



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

“HIDROGEOLOGÍA Y ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DEL LITIO EN EL  
SALAR DE LAS PARINAS, REGIÓN DE ATACAMA”

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO**

NICOLÁS EDUARDO CÁDIZ TREJOS

PROFESOR GUÍA:

IGOR AGUIRRE ARANEDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LINDA DANIELE

GABRIEL VARGA EASTON

ESTE TRABAJO HA SIDO FINANCIADO POR CORFO, EN EL CONTEXTO DE UN  
CONVENIO DE COLABORACIÓN ENTRE EL COMITÉ DE MINERÍA NO METÁLICA  
CORFO Y EL DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE

2019

## Resumen

El presente estudio se centró en la realización de una caracterización hidrogeológica y estimación del potencial de litio del Salar de Las Parinas. Este salar se localiza en la cordillera Altiplánica, a 170 km hacia el Este de Diego de Almagro, próximo al límite fronterizo con Argentina al interior de la Región de Atacama. El salar de Las Parinas se emplaza en una cuenca endorreica, volcano-sedimentaria, de forma elipsoidal, con un eje mayor de 35 km de largo en dirección N-S y un eje menor de 18 km en dirección E-O.

El objetivo propuesto fue alcanzado mediante la recopilación de antecedentes geológicos, hidrográficos, hidrológicos e hidroquímicos de la zona de estudio, en conjunto con una campaña de muestreo hidroquímico realizada en enero del 2018, en donde se tomaron 12 muestras de vertientes y lagunas, junto con 4 muestras de costra salina.

La recopilación y análisis de la información hidrológica aportó un balance hídrico de la cuenca del Salar de las Parinas de 1,38 l/s, lo que indica un gran equilibrio entre la recarga y descarga del salar. Se destaca a la precipitación como único agente de recarga y a la evaporación como agente de descarga de la cuenca.

Las principales unidades hidrogeológicas de la cuenca corresponden a los depósitos aluviales y coluviales los cuales son responsables de gran parte de la recarga de la cuenca producto de su gran extensión y de su alta permeabilidad que facilita los procesos de infiltración. La mayoría de las unidades volcánicas de la cuenca tienen bajos potenciales hidrológicos, no obstante, aquellas unidades afectadas por un sistema de fallas NNO al norte del salar posiblemente podrían tener mayores potenciales debido al fracturamiento secundario.

Los resultados de los análisis hidroquímicos muestran que las aguas superficiales del salar son de composición clorurada sódica, con salinidades crecientes hacia el norte del salar. A partir de la identificación de la vía evolutiva de sus aportes, la mayoría de las muestras de agua salina pueden ser clasificadas como salmueras del tipo sulfatada, esto producto de la gran predominancia de rocas volcánicas en la cuenca de estudio. Las relaciones químicas de Na/Cl indican posible enriquecimiento por disolución de halita, por otro lado, se descarta el enriquecimiento por disolución de yeso por los bajos valores de la relación Ca/SO<sub>4</sub>

La evaluación del potencial de litio realizada en el Salar de Las Parinas corresponde a una serie de estimaciones de los parámetros de volumen, porosidad eficaz y concentración de litio, por lo tanto, los resultados obtenidos corresponden a la categoría de recursos inferidos. Los valores de las estimaciones obtenidas varían desde las 77.774 a 201.295 toneladas de litio, con un promedio de alrededor de las 120 mil toneladas. Los resultados de las estimaciones