructurales, el primero afectando principalmente al sur, asociado al domo resurgente Caldera Aguilar, que expone grandes depósitos ignimbríticos, el segundo con fallas en dirección NW-SE ubicadas entre el Salar de La Isla y Las Parinas afecta. Montículos de yeso se encuentran en el borde noreste del salar (límite norte de la cuenca La Parinas) que tienen similitud con facies lacustres encontradas en la cuenca adyacente que corresponderían a depósitos evaporíticos antiguos (Naranjo y Cornejo, 1992, Naranjo, et al., 2013).

En términos hidrogeológicos el mayor potencial lo presentan los depósitos aluviales y coluviales ampliamente distribuidos alrededor del salar, junto con los depósitos de avalancha derivados desde las laderas de los volcanes Agua Amarga y Manchado, dado su carácter granular, sumando también las ignimbritas fisuradas con una alta permeabilidad secundaria. Niveles menos permeables lo constituyen los edificios volcánicos con una menor capacidad de almacenaje e infiltración. La estratigrafía de los sondajes realizados al norte muestra niveles clásticos bajo la superficie del salar por lo que el acuífero saturado principal estaría constituido por los depósitos salinos engranados lateralmente a depósitos no consolidados de abanicos, aluviales y avalancha volcánica, y probablemente ignimbríticos en la parte sur del salar, desconociendo su límite lateral y profundidad. Sobre las cumbres de los edificios volcánicos podría encontrarse acuíferos libres o semiconfinados constituidos por depósitos no consolidados, que recibirían una recarga directa, pudiendo tener alguna conexión con el acuífero principal. La estratigrafía y sedimentología de los depósitos aportantes, superposición de abanicos aluviales, junto con la geofísica (reporte proyecto de Exploración Salares 7) permiten inferir períodos de humedad, teniendo una secuencia alternante de evaporitas y depósitos sedimentarios sugiriendo que el Salar de La Isla es de tipo inmaduro (Figura 2).

De modo generalizado se tiene que la piezometría guarda relación con la topografía, por lo que descendiendo hacia el salar ésta va disminuyendo, alcanzando niveles someros del orden de los centímetros a metros con respecto a su superficie, evidencia de ello se encuentra en la diferencia piezométrica de casi 250 metros entre el pozo CPX-2 (cota 4.449 m.s.n.m.) y los lisímetros ISL-1 y ISL-2 (cota 4.000 m.s.n.m.) ubicados en el abanico aluvial del noreste (Figura 50). De lo anterior se desprende que

el flujo se dirige hacia el centro de la cuenca; el salar, no descartando variaciones locales en sectores menos permeables como al centro de la cuenca.

Las aguas superficiales corresponden a aguas saladas y salmueras, con salinidades que van desde 6.029 (mg/L) a los 353.965 (mg/L), cuya química se caracteriza por ser de tipo clorurada-sulfatada sódica, manteniendo la proporción de sus iones mayoritarios tanto lagunas como vertientes, estando las primeras más concentradas. Se tiene una relativa homogeneidad de las aguas en cuanto a sus componentes mayoritarios y proporciones, no obstante, se reconocen diferencias entre las aguas del norte con respecto a las del centro y sur:

- Risacher et al. (1999) registra una temperatura atmosférica de 2,9°C entorno a la muestra de vertiente ISL-18 ubicada en el extremo norte del salar, la que presenta 26,4°C, evidenciando el termalismo de este sector, que también ha sido registrado en las muestras de vertientes LIS-RT-001 (26,4°C) y USL-02 (25,3°C), caracterizadas también por ser las aguas con menor TSD (<10.000 mg/L).
- Vertientes y en especial lagunas del norte son menos; salinas, neutras (tendencias más alcalinas), y densas que las del centro y sur.
- En los faldeos del Volcán Aguas Blancas y Parinas, las aguas tienen diferencias locales (relación entre Ca y Mg), que tendría la influencia de la falla que corta las unidades volcánicas y al desarrollo de dolinas en el abanico aluvial próximo a la zona.
- Altos contenidos de elementos conservativos litio, potasio y cloruros, se registran en todo el salar, siendo mayor desde el centro al sur.

La relación de equimolaridad entre Na y Cl de todas las aguas, indica disolución de halita, proveniente probablemente desde la disolución de evaporitas o salmueras residuales. Para el caso del K éste procedería de la meteorización de feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, silvita o carnalita, estando sujeto a la adsorción desde arcillas. El Mg tendría un origen asociado a la disolución de rocas carbonatadas, evaporitas y alteración de silicatos ferromagnesianos, siendo afectado por el intercambio iónico. El Ca suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales por su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, estando controlado por la ley de los iones HCO_3 y CO_3 pudiendo precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial de CO_2 , de igual manera afectado por el intercambio iónico (Custodio y Llamas, 1996). La isotopía de azufre 34 apunta a un origen desde evaporitas antiguas y/o azufre volcánico para los sulfatos disueltos. Elementos menores como As, Br, CO_2 , Cr, Cu, F, Fe, Mo, Mn, Rb y Sr presentan concentraciones en torno a 1 mg/L.

La hidrogeoquímica del Salar de La Isla refleja parcialmente la geología de la cuenca en la que las aguas superficiales siguen las vías evolutivas sulfatadas, siendo las aguas de aporte del extremo norte y lagunas del sureste alcalina o directa, en tanto el resto la vía sulfatada neutra, evidenciando la interacción agua-roca, con la geología predominantemente volcánica con altos contenidos de azufre, aunque no logra explicar la alta salinidad que alcanzan los aportes, lo que podría indicar una mezcla con salmueras residuales y/o disolución de antiguas evaporitas. El reporte geofísico del proyecto de Exploración Salares 7 plantea que los límites de la salmuera se extienden más allá del perímetro del salar, no descartando así la existencia de una cuña salina en la zona norte del salar donde se tienen aguas superficiales menos salinas.

La isotopía de las aguas superficiales (^{18}O y deuterio) muestra aguas de aporte relativamente jóvenes, que experimentan evaporación, teniendo un enriquecimiento de isótopos pesados, desde vertientes a lagunas altamente salinas, en la mayor parte del salar. Vertientes menos salinas y de origen meteórico, se ubican en la zona norte y noreste del salar. Procesos de intercambio con H_2S y CH_4 , y/o hidratación de silicatos, explicarían los valores por sobre la recta meteórica mundial de las lagunas de la zona central del salar. Probable mezcla con salmueras acontecería en áreas afectadas por fallas, suroeste del salar y noreste (próximo salar Las Parinas).

La recarga de la cuenca se produce desde los deshielos tras la precipitación nival durante el invierno en la parte alta de la cuenca (edificios volcánicos), y las lluvias durante el invierno altiplánico (~150 mm/año), que escurren por las laderas hasta alcanzar niveles más permeables y finalmente alcanzar el acuífero saturado (no totalmente definido), estos niveles pueden estar condicionado por la conectividad; unidades granulares y/o fisuradas que permitan el flujo. Durante este recorrido el agua entra al sistema subterráneo y se va enriqueciendo en iones provenientes de rocas volcánicas, depósitos evaporíticos antiguos, y/o salmueras. El agua almacenada desciende hacia los depósitos salinos, donde aflora formando vertientes con desarrollo de vegetación, que generalmente derivan en lagunas, éstas están restringidas a pendientes bajo los 15° , condiciones que no se cumplen en la zona centro de la cuenca. Una vez alcanzado el salar acontece el principal mecanismo de descarga; la evaporación, que origina aguas altamente salinas y salmueras.

La Figura 50 representa en dos dimensiones las condiciones estáticas y dinámicas del sistema hidrogeológico de la cuenca, que de forma generalizada recibe las precipitaciones desde las altas cumbres, que se infiltran y escurren hacia al salar, donde se evapora, y los elementos que va adquiriendo en su recorrido, se concentran y formando salmueras. El perfil se obtiene desde una transversal que corta el salar en su parte sur, por lo que la zona de recarga en este caso está constituida principalmente por ignimbritas afectadas por estructuras del Domo Resurgente, en tanto al norte, depósitos volcánicos serían parte de ésta.

Amphos 21 (2016) propone un flujo lateral desde la cuenca norte Quebrada La Rossa principalmente volcánica que no presenta un cuerpo evaporante, de manera que al presentar una topografía menor en su límite sur y no tener manifestaciones superficiales de agua, se tendría un flujo subterráneo hacia el norte de la cuenca del Salar de La Isla probablemente a través de un acuífero confinado cubierto por las unidades volcánicas más jóvenes o bien que las unidades volcánicas (MPv) se encuentren afectadas por estructuras en profundidad que permitan tan flujo (Figura 51). Amphos 21 (2016) ha estimado este flujo en 100 (L/s) promedio, lo que podría explicar la menor salinidad de las aguas del norte.

Resumiendo, el balance hídrico de la cuenca en estudio (Figura 51) está dado por: una recarga total (205,7 - 214,3 L/s), escorrentía superficial (198,7 - 216,4 L/s), entrada lateral desde la cuenca Quebrada La Rossa (100 L/s), como entradas, y teniendo como salidas la evaporación, directa y desde cuerpos de superficie libre (538,81 L/s), y evapotranspiración (12,4 L/s). Lo que arroja un balance de -10,2 a -46,7 (L/s). Los caudales medidos in situ desde vertientes van desde los 0,56 (L/s) a 4,4 (L/s) que proyectado a todo el salar suman 127,12 L/s, representando la cuarta parte de las entradas.

Las características de la cuenca del Salar de La Isla que definen el modelo hidrogeológico conceptual han sido organizadas en la Figura 52.

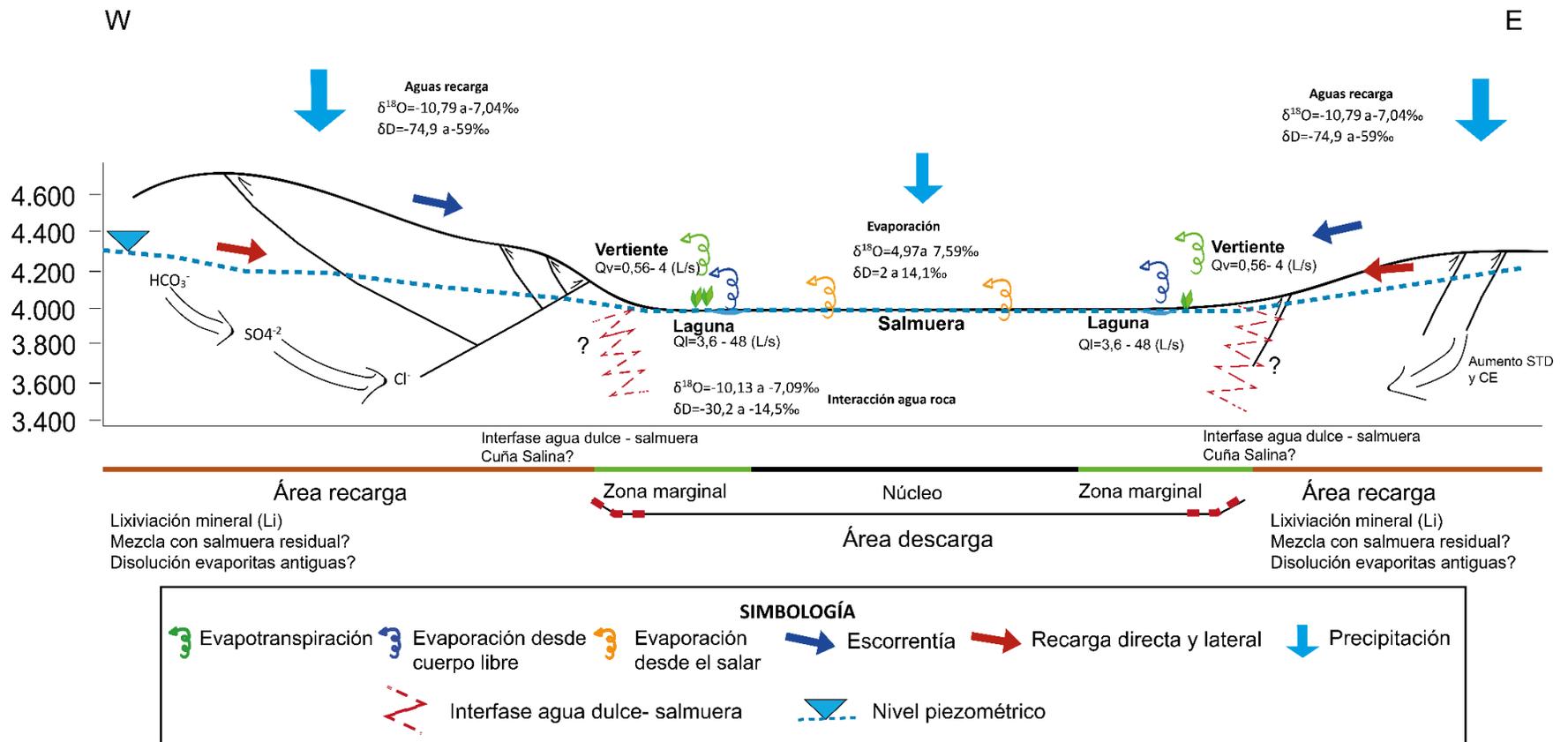


Figura 50: Esquema modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del Salar de La Isla. Se indica las variaciones de los valores isotópicos y caudales estimados in situ. Elaboración propia.

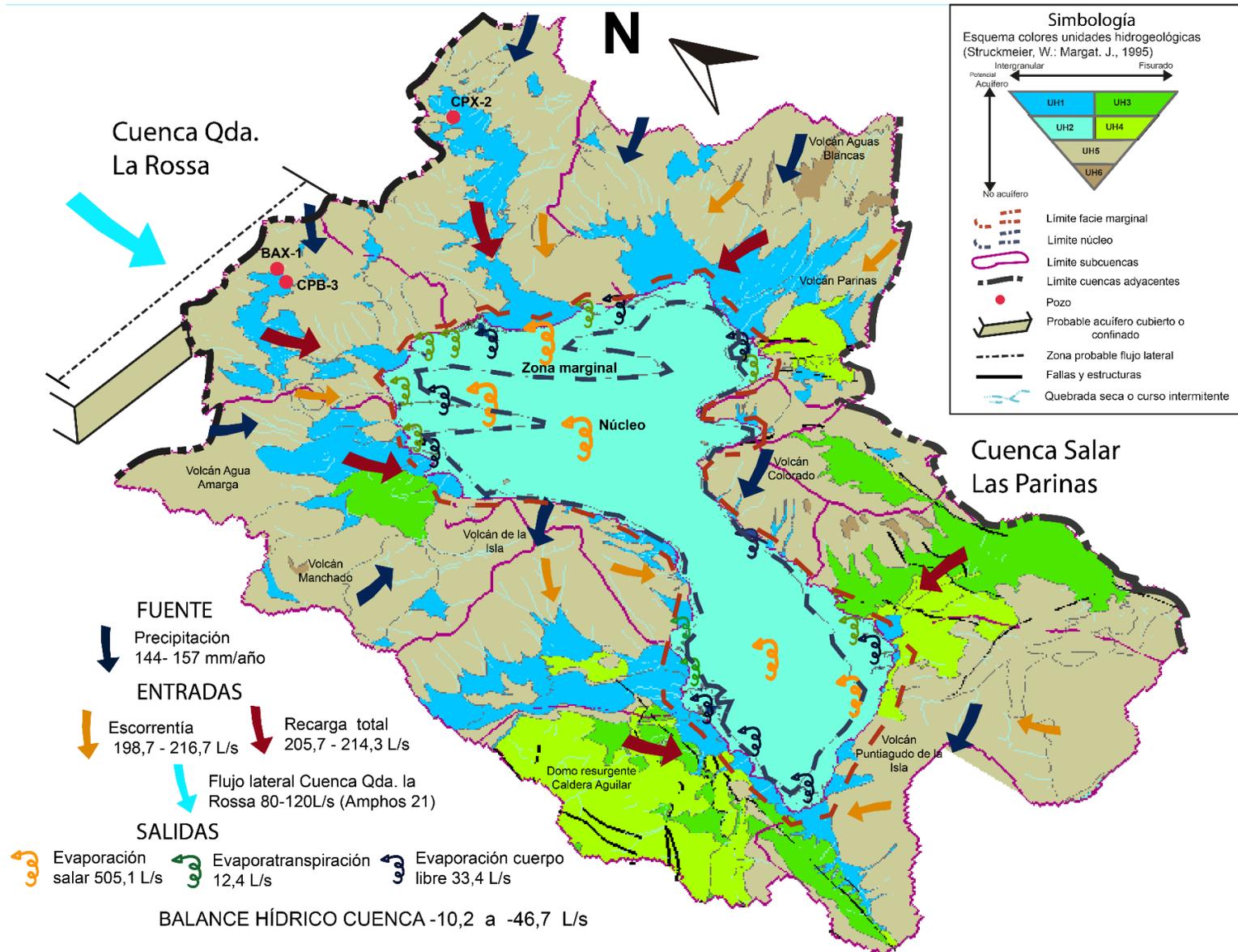


Figura 51: Modelo conceptual de la cuenca del Salar de La Isla, reconociendo entradas y salidas, junto con zonas de recarga. Elaboración propia. Mayor detalle Anexo S.

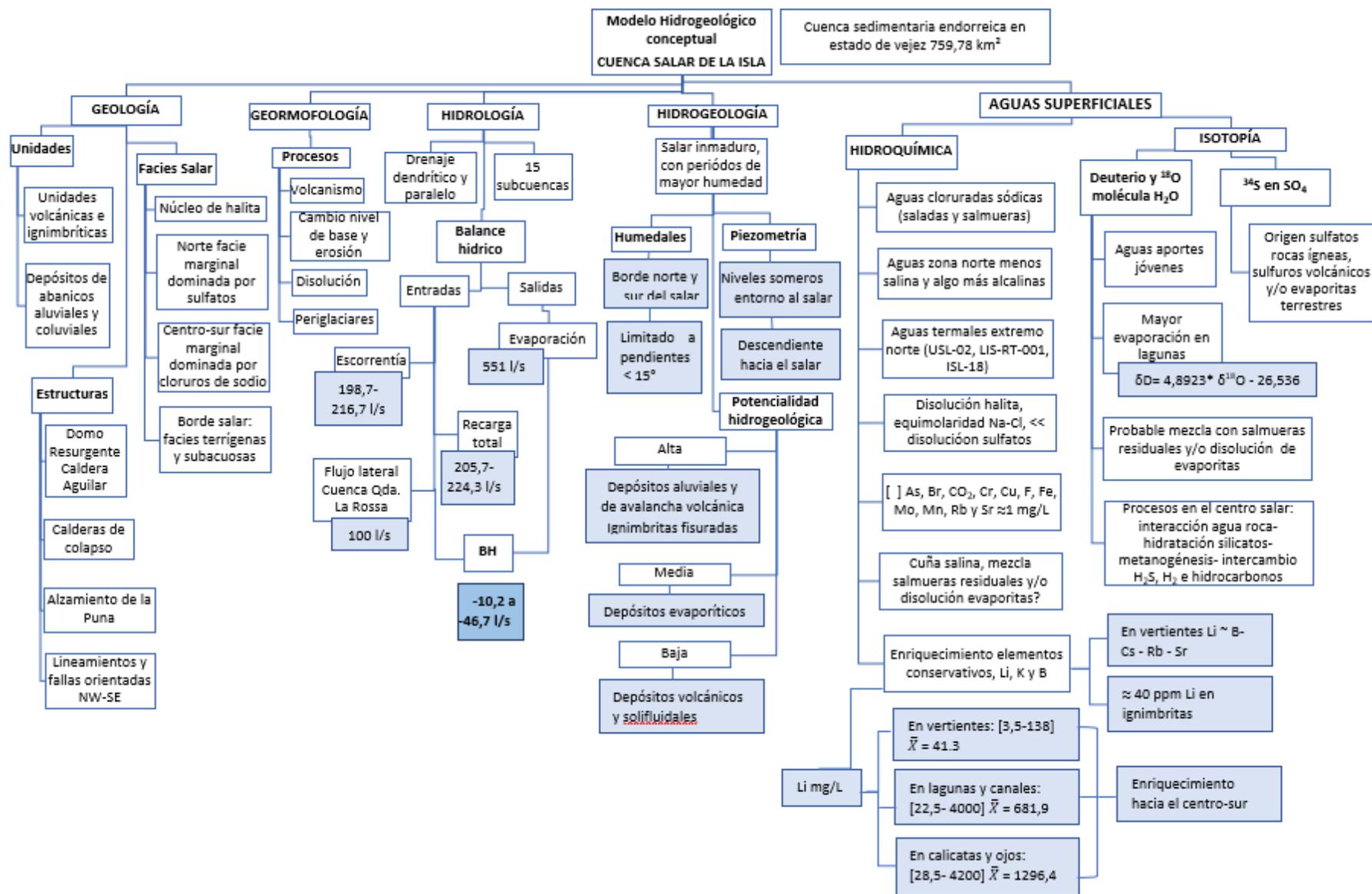


Figura 52: Organigramma modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca Salar de La Isla. Elaboración propia.

3.3 ESTIMACIÓN POTENCIAL DE LITIO

Para la prospección y exploración de salmueras es fundamental el conocimiento de los límites de las salmueras y su acuífero hospedante, y de acuerdo al grado de conocimiento se clasifican en recursos medidos, indicados e inferidos, para el caso de estimación de reservas de los elementos de interés económico (subconjunto de los recursos minerales extraíbles), se debe añadir los aspectos económicos y de procesos técnicos ante un escenario productivo, y sobre todo incorporar un análisis de la variación de las condiciones hidrogeoquímicas e hidrogeológicas, entendiendo que los recursos dentro de las salmueras son altamente dinámicos, puesto que están sujetos a procesos de mezclas con salmuera estéril o agua dulce y de convección por los contrastes de densidad entre las salmuera y las aguas de aporte.

3.3.1 Metodología

Los elementos necesarios para la determinación de recursos de salmuera en un salar son; definición de la geometría del acuífero, determinación de la porosidad drenable o rendimiento específico (S_y) de las unidades hidrogeológicas del salar, y la determinación de la concentración de los elementos de interés, en este caso la del litio. Houston, et al. (2011) propone que los recursos se pueden definir como el producto de estos parámetros, estableciendo como unidad de tonelaje para una celda:

$$G_{xyz} = S_{y_{xyz}} * C_{xyz} * b_{xyz} \text{ Ec. 22}$$

Donde,

G_{xyz} unidad de volumen en toneladas en xyz

$S_{y_{xyz}}$ specific yield en xyz

C_{xyz} concentración elemento de interés en xyz

b_{xyz} espesor

Siendo finalmente el volumen del recurso, la sumatoria de estas variables en el espacio y profundidad.

De esta manera la determinación del recurso requiere de un conocimiento detallado de las características de la salmuera en las tres dimensiones, en este caso este conocimiento es bastante vago, y solo se aproximan a partir de consideraciones y simplificaciones, de modo que es posible cuantificar solo un recurso en categoría de inferido, que para el caso de las salmueras considera conductividades hidráulicas secundarias, y un bajo conocimiento de la conectividad y/o concentración.

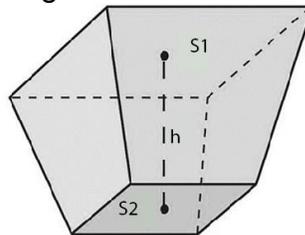
3.3.2 Geometría y volumen

Los reportes geofísicos del proyecto de Exploración Salares 7 indican: zonas de alta salinidad, sedimentos recientes formarían parte del salar, que la salmuera se extendería más allá de la línea de costa actual y que la profundidad del salar podría exceder los 200 metros de profundidad. Para el cálculo del volumen de salmuera varias han sido las consideraciones que intentan aproximar sus dimensiones, teniendo en cuenta estos antecedentes generales, es así que para delimitar el relleno sedimentario, se prolongan y proyectan las pendientes del relieve entorno al salar suponiendo que éste no ha experimentado grandes modificaciones posterior a su formación, considerando también que en el sector norte se tendría mayor aporte sedimentario gracias a la mayor

extensión de los abanicos aluviales, es así que se proponen y distinguen tres sectores con diferencias en la estratigrafía en profundidad;

- Sector norte el salar, donde a partir de sondeos de exploración y geofísica del proyecto Exploración Salares 7 se habla de unos 170 metros de profundidad de la salmuera (Talison Lithium Ltda., 2011), esta zona tendría un mayor aporte de las facies clásticas.
- Sector centro del salar, parte más estrecha, y se infiere que posee una menor profundidad de la salmuera y menor aporte clástico, dado que está limitado por dos grandes edificios volcánicos de gran pendiente.
- Sector sur, se asume una distribución muy similar al sector norte, con un menor aporte clástico, y una mayor proporción de unidades volcanoclásticas dado que en esta zona de la cuenca se tiene una mayor extensión de los afloramientos ignimbríticos.

Teniendo presente lo anterior, se calcula el volumen de salmuera hospedada asumiendo una geometría similar a un tronco pirámide, cuyo volumen se calcula:



$$V_{\text{tronco piramide}} = \frac{h}{3} (S1 + S2 + \sqrt{S1 + S2}) \text{ Ec. 23}$$

Donde,

S1, correspondería a la superficie de cada una de las zonas del salar, al cual se ha asignado un error de 1 km².

h, la profundidad máxima de la salmuera, para la cual se evalúan dos escenarios teniendo como base los 170 metros propuestos por la geofísica del proyecto de Exploración Salares 7 y un segundo escenario de 150 de profundidad máxima, considerando que varía de norte a sur, tal como lo muestra la Figura 53, considerando un error de 20 metros en ambos casos.

S2, al área basal del depocentro, asumiendo que corresponde a un décimo del área superficial, teniendo la misma razón para su error.

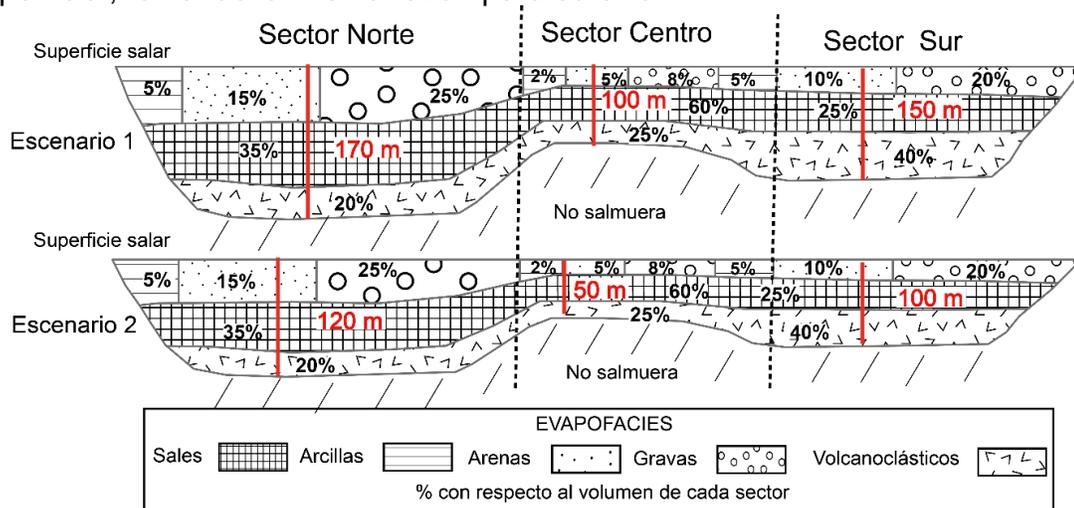


Figura 53: Esquema de los escenarios de profundidad de la salmuera, y distribución de las facies dentro del salar. La disposición espacial evaporofacies solo es referencial.

Teniendo presente lo anterior y utilizando la propagación de errores, se obtiene:

Tabla 19: Cálculo volumen para cada zona del salar, bajo dos escenarios de profundidad de la salmuera.

Sector	Área superficial (km ²)	Área basal (km ²)	Profundidad máxima salmuera (m)		Volumen salmuera (km ³)		Error (km ³)
	S1	S1					
Norte	39,219	3,922	h1	170	V1	3,147	0,292
			h2	120	V2	2,222	0,276
Centro	67,873	6,787	h1	100	V1	3,204	0,285
			h2	50	V2	1,602	0,277
Sur	51,041	5,104	h1	150	V1	3,614	0,290
			h2	100	V2	2,410	0,276
Volumen total escenario 1						9,966	0,868
Volumen total escenario 2						6,233	0,829

Siguiendo y proyectando las curvas de nivel bajo la superficie del salar se genera un TIN (triangle irregular network) que modela el relieve en profundidad, a partir del cual se calcula un volumen de la salmuera contenida, que arroja una diferencia de alrededor de 1km³ al estimado según Ec. 24, similares a los errores calculados para ambos escenarios. Cabe destacar que solo se ha considerado como límite lateral de la salmuera enriquecida en litio, la proyección en profundidad del borde del salar, aunque bien la geofísica del proyecto de Exploración Salares 7 lo propone más allá del borde, de modo que existiría un mayor potencial.

La salmuera se hospeda en diferentes unidades litológicas; depósitos evaporíticos, clásticos y volcanoclásticos, por lo que es necesario determinar el volumen de cada una, de manera de representar la estratigrafía del salar en profundidad, así teniendo en cuenta sus características dentro de cada sector y diferencias estratigráficas descritas se asigna un porcentaje de estas unidades con respecto al volumen total estimado en cada zona (Figura 53), obteniendo:

Tabla 20: Volúmenes estimados para las distintas unidades sedimentarias bajo los escenarios de profundidad de la salmuera.

Sector	Escenario	Costra	Arcillas	Volumen (km ³)		
				Arenas	Gravas	Volcanoclásticas
Norte	E1	1,102	0,157	0,472	0,787	0,629
	E2	0,778	0,111	0,333	0,555	0,444
Centro	E1	1,922	0,064	0,160	0,256	0,801
	E2	0,961	0,032	0,080	0,128	0,401
Sur	E1	0,904	0,181	0,361	0,723	1,446
	E2	0,602	0,120	0,241	0,482	0,964

3.3.3 Parámetro Specific Yield (Sy)

Este parámetro hace referencia a la relación entre el volumen de agua que puede ser drenado por gravedad de un medio poroso inicialmente saturado y su volumen total, de manera que muestra la capacidad de vaciado de un medio poroso saturado, y en este contexto indicaría el porcentaje de salmuera extraíble desde el salar. Para la estimación de esta variable se ha recurrido a la literatura, y en especial a trabajos que han desarrollado una caracterización cuantitativa de otros salares con miras a determinar recursos indicados y medidos, la Tabla 21 muestra algunos valores obtenidos para distintas unidades sedimentarias.

Tabla 21: Valores de Specific Yield (Sy) determinados en otros trabajos.

Proyecto	Fecha	Salar	Promedio	Specific Yield Sy %				
				Halita	Arcillas	Arenas	Gravas	Volcano clásticos
Exploration Potential and Mineral Resource Estimate for Potash Dragon Inc,'sLlamara Project, Salar de Llamara, Northern Chile.	ene-13	Llamara	12,5					
Technical Report Resource Estimate for Lithium y Potassiu Sal de los Angeles Project.	feb-17	Diablillos	12		1,6	13,2		
Technical Report On The Maricunga Lithium Project Region III, Chile.	abr-12	Maricunga	9	7	2	5	10	13
Technical Report on Salinas Grandes Lithium Project.	abr-12	Salinas Grande	4,1		2	16		
Error (%)				2	1	3	3	3

Se observan algunas variaciones en el valor promedio, sin embargo, existe una tendencia en las facies clásticas, donde las arcillas presentan los valores más bajos, en consideración de lo anterior se asigna un error para cada unidad. Se ha optado por los valores reportados para el Salar de Maricunga debido a que se dispone de esta variable para las diferentes unidades logrando representar de mejor manera la estratigrafía.

3.3.4 Concentración de la salmuera

Las muestras de agua superficiales arrojan valores de Li que van desde los 4 a 4.200 mg/L, siendo las aguas de aporte las que presentan valores más bajos e inferiores a 200 mg/L, y las lagunas junto con las calicatas las que poseen las concentraciones máximas que superan los 1.000 mg/L. La Figura 54 muestra la distribución de las concentraciones de Li en aguas superficiales, de la cual se desprende que en las zonas centro y sur se tienen las mayores concentraciones que en general superan los 780 mg/L, en tanto en el sector norte en general éstas son inferiores a dicho valor.

El proyecto de Exploración Salares 7, en 2011 en su fase exploratoria desarrolla 26 sondajes que van desde los 6 metros y que alcanzan como máximo los 42 metros de profundidad, teniendo 16 metros en promedio, de los cuales se obtiene mediciones de concentraciones de Li y B, junto a elementos mayores, e incorporando además la densidad de la salmuera (Anexo O). La Figura 55 muestra las concentraciones de Li (eje z en m.b.n.t) que van desde los 220 a 1.080 mg/L, manteniendo una distribución similar de las aguas superficiales; concentraciones menores en el norte, y superiores hacia el sur, y sin mayores contrastes en la vertical

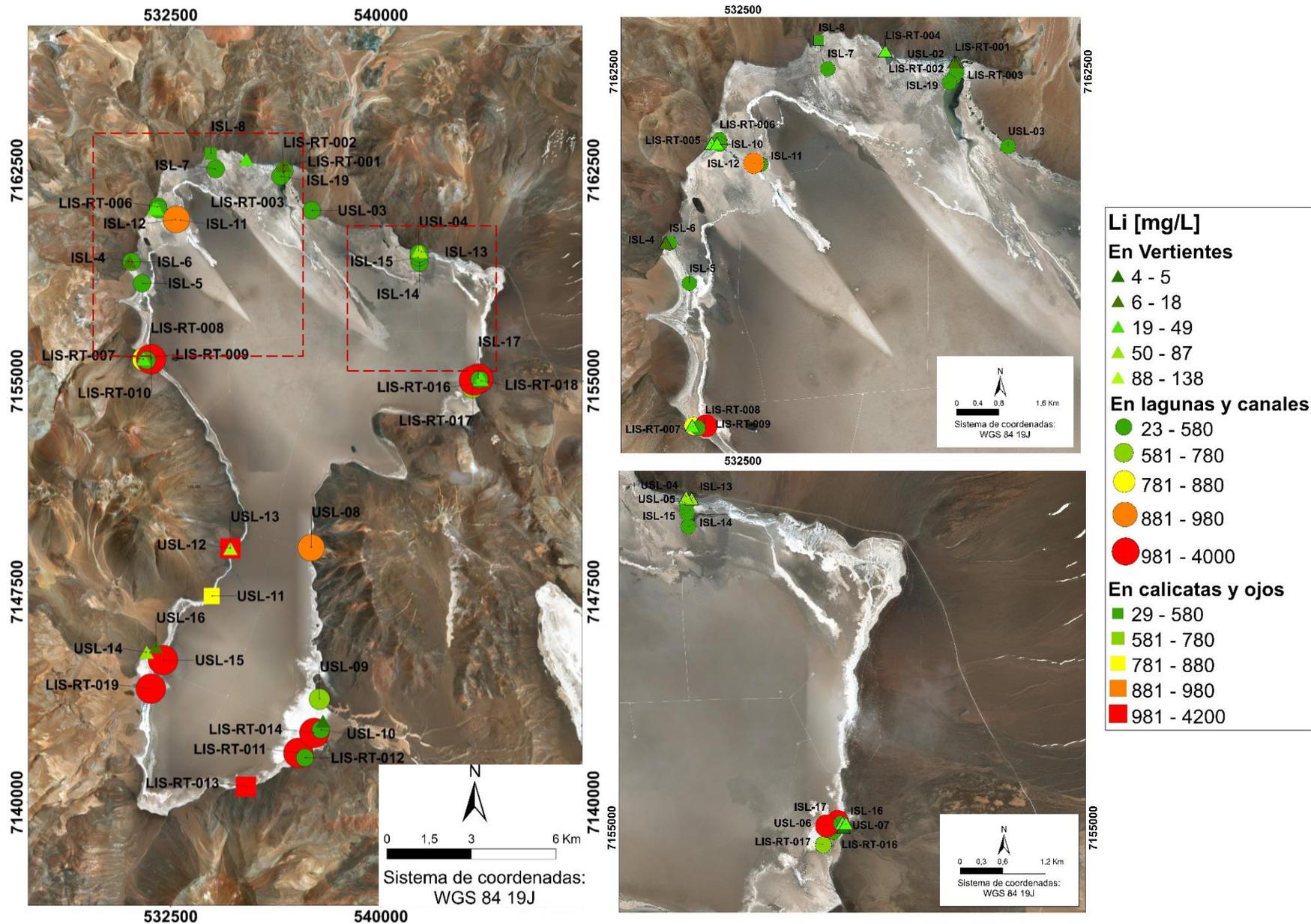


Figura 54: Concentración en superficie de Li a partir de Risacher, et al. (1999), Troncoso, et al. (2013), Troncoso y Ercilla (2016), y muestras de este estudio.

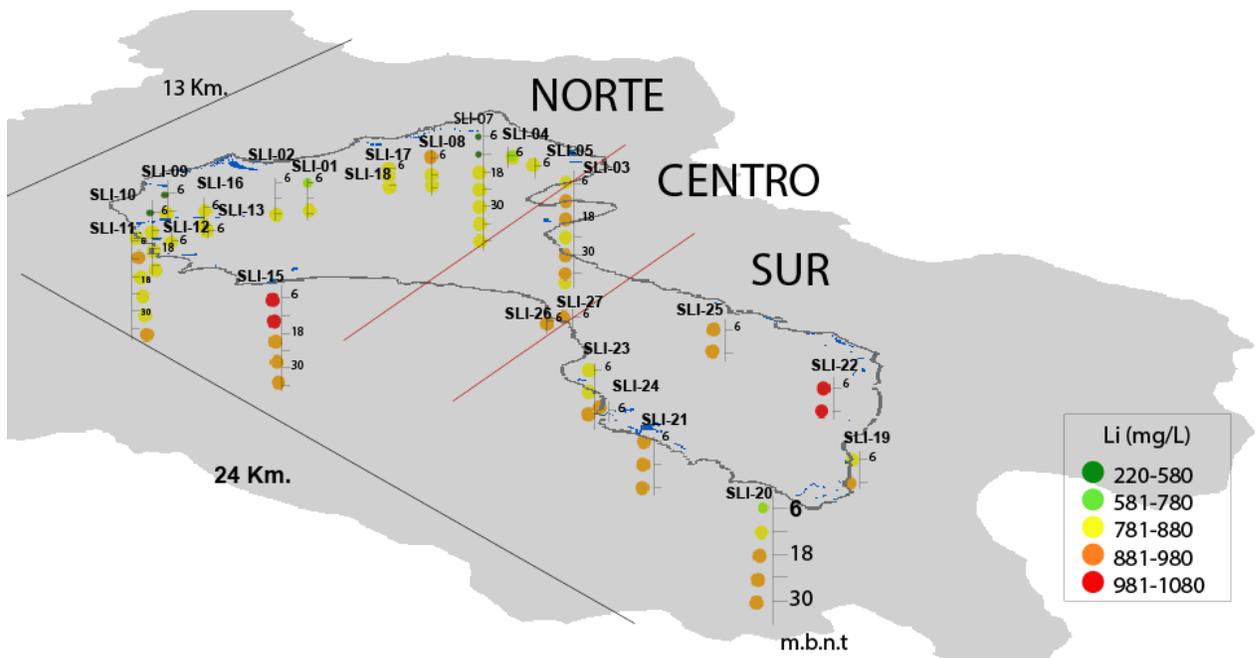


Figura 55: Concentraciones en profundidad de Li del Salar de La Isla (eje z en m.b.n.t) a partir de Talison Lithium Ltda. (2011).

Al analizar la relación entre la profundidad, densidad y concentración de las salmueras hay un enriquecimiento considerable de Li con la densidad, y que no hay mayor variación en profundidad desde los 6 m.b.n.t, no así en niveles más superficiales, lo que se debe a que existen tanto aguas de aporte como salmueras. Se ha propuesto que las salmueras económicas tienen concentraciones de Li en el intervalo de 200 a 4.000 (mg/L) (Gruber, et al., 2011; Kesler, et al., 2012), por lo que a partir de la Figura 56 en el Salar de La Isla tendrían densidades mayores a 1,05 (g/cm³).

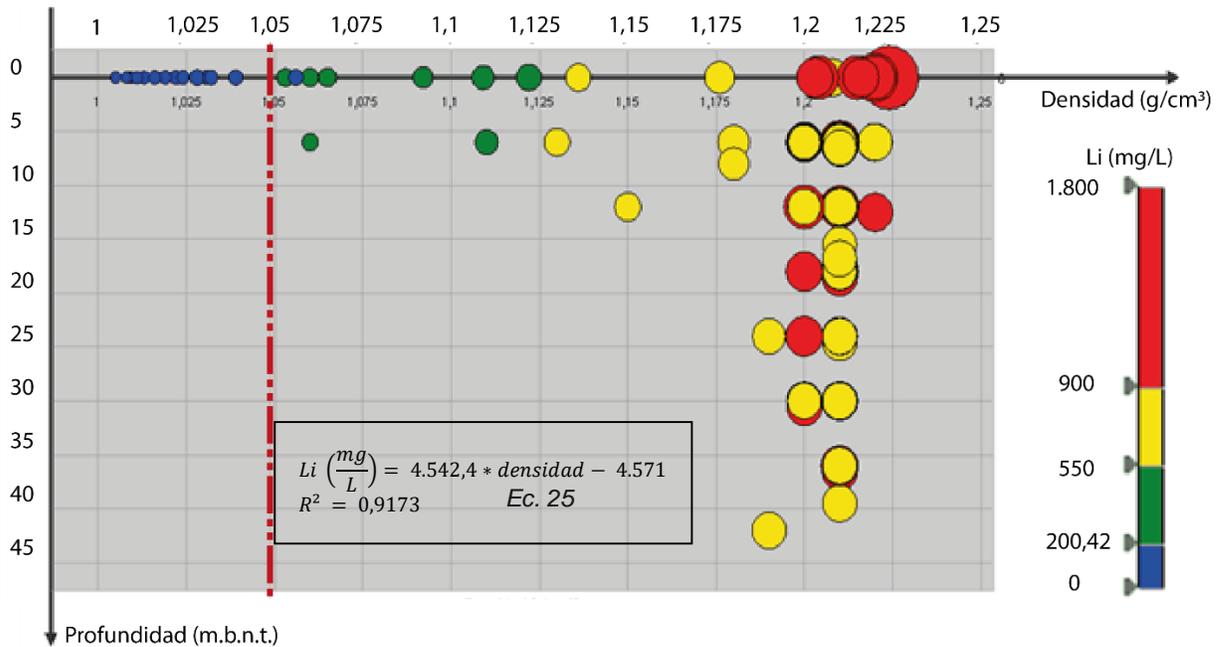


Figura 56: Relación entre profundidad y densidad en las salmueras del Salar de La Isla, escalado y coloreado según concentración de Li.

Tomando el valor límite de la densidad, se calcula la concentración promedio de Li de cada zona del salar seleccionando aquellas que sobrepasan dicho valor o la sobrepasarían dada su concentración según la relación presentada en la Figura 56 (Ec. 24) de manera de incluir aquellas concentraciones que no cuentan registro de sus densidades, descartando así las asociadas a las aguas de aporte y menos evolucionadas. La siguiente tabla y figura resume la estadística de las concentraciones de Li en el salar, sumando también otros elementos de interés como el boro y el potasio.

Tabla 22: Estadística de la concentración de litio, boro y potasio para cada sector del salar (mg/L).

Sector	N° obs	Elemento	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Error típico
Norte	40	Li	220	960	752,825	205,704	32,52
		B	54	276	185,065	43,099	6,81
		K	1.960	9.700	7.109,5	1.876,109	296,64
Centro	32	Li	156	1.730	884,625	254,730	45,03
		B	63	533	239,181	83,169	14,70
		K	1.380	15.000	8.248,437	2.194,602	387,95
Sur	21	Li	550	4.200	1.244,762	970,766	48,57
		B	171	670,4	247,021	110,908	23,55
		K	4.700	13.000	8.456,315	1.692,720	388,34

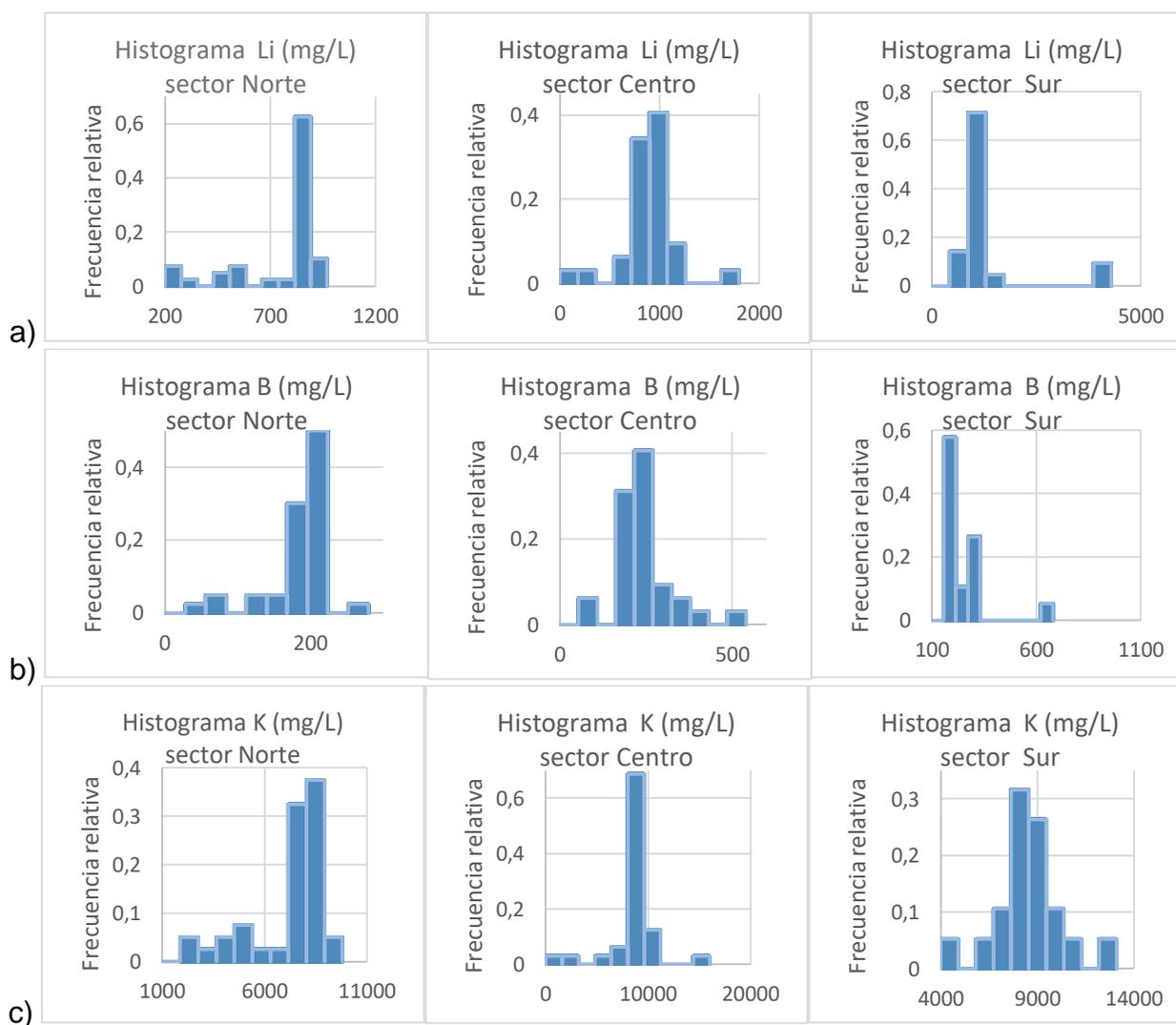


Figura 57: Histograma concentraciones elementos de interés económico (mg/L) en cada zona del salar; a) Litio, b) Boro, c) Potasio.

3.3.5 Potencial de litio en el Salar de La Isla

En base a lo propuesto, para la determinación de recursos de litio en el Salar de La Isla, se realiza una simplificación de ello, aplicando la metodología para los sectores representativos del salar y adaptando la Ec.22, donde los volúmenes obtenidos para cada unidad litológica bajo los dos escenarios se ponderan por sus respectivos parámetros Specific Yield y la concentración promedio de cada zona del salar, que se consideran constante en el espacio y en profundidad. La Tabla 23 resume y muestra los recursos inferidos para el Salar de La Isla.

Tabla 23: Recurso inferido de litio, boro y potasio del Salar de La Isla.

Elemento interés	(mg/L)	Escenarios	Total	Error	%
			ton	ton	
NORTE	752,825	E1	199.034	63.977	
		E2	140.494	46.711	
CENTRO	884,625	E1	242.063	71.487	
		E2	121.032	40.070	
SUR	944,211	E1	325.909	95.886	
		E2	217.273	66.451	
TOTAL E1			767.006	231.350	30
TOTAL E2			478.799	153.232	32
NORTE	185,065	E1	48.928	15.686	
		E2	34.537	11.455	
CENTRO	239,181	E1	65.448	19.463	
		E2	32.724	10.894	
SUR	247,021	E1	85.263	26.043	
		E2	56.842	17.997	
TOTAL E1			199.639	61.192	31
TOTAL E2			124.104	40.346	33
NORTE	7109,5	E1	1.879.628	603.797	
		E2	1.326.796	440.861	
CENTRO	8248,437	E1	2.257.051	665.067	
		E2	1.128.526	372.962	
SUR	8456,316	E1	2.918.832	855.957	
		E2	1.945.888	593.348	
TOTAL E1			7.055.512	2.124.822	30
TOTAL E2			4.401.210	1.407.171	32

Aplicando la metodología para ambos escenarios y propagación de errores de las distintas variables se obtienen recursos entre 478.799 y 767.006 toneladas para el Li, entre 199.639 y 124.104 toneladas para el B, finalmente entre 7.055.512 y 4.401.210 toneladas para el caso del K, con un error cercano al 30% en todos los elementos y escenarios.

4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

El núcleo del salar es fácilmente identificable por su textura y color, compuesto principalmente por halita y siendo bastante homogéneo, en el caso de las facies marginales, la química de la costra salina permite diferenciar una dominada por yeso en el norte y una por halita en el centro-sur, cuyo límite pareciera estar definido a partir del punto donde tanto la facie marginal y el núcleo dejan de ser concéntricos, donde la facie marginal experimentaría una mayor disolución. Se reconoce una costra salina de poca extensión compuesta por montículos de yeso en el borde oriental del salar, que por su textura y posición correspondería a depósitos lacustres de antiguas salmueras similares a los encontrados en el Salar Las Parinas, planteando la interrogante del origen de ambos salares y si existe alguna conexión entre ambos, de modo que podrían tener un origen común que posteriormente por la tectónica y volcanismo fueron aislados.

De las dolinas tipo *suffosion* identificadas en el frente del abanico aluvial que se encuentra en la falda del Volcán Aguas Blancas (sección 3.1.2.2) asociadas a disolución rápidas de sales permite inferir un nivel salino de pocos metros de profundidad que fue cubierto, y que dada la proximidad al margen este del salar podría indicar una extensión de éste en profundidad que fue cubierta por sedimentos recientes o bien estar relacionado a los niveles de yeso lacustres reconocidos en esta área del salar, que por la entrada de aguas algo más diluidas desencadene su disolución, subsidencia y que potencialmente genere aguas salinas que lleguen al borde del salar, representando también una posible fuente de Ca y SO₄.

En el área de estudio numerosos son los depósitos ignimbríticos, siendo la ignimbrita Río Frío una de las más antiguas (22-17 Ma) y mayor volumen, junto con la Pajonales (16,5 Ma), teniendo un grado de soldamiento variable. Estas unidades constituirían parte del salar al menos en su parte sur, desconociendo su geometría del todo, pero descartando algún abombamiento impulsado por el Domo Resurgente Caldera Aguilar dado que su reología es más bien frágil, de modo que están afectadas principalmente por fallas, las que tendrían un comportamiento hidráulico favorable, que se suman a las condiciones intergranulares de los abanicos aluviales y coluviales, y avalanchas volcánicas.

Se han asignado valores de permeabilidad hidráulica referenciales en base a sus propiedades litológicas superficiales, de manera de caracterizar las unidades hidrogeológicas definidas para la cuenca del Salar de La Isla, quedando pendiente el real comportamiento hidrogeológico de la unidad UH5, compuesta principalmente por unidades volcánicas y que cubre la mayor parte de la superficie, debido a que la información disponible para el análisis es principalmente petrográfica, desconociendo grados de meteorización y estructuras internas, que favorezcan su conexión.

En las proximidades del salar, las aguas alcanzan niveles someros, del orden decimétrico a métrico bajo el nivel de terreno, siendo el sumidero principal de esta cuenca endorreica. La piezometría salar arriba se conoce parcialmente al menos en las subcuencas n°s 1 y 14 (Figura 13) donde se dispone de información de niveles de

aguas, teniendo una directa relación con las unidades aluviales (Figura 19) que se localizan en ellas, de manera que se puede desprender un comportamiento análogo para el resto de las subcuencas, no eliminando la posibilidad de variaciones de la piezometría asociado a las fallas, y a unidades y niveles menos permeables. De este comportamiento generalizado es que se infiere que el salar, perteneciente a la unidad hidrogeológica 2 (UH2), junto a las unidades hidrogeológicas de alto potencial; UH1, UH2, UH3 y UH4 configura el acuífero principal de la cuenca, y en el que la estratigrafía de los sondajes ubicados principalmente en la facie marginal da nociones del engranaje y conexión de estas unidades.

El desarrollo de humedales es bastante limitado en comparación a la superficie del salar, representando un 1% de su superficie, ubicándose en la facie marginal del salar y teniendo relación con aquellos depósitos que bordean el salar con alto potencial hidrogeológico, condicionado a aquellos sectores con pendientes menores a 15°, por lo que al centro el desarrollo es prácticamente nulo debido a que la pendiente es mayor a 30° alzando valores de hasta 70° (subcuencas n°s 6 y 12, Figura 13). A las condiciones de topografía, y propias del terreno, se debe sumar la identificación y caracterización de la vegetación hidrófila, que para este caso solo consistió en el uso de NDVI, sin mayor análisis de las especies del terreno.

Los humedales del norte mantienen una relación con las unidades de alto potencial hidrogeológico; abanicos aluviales, desarrollándose en la zona distal de los lóbulos laterales de estos, y en algunos casos más allá de la zona distal (Figura 23 zonas a, c, d y h), siendo más extensos, y prolongados en la dirección NW-SE al igual que la facie marginal del norte. Esta disposición significa un aporte permanente o semipermanente en estos sectores y en esa dirección, recibiendo la influencia de los lineamientos y fallas que se orientan en tal sentido.

La distinción entre salar maduro e inmaduro, entrega información acerca de las condiciones climáticas, nociones de la estratigrafía y de la hidrogeología propia del salar. En este caso se identifican períodos de humedad y de mayor aridez a partir de las características superficiales principalmente la geometría de su borde y del conocimiento limitado del salar en profundidad, con el desarrollo de evapofacies clásticas y/o volcanoclásticas, que hacen pensar que se trata de un salar inmaduro, sin embargo, esta categorización queda sujeta a la descripción de las evapofacies más allá de los 40 m.b.n.t. registrados por el Proyecto de Exploración Salares 7 en la facie marginal, así como también del paleoclima en el área.

4.2 HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA

Con el levantamiento hidroquímico desarrollado en este estudio se logra completar una base de datos que cuenta información solo de aguas superficiales, consiguiendo una mayor homogeneidad de esta al aportar información de las aguas del sur del salar. A lo anterior se añade el levantamiento de datos isotópicos generando una herramienta no empleada hasta el momento para el estudio de la cuenca del Salar de La Isla.

De las 54 muestras que componen la base de datos, dos de ellas presentan un error del balance iónico superior al 10%, en el que el desbalance se asocia a un mayor contenido catiónico (K) para el caso de LIS-RT-011, y aniónico (CO₃) para el caso LIS-RT-015, convirtiéndose en el tercer elemento mayoritario respectivamente, trasladando

al Ca y SO_4 como componentes secundarios presentes en el resto de las muestras, como no se dispone de las observaciones de campo y metodología de estas muestras, resulta difícil determinar la fuente de estos errores, y condiciones de no equilibrio. Las condiciones de pH controlan la especiación química acuosa, y reacciones geoquímicas, de modo que las diferencias entre las mediciones de conductividad eléctrica y en especial del pH realizadas en terreno y laboratorio, darían cuenta de estos procesos, pudiendo responder a cambios en la presión parcial del gas de dióxido de carbono (CO_2), temperatura, procesos de sorción y precipitación, y/o presencia de sedimentos y/o coloides.

Las muestras fueron obtenidas en tres campañas de terreno, marzo de 1996, 2013 y 2014, y enero de 2018, en pleno desarrollo del Invierno Boliviano, encontrando diferencias menores de los resultados en aquellos sectores que se analizaron durante todas ellas, así éstas se encuentran en rangos de salinidad entre salado y salmuera, con valores de TSD desde 6.029 a 353.965 (mg/L), siendo las vertientes mayoritariamente saladas, y los ojos las aguas más salinas, lo que hace pensar un efecto menor de las precipitaciones estivales con una posible dilución de las aguas. Para el caso de los datos isotópicos recogidos por Amphos 21 en marzo de 2016 (ISL-8 y ISL-16), vertientes del norte se encuentran con un grado de evaporación acompañado de un leve aumento en la salinidad (Figura 46), pudiendo evidenciar un efecto por las mayores temperaturas y/o precipitaciones (enriquecida en isotopos pesados) durante el verano.

Aguas termales con temperaturas superiores a 25°C se han registrado durante todas las campañas en la laguna norte del salar con abundante vegetación, caracterizándose por ser aguas cloruro sódicas de baja salinidad, cuya isotopía entrega un origen meteórico para estas aguas, de manera que su temperatura se debería a la convección influenciada por los lineamientos y fallas que se orientan en la dirección NW-SE, el volcanismo relativamente joven, y el desarrollo de alteración hidrotermal, principalmente argílica en la parte centro-norte de la cuenca.

Al igual que la costra salina, la química de las aguas superficiales presenta diferencias del norte con respecto al centro y sur, siendo las del norte relativamente menos salinas, conductoras y densas, y algo más alcalinas, lo que podría responder al desarrollo de una cuña salina en esta zona, que permita la circulación superficial de aguas menos evolucionadas. Estos contrastes guardan relación con la diferencia espacial de la costra salina cuyo límite se ubica aproximadamente en la zona más extensa del salar.

Localmente en la zona noroeste a los pies del gran abanico aluvial (subcuenca n° 1, Figura 13) se forman una serie de pequeñas lagunas paralelas a su borde, y cuya química es algo más rica en potasio a pesar de su alta salinidad, siendo controlada esta última por el grado de evaporación (Figura 46), lo que podría estar asociado a un menor tiempo de residencia, indicando una mayor transmisividad de la unidad por la que circula, significando condiciones aún más favorables, pudiendo ser ésta parte del acuífero saturado en torno al salar en toda su extensión de casi 12 km. Lo que se complementa con las aguas relativamente jóvenes que describe la isotopía de vertientes en esa zona.

Los contrastes entre las proporciones Na, Ca y Mg, de la zona más próxima al límite norte del salar contiguo Las Parinas (USL-01, vertiente algo más cálcica y magnésica),

junto con la isotopía (Figura 46) que da señales de una posible mezcla con salmueras, indicarían la acción de las fallas que afectan este sector. Similares características isotópicas se describen en el propio Salar de Las Parinas (Cadiz, 2018) lo que no logra sustentar del todo la conexión entre las cuencas propuestas por Ricketts y Hutcheon (2012), más bien, sugiere procesos análogos fuertemente influenciado por el conjunto de fallas y lineamientos de orientación NW-SE que se encuentran entre ambos salares (Figura 6) que exponen el basamento en la parte oriental de la cuenca del Salar de Las Parinas.

Valores isotópicos sobre la LMM han sido determinados en salmueras tipo Ca- Na- Cl hospedadas a profundidades kilométricas en el basamento cristalino fracturado de cratones estables y cinturones montañosos (ejemplos Canadian Shield - Scandinavian Shield brines), para lo cual se han planteado como hipótesis de que estas aguas subterráneas serían el resultado de la mezcla de salmueras altamente concentradas y aguas más jóvenes y/o salobres aguas, en el que el aumento de la salinidad de la salmuera estaría asociado a la hidrólisis de silicatos y neoformación de arcillas, evaporación o congelamiento (Kietäväinen, 2017 y sus referencias). Lo anterior da señales de lo que acontecería en el centro del salar, donde han sido registradas salmueras superficiales tipo Na-Cl con datos isotópicos sobre la LMM, difiriendo de lo descrito; principalmente por la diferencia de la profundidad de las aguas, además de los contextos geológicos y edades de sus rocas hospedantes, y considerando también que hasta el momento no se ha reconocido estas desviaciones en aguas superficiales y subterráneas del norte de Chile, sin embargo, no se descarta alguna relación con el basamento principalmente intrusivo de la cuenca del Salar de La Isla, dado que éste si aflora en sus proximidades, y algunos de los procesos que se han propuesto si se desarrollan en el salar, tal como la evaporación o mezcla (?). De tener un origen similar esta composición isotópica al señalado resulta interesante primero de qué manera alcanzan niveles superficiales, qué papel ha jugado el volcanismo en profundidad y su influencia termal que ha sido reconocido en vertientes del norte del salar, teniendo presente que son el resultado de la interacción agua-roca a baja temperatura.

En cuanto al origen del sulfato disuelto; intrusivo, volcánico o desde evaporitas terrestres a partir de los resultados obtenidos para $\delta^{34}\text{S}-\text{SO}_4$, éste queda sujeto al estudio del isotopo ^{18}O de la molécula de sulfato, de manera de acotar el/los orígenes, de sectorizar de existir más de uno, y relacionar con los montículos de yeso encontrados en los salares de La Isla y Las Parinas, que corresponden a facies lacustres de los actuales salares.

Se ha determinado que las aguas superficiales siguen la vía sulfatada neutra y la sulfatada alcalina, coherente con la geología volcánica rica en azufre que predomina en el área. Aunque bien lo anterior no es capaz de explicar la alta salinidad de los aportes (TSD promedio 22.128 mg/L), de hecho la geofísica plantea que los límites de la salmuera se extienden más allá del perímetro del salar, lo que está condicionado por el tiempo de residencia, el grado de evaporación, piezometría, redisolución y mezcla con salmueras residuales, para lo cual Risacher et al. (2003) propone que la salinidad se debería a la mezcla con salmueras residuales y donde el yeso antiguo en formaciones sedimentarias profundas pareciera ser el único mineral evaporítico reciclado en salares actuales, sin embargo, la isotopía de vertientes y lagunas (Figura 46 y Figura 47) de la cuenca, indica vertientes que caen en la recta meteórica en la zona norte (USL-2, TSD

10.370 mg/L y USL-3, TSD 48.100 mg/L), vertientes con cierto grado en la evaporación (por ejemplo USL-16 y ISL-16, Figura 46) y vertientes que experimentarían mezcla con salmueras (USL-01-USL-07-USL-06 y USL-14-USL16), de manera que el origen no solo se restringe al proceso de mezcla.

La caracterización de la cuenca del Salar de La Isla se limita a un conocimiento más bien superficial tanto de su geología como de sus aguas, siendo insuficiente la información geofísica y de las aguas subterráneas que aporta el proyecto de Exploración Salares 7, de manera que la delimitación de la geometría y condiciones de borde presentan una gran incertidumbre, en especial el reconocimiento de los acuíferos, basamento y/o cuña salina.

4.3 HIDROLOGÍA

Se define la cuenca del Salar de La Isla que cuenta con 14 áreas aportantes hacia el salar, a partir de los límites propuestos para ella, teniendo como principal diferencia con respecto a la establecida por la DGA; la consideración de la cuenca Quebrada La Rossa dentro de sus límites, y con respecto a la establecida por DICTUC (2009), la incorporación de la subcuenca n°5 (Figura 13) en la delimitación de este estudio, que aunque mantiene una geomorfología cerrada, marcada por mayores alturas en la dirección W-E y menores en la N-S, con líneas de drenaje convergente dentro del área, se infiere una salida subterránea hacia el sur, donde la topografía es menor y donde se encuentra afectado por fallas inversas que hacen aflorar depósitos ignimbríticos (alto potencial hidrogeológico) dentro de la subcuenca, de modo que se conectaría con la subcuenca n°7 (Figura 13) ubicada al sur.

La falta de datos representativos de las condiciones meteorológicas de la cuenca es la mayor limitación para el balance hídrico obtenido, donde la metodología desarrollada depende fuertemente de la precipitación para la estimación de la escorrentía, recarga lateral y directa, al ser la precipitación el parámetro de entrada, por lo que mantienen un alto grado de incertidumbre. Para el caso de la estimación de la evaporación tanto la metodología del domo como la de lisímetros, requiere un conocimiento de los niveles freáticos entorno al salar, de modo de identificar aquellos sectores con niveles hasta los 2,5 a 3 m.b.n.t., profundidades que se encuentran sujetos a procesos de evaporación, para el caso del Salar de La Isla la instalación de lisímetros en la facie marginal del noreste por parte de Amphos 21 en 2016 y el levantamiento de la información registrada permitirá generar una curva de evaporación en función del nivel freático propia al salar, quedando pendiente la representación de la evaporación del núcleo de salar, lo anterior junto al desarrollo de técnicas complementarias a las observaciones de campo e imágenes satelitales (NDWI), lograrán una mejor categorización de los niveles freáticos, y a su vez de la determinación de la evaporación en la cuenca.

Valores negativos para los distintos escenarios del balance hídrico dan cuenta de la magnitud de la descarga, lo que es esperable para las condiciones de aridez de la zona, sin embargo, la cuantía del balance estimado no es totalmente representativa, dado que se encuentra sujeta a una serie de consideraciones y simplificaciones, en especial de información meteorológica que aplique a la latitud y altitud del área estudio. Ruch et al. (2012) determina tasas de acreción vertical por evaporación capilar principalmente del núcleo del salar, lo que se ajusta al escenario donde la evaporación

es más intensa que los mecanismos de recarga, sin embargo, a partir de las altas tasas 0,5 a 1,5 cm/año de acreción, se infieren períodos previos de mayor humedad puesto que bajo estas mismas condiciones se generarían potentes secuencias del orden de los cientos de metros, cuestión que no se registra de acuerdo a la geofísica desarrollada por el proyecto de Exploración Salares 7.

Con respecto al flujo lateral desde la cuenca Qda. La Rossa ubicada al norte, la existencia no es clara al menos superficialmente, éste se ve favorecido por la topografía, en el que la altura del límite sur es menor con respecto al del norte (Figura 18) y sustentado por la carencia de cuerpos superficiales, y la tendencia de la piezometría hacia la cuenca del Salar de La Isla según los pozos ubicados en el oeste del límite entre ambas cuencas. La química de una muestra de agua subterránea (Anexo I), obtenida en marzo de 2016 indica agua dulce de tipo bicarbonatado sódico y de vía evolutiva carbonática con pH cercano a 9, con una evolución química menor de acuerdo con la secuencia de Chevotareb, exponiendo un bajo contenido salino y un predominio mayoritario del ión bicarbonato, por lo que se puede asociar a zonas de recarga in-situ, no obstante, la isotopía de la misma, evidencia un enriquecimiento de isótopos pesados, que dada la baja salinidad, ésta podría representar un efecto de la lluvia de verano y/o evaporación durante la precipitación. Esta diferencia (detallada en Anexo I) con respecto a la química general de la cuenca del Salar de La Isla podría generar la diferencia del quimismo del norte con respecto al centro y sur, en especial la existencia de aguas menos salinas, que genere una mayor costra de disolución al norte, cuestión que podría ser compatible al desarrollo de una cuña salina en esta zona.

Para evaluar el caudal asociado al flujo lateral desde la cuenca adyacente Quebrada La Rossa, planteado por Amphos 21 (2016) de 100 L/s en promedio, se aplica la ley de Darcy sobre el segmento oeste del límite, obteniendo un caudal que va desde 36,1 a 170,126 L/s (sección 3.1.3.5) lo que es comparable con lo determinado al menos en los órdenes de magnitud, y más afín al escenario de 100 m de espesor saturado. Este posible escenario abre la interrogante de que, si realmente se encuentran las condiciones hidrogeológicas que permitan tal flujo, en ese sentido, las unidades volcánicas allí ubicadas, pertenecientes a la unidad hidrogeológica 5 (UH5), en general presentan un bajo potencial hidrogeológico de acuerdo a su geología superficial, lo que sugiere que en profundidad se desarrollarían estructuras primarias y secundarias, o bien exista un acuífero cubierto por las unidades volcánicas jóvenes, que faciliten el flujo desde la cuenca adyacente Quebrada La Rossa. De no existir este flujo lateral el balance sería hasta 100 veces más negativo, evidenciado que las entradas serían aún menores con respecto a la evaporación.

Una posible conexión con el Salar Las Parinas como lo plantea Ricketts y Hutcheon (2012) no se puede confirmar con la información disponible, aunque bien de existir esta conexión, la configuración de balance hídrico se vería modificado, para lo que es necesario y determinante el conocimiento de las estructuras; fallas y lineamientos que favorecen la conexión, junto a la piezometría, de manera de evaluar si corresponde a una nueva salida.

4.4 LITIO

Es claro que el Salar de La Isla presenta concentraciones de Li anómalas, teniendo en aguas superficiales concentraciones que van desde 4 a 4200 mg/L, y en aguas más profundas desde 220 a 1080 mg/L, resultando interesante determinar el origen de este metal dentro de este sistema salino, para lo cual Risacher y Fritz (2009) ha planteado como fuente los depósitos ignimbríticos ampliamente distribuidos en el Altiplano y la Puna, sin embargo, es necesario evaluar otras posibles fuentes (Figura 1) más allá de la roca caja.

La probable existencia de un flujo lateral desde la cuenca Quebrada La Rossa, ubicada al norte en la que se desarrolla una mayor alteración hidrotermal y se registran yacimientos de azufre, abre la posibilidad de que el Li provenga desde otras cuencas, no obstante, las concentraciones de Li presentan un mayor enriquecimiento hacia el centro-sur, de modo que esta alternativa se reduce. Se distinguen niveles de evaporitas lacustres antiguos, relaciones de equimolaridad de los elementos principales, y hay evidencia de mezcla con salmueras residuales, lo que daría cuenta de algún grado de reciclaje que pueda servir de fuente para el Li, pese a ello, no logra dar respuesta al origen Li, sino más bien un mecanismo de concentración. En el área de estudio se tiene la acción del viento durante las tardes y en dirección NW (sección 2.3), sin embargo, se desconoce su intensidad y magnitud por lo que no es posible analizar un origen asociado a depósitos eólicos (loess). En la zona de estudio no hay registro de volcanismo histórico, por lo que alguna relación con depósitos de tefra como lo propone Munk et al. (2016) (Figura 1) se restringe y expondría alguna relación con la roca caja volcánica que compone ampliamente la cuenca.

Algún vínculo con fluidos hidrotermales no logra explicar el alto contenido de Li en vertientes, de hecho, de acuerdo a la hidroquímica desarrollada no existe una relación entre la temperatura y el enriquecimiento de Li (Figura 36), aun en la zona de afloramientos hidrotermales ubicada al noreste del salar, que presenta una concentración similar al resto de las muestras localizadas en el norte. En vertientes se ha encontrado una relación creciente de Li con B, Cs, Rb y Sr, cuyas proporciones no indican una asociación a fluidos hidrotermales (diagramas ternarios Li-4Rb-10Cs y Li-Cl/100-B/4) debido que los contenidos de Li son muy superiores.

La distribución de litio en el salar también presenta un enriquecimiento hacia el centro-sur, donde afloran la mayoría de las ignimbritas que contienen 40 ppm en promedio de Li, de manera que esta relación espacial hace pensar en esta como una posible fuente, por sobre alguna relación con la temperatura, o a alguna otra fuente antes evaluada.

Los máximos valores de Li, superiores a 4.000 mg/L se obtienen en muestras del sur del salar; LIS-RT-013 (calicata) y LIS-RT-014 (laguna), cuyas salinidades no son muy elevadas, 147.320 y 149.464 mg/L respectivamente (Figura 36 y Figura 37), quedando fuera de las rectas de enriquecimiento de litio con respecto a la salinidad y conductividad eléctrica, sugiriendo un mecanismo adicional para el enriquecimiento, estando sujeto primero a las observaciones de campo de estas muestras y a una mayor densidad de muestras en la zona.

Finalmente con el trabajo desarrollado basado principalmente en la hidroquímica e isotopía de las aguas superficiales se ha logrado determinar y caracterizar los procesos que favorecen la concentración de Li, más que su origen, lo que en parte se debe a un enmascaramiento de las muestras ante las intensidad de la concentración, por lo que para dar respuesta a esta incertidumbre, es necesario estudiar aguas menos evolucionadas salar arriba y más profundas, determinando su tiempo de residencia (isótopos ^{14}C y/o ^3H), de manera de describir el aporte de Li hacia el salar, y confirmar si la meteorización de las ignimbritas es capaz de contribuir en tal magnitud.

4.5 RECURSO Y SUSTENTABILIDAD

La estimación de los recursos requiere de la delimitación de la salmuera, su grado y las características hidrogeológicas del acuífero que permiten su extracción. El desconocimiento de la profundidad del basamento y los límites laterales de la salmuera genera una gran incertidumbre en la cuantía del recurso inferido para el Salar de La Isla, sin embargo, para dar una mejor aproximación del volumen de la salmuera, se han puesto dos escenarios de profundidad de la salmuera, teniendo como referencia la geofísica del proyecto de Exploración Salares 7 y dividido el salar en tres zonas; norte, centro y sur, lo que se justifica en el enriquecimiento de Li hacia el sur y en las variaciones de la topografía de norte a sur, que significan distintas tasas de aporte clástico y volcanoclástico. En cuanto al parámetro S_y sólo se cuenta con valores referenciales de distintas evapofacies determinados en otros salares, debido a que durante la campaña de terreno de este trabajo y los anteriores realizados en el área no consigue describir esta variable, por lo que un conocimiento más acabado de este parámetro y ver como varía en el espacio reduciría los errores asociados, que se estiman en 30%.

La concentración de la salmuera es la variable mejor comprendida puesto que se cuenta con análisis tanto de aguas superficiales y profundas, de modo que se tiene un conocimiento en las tres dimensiones, sin embargo, no permite una extrapolación para toda la superficie del salar debido a que se limita solo a la facie marginal de éste, siendo discreto espacialmente. Los valores de concentración de Li indican un mayor enriquecimiento en la zona sur del salar, alcanzando valores extremos superiores a 4.000 mg/L, en muestras de agua superficial (LIS-RT-013, LIS-RT-014) mostrando la potencialidad máxima que presenta el Salar de La Isla, el que se debe corroborar con una mayor densidad de muestras para validar esta observación. Con la información recogida en superficie y los sondeos realizados por el proyecto de Exploración Salares 7, se aplica una ley de corte de 200 mg/L de acuerdo con lo señalado para salmueras económicas (Gruber, et al., 2011; Kesler, et al., 2012), obteniendo para el norte un promedio de concentraciones de Li de 753 mg/L, centro 885 mg/L y sur 944,211 mg/L.

Ante dos escenarios de profundidad máxima que definen el volumen de la salmuera, que considera un primer caso de 170 metros de profundidad y un segundo que considera 50 metros menos que el anterior, se obtiene un recurso inferido de alrededor de 767.006 toneladas de Li, 199.639 toneladas de B y 7.055.512 toneladas de K para el primer escenario, ahora bien, para el escenario dos se obtienen 478.799 toneladas de Li, 124.104 toneladas de B y 4.401.210 toneladas de K. Determinando errores para los distintas variables consideradas en la metodología propuesta por Houston et al. (2011) para el cálculo del potencial de Li, se obtiene un error asociado del 30% en promedio al

aplicar la técnica de propagación de errores, lo que significa una variación de varios ordenes de magnitud y un alto grado de imprecisión, de manera que lo estimado es más bien referencial, lo que requiere de una mejor comprensión del salar en toda su extensión y profundidad, para reajustarlo a condiciones propias del Salar de La Isla.

Bajo el mejor escenario los recursos claramente no son comparables con los 6,9 millones de toneladas de Li hospedadas en el Salar de Atacama (Anexo P), y con el Salar de Uyuni, las dos más grandes reservas de Li. Similar tonelaje se determina para el Salar Hombre Muerto en Argentina, definida a partir de una menor profundidad y concentración de la salmuera, probablemente con mejores condiciones hidrogeológicas (Sy). El Salar de Maricunga se ubica a unos 130 km al suroeste al del Salar de La Isla, con una cota promedio de 3760 m.s.n.m., presentando superficie y concentración de Li similar, sin embargo, sus recursos estimados varían ampliamente en comparación a lo señalado para el Salar de La Isla, la diferencia radica en el área y profundidad de la salmuera contemplada (Anexo R: Potencial y recursos en otros salares lo que define un volumen bastante menor, pudiendo sobrestimar el volumen inferido para el salar en estudio, de modo que los 200.00 toneladas promedio Li en el Salar de Maricunga, sirven de referencia para la potencialidad de los recursos del Salar de La Isla dada su similitud, sin embargo, es necesario tener presente que existen importantes diferencias; el Salar de Maricunga se encuentra influenciado por una mayor área que aporta agua (Cuenca Ciénaga Redonda, Cuenca Piedra Pómez), al Este presenta una gran unidad de alto potencial hidrogeológico formada por materiales sedimentarios aluviales recientes, sumando de primer orden la diferencia de altura entre ambos salares, 200 metros.

El estudio de las condiciones dinámicas del salar permitirá definir reservas de Li, de modo de evaluar su evolución temporal y reacción frente a un régimen de estrés asociado a un escenario de bombeo, el que generará un cono de depresión que depende de las propiedades del medio físico; permeabilidad y almacenamiento que determinan los rendimientos de pozos y regímenes de flujo, así como también la tasa de bombeo y la duración. Para lo anterior se vuelve necesario determinar la naturaleza de las condiciones de borde; permeable o impermeable, puesto que controla la tasa de propagación del cono, y la absorción de fluidos diluidos; salmueras estériles y/o agua fresca, de modo de analizar los cambios en la densidad, la reorganización de fluidos, y posibles procesos de mezcla. En Houston et al. (2011) se propone una relación entre el volumen de extracción y el volumen de almacenamiento, donde el factor de recuperación de salmuera de un acuífero alcanza solo alrededor de un tercio, y además establece que para la definición de reservas se requiere de la formulación y calibración de un modelo de simulación digital del flujo para predecir variaciones en el transporte de solutos y en la densidad de salmuera durante la implementación del proyecto de extracción.

Con el trabajo desarrollado se confirma el alto potencial de Li, B y K que presenta el Salar de La Isla, cuestión que sustentaría una futura explotación de las salmueras que se hospedan en el salar, para lo cual se vuelve fundamental asegurar que sea sustentable y sostenible, de manera de minimizar su impacto y especialmente capaz de mantener las condiciones ambientales en que se desarrollan los humedales; ecosistemas sumamente frágiles (Figura 58), entendiéndose que el recurso hídrico sostiene una fuerte relación con la flora y fauna del lugar, por ello una posible

extracción y bombeo de las salmueras, conlleva variaciones en la química y niveles de agua, que genera un desequilibrio en los ecosistemas que es relevante comprender.

Como medida ante el uso intensivo del agua, en Chile se ha establecido el concepto de caudal ecológico mínimo, que se define como el caudal que debe mantenerse en un curso fluvial o en específico en cada sector hidrográfico, de tal manera que los efectos abióticos (disminución del perímetro mojado, profundidad, velocidad de la corriente, incremento en la concentración de nutrientes, entre otros, etc.), producidos por la reducción de caudal no alteren las condiciones naturales del cauce, impidiendo o limitando el desarrollo de los componentes bióticos del sistema (flora y fauna), como tampoco alteren la dinámica y funciones del ecosistema (DGA, 2008), caudal ecológico mínimo que no debe exceder el 20% del caudal medio anual, aunque pueden haber excepciones determinadas bajo mandato presidencial. El desarrollo de humedales en salares está asociado al afloramiento de aguas subterráneas permanentemente, que desde el punto de vista de la conservación biológica incluye especies de flamencos y los peces del género endémico *Orestias* (*Teleostei: Cyprinodontidae*), el análisis de éstos es complejo puesto que cada uno de los factores que lo controlan actúan a diferentes escalas temporales y espaciales (Figura 58), para ello es necesario la caracterización de sus variables de estado; cobertura vegetación hidrófila, superficie lagunas, cobertura macrófitas, biomasa microalgas y composición y abundancia de la avifauna, así como también de sus factores condicionantes como el caudal vertientes, nivel freático, humedad, salinidad del suelo y condiciones climáticas (SAG, 2006, Ahumada, et al., 2011).

La definición de un caudal ecológico mínimo para el Salar de La Isla requiere de un vasto conocimiento de las entradas y salidas que controlan el balance hídrico, el que como ya se discutió no es suficientemente robusto dada la falta de información válida y que describa las condiciones de su latitud y altitud, teniendo solo un modelo conceptual del mismo, en el que la descarga por evaporación supera la recarga por infiltración y escurrimientos.

Este trabajo logra aportar a la generación de una línea base sobre la cual regular actividades que se desarrollen en la cuenca, teniendo en primer lugar la identificación de las zonas con mayor potencial y que probablemente se vean afectadas directamente ante una eventual explotación, así es que la zona sur presenta las mayores concentraciones de Li, donde precisamente se observa un mayor avistamiento de la fauna, especialmente flamencos, especie en riesgo de amenaza, y en segundo lugar se tiene la generación de un catastro de los humedales presentes en el salar, que incluye el conocimiento de su ubicación, superficies, condiciones fisicoquímicas y un caudal aproximado (127,12 L/s) asociado al aporte desde vertientes localizadas alrededor del salar (Figura 17). Siendo información de relevancia que sirve para la toma de decisiones asertivas acerca de una eventual entrega de derechos de agua y explotación.

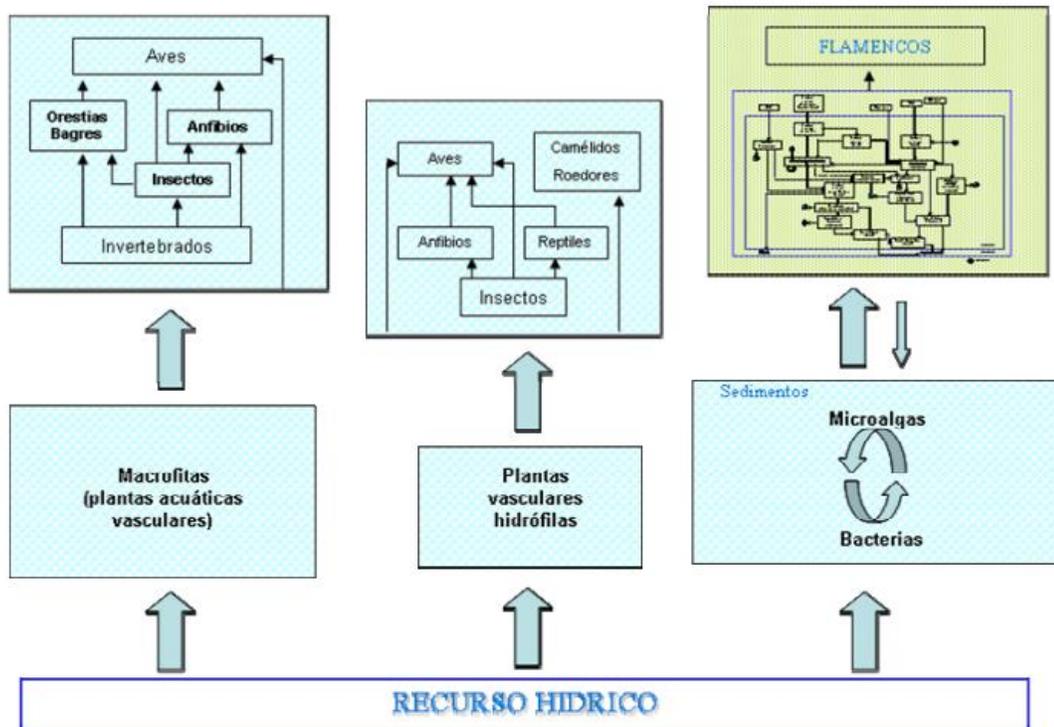


Figura 58: Tramas tróficas en cada compartimiento asociado a la fuente de recursos hídricos en las cuencas endorreicas (SAG, 2006).

5 RECOMENDACIONES

Para complementar la información obtenida para la cuenca del Salar de La Isla se proponen lo siguiente:

- Caracterización geológica con miras a estudiar sus propiedades hidráulicas e identificar estructuras secundarias.
- Gestionar la solicitud de la información detallada por el proyecto Salares 7.
- Desarrollo de geofísica; TEM y gravimetría para estudiar la geometría de él o los acuíferos, y evaluar posibles conexiones con las cuencas contiguas.
- Levantamiento de nuevos datos piezométricos, a partir de pozos existentes, nuevos y calicatas.
- Ensayos hidráulicos para determinar parámetros S_y y K de las unidades del salar.
- Levantamiento de la información de los lisímetros y estación meteorológica instaladas en el área de estudio, para su posterior análisis y reajuste del balance hídrico.
- Instalación de nuevas estaciones; fluviométricas y pluviométricas, para ajustar la estimación de la recarga y escorrentía superficial.
- Isotopía tanto de aguas de la zona de recarga, aporte y superficiales, para dar seguimiento al proceso de evaporación, identificar otros procesos de fraccionamiento, y estimar tiempo de residencia de las aguas.
- Estudio geoquímico de las rocas volcánicas que componen la cuenca del Salar de La Isla con el fin de comprender la dinámica de remoción e incorporación de las especies químicas en el agua.
- Estimar recursos de Li, con la nueva delimitación del volumen, propiedades hidráulicas e información de más detalle desde análisis de sondajes y geofísica, entre otros.
- Profundizar en el estudio de la recarga de los humedales desde vertientes, junto con el estudio de la vegetación hidrófila.
- Estudio de paleosalares y sus paleocostas, estratigrafía y estructuras de las facies evaporíticas para analizar la dinámica de la tectónica y condiciones de su génesis.

6 CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado tiene como objetivo la generación de información geológica, hidrológica, hidrogeoquímica para la caracterización de la cuenca del Salar de La Isla, logrando con ello determinar las condiciones que favorecen la concentración de Li, estimar su potencial de Li hospedado en sus salmueras y describir el escenario que se debe preservar ante el desarrollo de alguna actividad en el salar. Para ello se realiza una campaña de terreno durante enero de 2018, que complementa observaciones y muestras obtenidas de estudios anteriores, efectuando también el geoprocesamiento tanto de imágenes satelitales y modelos de elevación, para finalmente integrar la información en un modelo hidrogeológico conceptual.

El Salar de La Isla, se ubica al norte de la región de Atacama cercano al límite con Argentina, con una cota media próxima a 3960 m.s.n.m., y un área de 158 km², formando parte de una de las cuencas cerradas altiplánicas, cuya superficie se extiende por 759 km². El desarrollo de sistemas salinos se ve influenciado por su carácter endorreico y la intensa evaporación que genera la aridez de la zona de estudio.

Desde el punto de vista geológico, la cuenca hidrográfica se emplaza prácticamente en la Puna, caracterizada por el volcanismo cenozoico (ZVC), y por el Domo Resurgente de la Caldera Aguilar (Mioceno Inferior) con el desarrollo de sistemas de fallas principalmente en la parte sur del salar, que permite la exposición en superficie de ignimbritas asociadas a la actividad de la caldera. En la superficie del salar se reconoce un núcleo compuesto principalmente de halita con textura rugosa, y una zona marginal, que a su vez se compone, de una dominada por sulfatos en la parte norte, y por cloruros al centro-sur, terrígena asociada a la vegetación y aporte clástico, y finalmente una asociada a lagunas presentes en el salar.

Geomorfológicamente la cuenca está dominada por la preservación de edificios volcánicos gracias a bajas tasas de erosión, sobre los que se desarrollan; procesos de deslizamiento y flujo que generan una serie de abanicos aluviales y avalancha volcánica influenciado por la actividad tectónica de la región, procesos periglaciares evidenciado en los depósitos solifluidales presentes en las cumbres de los volcanes, y finalmente procesos de disolución en la ladera del volcán Aguas Blancas.

En términos hidrogeológicos la mayor potencialidad la presentan las unidades granulares; abanicos aluviales y avalancha volcánicas, junto con las unidades ignimbríticas fisuradas, de manera que con los depósitos evaporíticos, principal sumidero, formarían un acuífero interconectado mediante un engranaje lateral y en profundidad, donde los niveles piezométricos descenderían siguiendo la topografía, alcanzando niveles someros en el salar. Una menor potencialidad estaría dada por el resto de los depósitos volcánicos principalmente brechas y lavas.

La hidrogeoquímica de las aguas superficiales se caracteriza por una composición tipo clorurada sódica, y salinidades que evoluciona desde vertientes saladas hasta lagunas y ojos de agua que alcanzan categoría de salmuera. Las aguas del norte son más diluidas y algo más alcalinas con respecto a las del centro-sur, reconociéndose una zona de afloramientos termales con temperaturas entorno a los 25°-30°C en el extremo noreste del salar. De acuerdo con la isotopía de ¹⁸O y D, las aguas superficiales del norte y sur del salar adquieren altas salinidades principalmente por

evaporación con un origen meteórico, y sugiere la posible mezcla con salmueras residuales, para el caso de las aguas superficiales del centro del salar la isotopía indica interacción agua-roca a baja temperatura. Las aguas superficiales del salar siguen la vía evolutiva sulfatada neutra, y sulfatada alcalina o directa coherente con la geología volcánica.

La recarga al sistema hidrológico se debería principalmente a las precipitaciones estivales y a los deshielos de la precipitación sólida caída durante el invierno, lo que contempla alrededor de 150 mm/año. Para el balance hídrico generalizado de largo plazo se consideran como entradas, una recarga total (205,7 a 214,3 L/s) compuesta por la directa (infiltración) y lateral (escurrimiento y posterior infiltración), escorrentía superficial (198,7 a 216,4 L/s), entrada lateral en límite noroeste de la cuenca proveniente de la cuenca Quebrada La Rossa (80 a 120 L/s), y como salida la evaporación, directa y desde superficies libres (538,81 L/s), y evapotranspiración (12,4 L/s), obteniendo un balance hídrico negativo que va de -10,2 a -46,7 (L/s).

Las concentraciones de Li son mayores en el sur con 1.245 mg/L en promedio (norte 753 mg/L, centro 885 mg/L) demostrando una mayor potencialidad hacia el sur. Se obtiene un recurso inferido de alrededor de 478.799 toneladas de Li, 124.104 toneladas de B y 4.401.210 toneladas de K, para un escenario que considera una profundidad máxima de la salmuera de 120 metros, y de 767.006 toneladas de Li, 199.639 toneladas de B y 7.055.512 toneladas de K para un segundo escenario que considera una profundidad máxima de la salmuera de 170 metros, estas estimaciones tienen un error del 30% originado principalmente por el desconocimiento del volumen de la salmuera y condiciones hidrogeológicas del salar. Con la información analizada solo es posible determinar los mecanismos que controlan la concentración de Li, quedando pendiente el origen y fuente del Li en el Salar de La Isla, siendo las ignimbritas la principal hipótesis.

Áreas de sensibilidad corresponderían a humedales principalmente vertientes, lagunas y vegetación, que en general quedan restringidas a unidades permeables y pendientes del terreno menores a 15°, condiciones que se presentan en la parte norte y sur del salar. Se estima un caudal aproximado de 127,12 L/s asociado al afloramiento de vertientes.

En base a lo anterior se concluye que el Salar de La Isla presenta condiciones que han favorecido la concentración anómala de Li; presencia de un clima árido, carácter endorreico de la cuenca, evidencia de actividad tectónica que favorece la subsidencia y desarrollo de depocentros y aportes a los mismos, fuentes de litio y acuíferos adecuados, y tiempo suficiente para ello.

Las mayores limitaciones al trabajo realizado principalmente apuntan a un desconocimiento en profundidad tanto de las unidades hidrogeológicas, estructuras y aguas; composición e hidrodinámica, cuestión fundamental para dar cumplimiento a los objetivos del trabajo; una caracterización acabada de la cuenca del Salar de La Isla.

Finalmente, se confirma que el Salar de La Isla presenta un alto potencial de Li, B y K, lo que despierta un elevado interés económico para la extracción de sus recursos y desarrollo de una minería no metálica, eventual escenario que debe asegurar la preservación del salar y sus ecosistemas, y es en ese sentido que este estudio recoge información relevante del medio físico; referencias acerca de la hidrogeología e

hidrología, antecedentes hidroquímicos de aguas superficiales, y delimitación de humedales y caudales asociados a los mismos, que debe ser considerada para una planificación y explotación sustentable del salar.

7 BIBLIOGRAFÍA

Taiga Consultants Ltda., 2009. *Technical report on the Salares 7 property, Region III, Chile*, Calgary.

Aceituno, P., 1996. Elementos en el Clima del Altiplano Sudamericano. *Revista Geofísica*, Issue 44, pp. 37-55.

Ahumada, M., Aguirre, F., Contreras, M. y Figueroa, A., 2011. *Guía para la Conservación y Seguimiento Ambiental de Humedales Andinos*, .: División de Recursos Naturales y Biodiversidad (Ministerio de Medio Ambiente), Unidad de Gestión Ambiental del Departamento de Protección de Recursos Naturales (SAG), Departamento de Conservación y Protección de Recursos hídricos (DGA).

Allmendinger, W., Jordan, T., Kay, S. y Isacks, B., 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Annual Review Earth Planet Science*, Issue 25, p. 139 – 174.

Amilibia, A., 2002. *Inversión Tectónica en la Cordillera de Domeyko, Andes del Norte de Chile*: PhD thesis, Universitat de Barcelona.

Amphos 21, 2018. *Informe Comité de Minería No Metálica CORFO: Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales, etapa III, Modelo Hidrogeológico Consolidado cuenca Salar de Maricunga*, Santiago.

Amphos 21, 2016. *Informe DGA: Diagnóstico de disponibilidad hídrica en Cuencas Alto - Andinas de la Región de Atacama, Fase 3*, Santiago.

Aquaterra Ingenieros Limitada, 2013. *"Informe DGA: Diagnóstico De Disponibilidad Hídrica En Cuencas Alto - Andinas De La Región De Atacama*, Santiago.

Beauheim, R. L. y Roberts, R. M., 2002. Hydrology and hydraulic draulic properties of a bedded evaporite formation. *Journal of Hydrology*, Volumen 259, pp. 66-88.

Boutt, D., Munk, L., Hynek, S. y Corenthal, L., 2014. Dynamics and hydrogeology of the freshwater brine transition zone at the Salar do Atacama, Chile. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 46(6), p. 409.

Brandmeier, M. y Wörner, G., 2016. Compositional variations of ignimbrite magmas in the Central Andes over the past 26 Ma — A multivariate statistical perspective. *Lithos*, Volumen 262, pp. 713-728.

Cadiz, T. N. E., 2018. *Hidrogeología y potencial de litio, Salar Las Parinas, III Región*: Memoria pregrado inédita. Departamento de Geología. Universidad de Chile.

Chebotarev, I., 1955. Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochimica et Cosmochimica*, 137-170(198-212), pp. 22-48.

Chernicoff, C. J., Richards, J. P. y Zappettini, E. O., 2002. Crustal lineament control on magmatism and mineralization innorthwestern Argentina: geological, geophysical, and remotesensing evidence. *Ore Geology Reviews* , Issue 21, p. 127–155.

Clark, I. D. y Fritz, P., 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. *CRC Press*, Issue 328.

Corenthal, L., Boutt, D., Munk, L. y Mynek, S., 2014. Does the hydrologic budget of the Salar de Atacama elose: Implications for regional ground water flow. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 46(6), p. 409.

Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, Volumen 133, pp. 1702-1703.

Custodio, E. y Llamas, M., 1996. Hidrogeoquímica. En: E. Custodio y M. Llamas, edits. *Hidrología Subterránea*. Barcelona: OMEGA, pp. 1008-1095.

DARH, Dpto. de Administración de Recursos Hídricos, 2009. *Informe DGA: Estudio Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama Ubicadas entre el Río Copiapó y la Región de Antofagasta*.

de Silva, S. y otros, 1988. New observations on La Pacana caldera complex, N. Chile. EOS, Transactions of the American. *Geophysical Union* , 69(44), pp. 14-88.

DGA, 2008. *Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos* , Santiago.

DICTUC, 2009. *Informe DGA: Estudio Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III: SIT N° 157 (parte 1) y SIT N° 195 (parte 2)*.

Fernández, E. E., 2006. *Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas*. Madrid: Grafinat.

Freeze, R. A. y Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. 1 ed. Englewood Cliff, USA: Prentice-Hall.

Froehlich, K., Gibson, J. y Aggarwal, P., 2002. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. Study of environmental change using isotope techniques. *Int. At. Energy Agency C. C. Pap. Ser.*, pp. 54-65.

Garreaud, R. D., Molina, A. y Farias, M., 2010. Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Science Letters* , Issue 39–50, p. 39–50.

Garreaud, R., Vuille, M. y Clement, A. C., 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Issue 3054, pp. 1-18.

Gruber, P. y otros, 2011. Global lithium availability: A constraint for electric vehicles?. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), pp. 760-775.

Hains, H., 2011. *CIM Best Practice Guidelines for Resource and Reserve Estimation for Lithium Brines*.

Hardie, L. y Eugster, H., 1970. The evolution of closed basin brines. *Mineralogical Society of America Special* , Issue 3, pp. 273-290.

Hartley, A., 2003. Andean uplift and climate change. *J. Geol. Soc.* , Volumen 160, p. 7–10.

Horita, J., 2005. Saline Waters. En: P. Aggarwal , J. Gat y K. Froehlich , edits. *Isotopes in the Water Cycle*. Dordrecht: Springer, pp. 271-285.

Houston, J. y otros, 2011. The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. *Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology* , Volumen 106, pp. 1225-1239.

Houston, J. y Hartley, A., 2003. The Central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. *Int. J. Climatol.* 23, Issue 23, p. 1453–1464.

Isacks, B., 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, Issue 93, p. 3.211 – 3.231.

Kesler, S. y otros, 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, Volumen 48, pp. 55-69.

Kietäväinen, R., 2017. Deep Groundwater Evolution at Outokumpu, Eastern Finland: From Meteoric Water to Saline Gas–Rich Fluid. *Tesis doctoral, Department of Geosciences and Geography, University of Helsinki.*

Lettau, K. y Lettau, H., 1978. Experimental and Micro-Meteorological Field Studies of Dune Migration. *Exploring the World's Driest Climate, University of Wisconsin, Madison.*

Liboutry, L., 1956. *Nieves y Glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología*, Santiago: Ediciones de la Universidad de Chile.

Montgomery, E. y otros, 2003. Interbasin Underflow Between Closed Altiplano Basins in Chile. *Ground Water*, 1(4), pp. 523-531.

Munk, L. A. y otros, 2016. Chapter 14 Lithium Brines: A Global Perspective. *Society of Economic Geologists, Inc. Reviews in Economic Geology*, Volumen 18, pp. 339-365.

Naranjo, J. A. y Cornejo, P., 1992. *Hoja Salar de La Isla : escala 1:250.000*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Naranjo, J. A., Villa, V., Ramírez, C. y Pérez de Arce, C., 2018. Volcanism and tectonism in the southern Central Andes: Tempo, styles, and relationships. *Geosphere*, 14(2), pp. 1-16.

Naranjo, J. A., Villa, V. y Venegas, C., 2013. *Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, región de Atacama, Escala 1:100.000*, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Naranjo, J. y Paskoff, R., 1985. Evolución cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, norte de Chile (18°-21°S). *Congreso Geológico Chileno*, 4(4), pp. 149-165.

Piper, A., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, Issue 25, pp. 914-923.

Ricketts, B. y Hutcheon, I., 2012. *Evaluación Preliminar de la Hidrogeología y la Recarga de los Salares, de Concesión Minera de, Salares de Atacama Sociedad Contractual Minera (SCM), Atacama, Norte de Chile.*

Riller, U. y otros, 2001. Late Cenozoic tectonism, collapse caldera and plateau formation in the Central Andes. *Earth and Planetary Science Letters* , Issue 188, pp. 299-311.

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C., 1999. *Geoquímica De Aguas en cuencas cerradas: I, II Y III Regiones– Chile*: Volumen IV Estudio de Cuencas de la III Región.

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C., 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, Issue 63, p. 249–293.

Risacher, F. y Fritz, B., 2009. Origin of salts and brine evolution of Bolivian and Chilean salars. *Aquatic Geochemistry*, Volumen 15, pp. 123-157.

Risacher, F., Fritz, B. y Hauser, A., 2011, Origin of components in Chilean thermal waters. *Journal of South American Earth Sciences*, Volumen 31, pp. 153–170.

Ruch, J. y otros, 2012. Salt lake deformation detected from space. *Earth and Planetary Science Letters*, Volumen 331–332, p. 120–127.

SAG, 2006. *Conceptos y criterios para la evaluación ambiental de humedales*, Santiago: Servicio Agrícola y Ganadero, Centro de Ecología Aplicada Ltda..

Salfity, J., 1985. Lineamientos transversales al rumbo andino en el noroeste Argentino. *IV Congreso Geológico Chileno Antofagasta, Chile, Part 2*, p. 119– 137.

Sánchez, F. J., 2014. *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*. Universidad de Salamanca. [En línea]
Available at: <http://hidrologia.usal.es>

Santibañez, I., 2000. *Guía metodológica para la elaboración de mapas hidrogeológicos*. Informe inédito. Servicio Nacional de Geología y Minería *Guía metodológica para la elaboración de mapas hidrogeológicos*. Informe inédito. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

Scheuber, E. y Reutter, H., 1992. Magmatic arc tectonic in the Central Andes between. *Tectonophysics*, Issue 205, pp. 127-140.

Schnurr, W. y otros, 2007. Twenty-five million years of silicic volcanism in the southern central volcanic zone of the Andes: Geochemistry and magma genesis of ignimbrites from 25 to 27 °S, 67 to 72 °W. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166(1), pp. 17-46.

SERNAGEOMIN, 2014. *Potencial del Litio en salares Del Norte De Chile*. Santiago.

Spearman, C., 1904. The proof and measurement of association between two things. *Am. J. Psychol*, Issue 15, pp. 72-101.

Stern, C., 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, 31(2), pp. 161-206.

Stoertz, G. E. y Ericksen, G. E., 1974. Geology Northern of Salars Chile. *Geological Survey Professional Paper*, Issue 811.

Strahler, A., 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, Issue 38, pp. 913-920.

Struckmeier, W. F. y Margat, J., 1995. Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. *International Association of Hydrogeologists*. Heise, Hannover, Volumen 17, p. 177.

Talison Lithium Ltda., 2011. *MarketWired*. [En línea] Available at: <http://www.marketwired.com/press-release/talison-lithium-reports-positive-results-from-initial-drill-program-salares-7-project-tsx-tlh-1518836.htm> [Último acceso: 4 Marzo 2018].

Talison Lithium Ltda., 2011. *Streetwisereports*. [En línea] Available at: <https://www.streetwisereports.com/pub/na/talison-lithium-the-worlds-only-pure-lithium-producer> [Último acceso: 04 Marzo 2018].

Troncoso, R. y Ercilla, O., 2016. *Caracterización geoquímica superficial de aguas y sales de los principales salares andinos (22°50'-26°05'S), Regiones de Antofagasta y Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería.*

Troncoso, R., Ercilla, O., Carrasco, R. y Vivallo, W., 2013. *Estudio del potencial de litio en salares del norte de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería.*

Troncoso, R., Ercilla, O., Carrasco, R. y Vivallo, W., 2013. *Estudio del Potencial De Litio Salares Del Norte De Chile.*

Warren, J., 2010. Evaporites through time Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98(3), pp. 217-268.

Warren, J. K., 2016. *Evaporites, A Geological Compendium*. 2° ed. Switzerland: Springer.

8 ANEXOS

Anexo A: Base de datos

Anexo B: Resultados muestra campaña de terreno enero 2018

Anexo C: Metodología delimitación Cuenca del Salar de La Isla

Anexo D: Metodología estimación precipitación anual

Anexo E: Metodología estimación escurrimiento

Anexo F: Estimación coeficiente de infiltración a partir condiciones de permeabilidad

Anexo G: Metodología estimación evaporación

Anexo H: Observaciones de campo

Anexo I: Cuenca Quebrada La Rossa

Anexo J: Detalle instalación de lisímetros en el Salar de La Isla

Anexo K: Descripción calicata, estudio edafológico desarrollado por el proyecto Salares 7

Anexo L: Catastro de pozos

Anexo M: Metodología de muestreo de agua

Anexo N: Validación de análisis químicos

Anexo O: Índices hidrogeoquímicos

Anexo P: Relación entre Li y elementos traza -menores

Anexo Q: Resultados fase exploratoria de sondajes proyecto de Exploración Salares 7

Anexo R: Potencial y recursos en otros salares

Anexo S: Figuras amplificadas

8.1 Anexo A: Base de datos

Resultados isotópicos deuterio y $\delta^{18}\text{O}$

Código	Fuente	Fecha	$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O } \text{‰ VSMOW}$	$\delta\text{D H}_2\text{O } \text{‰ VSMOW}$	TSD (mg/L)	Exceso deuterio	Potencial altura de recarga
ISL-1	Risacher, et al., 1999	03/1996	-6,37	-59	17521,00	-8,0	5000
ISL-16	Amphos 21 2016	03/2016	2,1	-24	63680	-40,8	5500
ISL-8	Amphos 21 2016	03/2016	-3,2	-47,8	77610	-22,2	4500

Resultados análisis químicos muestras Risacher et al. 1999, concentraciones en (mg/L).

Código	Fecha	Tipo	So ₄	Cl	Hco ₃	Co ₃	Li	K	Ca	Na	Mg	B	As	Br	I	No ₃	Si	Co ₂	CE(μ/cm)	T ° (°c)	pH	Alcalinidad (meq/l)	O ₂	Densidad (g/ml)	TSD (mg/L)
ISL-1	18-03-1996	Vertiente	860	9800	23,4	0,24	49	532	97,8	5840	253	16	0,11	0,18	0,02	16,9	24,4	0,62	26900	21,3	7,61	0,455	4,4	1,013	17521
ISL-2	18-03-1996	Laguna	14800	189000	-	-	1080	10800	565	107000	5860	322	1,39	2,20	0,20	148	22,2	-	222000	29,5	6,67	3,35	na	1,215	329693
ISL-3	18-03-1996	Laguna	2940	50100	40,9	0,6	247	2830	201	29200	1240	70,8	0,30	0,64	0,08	38,3	23,4	1,7	108900	23,1	7,33	0,955	na	1,06	86916
ISL-4	18-03-1996	Vertiente	285	3620	134	0,42	17,6	250	37,2	2240	57,1	6,68	0,05	0,09	0,03	0,02	15,3	7,9	11230	23,4	7,31	2,23	na	1,005	6662
ISL-5	18-03-1996	Laguna	3190	54700	104	3,84	269	3100	260	31700	1270	76,3	0,80	0,86	0,12	17,2	26,6	1,9	116800	27	7,67	2,5	2,8	1,065	94773
ISL-6	18-03-1996	Canal	1230	15100	28,3	1,44	75,6	856	102	8900	365	29	0,48	0,17	0,03	0,98	18,1	0,16	38500	21,4	8,26	0,983	5,1	1,019	26729
ISL-7	20-03-1996	Canal	3710	29000	73,8	3,12	135	1750	830	17000	656	65,5	1,95	0,90	0,14	3,34	35,3	0,88	69300	18,7	7,93	2,01	3,8	1,039	53369
ISL-8	20-03-1996	Napa (calicata)	1440	5500	34,5	0,3	28,5	340	340	3380	152	16,4	0,70	0,29	0,07	6,7	17,9	1	17000	13,3	7,65	0,632	4,8	1,009	11269
ISL-9	20-03-1996	Vertiente	1160	9300	37,6	0,36	45,7	512	327	5380	248	16,9	0,16	0,35	0,11	12,6	33,6	1,2	25300	16,6	7,57	0,688	5,1	1,013	17087
ISL-10	20-03-1996	Laguna	2660	23400	61	3,12	113	1200	734	13300	625	36,5	0,29	0,84	0,14	8,68	30,8	0,57	57000	18	8,05	1,57	4,7	1,031	42164
ISL-11	20-03-1996	Laguna	7110	75600	94,6	8,28	347	3780	1880	43000	1840	131	0,94	1,69	0,36	12,9	43,1	1,3	146600	12,2	7,92	3,8	3	1,092	134013
ISL-12	20-03-1996	Napa del salar (ojo)	12100	180000	-	-	937	9700	690	103000	5010	276	1,01	1,75	0,17	96,7	8,43	-	222000	13,9	6,81	2,79	1	1,203	312003
ISL-13	21-03-1996	Vertiente	1440	17500	23,8	0,18	87,4	934	128	10400	459	31,3	0,10	0,20	0,04	18,8	25,7	1,1	44300	12,9	7,42	0,47	5	1,022	31046
ISL-14	21-03-1996	Laguna	7830	104000	87,8	2,1	521	5470	710	60300	2770	183	0,77	1,29	0,13	62	30,5	5,3	180800	12,5	7,25	2,3	2,3	1,122	181647
ISL-15	21-03-1996	Canal	3420	43300	23,6	0,42	221	2330	316	25100	1190	77,3	0,37	0,64	0,06	28,8	18,7	0,75	97100	11,7	7,54	0,737	4,9	1,053	76030
ISL-16	21-03-1996	Vertiente	797	8020	54,2	0,48	40,3	446	62,2	4850	223	14,7	0,07	0,20	0,03	22,6	27,7	1,5	22700	16,5	7,66	0,962	4,3	1,011	14572
ISL-17	21-03-1996	Laguna	15600	179000	-	-	1070	10600	453	101000	6030	392	1,36	3,00	0,17	183	26,3	-	220000	20,5	6,8	4,94	0,8	1,204	313963
ISL-18	21-03-1996	Vertiente	699	3130	25,8	0,3	16,4	172	95,4	1970	72,4	7,04	0,36	0,12	0,03	9,67	22,8	0,48	10140	26,4	7,79	0,478	4,3	1,005	6229
ISL-19	21-03-1996	Laguna	9600	87700	207	9,96	438	4650	1200	51800	2050	195	6,00	4,14	0,34	5,9	38,4	4,8	164300	10,8	7,67	5,51	2,7	1,109	157959

8.2 Anexo B: Resultados muestra campaña de terreno enero 2018

Las muestras de costra salina se molieron y cuartearon en varias oportunidades para lograr una muestra representativa. Posteriormente sin proceder a secarlas para evitar cambios en la composición mineralógica, se colocaron en portamuestras de aluminio, sin presionar para evitar pérdida de cristalinidad. Es complejo analizar estas muestras dado el grado de humedad, Las muestras se barrieron en un difractor Panalytical, modelo X'Pert PRO y se analizaron con el programa High Score Plus. La composición mineralógica cualitativa es la siguiente.

Resultados difracción de rayos X para las muestras de costra salina.

Código	Norte	Este	Altura	Proyección	Fecha	Tipo de muestra	Resultado
USL-COST-01	7153901	540604	3965	WGS 84	10-01-2018	Costra salina	Yeso, calcita, inyoita
USL-COST-02	7153901	540604	3965	WGS 84	10-01-2018	Costra salina	Halita, yeso hilgardita
USL-COST-03	7142592	537853	3963	WGS 84	10-01-2018	Costra salina	Halita. bloedita, singenita
USL-COST-04	7147354	533969	3957	WGS 84	11-01-2018	Costra salina	Halita, korzhinskita (por su génesis, tomar este mineral con duda, aunque aparece bien en difracción), anortita
USL-COST-05	7147354	533969	3957	WGS 84	11-01-2018	Costra salina	Halita, silvita, yeso.

Resultados análisis químico para las muestras de costra salina.

Código	Na	K	Mg	Ca	Cl	NO ₃	SO ₄
	%						
USL-COST-01	0,03	0,01	0,01	6,05	0,04	0,01	15,68
USL-COST-02	35,8	0,18	0,08	0,38	59,67	0,01	1,42
USL-COST-03	31,5	1,01	0,63	0,35	50,59	0,01	6,71
USL-COST-04	35,7	0,2	0,1	0,07	61,75	0,01	0,33
USL-COST-05	34,5	0,22	0,11	0,06	57,98	0,01	0,27

Resultados análisis químico para las muestras de costra salina.

Código	Sn	P	Fe	Mn	Mo	Ni	Ag	Pb	Se	Ti	V	Zn		
	ppm													
USL-COST-01	<0,003	<0,050	<0,010	<0,003	0,1	0,06	0	0,03	<0,005	<0,001	0,04	0,12		
USL-COST-02	<0,003	0,35	<0,010	0,78	0,36	0,16	0,02	0,06	0,88	0,02	0,01	0,2		
USL-COST-03	<0,003	2,04	<0,010	<0,003	0,27	0,12	0,01	0,03	0,57	0,03	0,18	0,31		
USL-COST-04	0	<0,050	1,04	0,75	0,15	0,18	0,06	0,08	<0,005	0,01	0,01	0,56		
USL-COST-05	0	<0,050	<0,010	1,86	0,13	0,18	0,13	0,35	0,47	0,04	<0,003	0,91		
Código	Li	La	Ge	Rb	Sr	Cs	Al	Sb	As	Ba	B	Cd	Co	Cr
	ppm													
USL-COST-01	11	0,89	0,12	0,15	38,86	0,06	1,08	0,03	1	0,33	93,8	0	0	0,02
USL-COST-02	99	0,11	<0,01	2,39	28,27	0,73	0,69	0,02	1,42	0,61	98	0,01	<0,002	0,05
USL-COST-03	1082	0,04	0,03	20,72	61,69	1,7	0,43	0,02	1,97	1,61	566	<0,002	0,01	0,1
USL-COST-04	199	1,03	<0,01	3,67	8,08	0,68	1,05	0,02	0,49	0,43	125	0,01	0,02	0,29
USL-COST-05	198	0,05	<0,01	3,59	7,8	0,67	0,64	0,02	0,16	0,3	105	0,07	0,21	0,06

Resultados análisis químicos muestras campaña terreno 2018, concentraciones en mg/L.

Código	pH	CE	HC0 ₃	F	Ca	Mg	Na	K	Li	SO ₄	Cl	NO ₃	TSD (mg/L)	TSD 103°C (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)	Dureza Total	Dureza carbonatosa	Dureza no carbonatosa
USL-01	7,64	23600	62	0,83	62	1175	4500	370	37	1480	8662	<3,0	16317	17231	51	4988	51	4937
USL-02	7,68	10370	30	1,1	91	81	2000	137	12	556	3137	<3,0	6029	6366	25	558	25	533
USL-03	8,12	93400	262	7,09	1400	885	22900	5275	168	4887	38540	<3,0	74191	78346	215	7133	215	6918
USL-04	7,33	48100	26	0,65	136	455	10420	790	84	964	16732	412	30006	31686	21	2210	21	2188
USL-05	7,68	67500	34	0,75	161	655	15750	1090	119	1651	26269	<3,0	45713	48273	28	3095	28	3067
USL-06	6,7	229000	409	2,39	400	9175	103000	15000	1730	22781	187896	341	340526	359595	336	38737	336	38401
USL-07	7,68	80800	75	0,83	127	219	19000	1380	156	2084	33616	335	56955	60144	61	1218	61	1156
USL-08	6,75	239000	169	0,22	560	4750	114000	8000	920	12165	189664	<3,0	330143	348631	139	20935	139	20796
USL-09	7,71	226000	1054	0,5	117	3650	87750	6600	710	9559	146382	<3,0	255287	269583	864	15304	864	14440
USL-10	7,83	200000	2130	0,93	134	2950	67250	4700	550	7301	109240	867	194040	204906	1745	12467	1745	10722
USL-11	6,87	241000	195	0,31	540	4825	118000	7900	870	8866	189949	<3,0	331046	34958	160	21193	160	21034
USL-12	7,46	69800	65	0,25	238	770	17350	1030	138	1705	26706	<3,0	47969	50656	53	3761	53	3707
USL-13	6,76	236000	245	0,07	342	6850	115750	8500	1080	15936	197717	32	346328	365723	201	29027	201	28826
USL-14	7,45	41100	79	0,46	227	445	8490	730	75	1520	13100	<3,0	24626	26005	65	2395	65	2331
USL-15	7,12	232000	495	0,98	465	7675	109250	10600	1240	16422	181385	<3,0	327281	345609	406	32728	406	32322
USL-16	6,74	16540	127	3,48	206	159	3275	290	14	743	5253	359	10365	10945	104	1168	104	1064

Resultados análisis elementos trazas muestras campaña terreno 2018, concentraciones en mg/L.

Código	Al	Sb	As	Ba	Be	B	Cd	Co	Cu	Cr	Sn	P	Fe	Mn	Mo	Ag	Pb	Se	V	Zn	Hg
USL-01	<0,020	<0,010	0,05	<0,005	0,007	5,1	<0,002	<0,002	<0,010	<0,001,	<0,003	<0,050	<0,010	<0,003	0,046	0,005	0,003	1,3	0,035	0,53	168
USL-02	0,58	<0,010	0,014	<0,005	0,007	<0,060	<0,002	<0,002	<0,010	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	<0,003	0,013	<0,002	<0,002	0,49	0,006	0,52	<0,0003
USL-03	0,28	<0,010	0,47	0,17	0,004	32	<0,002	<0,002	<0,010	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	0,019	0,012	<0,002	<0,002	0,73	0,018	0,42	<0,0003
USL-04	0,83	<0,010	<0,005	<0,005	0,003	<0,060	<0,002	<0,002	<0,010	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	<0,003	<0,005	0,003	<0,002	<0,005	0,01	0,71	<0,0003
USL-05	0,27	<0,010	<0,005	<0,005	0,007	14	<0,002	<0,002	<0,010	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	<0,003	0,012	0,002	<0,002	<0,005	0,01	0,45	<0,0003
USL-06	0,59	0,067	2,1	0,011	<0,002	533	0,005	<0,002	0,96	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	0,22	0,84	0,009	<0,002	0,83	0,091	0,71	535
USL-07	1,2	0,088	0,4	<0,005	0,007	63	0,005	<0,002	0,150	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	<0,003	0,13	<0,002	<0,002	0,42	0,024	0,53	42
USL-08	0,75	0,051	1,1	<0,005	<0,002	239	0,007	<0,002	1,7	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	0,18	0,42	0,009	0,014	0,56	0,012	0,58	217
USL-09	0,58	0,043	0,92	0,031	<0,002	176	0,01	<0,002	1,7	<0,001	<0,003	<0,050	0,6	0,18	0,024	0,006	0,012	0,73	0,014	0,66	<0,0003
USL-10	0,75	0,034	1,05	<0,005	<0,002	171	0,004	<0,002	1,3	<0,001	<0,003	1,3	<0,010	0,006	<0,005	0,004	0,009	0,14	<0,003	0,5	<0,0003
USL-11	2,3	0,039	0,805	0,054	<0,002	222	0,011	0,002	2,9	<0,001	<0,003	<0,050	1,2	0,98	0,32	0,006	0,046	0,58	0,025	1,5	365
USL-12	0,79	0,027	<0,005	<0,005	0,003	18	0,003	<0,002	0,53	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	0,14	<0,005	0,003	<0,002	0,63	0,013	0,58	<0,0003
USL-13	0,88	0,039	0,25	<0,005	<0,002	333	0,005	0,011	2,4	0,06	<0,003	<0,050	0,14	4,1	0,25	0,011	0,02	<0,005	0,059	2,6	333
USL-14	1,2	0,027	<0,005	<0,005	0,007	21	0,003	<0,002	0,51	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	<0,003	<0,005	<0,002	<0,002	0,62	0,028	0,45	<0,0003
USL-15	0,88	0,037	1,1	0,089	<0,002	279	0,01	<0,002	1,7	<0,001	<0,003	<0,050	<0,010	0,065	0,4	0,008	<0,002	0,5	0,062	0,51	43
USL-16	1,1	0,027	0,16	<0,005	<0,002	2,7	<0,002	0,006	0,57	<0,001	<0,003	<0,050	6,3	0,28	<0,005	0,002	0,019	0,44	0,01	0,66	<0,0003

Resultados isotópicos deuterio, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{34}\text{S}$ muestras campaña enero 2018.

Código	Tipo muestra	$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O}$ ‰ VSMOW	Error	$\delta\text{D H}_2\text{O}$ ‰ VSMOW	Error	$\delta^{34}\text{S}$ SO ₄ ‰ V-CDT	Error	SO ₄ (mg/L)	Altura	TSD (mg/L)	Exceso deuterio	Error	Potencial altura de recarga
ISL-1	Vertiente	-6,37		-59						17521,00	-8,0	77,9610262	5600
ISL-16	Vertiente	2,1		-24						14572,00	-40,8	29,2957335	4500
ISL-8	Calicata	-3,2		-47,8						11269,00	-22,2	54,2236111	5000
USL-01	Vertiente	-9,21	0,05	-69,1	1,2	4,65	0,17	1480	3964	16317,00	4,6	101,012635	5000
USL-02	Vertiente	-10,79	0,09	-74,9	1,3	6,12	0,15	556	3957	6029,00	11,4	114,285399	5000
USL-03	Laguna	6,05	0,08	3,4	0,6	4,87	0,3	4887	3962	74191,00	-45,0	48,5192745	5600
USL-04	Vertiente	-10,26	0,06	-72,2	0,2	4,07	0,17	964	3960	30006,00	9,9	109,315902	5600
USL-05	Canal	-8,41	0	-61,8	0,6	3,76	0,46	1651	3961	45713,00	5,5	91,3555603	4600
USL-06	Laguna	1,12	0,43	14,3	1,4				3964	340526,00	5,3	16,875177	4700
USL-07	Canal	-6,79	0,01	-57	0,8	4,45	0,06	2084	3959	56955,00	-2,7	78,7379349	4700
USL-08	Laguna	-10,13	0,17	-30,2	0,8				3959	330143,00	50,8	86,4842275	5000
USL-09	Laguna	4,97	0,14	2	1,4				3964	255287,00	-37,8	39,81027	5000
USL-10	Laguna	7,59	0,1	14,1	1,3				3963	194040,00	-46,6	62,335611	5000
USL-11	Calicata	-11,58	0,27	-47,8	0,6				3957	331046,00	44,8	104,24495	5000
USL-12	Vertiente	-7,04	0,03	-66,5	0,5				3960	47969,00	-10,2	87,1446636	5000
USL-13	Calicata	-7,09	0,1	-14,5	0,5				3959	346328,00	42,2	58,5440723	5000
USL-14	Vertiente	-8,17	0,06	-64,7	1				3961	24626,00	0,7	91,9674921	5600
USL-15	Laguna	1,79	0,16	13,1	0,6				3960	327281,00	-1,2	19,4080499	4500
USL-16	Vertiente	-8,96	0,08	-71,2	1,7	1,84	0,05	743	3962	10365,00	0,5	101,031987	5100

8.3 Anexo C: Metodología delimitación Cuenca del Salar de La Isla

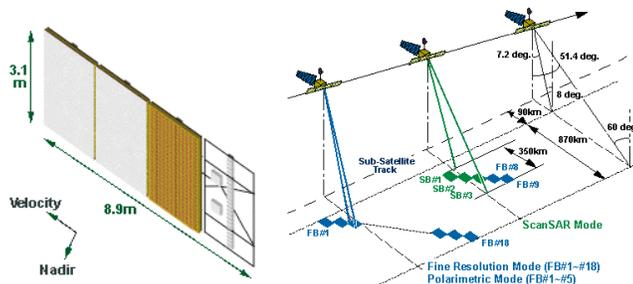
La cuenca del Salar de La Isla ha sido determinada en más de una ocasión con distinto nivel de detalle dado el carácter nacional y regional de los estudios, como este trabajo solo se enfoca en esta cuenca, requiere de una redefinición de su límite, para ello se toma como antecedentes las áreas definidas previamente a modo de validar su análisis.

Estudio	UTM	UTM	AREA Cuenca (km ²)	Perímetro km
	Este	Norte		
DGA	535415	7159675	858	-
DICTUC (2009)	536212	7154111	736,4	196
AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA (2013)	536434	7153905	758,4	157,4

La herramienta principal para este análisis junto a los shapex existentes es el Dem, en este caso ALOS PALSAR con una resolución de 12,5 m, obtenido en el sitio <https://www.asf.alaska.edu/>, y con fecha de 03/09/2011. A continuación, se describen algunas de sus principales características:

El satélite ALOS fue lanzado en enero del 2006 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial en enero de 2006 y su nombre japonés es "DAICHI". El satélite ALOS durante su operación (May 16, 2006 – April 22, 2011), colectó imágenes de Radar en escenas de 50 km x 70 km de todo el planeta cada 45 días aproximadamente a través de su sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar).

- Operador del Satélite: JAXA – Cross Restec
- Fecha de Lanzamiento: enero de 2006
- Resolución espacial de la Imagen: 6,25 o 12,5 mts.
- Ángulo de Incidencia: 8°.
- Polarizaciones: HH o VV.
- Capacidad de Colección:
- Escena: 50 km x 70 km
- Mínima área de pedido en archivo: Escena



Descripción satélite para obtención modelo digital de terreno ALOS PALSAR, información obtenida desde <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>

Previa a la delimitación en ArcMap 10.5 de la cuenca para evitar y disminuir los errores se recorta la superficie del salar, de manera que la metodología reconozca los

bordes del salar como punto de salida, considerando que se trata de una cuenca endorreica cuyo punto de salida es el mismo salar.

Para verificar la correcta delimitación el método semiautomático de delimitación se ejecuta en dos softwares: ArcMap 10.5 mediante la herramienta *Hydrology* y Global Mapper v18 mediante la herramienta *Generated Watersheds*. Se detalla el procedimiento y el resultado de ambos programas.

8.3.1 Delimitación de cuenca en ArcMap 10.5

La siguiente figura corresponde a un diagrama de flujo que detalla el procedimiento y las distintas herramientas utilizadas de la herramienta *Hidrology*:

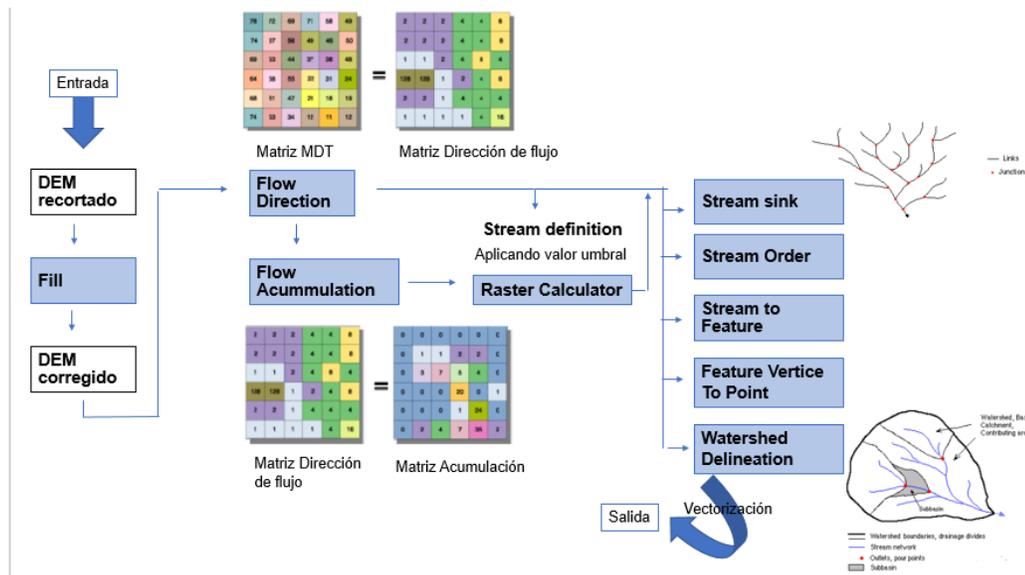


Diagrama flujo proceso de delimitación de la cuenca en ArcMap 10.5.

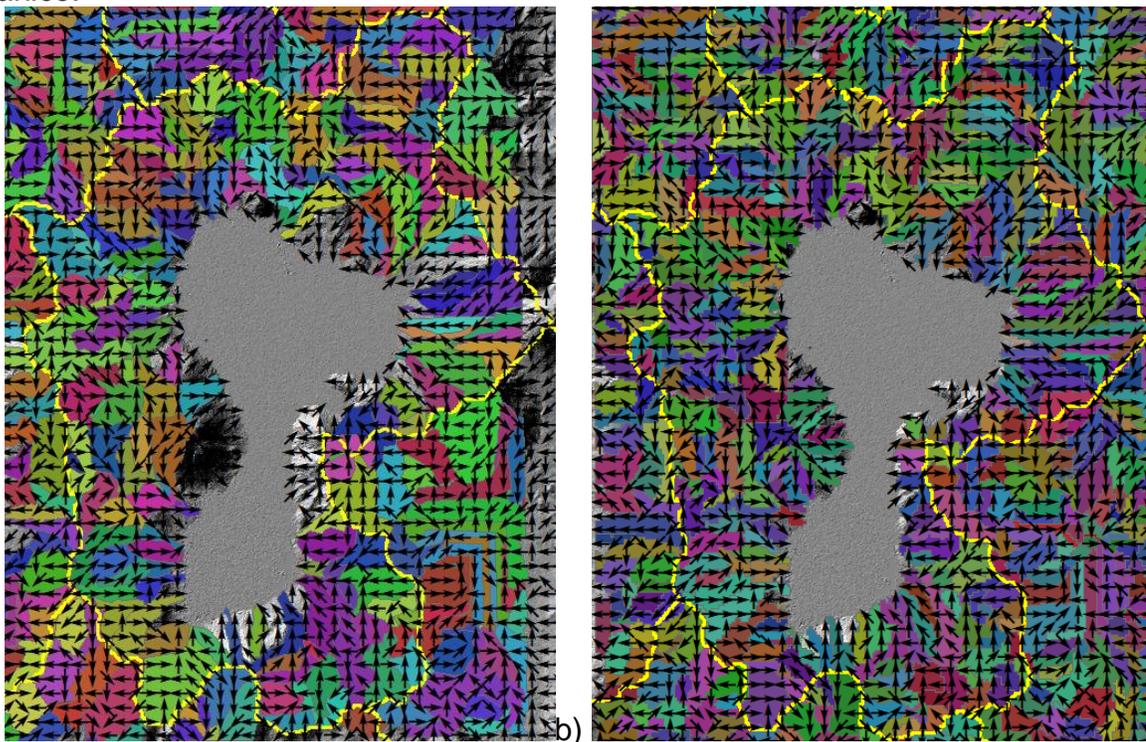
Es importante destacar que el dem es ajustado previamente, considerando la superficie del salar como punto de salida, tal como lo es un lago, en cuanto a las correcciones del por vegetación no se aplica debido a que los perfiles topográficos levantados no evidencian este efecto.

8.3.2 Delimitación de cuenca en Global Mapper v18

Para este caso la ejecución es más simple ya que lo único que se necesita es el dem, en ese caso no cortado, junto al parámetro de valor del área de drenaje, aplicando automáticamente la metodología utilizada por ArcMap, obteniendo la creación de archivos que muestran tanto las cuencas y los drenajes. De igual manera se evalúa con distintos valores.

Con los resultados obtenidos con ambos programas, se correlacionan las subcuencas generadas con ArcMap con umbral de 125 y con la Global Mapper con umbral de 10 de km² dada la escala de trabajo sumando también a este análisis las cuencas altioplánicas generadas por la DICTUC en 2010 y el raster de dirección de flujo, de esta manera se observa cierto ensamblaje de estas microcuencas con los límites

generados por la DICTUC, finalmente se genera el límite de la cuenca del Salar de La Isla de forma manual de modo de suavizar el polígono, a partir de estos dos resultados, corroborando con las líneas de flujo y un mapa de sombras. Las microcuencas que constituyen la cuenca del Salar de la Isla se construyen siguiendo las líneas de flujo y las subcuencas generadas por los programas, agrupándolas de acuerdo al patrón de drenaje principalmente dendrítico y paralelo, sumado al sector del borde del salar donde drenan, que corresponden a un abanico aluvial o constituyendo la ladera de un edificio volcánico.



Resultados delimitación de cuencas y subcuencas: a) Desde ArcMap 10.5 para un umbral de 500 píxeles de acumulación, b) Desde Global Mapper para un umbral de 250 km² valor umbral del área de drenaje.



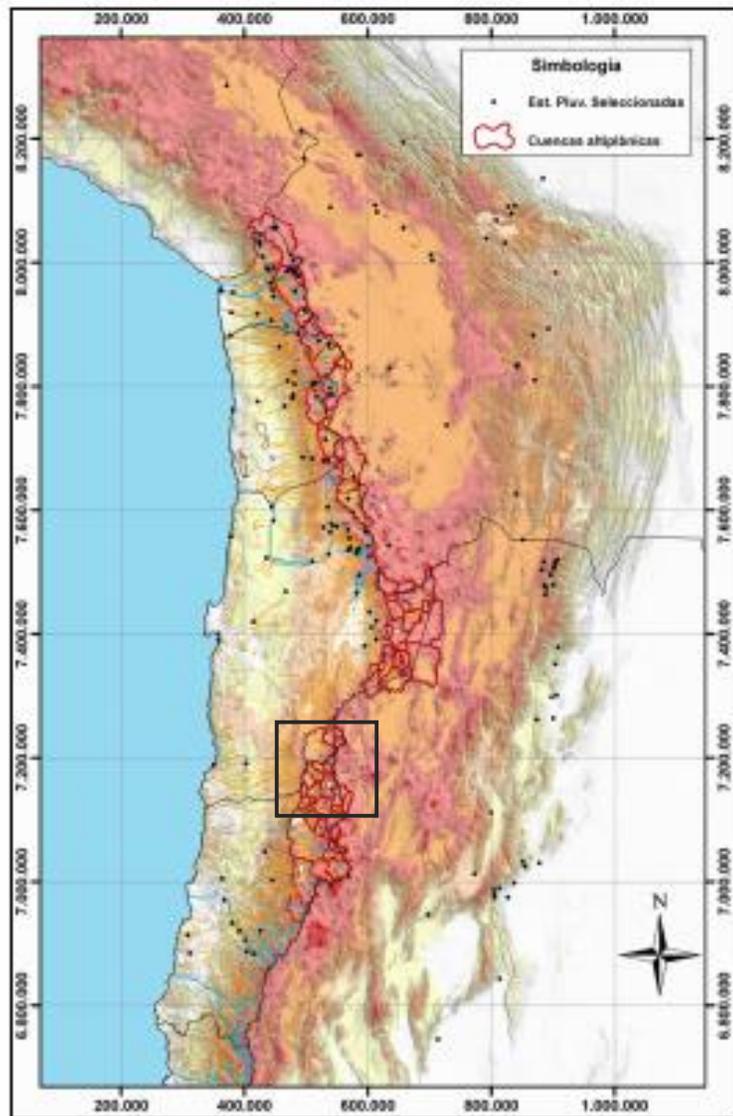
Comparación de límite de cuenca definido, las áreas coloreadas corresponden a los límites determinados por la DICTUC en 2009, y el polígono rojo la determinada en este estudio.

Para el caso del drenaje, éste se construye a partir de los resultados generados para los menores umbrales, filtrando y limpiando las líneas con la ayuda de un hillshade, imágenes satelitales, líneas de flujo, estableciendo además su orden de acuerdo con lo propuesto Strahler.

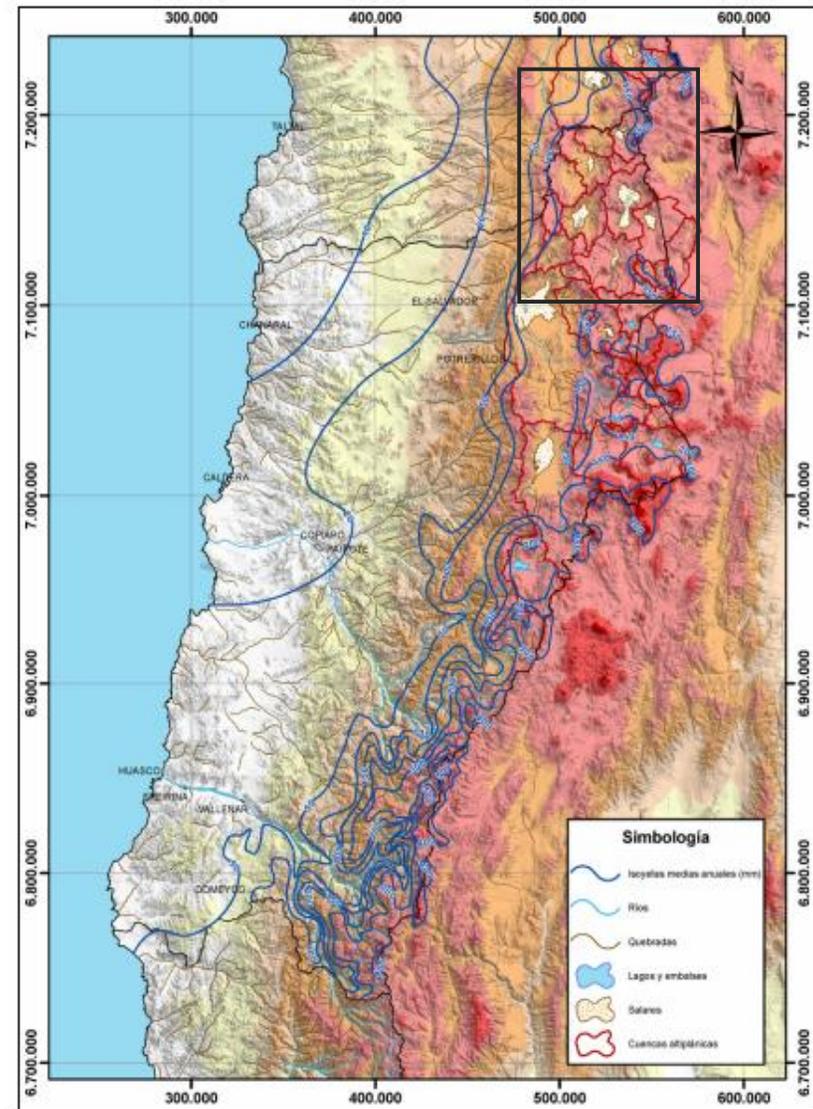
8.4 Anexo D: Metodología estimación precipitación anual

Resumen metodología aplicadas para la estimación de la precipitación media de la cuenca del Salar de La. Isla.

Estudio	N° de estaciones pluviométricas	N° de estaciones evaporimétricas	Metodología
B. Hídrico Chile (1987)	718 distribuidas en todo el territorio nacional.	139 distribuidas en todo el territorio nacional, siendo la estación Poterillos la más cercana al área de estudio a más de 100 km.	Trazado de mapas de isolíneas de precipitación o isoyetas (1:500.000) e isolíneas de evaporación a partir de estación con medición de evaporación de tanque clase A (1:1.000.000).
DICTUC (2009)	168 ubicadas en territorio chileno, argentino y boliviano.		Trazado de mapas de isolíneas de precipitación o isoyetas, con previo relleno de series de meses incompletos.
Aquaterra (2013)	11 estaciones pluviométricas que presentan información de precipitaciones anuales para cada estación, con 10 años de registro.	4 estaciones que cuentan con 10 años de registro.	Generación de un manto de precipitaciones anuales a partir de las isoyetas del Estudio Balance Hídrico (DGA) y la red de estaciones pluviométricas con información de precipitaciones anual, y en el caso de la evaporación a partir de las isolíneas de Evaporación de Tanque del Estudio Balance Hídrico (DGA) y la red de estaciones evaporimétricas con información de evaporación anual. Con los mantos se procede a la intersección con la cuenca en estudio, y cálculos de las estadísticas solo para esta zona.
II Región ARCADIS (2015)	s/i	s/i	s/i
Huasco ARCADIS (2015)	s/i	s/i	s/i
ARCADIS (2015)	s/i	s/i	s/i
Isoyetas (Amphos 21, 2016)	15 públicas y privadas con 5 años de registro en promedio		Método de Isoyetas a partir de registros meteorológicos en cuencas cercanas, junto con los resultados de cada una de las cuencas de los estudios anteriores en el sector (DGA, 1987; DICTUC, 2009; DGA-Aquaterra, 2013; DGA-Arcadis, 2015).

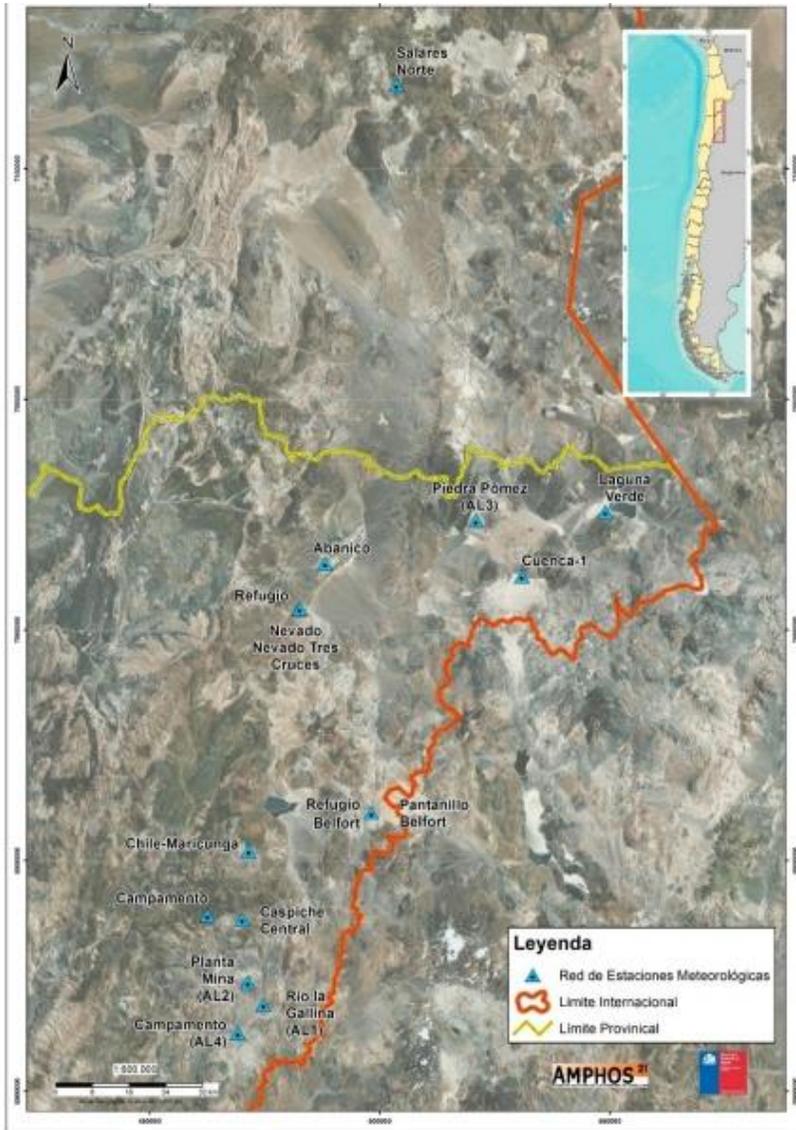


a)

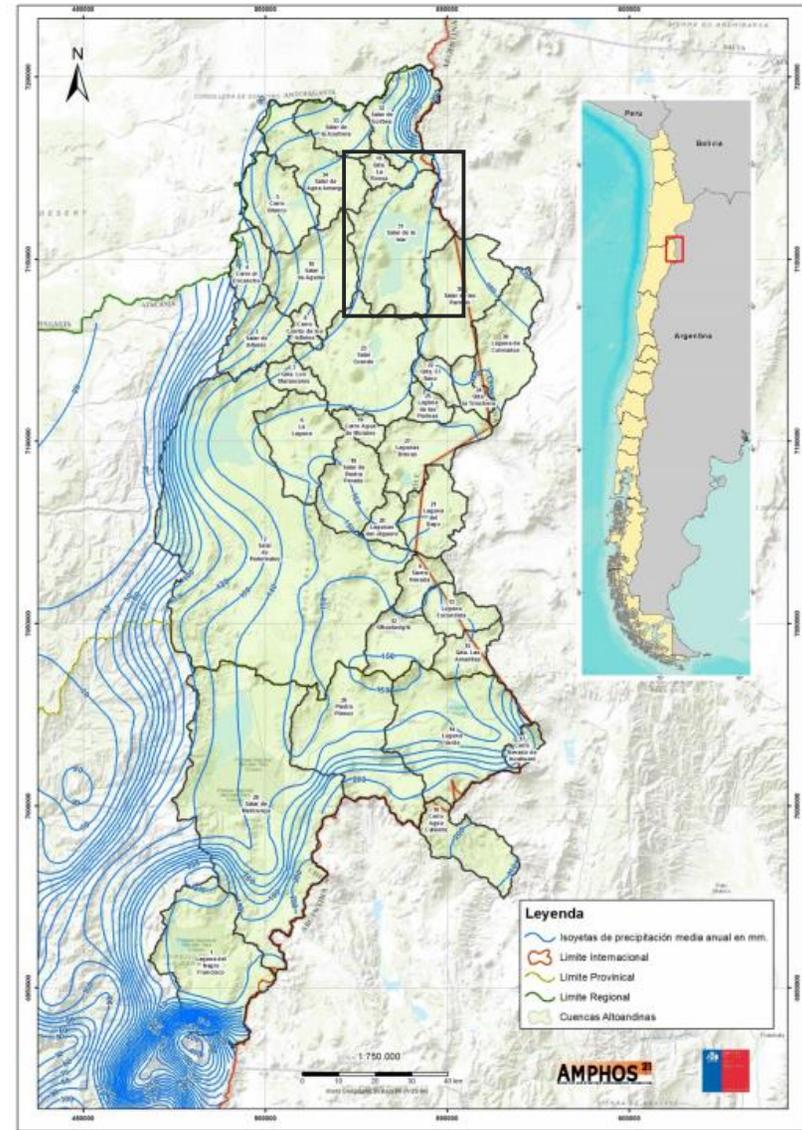


b)

a) Distribución estaciones seleccionadas para la construcción de las isoyetas en el estudio elaborado por DICTUC, 2009. b) Isoyetas generadas. En el recuadro área de estudio.



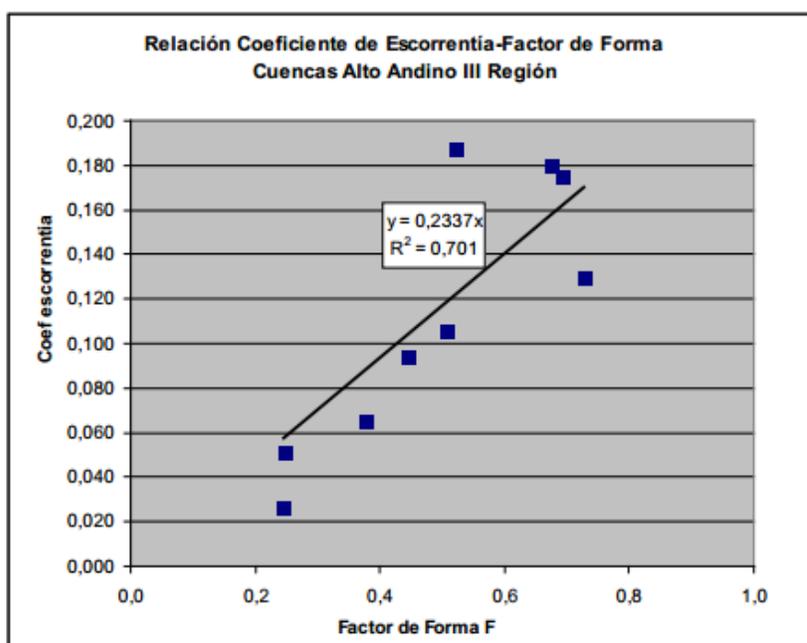
a)



b)

a) Distribución estaciones para la construcción de isoyetas, elaboradas por Amphos 21, 2016. b) Isoyetas generadas. En el recuadro área de estudio.

8.5 Anexo E: Metodología estimación escurrimiento



Correlación coeficiente de escorrentía y el factor de forma de una cuenca Aquaterra (2013).

8.6 Anexo F: Estimación coeficiente de infiltración a partir condiciones de permeabilidad

Valores del coeficiente de infiltración (CI) en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas.

Permeabilidad cualitativa	CI
Alta	0,30
Media a Alta	0,25
Media	0,20
Media Baja	0,15
Baja	0,10
Muy Baja	0,05

DICTUC (2009) a partir de Xu et al. (2005) y Wang et al. (2008).

8.7 Anexo G: Metodología estimación evaporación

Valores de Kc según unidad vegetacional en bofedal tipo.

Unidad	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Kpromedio	Área [KM2]	K promedio*área
Cojines	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,467	2,467
Transición 1	0,83	0,80	0,78	0,80	0,80	1,211	0,972
Vega 1	0,76	0,69	0,58	0,69	0,68	-	0,000
Transición 2	0,60	0,52	0,35	0,52	0,50	0,768	0,382
Vega 2	0,50	0,42	0,24	0,42	0,40	0,842	0,333
TOTAL						5,288	4,153

8.8 Anexo H: Observaciones de campo

8.8.1 Descripción macroscópica muestra costra salina

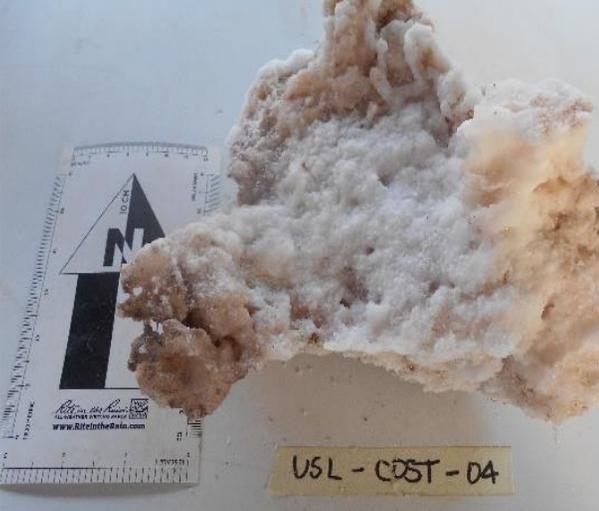
Descripción macroscópica muestra costra salina campaña terreno 2018.

Código	Descripción	Afloramiento	Muestra
USL-COST-01	Yeso cristalino cubierto por sedimentos clásticos muy finos, formando una intercalación con los mismos, desarrollo de cavidades. Sin evidencia de halita. Yeso cristalino con textura especular, con brillo perlado, clivaje de 120°. Además, yeso masivo con brillo opaco y terroso. Internamente se observan líneas grises. Porosidad primaria asociada al componente arenoso fino.		
USL-COST-02	Halita cubierta de una capa de finos. Halita cristalina, brillo vítreo. Halita masiva blanquecina. Halita cubriendo de forma globular sedimentos arenosos. Patina de sustancia calipso. Porosidad asociada al componente clástico.	 <p data-bbox="533 1271 1276 1318">Área achurada en cuadrillé, costra de halita, área achurada en diagonal costra de yeso</p>	

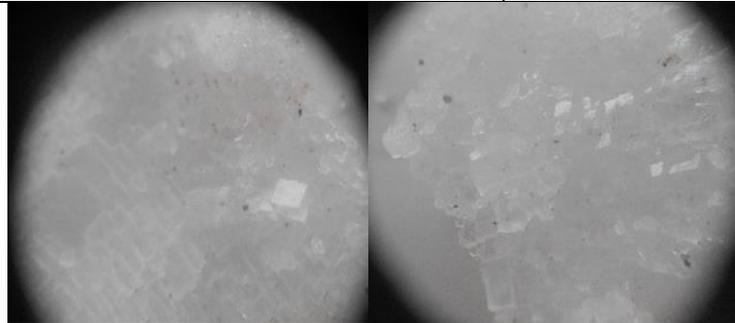
			
<p>USL-COST-03</p>	<p>Principalmente halita, con una leve cubierta arcillosa blanca, halita de forma cristalina y masiva, presenta desarrollo de cavidades. En su parte inferior se reconoce un componente clástico, de tonalidad rosada ya naranjada. Evidencia de actividad orgánica</p>		
			

Lupa 10x

Lupa 10x

<p>USL-COST-04</p>	<p>Principalmente halita de aspecto masivo y menor desarrollo de cavidades, y menor fracción clástica.</p>		 <p>Lupa 10x</p> 
<p>USL-COST-05</p>	<p>Relleno de calicata, bajo costra salina y grietas de desecamiento. Halita primatica de hábito</p>	<p>Área achurada en cuadrille espaciada halita formando grietas poligonales, área achurada cuadrille fino halita arcillosa clástica</p>	

cubico. Saturada en agua, evidencia de humedad. Menor porcentaje de impurezas clásticas.



Lupa 10x

8.8.2 Descripción puntos de muestreo hidroquímico campaña terreno 2018

Descripción puntos de muestreo hidroquímico campaña terreno 2018

Estación	Código	Coordenadas UTM		Altura (msnm)	Fecha	Tipo de muestra	Cel (mS/cm)	T°C	pH	ρ (g/ml)	Observaciones
		Norte	Este								
Manantial en centro E	USL-01	7155066	543588	3964	09-01-2018	Vertiente	23,07	17,3	7,74	-	Dentro de un sistema vegetacional con al menos 7 de corriente y 4 difusos, evidencia de disolución de halita. Relación con unidades PH1a, MPv(a) y MPv(e). Surgencia vertical. Medición de caudales en vertientes y riachuelo en que convergen
Humedal	USL-02	7162680	536516	3957	09-01-2018	Vertiente	22,3	26,4	7,83	-	Vertiente relacionada a un sistema vegetacional, presenta una alta temperatura, relacionar con sistemas de alteración hidrotermal. Relación con unidades MPv(a) y MPv(b)
Laguna en abanico aluvial	USL-03	7161082	537533	3962	09-01-2018	Laguna	98,9	19,15	8,15	-	Parte de varias lagunas pequeñas alineadas en el frente del gran abanico aluvial del noreste. En su parte más distal, evidencia de infiltraciones desde la unidad aluvial. Altura de algunos 5 cm. Presencia de vegetación en el borde que está en contacto con los depósitos aluviales.
Manantiales al este de un abanico	USL-04	7159634	541346	3960	10-01-2018	Vertiente	47,48	13,4	7,5	1,024	Parte de un sistema de vertientes, que convergen en riachuelo y finaliza en una laguna. Relación con unidad MPv(a). En general de baja temperatura. Medición de caudales en vertiente y riachuelo
Riachuelo hacia laguna	USL-05	7159548	541355	3961	10-01-2018	Riachuelo	65,85	22,3	7,74	1,032	
Laguna	USL-06	7155028	543316	3964	10-01-2018	Laguna	190,4	17,3	6,67	1,224	Película de agua de al menos 3cm en su borde, al centro de la laguna se observan niveles más profundos. Fondo superficial fangoso, a mayor profundidad arenoso y gravoso. Borde laguna correspondiente a una cubierta de halita varía desde halita poligonal a masiva
Riachuelo	USL-07	7155063	543515	3959	10-01-2018	Riachuelo	66,4	26	7,76	1,056	Convergencia de manantiales entre ellos USL-01, que termina en USL-05
Laguna borde camino	USL-08	7149072	537515	3959	10-01-2018	Laguna	199,3	24,1	6,68	1,216	Se observa aporte de agua difusos bajo y/o desde película de costra salina, al menos 4, formando una pequeña laguna
Laguna amarilla	USL-09	7143677	537812	3964	10-01-2018	Laguna	184,7	20,4	7,57	1,176	Película de agua de baja altura unos 3 cm, base arcillosa fangosa blanca, con evidencia de saturación. Evidencia de actividad orgánica y biológica, con avistamiento de caitís.
Laguna roja	USL-10	7142592	537853	3963	10-01-2018	Laguna	208,9	22,5	7,76	1,136	Desarrollo de laguna colorada bajo un nivel base de costra salina. En su borde oriental existe un paredón de al menos un metro. Base lagunas, fangosa. Gran actividad biológica, avistamiento de flamencos
Calicata próxima a pozo SLI-23	USL-11	7147354	533969	3957	11-01-2018	Calicata	220/173	12,4	6,95	1,208	A unos 10 metros del borde del salar, no se observa afloramientos de agua visible solo una delgada lámina sobre costra salina, por lo que se desarrolla una calicata de 0,5 m de profundidad, con relleno halita cristalina y nivel somero del nivel estático. Rápida infiltración de la perforación
Manantial*	USL-12	7149044	534631	3960	11-01-2018	Vertiente	30-40	14,7	7	1,028	Acceso mediante perforación manual, alcanzando una profundidad de 15 cm. Rápida infiltración y llenado, nivel de agua 0,1 mbnt. Surgencia lateral
Perforación sobre costra salina	USL-13	7149031	534634	3959	11-01-2018	Calicata	200/240	20,2	6,76	1,22	Perforación manual de costra salina de poco espesor, ubicada a unos 10 metros de USL-12, adentrado al salar. Nivel somero de agua.
Perforación acceso manantial	USL-14	7145347	531649	3961	11-01-2018	Vertiente	44,03	14,1	7,48	1,016	Perforación manual del manantial, dentro de un gran sistema vegetacional. Inter digitación con unidad MPv(c), nivel de agua 0,1 mbnt
Interior laguna	USL-15	7145069	532233	3960	11-01-2018	Laguna	190	23,9	7	1,22	Laguna terminal de las vertientes USL-14, de baja altura base cristalina, con desarrollo de polígonos
Manantial junto a MPv(c)	USL-16	7145540	531983	3962	11-01-2018	Vertiente	12,84	12,8	6,68	1,008	Desarrollo de vertiente al costado de un megabloque de la unidad MPv(c), con evidencia de vegetación y actividad orgánica intensa. Acceso mediante perforación, menor rapidez de llenado e infiltración, nivel estático somero.

USL-01



Sector achurado en celeste riachuelo y laguna, sector achurado en rosado vertientes.

USL-02





USL-03

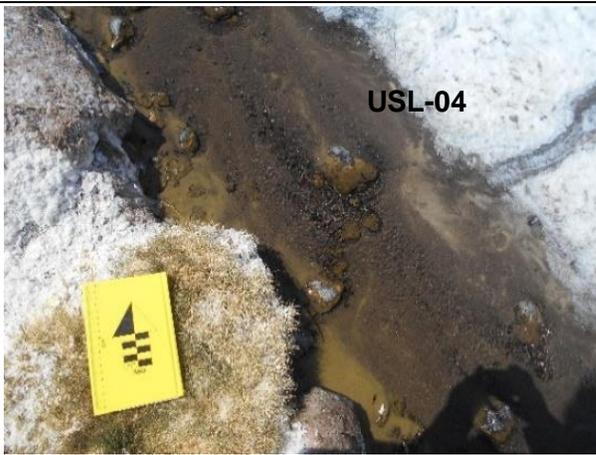


En achurado laguna muestreada

USL-04/ USL-05



Zona muestreada, ubicada al noreste



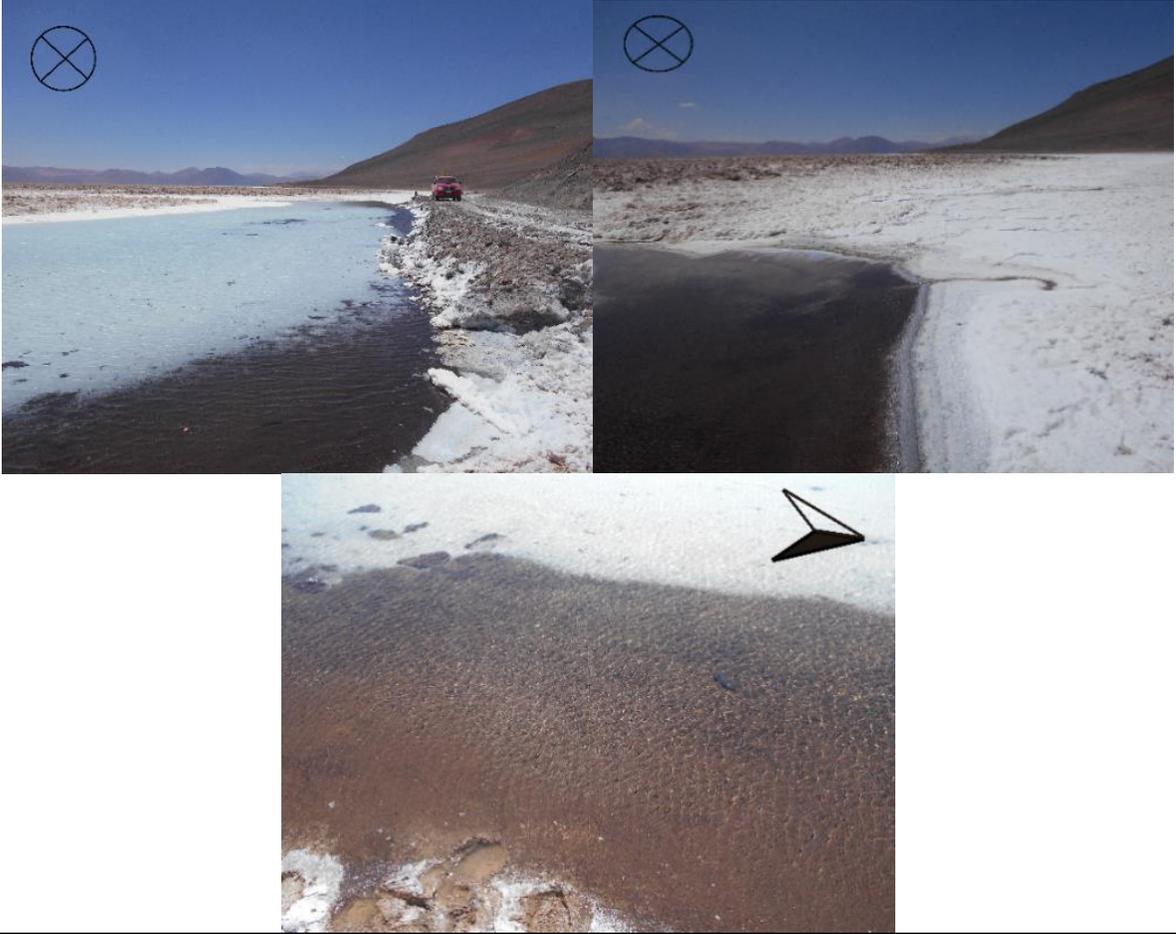
USL-06/ USL-07



Zona muestreada, ubicada al noreste, afloramiento de vertientes, formación de canal y laguna.



USL-08



USL-09



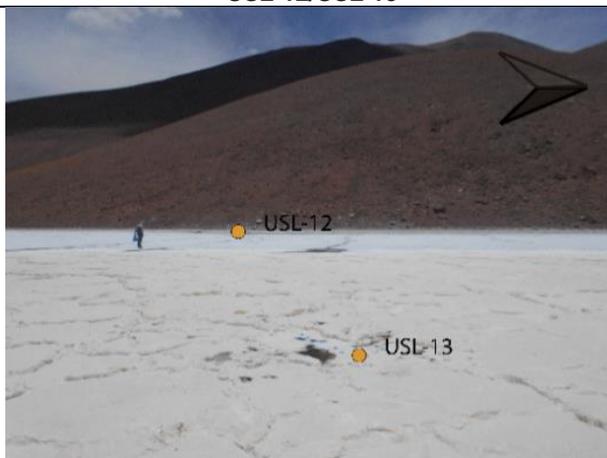
USL-10



USL-11



USL-12/USL-13





USL-14/USL-15



USL-16



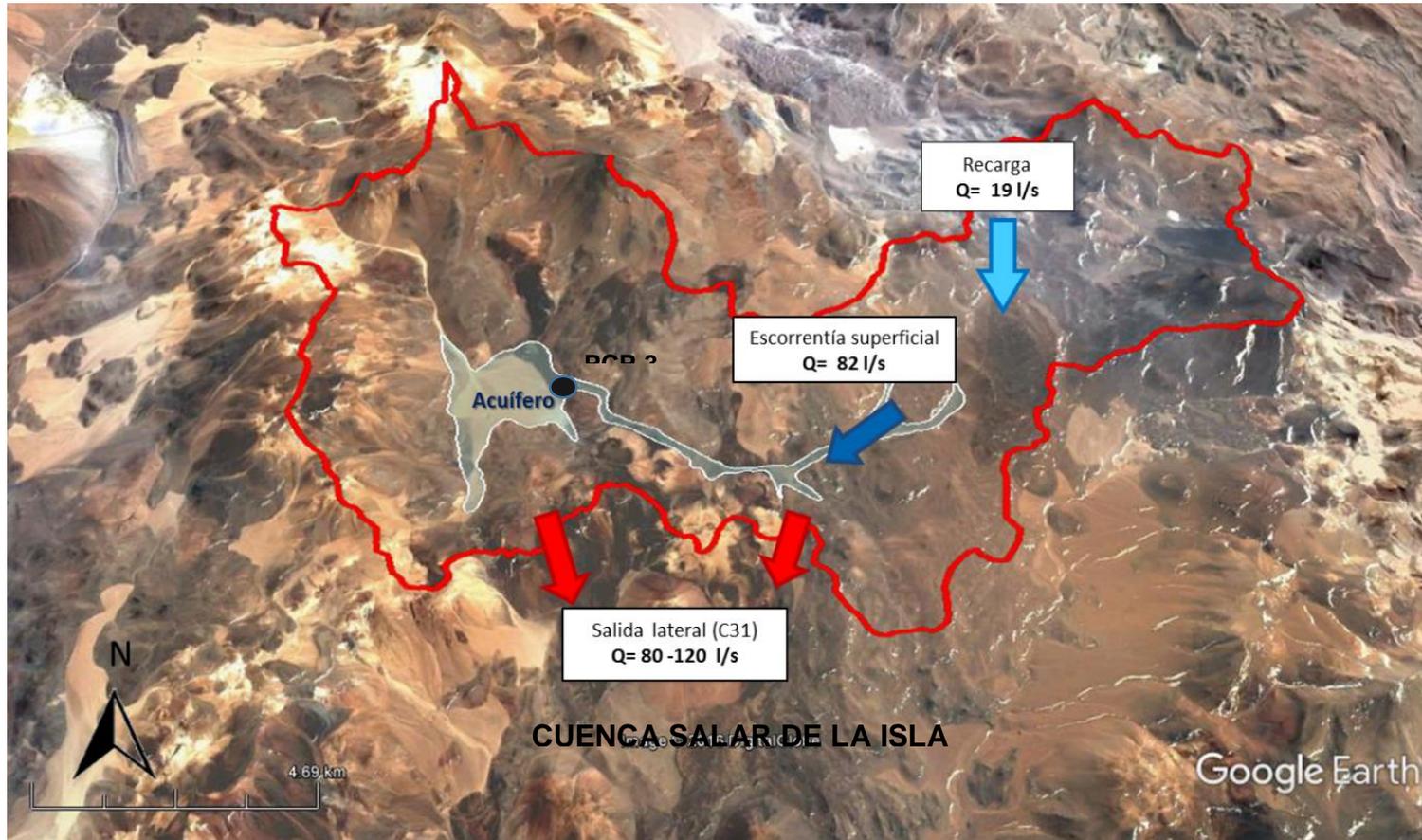
8.8.3 Medición de caudales in situ

Medición de caudales en L/s.

Sector	Observaciones	Sección (m ²)	Velocidad (m/s)	Caudal 1(L/s)	Sección (m ²)	Velocidad (m/s)	Caudal 2(L/s)
Vertiente USL-01	En el área se observan alrededor de 7 manantiales de corriente y 4 difusos	0,005	0,117	0,56	0,018	0,125	2,25
Vertiente USL-02	En el área se observan alrededor de 12 manantiales de corriente, y se estima un caudal de 4,8 Litros/s	0,015	0,267	4			
Vertiente USL-04	Se observan alrededor de 12 manantiales	0,01	0,1	0,96			
Riachuelo USL-07	Sector de confluencia de manantiales que forma una laguna	0,033	0,133	4,4			
Riachuelo entre USL-14 y USL-15	Sector de confluencia de manantiales que forma una laguna	0,024	0,135	3,24			

8.9 Anexo I: Cuenca Quebrada La Rossa

8.9.1 Esquema del balance hídrico preliminar de la cuenca Qda. La Rossa



Esquema del balance hídrico preliminar de la cuenca Qda. La Rossa (Amphos 21, 2016).

8.9.2 Piezometría y química cuenca Quebrada La Rossa

Información piezométrica de la cuenca Quebrada La Rossa desarrollada por Amphos 21.

Nombre	Este	Norte	Elevación (msnm)	Propietario	Cota piezométrica (msnm)	Nivel de agua estático (m)	Caudal derechos (L/s)	H de referencia del pozo (m)	Fecha medición nivel de agua
CPB-1	530628,6	7172743,7	4236,0	Cerro Pudiera S.A - MEL	4172	51,26	55,00	0,83	12-03-2016
CPB-2	536478,0	7171557,0	4303,0	Cerro Pudiera S.A - MEL	4144	134,80	8,00	0,69	12-03-2016
CPX-1	531183,8	7174233,0	4230,0	Cerro Pudiera S.A	4171	53,26		0,40	25-09-2016
CPX-1B	531521,1	7173878,1	4225,0	Desconocido				0,46	25-09-2016
CPX-3	539752,9	7173046,2	4373,0	Cerro Pudiera S.A	4155	215,89		0,50	25-09-2016
CPX-5	536429,8	7171510,6	4284,0	Cerro Pudiera S.A	4147	135,08		0,41	25-09-2016
CPX-5a	534662,6	7171858,0	4271,0	Cerro Pudiera S.A	4165	105,83		0,58	21-03-2006
CPX-6	538496,0	7173867,0	4370,0	Cerro Pudiera S.A	4161	194,07		1,05	05-03-2016
PCB-2	531814,0	7173322,0	4228,0	MEL	4171	45,09		0,59	12-03-2016
PCP-3	533166,0	7172780,0	4230,0	MEL	4174	47,11		0,71	12-03-2016
PPCP-2	531919,0	7172992,0	4228,0	MEL	4174	42,54	80,00	0,65	12-03-2016
PPCP-3	533140,0	7172821,0	4220,0	MEL	4174	47,36	9,50	0,58	12-03-2016

Química muestra pozo PCP-3, tomado el 12-03-2016 por Amphos 21.

T TR °C	11,1	Mg SOL mg/L	7,0		
CE TR µs/cm	532	Na SOL mg/L	110,0		
TSD TR mg/L	266	Ag TOT mg/L	<0,05	Ni TOT mg/L	<0,009
pH TR	9,2	Al TOT mg/L	0,1	Pb TOT mg/L	<0,050
ALC.HCO3 mg/L	120	As TOT mg/L	1,6	Se TOT mg/L	<0,0050
CE LAB µs/cm	677	B TOT mg/L	2,3	Li TOT mg/L	0,6
pH LAB	8,3	Ba TOT mg/L	0,0	V TOT mg/L	<0,05
TSD TOTAL mg/L	555,5	Be TOT mg/L	<0,002	Zn TOT mg/L	<0,30
HCO3 mg/L	146,4	Ca TOT mg/L	29,4	δD H2O ‰	-26,5
Cl SOL mg/L	22,2	Co TOT mg/L	<0,001	δ18O H2O ‰	2,6
F SOL mg/L	1,6	Cr TOT mg/L	<0,050	Error (%)	2,10
SO4 SOL mg/L	175,0	Fe TOT mg/L	<0,30		
CO3 SOL mg/L	0,0	Hg TOT mg/L	<0,0010		
Ca SOL mg/L	17,8	Mn TOT mg/L	<0,050		
K SOL mg/L	22,0	Mo TOT mg/L	<0,01		

Índices hidrogeoquímicos muestra cuenca Quebrada La Rossa

Índice		Interpretación
rK/rNa	0,117	Relativamente alto en la zona, comparable con la muestra USL-03, aunque con una salinidad menor, asociado a un menor tiempo de residencia.
rMg/rCa	0,65	Ca como catión dominante, similar relación a muestras superficiales zona norte del Salar de La Isla.
rSO4/rCl	5,83	Valores que difieren de las muestras del Salar de La Isla, indicando un menor grado de evolución.
rCl/rHCO3	0,26	
icb	-7,55	Valor negativo relacionado a terrenos ígneos
Kr	1,72	Relativamente bajo puede indicar precipitación de HCO ₃

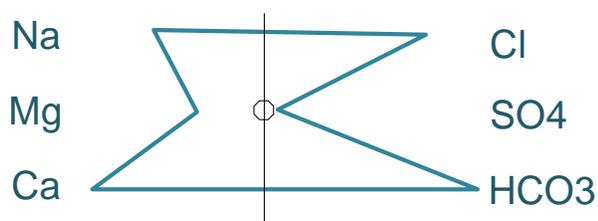
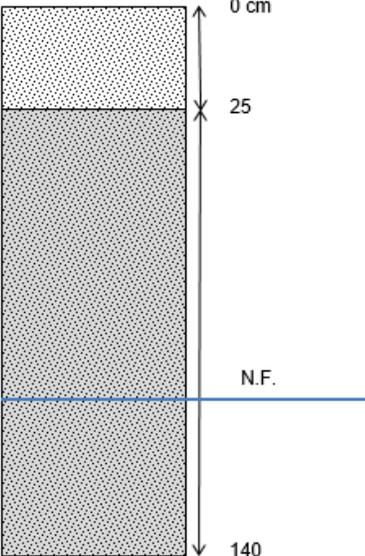


Diagrama Stiff muestra cuenca Quebrada La Rossa.

8.10 Anexo J: Detalle instalación de lisímetros en el Salar de La Isla

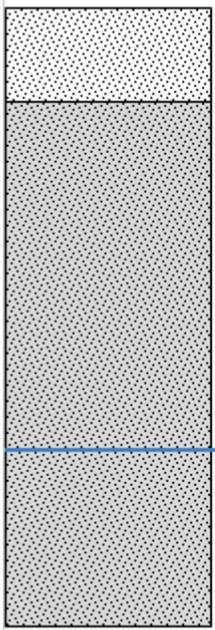
Características Lisímetro ISL-1.

CARACTERÍSTICAS LISÍMETRO			ISL-1		Fecha construcción	
					abr-16	
Ubicación Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 19J (m), Cota (msnm)						
Este	537.256	Norte	7.161.378	Zt	3966	
						

Descripción Estratigráfica			ISL-1	
Columna esq.	Profundidad	Color	Descripción litológica	
	0 cm	Marrón con algún tono blanco	Arenas gravosas. Clastos de rocas ígneas recubiertas de evaporitas. Capa inicial de evaporitas.	Según cartografía preliminar de suelos del salar se asocia a tipo de suelo Salino-Clástico
	25	Marrón	Arenas gravosas con alguna grava y de clastos de rocas ígneas. Según se profundiza la humedad se hace mayor, encontrando el nivel freático a los 100 cms de la excavación. Taludes estables.	
	N.F.			
	140			

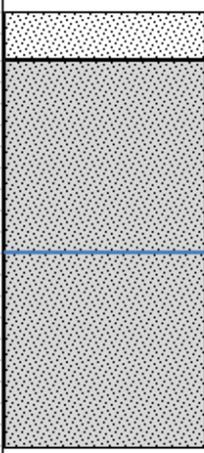
Características Lisímetro ISL-2.

CARACTERÍSTICAS LISÍMETRO			ISL-2		Fecha construcción	
					abr-16	
Ubicación Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 19J (m), Cota (msnm)						
Este	538.142	Norte	7.160.652	Zt	3969	
						

Descripción Estratigráfica			ISL-2	
Columna esq.	Profundidad	Color	Descripción litológica	
	0 cm	Marrón con tonalidades blancas	Arenas gravosas de color blanco y marrón. Clastos de rocas ígneas recubiertas de evaporitas. Capa inicial de evaporitas.	Según cartografía preliminar de suelos del salar se asocia a tipo de suelo Salino reciente
	20	Marrón con tonalidades blancas y verdes		
	N.F.			
	140			

Características Lisímetro ISL-3.

CARACTERÍSTICAS LISÍMETRO			ISL-3	Fecha construcción	
				abr-16	
Ubicación Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 19J (m), Cota (msnm)					
Este	543.483	Norte	7.155.766	Zt	3967
					

Descripción Estratigráfica			ISL-3	
Columna esq.	Profundidad	Color	Descripción litológica	
	0 cm	Blanco-marrón	Arcillas con restos evaporíticos en la superficie.	Según cartografía preliminar de suelos del salar se asocia a tipo intermedio a suelos próximos al núcleo Salar y clástico.
	10	Marrón	Arcillas con halita y silvita, costras evaporíticas. Nivel freático a 55 cms. Suelo muy duro a partir del metro de profundidad. Paredes estables.	
	N.F.			
	100			

8.11 Anexo K: Descripción calicata, estudio edafológico desarrollado por el proyecto 7 salares

Para esta unidad, el entorno tiene una inclinación promedio menor al 10% y levemente cóncava; el microrelieve se caracteriza por moderadas ondulaciones con erosión hídrica no aparente y erosión eólica leve, posiblemente por la ausencia de cubierta vegetal.

Los suelos son delgados, casi plano, con alta pedregosidad a lo largo del perfil, con piedras de hasta 12 cm en los horizontes más profundos; con ausencia de niveles freáticos mayores al metro de profundidad. Suelo estratificado, conformando estructuras de bloques subangulares, de coloraciones pardo rojizo claro a negro, a lo largo del perfil, tanto en húmedo como en seco. Las texturas varían de francas a arenosas, cuyas estructuras son muy friables en todo el perfil.



Vista del área de estudio y perfil de calicata C_1.

A continuación, se describe la calicata estudiada:

- Localización UTM: 539847 (E) 7160734 (N)
- Sector: Campamento exploraciones
- Posición: Pie de monte
- Pendiente: Menor al 10%

Características físicas y morfológicas del Pedón C_1.

Profundidad (cm)	
0 - 10 C1	Color en húmedo pardo rojizo oscuro 5YR 3/4, en seco pardo rojizo claro 5YR 6/3. Estructura de bloques subangulares de 2 cm, con poca resistencia a la penetración, de textura franco arenoso, con gravas angulares a subangulares de 3 cm ocupando el 20% del horizonte, muy friable, poco adhesivo, poco plástico, con muy poca reacción al HCl. Límite inferior lineal claro.
10 - 33 CA	Color en húmedo pardo rojizo oscuro 5YR 3/4, en seco pardo rojizo oscuro 5YR 3/3. Estructura de bloques redondeados de 1 cm sin resistencia a la penetración, de textura arena limosa, presencia de gravas subangulares (70%) de 0.3 a 1 cm, demasiado friable, levemente adhesivo y no plástico, no reactivo al HCl. Presencia de raicillas finas de 1 mm de diámetro en el 3% del perfil. Límite inferior lineal claro.
33 - 56 C2	Color en húmedo pardo rojizo oscuro 5YR 3/3, en seco gris rojizo oscuro 5YR 4/2. Estructura formada por bloques angulares de 0.5 cm, sin resistencia a la penetración, de textura arenosa, presencia de grava (85%) de 0.6 a 1.5 cm de forma subangular, demasiado friable, muy poco adhesivo y no plástico, no reactivo al HCl. Límite inferior lineal abrupto.
56 - 66 C3	Color en húmedo negro 5YR 2.5/1, en seco gris rojizo oscuro 5YR 4/2. Estructura de bloques redondeados de 1 cm, de textura arenosa, poco resistente a la penetración, con grava (30%) de 0.6 cm redondeada, friable, poco adhesivo y no plástico, no reactivo al HCl. Horizonte caracterizado por presentar vetas horizontales de color negro 5YR 2.5/1. Límite inferior lineal claro.
66 - 90 CR	Color en húmedo pardo rojizo oscuro 5YR 3/3, en seco gris rojizo oscuro 5YR 4/2. Estructura de bloques subangulares de 2 cm, de textura arenosa, con poca resistencia a la penetración, con grava (85%) de 12 cm redondeada a subangular, friable, poco adhesivo y no plástico, no reactivo al HCl. Límite lineal abrupto.
90 + C4	Color en húmedo negro 5YR 2.5/1, en seco pardo rojizo oscuro 5YR 2.5/2. Estructura de bloques redondeados de 1 cm, de textura arenosa, levemente resistente a la penetración, con grava (15%) de 0.3 cm redondeada, friable, poco adhesivo y no plástico, no reactivo al HCl. Horizonte caracterizado por presentar vetas horizontales de color negro 5YR 2.5/1.

8.12 Anexo L: Catastro de pozos

Catastro de pozos ubicado en la cuenca del Salar de la Isla.

Nombre	BAX-1	CPB-3	CPX-2
X (wgs_84)	532240,0	532004,0	542070,4
Y (wgs_84)	7168882,0	7168221,0	7171163,1
Elevación (msnm)	4233,0	4244,0	4449,0
Uso de punto	Piezómetro	Pozo	Piezómetro
Propietario	Cerro Pudiera S.A	Cerro Pudiera S.A - MEL	Cerro Pudiera S.A
Cota piezométrica (msnm)	4057	4054	4249
Nivel de agua estático (m)	159,12	161,06	195,29
Caudal derechos (L/s)		40,00	
H de referencia del pozo (m)	0,81	0,81	0,35
Fecha medición nivel de agua	12-03-2016	12-03-2016	25-09-2016
Profundidad perforación (m)	402,0	382,5	286,0
Profundidad habilitación (m)	402,0	379,8	286,0
Fecha construcción del pozo	03-2006	05-2006	02-2006
Constructor del pozo	Terra Service Ltda	Geotec Boyles Bros	Rock Drilling
Comentario			Airlift: 0,8 L/s (250 mbnt) y 1 L/s (286 mbnt)

Catastro de pozos ubicado en la cuenca Quebrada La Rossa.

Nombre	CPB-1	CPB-2	CPX-1	CPX-3	CPX-5	CPX-5a	CPX-6	PCB-2	PCP-3	PPCP-2	PPCP-3
X (wgs_84)	530628	536478	531183	539752	536429	534662	538496	531814	533166	531919	533140
Y (wgs_84)	7172743	7171557	7174233	7173046	7171510	7171858	7173867	7173322	7172780	7172992	7172821
Elevación (msnm)	4236,0	4303,0	4230,0	4373,0	4284,0	4271,0	4370,0	4228,0	4230,0	4228,0	4220,0
Uso de Punto	Pozo	Pozo	Piezómetro						Pozo	Pozo	
Propietario	Cerro Pudiera S.A - MEL		Cerro Pudiera S.A				MEL				
Cota piezométrica (msnm)	4172	4144	4171	4155	4147	4165	4161	4171	4174	4174	4174
Nivel de agua estático (m)	51,26	134,80	53,26	215,89	135,08	105,83	194,07	45,09	47,11	42,54	47,36
Caudal derechos (l/s)	55,00	8,00								80,00	9,50
H de referencia del pozo (m)	0,83	0,69	0,40	0,50	0,41	0,58	1,05	0,59	0,71	0,65	0,58
Fecha medición nivel de agua	12-03-2016	12-03-2016	25-09-2016	25-09-2016	25-09-2016	21-03-2006	05-03-2016	12-03-2016	12-03-2016	12-03-2016	12-03-2016
Profundidad perforación (m)	373,0	374,0	300,0	412,0	294,0	450,0	300,0	S/I	S/I	S/I	S/I
Profundidad habilitación (m)	373,7	370,5	300,0	412,0	294,0	450,0	300,0	S/I	S/I	S/I	S/I
Diámetro habilitación/perforación (in)	14	14	2	2	2	2	2	2	2	12 1/2.	12 1/2.
Fecha construcción del pozo	03-2006	04-2006	01-2006	03-2006	01-2006	03-2006	01-2006	S/I	S/I	11-2009	S/I

8.13 Anexo M: Metodología de muestreo de agua

En primer lugar, se procede a la calibración de los instrumentos de medición in situ, los equipos Hanna HI98191 y HI98192, multiparámetros de mayor rango de validez, su calibración se realiza con fecha 8 de enero, la siguiente tabla detalla su procedimiento:

Instrumento	Valor medición previo calibración	Solución calibración conductividad	Valor medición posterior calibración
Hanna HI98192	13.350 $\mu\text{S}/\text{cm}$	12.880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25 °C	12.882 $\mu\text{S}/\text{cm}$

De igual manera se procede a la calibración de los multiparámetros Hanna HI 98129 y HI 98130, tanto para valores de pH y conductividad, obteniendo los siguientes datos:

Instrumento	Valor medición previo calibración	Solución calibración	Valor medición posterior calibración
Hanna HI 98129	-	pH 4	pH 3,99
Hanna HI 98130	-	pH 7	pH 7,01
Hanna HI 98129	14.700 $\mu\text{S}/\text{cm}$	12.880 $\mu\text{S}/\text{cm}$	12.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Hanna HI 98130	11.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	12.880 $\mu\text{S}/\text{cm}$	12.889 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Con la calibración de los equipos en terreno se realiza la medición de los parámetros fisicoquímicos; temperatura, conductividad eléctrica y pH. Con la información medida in situ se determina la metodología del muestreo y además el tratamiento previo al análisis químico de laboratorio, en general se ambienta tres veces el jarro de llenado y las botellas de almacenamiento, siendo botellas de 1 litro para el análisis de elementos mayores y botellas de 125 ml para el análisis de elementos traza, isótopos de H y O, e isótopos de S. Si se trata de agua dulce, con conductividades menores a 25 mS/ cm, para los elementos traza el agua muestreada previamente se filtra y se acidifica con 6 ml de HNO₃ diluido al 30%. Las muestras para isótopos de azufre 34 se realiza solo para manantiales.

Obtenidas y registradas las muestras para cada punto de control, el muestreo finaliza con el etiquetado de cada una de las botellas con su respectivo código, fecha y hora de obtención, sumado al tipo de análisis que se le realizara y si presenta un tratamiento previo, tras esto se sella con cinta de embalaje para que no se borre, y se guardan en coolers durante el día fuera del alcance de la luz y a bajas temperaturas, y se refrigeran una vez en el campamento.

Cabe destacar que, tras cada medición de los parámetros, el jarro y los equipos son lavados con agua destilada y secadas con papel absorbente para luego ser guardados y vueltos a utilizar.

Terminada la campaña de terreno la totalidad de las muestras se trasladan vía terrestre al laboratorio, previo embalaje dentro de los coolers, a modo de evitar el derrame y la luz, y asegurar temperaturas bajas.

8.13.1 Especificaciones de equipos

Especificaciones equipo HI 98192.

	Descripción
EC Rango	.001 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 400 mS/cm con compensación de temperatura (conductividad real 1000 mS/cm) 0.001 a 9.999 $\mu\text{S}/\text{cm}^*$; 10.00 a 99.99 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 100.0 a 999.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 1.000 a 9.999 mS/cm ; 10.00 a 99.99 mS/cm ; 100.0 a 1000.0 mS/cm (EC real) (autorango)
EC Resolución	0.001 $\mu\text{S}/\text{cm}^*$; 0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 0.001 mS/cm ; 0.01 mS/cm ; 0.1 mS/cm
EC Precisión	$\pm 1\%$ de lectura ($\pm 0.01 \mu\text{S}/\text{cm}$ o 1 dígito, el que sea mayor)
Resistividad Rango	1.0 a 99.9 ohms; 100 a 999 ohms; 1.00 a 9.99 Kohms; 10.0 a 99.9 Kohms; 100 a 999 Kohms; 1.00 a 9.99 Mohms; 10.0 a 100.0 Mohms (autorango)
Resistividad Resolución	0.1 Ohm; 1 Ohm; 0.01 KOhms; 0.1 KOhms; 1 KOhms; 0.01 MOhms; 0.1 MOhms
Resistividad Precisión	$\pm 1\%$ de lectura (± 10 ohms o 1 dígito, el que sea mayor)
TSD Rango	0.00 a 99.99 mg/L (ppm); 100.0 a 999.9 mg/L (ppm); 1.000 a 9.999 g/L (ppt); 10.00 a 99.99 g/L (ppt); 100.0 a 400.0 g/L (ppt) (autorango)
TSD Resolución	0.01 mg/L (ppm); 0.1 mg/L (ppm); 0.001 g/L (ppt); 0.01 g/L (ppt); 0.1 g/L (ppt)
TSD Precisión	$\pm 1\%$ de lectura ($\pm 0.05 \text{mg}/\text{L}$ (ppm) o 1 dígito, el que sea mayor)
NaCl Rango	%: 0.0 a 400.0%; escala de agua de mar: 0.00 a 80.00 (ppt); salinidad práctica: 0.01 a 42.00(PSU)
NaCl Resolución	0.1%; 0.01
NaCl Precisión	$\pm 1\%$ de lectura
Temperatura Rango	-20.0 a 120.0°C
Temperatura Resolución	0.1°C
Temperatura Precisión	$\pm 0.2^\circ\text{C}$ (excluyendo error de sonda)
Calibración EC	automático hasta 5 puntos con 7 estándares memorizados (0.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 84.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1.413 mS/cm , 5.00 mS/cm , 12.88 mS/cm , 80.0 mS/cm , 111.8 mS/cm)
Calibración NaCl	un punto solo en rango de % (con HI 7037 estándar); usar calibración de conductividad para todos los demás rangos
Calibración Temperatura	uno o dos puntos
Compensación de temperatura	-20.0 a 120.0°C
Temperatura de referencia	15°C, 20°C y 25°C
Coefficiente de temperatura	0.00 a 10.00 $\%/^\circ\text{C}$
Factor TSD	0.40 a 1.00
Sonda	Sonda HI 763133 de TSD/conductividad de cuatro anillos en platino con sensor de temperatura interno y cable de 4m (13.1') (incluido)
Registro por demanda	400 muestras
Registro por lotes	5, 10, 30 seg, 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180 mín (máx 1000 muestras)
Perfiles Memorizados	hasta 10
Modos de Medición	Modo de autorango, finalización automática, BLOQUEO, rango fijo
Conectividad PC	USB opto-aislado (con software HI 92000) y cable micro USB
Tipo / Vida de Batería	(4) baterías AA 1.5V / aproximadamente 100 horas de uso continuo (sin luz de fondo); apagado automático configurable por el usuario: 5, 10, 30, 60 minutos o desactivado
Ambiente	IP67
Dimensiones	185 x 93 x 35.2 mm (7.3 x 3.6 x 1.4")
Peso	400 g



a)



b)

Equipo multiparámetro Hanna HI98192, b) Equipo multiparámetro Hanna HI 98130.

Especificaciones equipo multiparámetro HI 98130.

	Descripción
Rango pH	0.00 hasta 14.00 pH
Rango EC	0.00 hasta 20.00 mS/cm
Rango TSD	0.00 hasta 10.00 g/L (ppt)
Rango Temperatura	0.0 hasta 60.0° C / 32.0 hasta 140.0° F
Resolución pH	0.01 pH
Resolución EC	0.01 mS/cm
Resolución TSD	0.01 g/L (ppt)
Resolución Temperatura	0.1° C / 0.1° F
Precisión (@20°C) pH	±0.05 pH
Precisión (@20°C) EC / TSD	±2% F.S.
Precisión (@20°C) Temperatura	±0.5° C / ±1° F
Compensación de Temperatura	pH: automático; EC/TSD: automático con b ajustable desde 0.0 hasta 2.4% /° C
Calibración pH	automática, uno o dos puntos con dos juegos de tampones estándar (pH 4.01 / 7.01 / 10.01 o 4.01 / 6.86 / 9.18)
Calibración EC / TSD	automática, un punto a 12.88 mS/cm o 6.44 g/L (ppt)
Factor de Conversión de TSD	0.45 hasta 1.00
Electrodo de pH	HI 73127 (reemplazable, incluido)
Ambiente	0 hasta 50° C (32 hasta 122° F); HR max 100%
Tipo/Duración de Batería	1.5V (4) /aproximadamente 100 horas de uso continuo, apagado automático después de 8 minutos
Dimensiones/Peso	163 x 40 x 26 mm (6.4 x 1.6 x 1.0")/100 g (3.5 oz.)

8.14 Anexo N: Validación de análisis químicos

Para evaluar la confiabilidad de los resultados se realiza el balance iónico, método que permite comprobar que los análisis químicos realizados en laboratorio fueron bien ejecutados, éste consiste en verificar la electro-neutralidad del agua dentro de un margen de error, de manera que la suma de los mili-equivalentes de aniones sea aproximadamente igual a la suma miliequivalentes de cationes. Este análisis se aplica a todo tipo de muestras, las que deben mostrar siempre un equilibrio entre las cargas eléctricas de sus especies disueltas.

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

Existe una dependencia del error en función de las conductividades eléctricas, razón por la cual podrían aplicarse diversos criterios para seleccionar el margen de error aceptable. Comúnmente, se establece un margen de error del 10% en valor absoluto, pudiendo existir errores mayores, en los cuales hay que poner atención, de manera de investigar y encontrar la explicación al fenómeno.

8.14.1 Aplicación balance iónico

Balance iónico muestras (Risacher, et al., 1999).

Código	Tipo muestra	Conductividad (µS/cm)	S(+) suma de cationes (meq/l)	S(-) suma de aniones (meq/l)	Diferencia (%)
ISL-1	Vertiente	26900	300,37	294,9561	0,91
ISL-2	Laguna	222000	5596,2	5641,487	0,40
ISL-3	Laguna	108900	1490	1475,498	0,49
ISL-4	Vertiente	11230	112,915	110,23	1,20
ISL-5	Laguna	116800	1614,52	1611,5194	0,09
ISL-6	Canal	38500	455	452,02179	0,33
ISL-7	Canal	69300	899,11	896,60687	0,14
ISL-8	Calicata	17000	189,282	185,7535	0,94
ISL-9	Vertiente	25300	290,414	287,2694	0,54
ISL-10	Laguna	57000	713,53	716,6237	0,22
ISL-11	Laguna	146600	2261,89	2282,034	0,44
ISL-12	Ojo	222000	5309,83	5330,46	0,19
ISL-13	Vertiente	44300	533,038	524,2733	0,83
ISL-14	Laguna	180800	3101,29	3098,5089	0,04
ISL-15	Canal	97100	1297,12	1293,0513	0,16
ISL-16	Vertiente	22700	249,67	244,0428	1,14
ISL-17	Laguna	220000	5337,11	5376,751	0,37
ISL-18	Vertiente	10140	103,171	103,4188	0,12
ISL-19	Laguna	164300	2663,58	2677,7192	0,26

Balace iónico muestras Troncoso, et al., 2013 y Troncoso y Ercilla, 2016.

Código	Tipo muestra	Conductividad (µS /cm)	S(+) suma de cationes (meq/l)	S(-) suma de aniones (meq/l)	Diferencia (%)
LIS-RT-001	Vertiente	10710	103,9	103,7	0,06
LIS-RT-002	Laguna	60800	656,6	684,5	2,08
LIS-RT-003	Canal	15440	154,2	155,0	0,27
LIS-RT-004	Vertiente	26400	276,3	269,6	1,24
LIS-RT-005	Vertiente	29100	323,6	307,2	2,60
LIS-RT-006	Laguna	45700	503,4	491,5	1,19
LIS-RT-007	Canal	245000	6024,8	5642,7	3,28
LIS-RT-008	Ojo	246000	6411,3	5835,5	4,70
LIS-RT-009	Ojo	246000	6227,8	5359,7	7,49
LIS-RT-010	Laguna	244000	6123,7	5709,6	3,50
LIS-RT-011	Laguna	239000	8421,9	5724,5	19,07
LIS-RT-012	Laguna	89400	1064,7	1048,1	0,79
LIS-RT-013	Calicata	172900	2916,9	2700,8	3,85
LIS-RT-014	Laguna	165700	2857,0	2655,8	3,65
LIS-RT-015	Vertiente	29800	301,5	393,0	13,17
LIS-RT-016	Laguna	219000	3581,4	3868,6	3,86
LIS-RT-017	Laguna	232000	4142,9	4561,2	4,81
LIS-RT-018	Vertiente	25300	242,0	263,6	4,26
LIS-RT-019	Laguna	232000	5526,5	5862,8	2,95

Balace iónico muestras campaña terreno 2018.

Código	Tipo de muestra	CONDUCTIVIDAD (µS /cm)	S(+) SUMA DE CATIONES (meq/l)	S(-) SUMA DE ANIONES (meq/l)	DIFERENCIA (%)
USL-01	Vertiente	23600,00	310,278	276,126	5,82
USL-02	Vertiente	10370,00	103,439	100,5517	1,42
USL-03	Laguna	93400,00	1297,88	1192,994	4,21
USL-04	Vertiente	48100,00	529,737	499,1411	2,97
USL-05	Canal	67500,00	792,054	775,9272	1,03
USL-06	Laguna	229000,00	5887,76	5786,503	0,87
USL-07	Canal	80800,00	908,638	998,222	4,70
USL-08	Laguna	239000,00	5714,95	5606,07	0,96
USL-09	Laguna	226000,00	4394,239	4345,27	0,56
USL-10	Laguna	200000,00	3373,827	3281,89	1,38
USL-11	Calicata	241000,00	5884,35	5545,796	2,96
USL-12	Vertiente	69800,00	876,16	789,865	5,18
USL-13	Calicata	236000,00	5988,77	5913,3311	0,63
USL-14	Vertiente	41100,00	446,73	402,445	5,22
USL-15	Laguna	232000,00	5856,5	5466,012	3,45
USL-16	Vertiente	16540,00	175,294	171,541	1,08

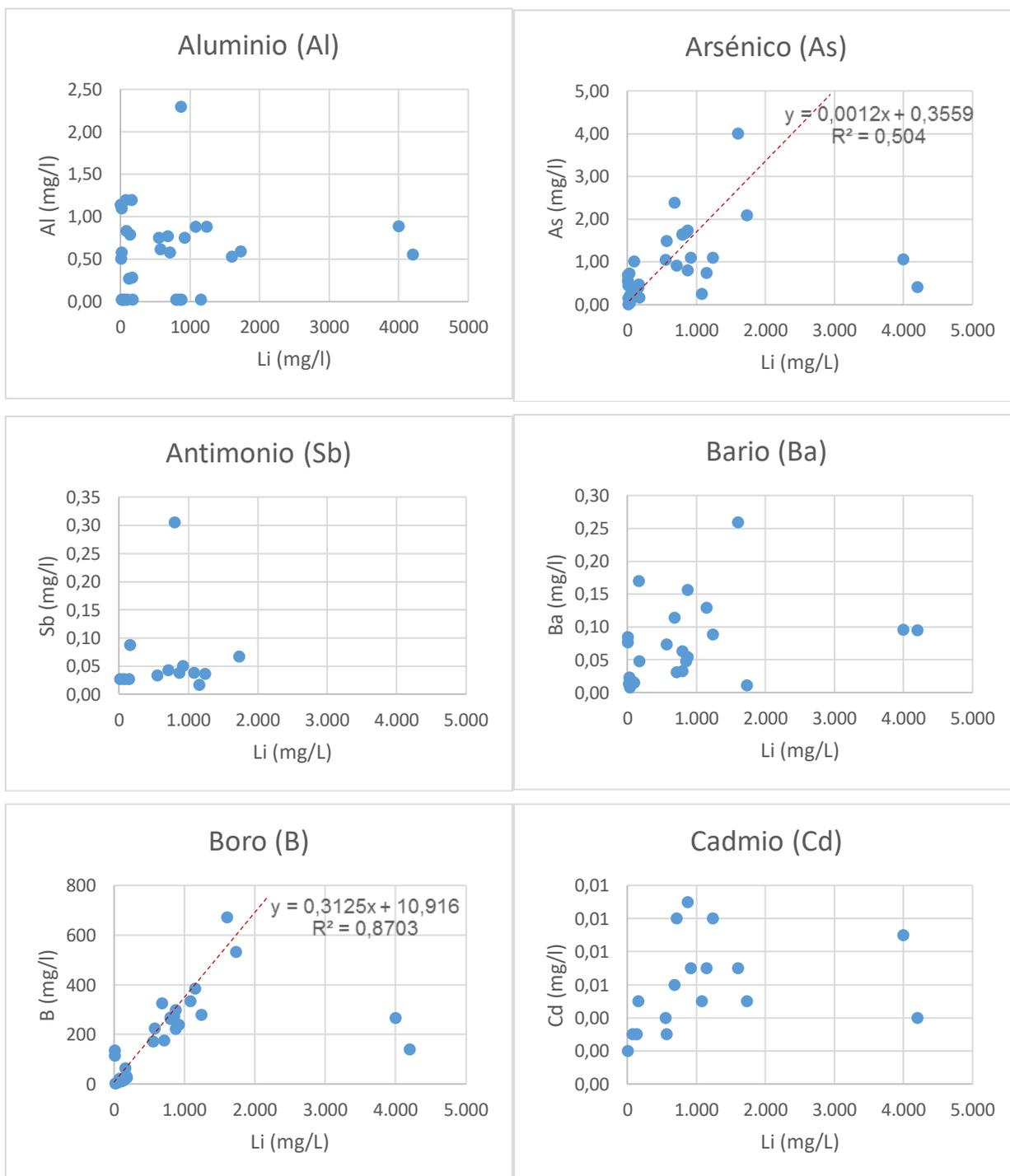
8.15 Anexo O: Índices hidrogeoquímicos

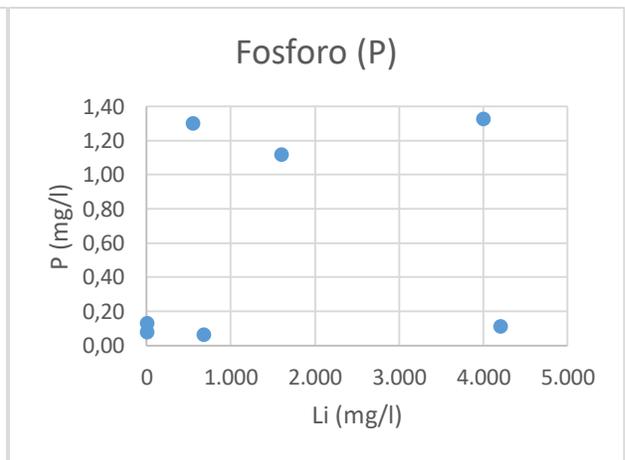
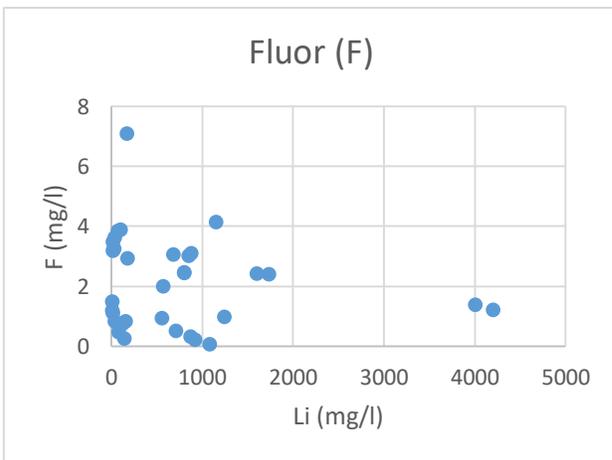
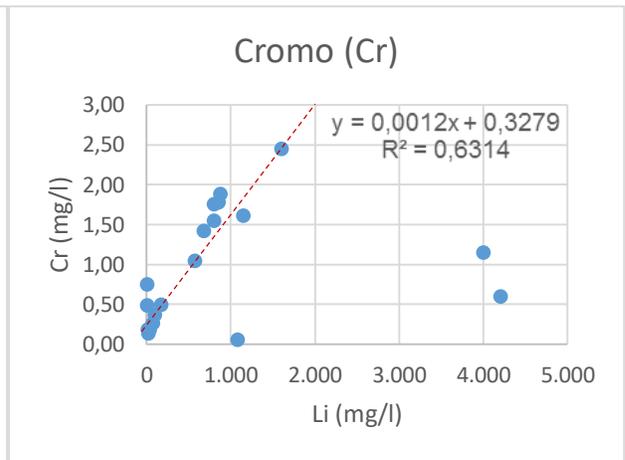
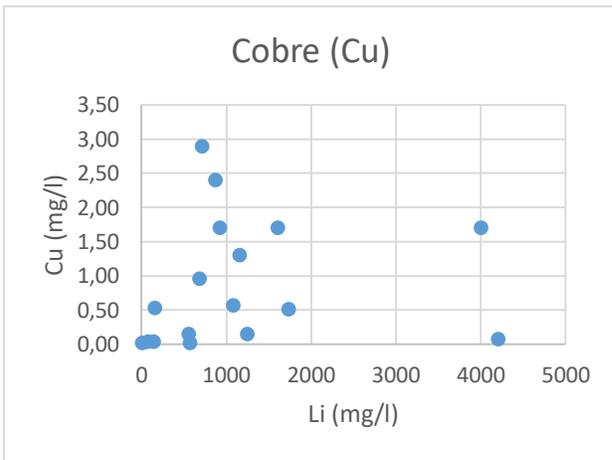
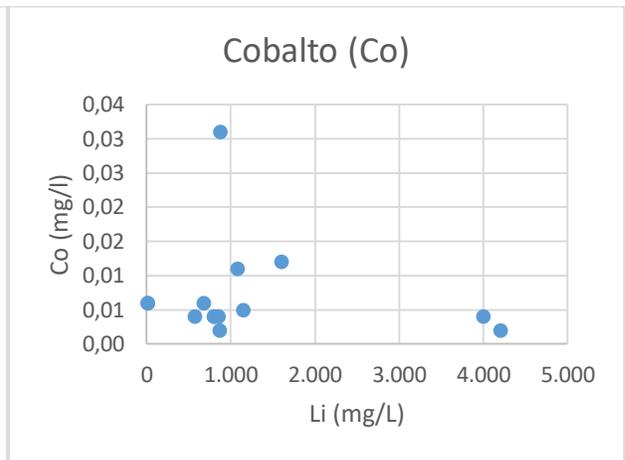
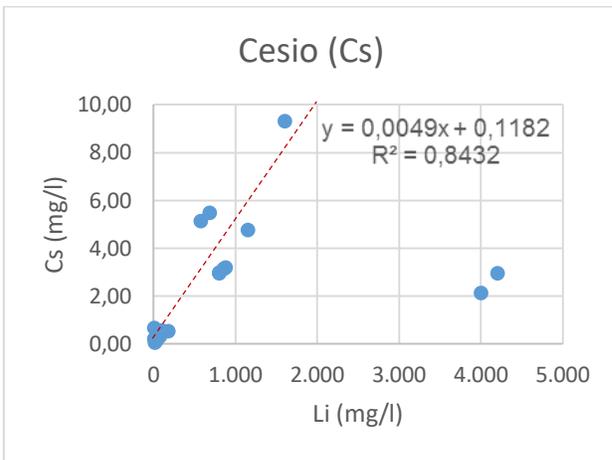
Índices hidrogeoquímicos.

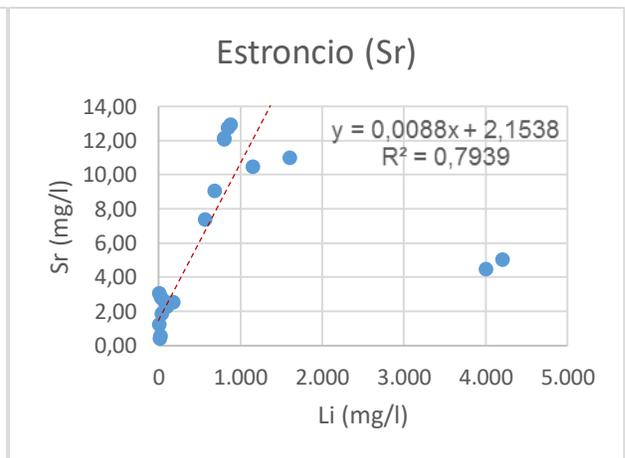
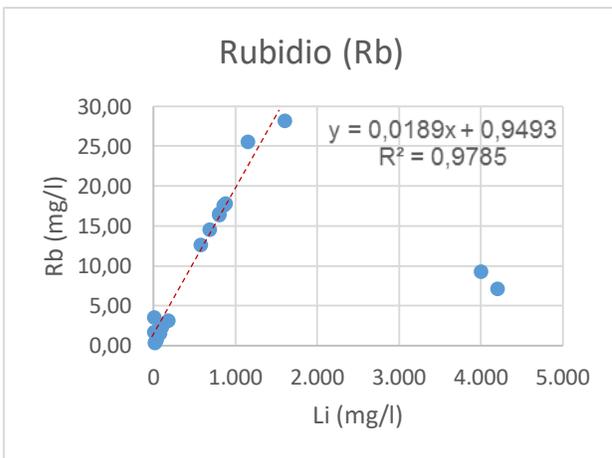
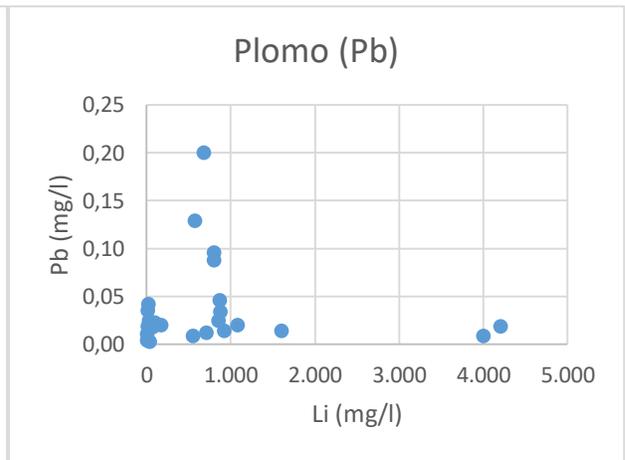
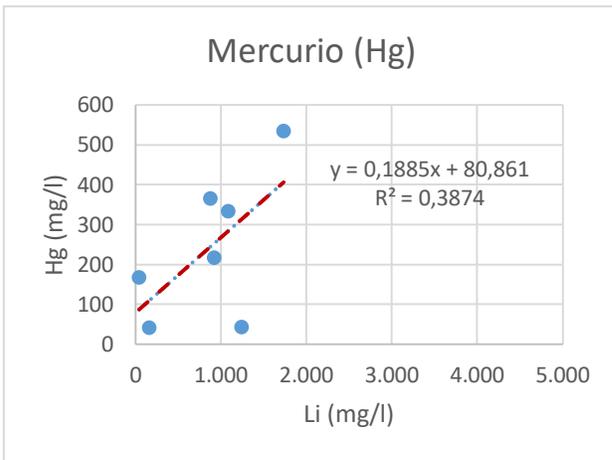
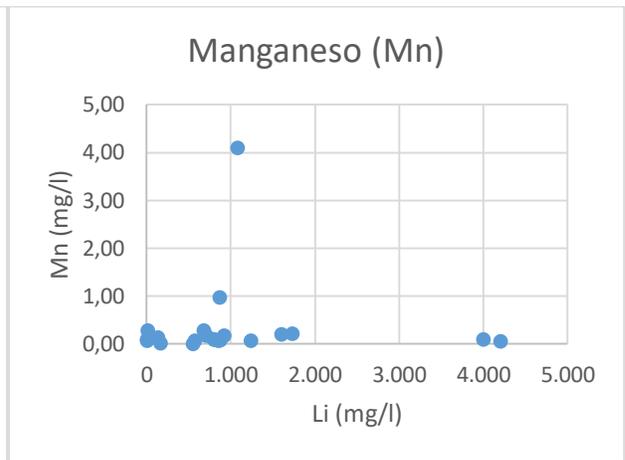
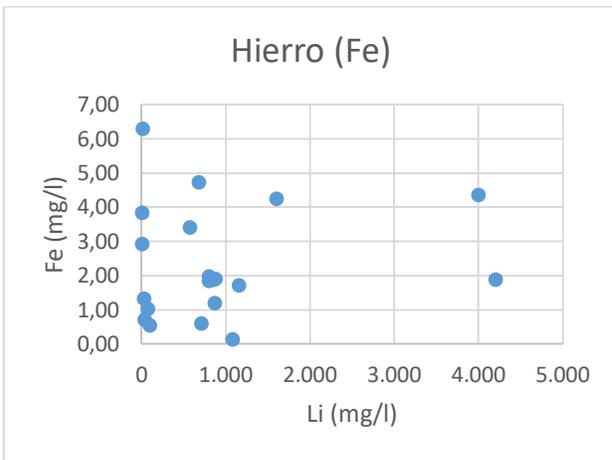
Código muestra	Tipo muestra	rMg/ rCa	rK/ rNa	rNa/ rCa	rNa/ r(Ca+Mg)	rCl/ rCO3H	rSO4/ rCl	icb	Kr
LIS-RT-001	Vertiente	0,857	0,012	11,623	6,258	170,347	0,155	0,014	1,272
LIS-RT-002	Laguna	2,120	0,040	32,370	10,376	534,448	0,069	0,080	2,924
LIS-RT-003	Canal	1,250	0,015	15,849	7,045	205,665	0,131	0,030	1,536
LIS-RT-004	Vertiente	0,635	0,031	9,544	5,836	430,259	0,102	0,044	1,968
LIS-RT-005	Vertiente	1,099	0,036	14,415	6,866	403,924	0,095	0,003	2,079
LIS-RT-006	Laguna	1,649	0,046	19,689	7,433	555,366	0,074	0,044	2,430
LIS-RT-007	Canal	16,645	0,042	199,237	11,291	1733,853	0,056	-0,018	6,289
LIS-RT-008	Ojo	16,489	0,036	226,653	12,960	2227,218	0,051	-0,056	5,370
LIS-RT-009	Ojo	17,013	0,037	231,266	12,839	2038,940	0,055	-0,119	5,278
LIS-RT-010	Laguna	16,962	0,041	202,557	11,277	1733,141	0,057	-0,024	6,334
LIS-RT-011	Laguna	26,069	0,577	182,634	6,747	277,471	0,070	-0,415	21,311
LIS-RT-012	Laguna	7,822	0,044	93,865	10,639	460,980	0,049	0,044	3,571
LIS-RT-013	Calicata	17,204	0,029	178,049	9,781	2342,805	0,056	0,177	2,391
LIS-RT-014	Laguna	17,977	0,029	193,034	10,172	187,208	0,062	0,163	12,278
LIS-RT-015	Vertiente	1,594	0,004	17,435	6,722	47,094	0,063	0,107	8,343
LIS-RT-016	Laguna	16,036	0,049	169,543	9,952	1692,202	0,048	0,134	4,403
LIS-RT-017	Laguna	7,878	0,048	77,488	8,728	1506,625	0,055	0,156	7,175
LIS-RT-018	Vertiente	1,031	0,004	10,025	4,937	260,865	0,078	0,175	2,592
LIS-RT-019	Laguna	24,736	0,079	140,047	5,442	572,229	0,103	0,147	13,709
ISL-1	Vertiente	4,266	0,054	52,049	9,883	720,730	0,065	0,032	0,895
ISL-2	Laguna	17,099	0,059	165,035	9,118		0,058	0,075	0,000
ISL-3	Laguna	10,169	0,057	126,620	11,336	2108,011	0,043	0,050	1,652
ISL-4	Vertiente	2,532	0,066	52,495	14,863	46,494	0,058	-0,017	2,076
ISL-5	Laguna	8,057	0,057	106,322	11,739	905,516	0,043	0,055	3,352
ISL-6	Canal	5,900	0,057	76,051	11,022	918,284	0,060	0,040	1,031
ISL-7	Canal	1,303	0,061	17,854	7,752	676,592	0,094	0,041	3,927
ISL-8	Calicata	0,737	0,059	8,662	4,986	274,319	0,193	-0,004	1,757
ISL-9	Vertiente	1,251	0,056	14,338	6,371	425,673	0,092	0,058	1,837
ISL-10	Laguna	1,404	0,053	15,793	6,569	660,198	0,084	0,077	3,320
ISL-11	Laguna	1,614	0,052	19,932	7,626	1375,484	0,069	0,078	6,086
ISL-12	Canal	11,975	0,055	130,119	10,028		0,050	0,069	0,000
ISL-13	Vertiente	5,913	0,053	70,820	10,245	1265,317	0,061	0,035	0,991
ISL-14	Laguna	6,432	0,053	74,033	9,961	2038,221	0,056	0,058	4,186
ISL-15	Canal	6,209	0,055	69,245	9,605	3156,670	0,058	0,057	1,331
ISL-16	Vertiente	5,912	0,054	67,977	9,835	254,644	0,073	0,017	1,348
ISL-17	Laguna	21,946	0,062	194,295	8,467		0,064	0,076	0,000
ISL-18	Vertiente	1,251	0,051	17,998	7,994	208,822	0,165	-0,020	0,948
ISL-19	Laguna	2,817	0,053	37,625	9,857	729,363	0,081	0,041	8,832
USL-01	Vertiente	31,251	0,048	63,251	1,961	240,453	0,126	0,160	1,473
USL-02	Vertiente	1,468	0,040	19,159	7,764	179,947	0,131	-0,023	1,032
USL-03	Laguna	1,042	0,135	14,259	6,981	253,144	0,094	-0,040	10,881
USL-04	Vertiente	5,516	0,045	66,775	10,247	1107,721	0,043	-0,003	1,072

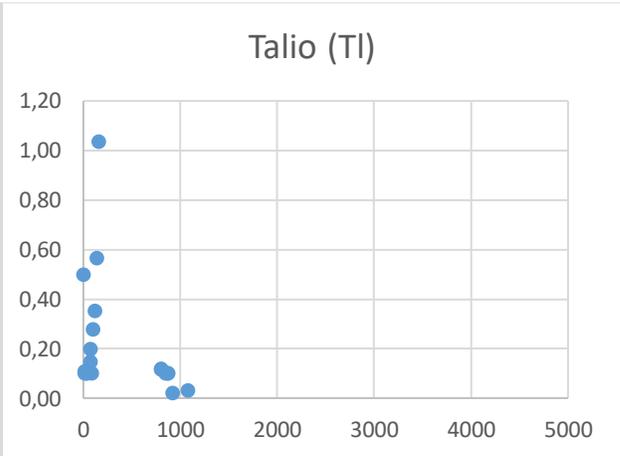
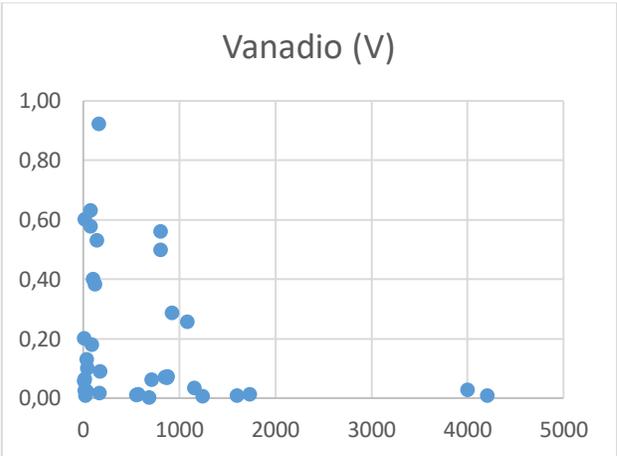
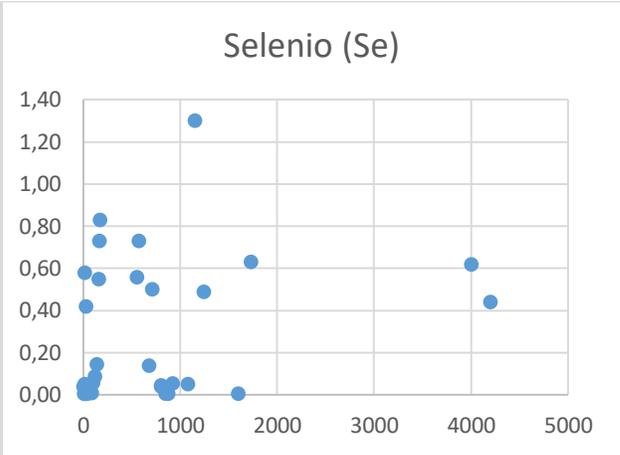
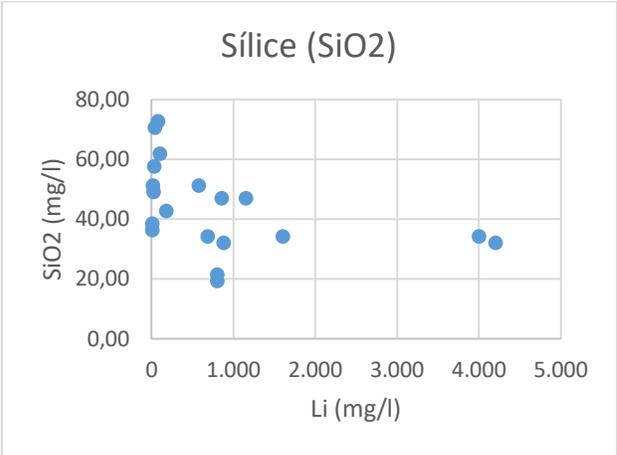
USL-05	Canal	6,709	0,041	85,275	11,062	1329,864	0,046	0,038	1,356
USL-06	Laguna	37,826	0,086	224,449	5,781	790,691	0,089	0,082	9,643
USL-07	Canal	2,843	0,043	130,404	33,931	771,522	0,046	0,091	2,123
USL-08	Laguna	13,986	0,041	177,424	11,840	1931,408	0,047	0,035	5,986
USL-09	Laguna	51,430	0,044	653,708	12,468	239,085	0,048	0,035	12,031
USL-10	Laguna	36,294	0,041	437,416	11,729	88,256	0,049	0,012	20,124
USL-11	Calicata	14,731	0,039	190,464	12,108	1676,471	0,034	0,004	6,505
USL-12	Vertiente	5,333	0,035	63,527	10,031	707,324	0,047	-0,037	2,380
USL-13	Calicata	33,023	0,043	294,962	8,670	1389,041	0,059	0,058	6,504
USL-14	Vertiente	3,232	0,051	32,595	7,702	285,328	0,086	-0,050	2,668
USL-15	Laguna	27,224	0,057	204,828	7,257	630,671	0,067	0,018	11,515
USL-16	Vertiente	1,272	0,052	13,862	6,100	71,216	0,104	-0,012	3,544
Mínimo		0,635	0,004	8,662	1,961	46,494	0,034	-0,415	0,000
Máximo		51,430	0,577	653,708	33,931	3156,670	0,193	0,177	21,311
Promedio		10,834	0,058	111,388	9,411	879,159	0,074	0,035	4,697
Desviación estándar		11,505	0,074	116,377	4,178	740,800	0,033	0,087	4,657

8.16 Anexo P: Relación entre Li y elementos traza -menores









8.17 Anexo Q: Resultados fase exploratoria de sondajes proyecto de Exploración

Salares 7

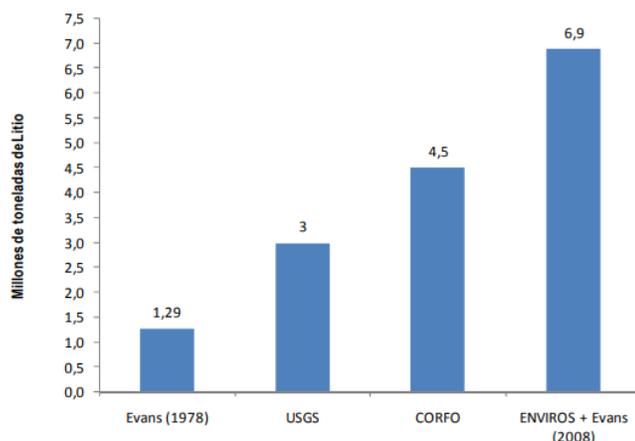
Resultados pozos SCM, Talison 2011.

Pozo	Profundidad m.b.n.t	Densidad g / cm ³	Li	Na	B	Ca	K	Mg	SO ₄	Cl
			mg / L							
SLI-01	8	1,18	720	87200	180	420	6550	4840	10700	159335
SLI-01	17	1,21	860	104000	196	520	7860	5610	12300	196888
SLI-02	16,8	1,21	840	102000	198	520	7700	5480	11900	190987
SLI-03	6,5	1,21	880	104000	200	480	8260	5800	12500	198498
SLI-03	12,5	1,22	900	106000	200	480	8360	5870	12500	194206
SLI-03	18,5	1,21	900	106000	200	480	8310	5840	12400	194742
SLI-03	24,5	1,21	880	105000	200	500	8130	5720	12300	185086
SLI-03	30,5	1,2	900	105000	220	480	8280	5830	12400	188305
SLI-03	36,5	1,21	900	105000	200	460	8250	5810	12500	192060
SLI-03	39,5	1,21	860	106000	200	480	8210	5830	12500	191524
SLI-04	6,5	1,21	820	109000	194	520	7830	5420	11800	193670
SLI-04A	6	1,2	780	105000	182	500	7230	5040	10700	194079
SLI-05	6	1,21	880	108000	220	480	8320	5870	12400	197425
SLI-07	6	1,06	220	26100	54	220	1960	1460	2750	46710,5
SLI-07	12	1,15	580	70600	140	420	5230	4020	8730	119408
SLI-07	18	1,21	840	102000	191	460	7870	5570	11900	182940
SLI-07	24	1,21	860	107000	200	480	8170	5750	12300	189378
SLI-07	30	1,21	860	106000	200	460	8150	5770	12400	190987
SLI-07	36	1,21	860	106000	200	460	8140	5740	12200	190451
SLI-07	42	1,19	860	105000	200	460	8090	5690	11900	189914
SLI-08	6	1,21	900	110000	200	540	8500	5920	12600	187232
SLI-08	12	1,2	840	102000	199	480	7780	5550	11900	188048
SLI-08	15,5	1,21	840	104000	200	520	7690	5500	11200	194079
SLI-09	6	1,11	460	56000	114	680	3960	3200	7520	104795
SLI-09	12	1,2	820	101000	191	460	7540	5390	11600	194079
SLI-10	6	1,13	560	70200	142	1040	5140	3880	10200	118062
SLI-10	12	1,2	820	98500	190	500	7470	5370	11600	183017
SLI-10	18	1,21	880	104000	200	500	8130	5880	12300	190241
SLI-10	24	1,21	880	106000	220	520	8300	5940	12500	194079
SLI-11	6	1,21	880	106000	200	500	8320	5930	12700	194627
SLI-11	12	1,21	900	106000	200	500	8500	6050	12600	193966
SLI-11	18	1,21	880	103000	197	480	8240	5880	12200	193531
SLI-11	24	1,19	820	97600	180	600	7620	5490	11900	174342
SLI-11	30	1,2	840	103000	195	460	7800	5570	11700	177632
SLI-11	36	1,21	960	118000	220	500	9020	6330	13300	197917
SLI-12	6	1,21	840	103000	194	500	7860	5540	11600	198312
SLI-13	6	1,2	860	105000	187	520	8090	5580	11800	185307

SLI-15	6	1,21	1060	99600	240	380	9630	6900	14400	194627
SLI-15	12	1,2	1080	100000	240	380	9820	6990	14300	191886
SLI-15	18	1,21	980	106000	220	440	9020	6360	13400	196272
SLI-15	24	1,21	900	107000	220	460	8380	5920	12500	195175
SLI-15	30	1,21	920	105000	200	440	8460	5970	12400	196272
SLI-16	6	1,22	860	106000	220	480	8180	5830	12000	197176
SLI-16	12	1,21	880	106000	220	480	8300	5920	12300	184100
SLI-17	6	1,2	820	100000	220	580	7740	5660	11800	184623
SLI-17	12	1,21	860	104000	220	500	8160	5840	12000	196653
SLI-18	6	1,22	880	105000	220	560	8230	5840	10800	198222
SLI-19	6	1,21	860	101000	196	460	7570	5500	11800	187261
SLI-19	12	1,21	920	104000	200	520	8050	5800	12200	193487
SLI-20	6	1,18	760	89200	179	360	6770	4950	11600	170019
SLI-20	12	1,2	860	102000	200	420	7690	5590	13100	185345
SLI-20	18	1,2	940	107000	280	440	8640	6130	13600	190217
SLI-20	24	1,2	960	109000	280	420	8690	6190	14700	192529
SLI-20	30	1,2	900	102000	200	400	7850	5680	13500	192529
SLI-21	6	1,2	920	106000	200	420	8110	5820	13400	196360
SLI-21	12	1,21	900	108000	220	460	8540	6150	14300	191092
SLI-21	18	1,21	920	107000	220	440	8710	6280	14100	193676
SLI-22	6	1,21	1060	107000	300	440	9830	6790	15600	192529
SLI-22	12	1,21	1040	105000	300	440	9770	6750	15200	193966
SLI-23	6	1,21	860	104000	200	440	8070	5870	12800	196839
SLI-23	12	1,21	880	109000	220	480	8300	5990	13300	193487
SLI-23	18	1,21	900	110000	220	480	8330	6000	13300	194923
SLI-24	6	1,21	960	110000	214	460	8750	6160	13500	194444
SLI-25	6	1,2	940	108000	214	460	8550	6030	13000	196429
SLI-25	12	1,21	900	104000	194	480	8250	5840	12400	195437
SLI-26	6	1,21	960	109000	214	480	8780	6170	13000	196429
SLI-27	6	1,2	940	110000	214	460	8530	5970	12800	204365

8.18 Anexo R: Potencial y recursos en otros salares

El Salar Atacama corresponde al salar más grande de Chile, y con el mayor potencial, presentando 1.500 mg/L en promedio y variaciones que van entre 600 a 5.000 mg/L. Sus recursos ascenderían a los 6,9 millones de toneladas **Fuente especificada no válida..**



Estimación reservas en el Salar de Atacama (COCHILCO).

El Salar del Hombre Muerto, ubicado a 220 km al sureste del Salar de Atacama, en Argentina, presenta concentraciones promedio de litio de 692 mg/L con variaciones entre 500 y 782 mg/L. Sus reservas probables se estiman en 850.000 toneladas de litio a 70 mts de profundidad (Cochilco, 2009).

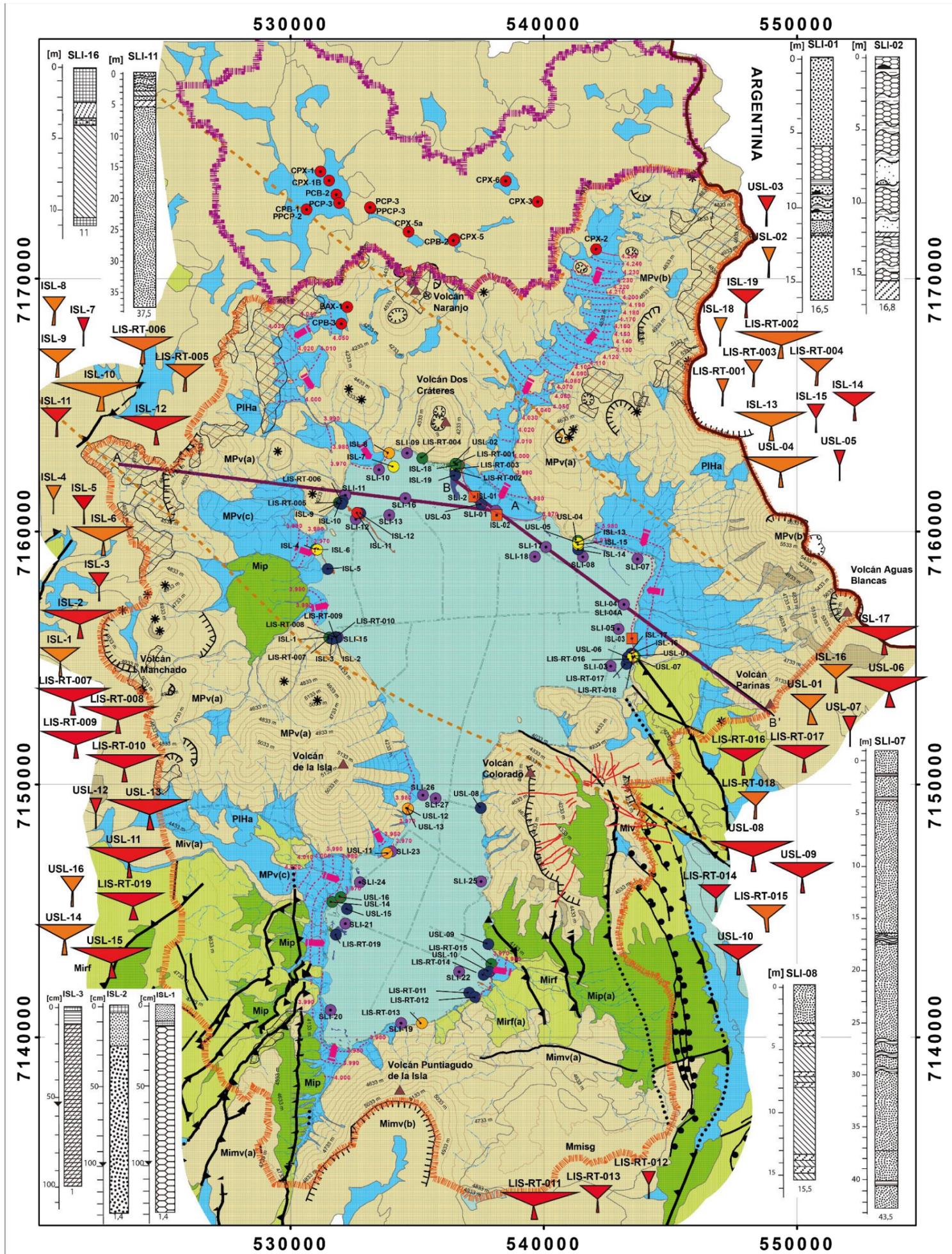
El Salar de Uyuni corresponde al salar más grande del mundo con una extensión de 9.000 km², Sus concentraciones son en promedio de 350 mg/L de Li, se estiman reservas por un total de 5.500.000 toneladas de litio (Cochilco, 2009).

Para el caso del Salar de Maricunga, la siguiente tabla expone las estimaciones que se han realizado, y en el que se han considerado distintos parámetros, en general concentraciones superiores a 1.000 mg/L y coeficientes de almacenamiento hasta 10%, contemplando espesores y áreas ampliamente variables que genera diferencias en el volumen de la salmuera, obteniendo un recurso promedio de 200.000 toneladas.

Tabla: Recursos estimados para el Salar de Maricunga en diferentes estudios, (extraído Amphos 2, 2018).

	Ley de Li (mg/l)	Porosidad efectiva (%)	Área contemplada (km ²)	Espesor (m)	Volumen salmuera (km ³)	Potencial de litio (t)
CORFO (1982)	1060	10	70,53	30	2,1159	224285
LI3ENERGY (2012)	1250	4	14,38	150	2,157	107850
Puig et al. (2012)	1450	8	30	50	1,5	174000
LITHIUMPOWER (2017)	600	6	4,23	100	0,423	195000 (suma de los dos volúmenes contemplados)
	700	6	21,41	200	4,282	

8.19 Anexo S: Figuras amplificadas



SIMBOLOGÍA

Geológica

- ▲▲▲ Falla inversa inferida
- ▲▲▲ Falla inversa observada
- ▲▲▲ Falla normal observada asociada a colapsos
- Falla observada
- Filones
- Lineamiento Culampajá (Chernicoff, et al., 2002)
- * Centros de emisión
- ▲ Volcán
- ▲ Escarpe indicando área deprimida
- Cráter
- A—A' Traza de perfil hidrogeológico
- Alteración hidrotermal

Hidrográfica

- Quebrada seca o curso intermitente
- Cuenca Salar de La Isla
- Cuenca Quebrada La Rossa

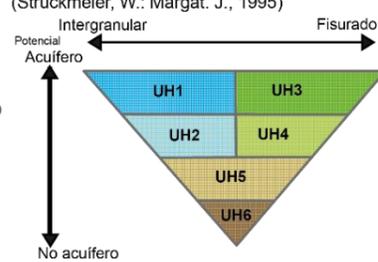
Geográfica

- == Huella o sendero
- Curva de nivel
- Límite internacional

Hidrogeológica

- Pozos
- Sondajes (Proyecto Salares 7, 2010, estratigrafía e hidroquímica)
- Lisímetros (Amphos 21- DGA, 2016)
- 3.900 Isopieza inferida (altura nivel freático m.s.n.m.)
- 3.980 Isopieza generalizada a partir de observaciones de campo de este estudio y Amphos 21 (2016)(altura nivel freático m.s.n.m.)
- Dirección flujo subterráneo inferido
- Laguna
- Riachuelo - Canal
- Halita
- Halita arenosa
- Yeso rudita
- Yeso arenoso
- Yeso limoso
- Sistema vega, riachuelo y laguna
- Vegetación
- Gravas
- Arena fina
- Arena media
- Arena gruesa
- Limo
- Arcilla

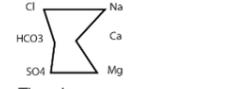
Esquema colores unidades hidrogeológicas (Struckmeier, W.; Margat, J., 1995)



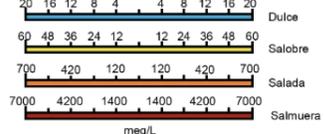
Hidroquímica

- Calicata
- Canal
- Laguna
- Vertiente
- Ojo

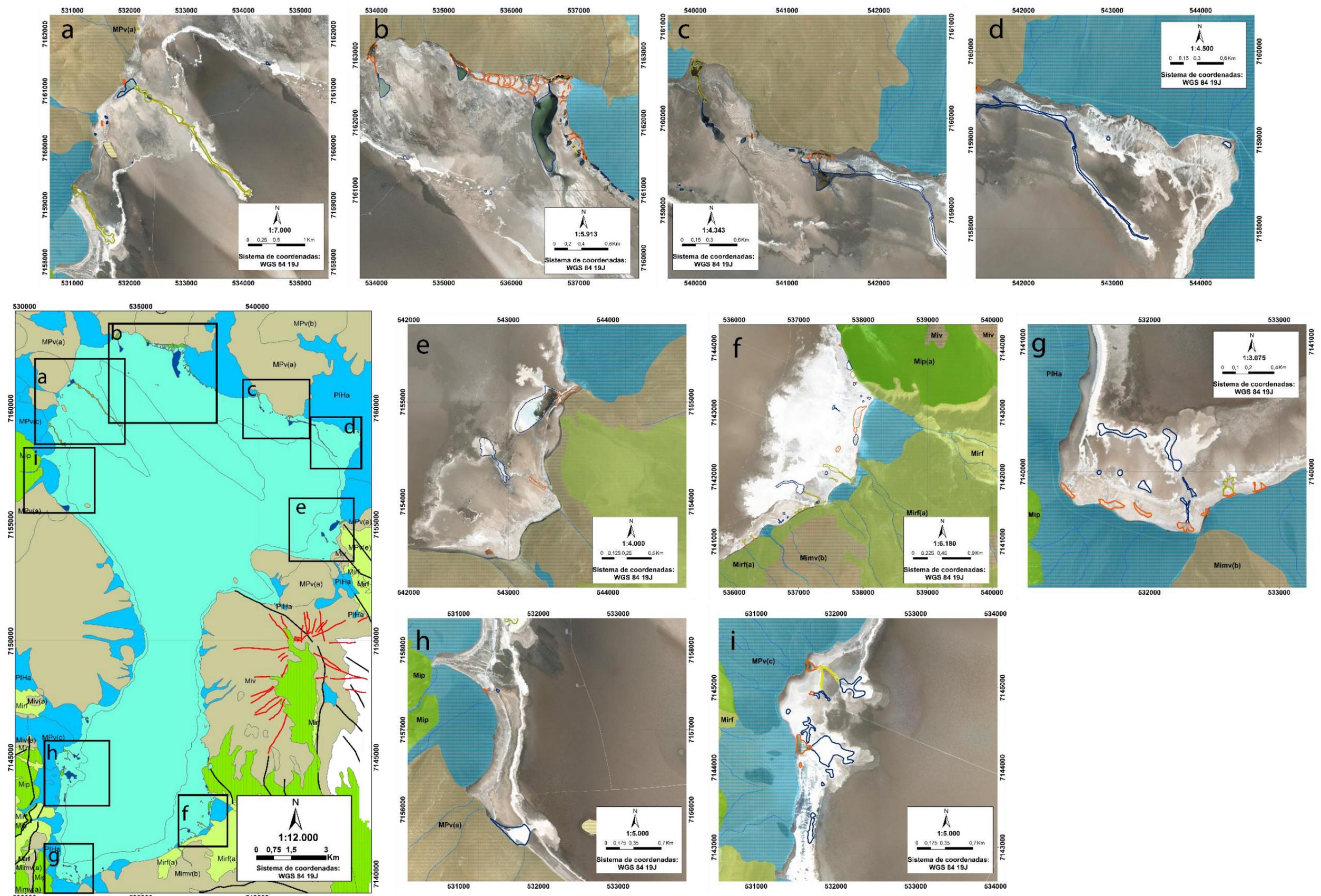
Diagrama Stiff



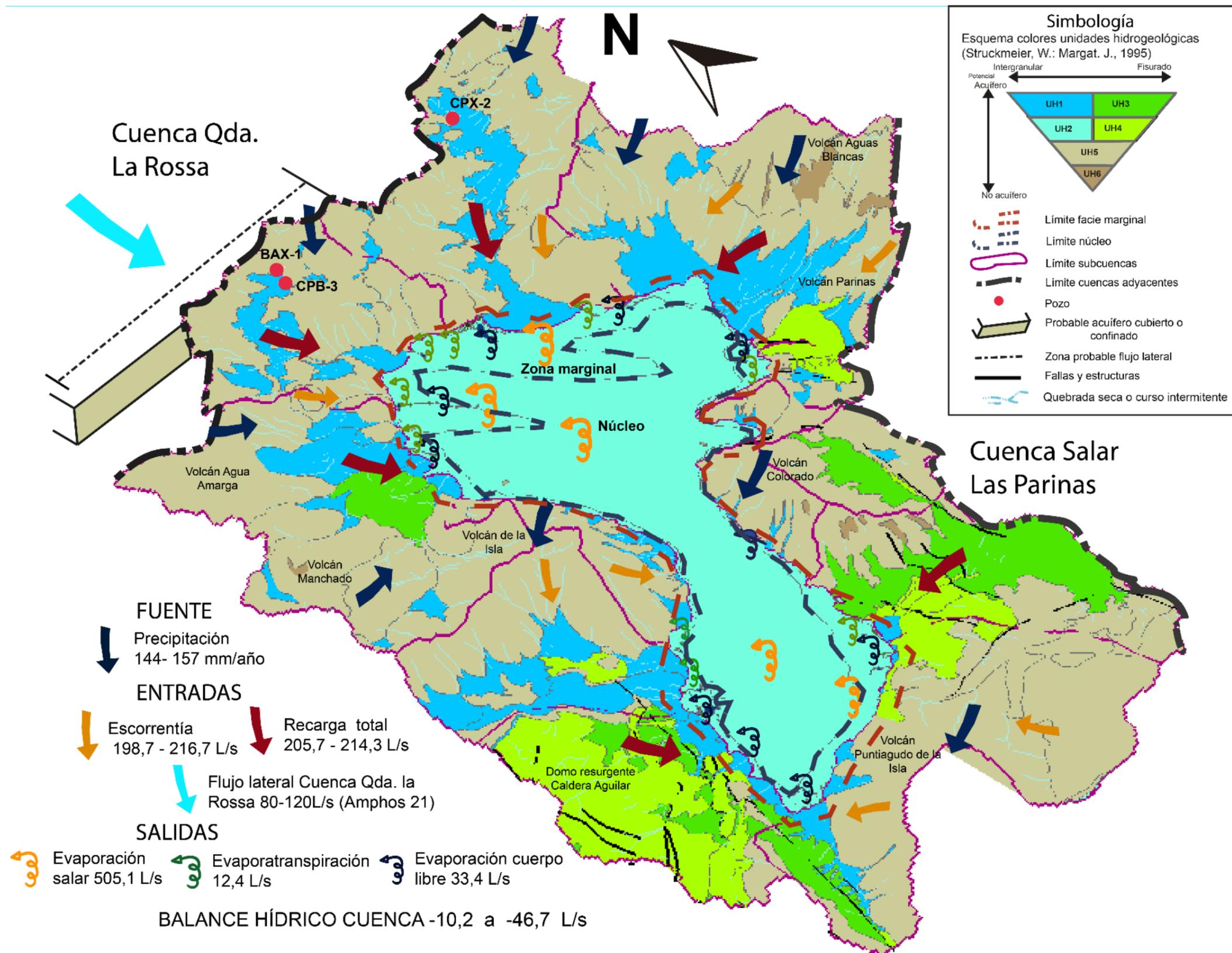
Tipo de agua



Mapa del potencial hidrogeológico de la cuenca del Salar de La Isla. Elaboración propia.



Catastro de humedales presentes en Salar de La Isla. Elaboración propia.



Modelo conceptual de la cuenca del Salar de La Isla, reconociendo entradas y salidas, junto con zonas de recarga. Elaboración propia. Mayor detalle Anexo S.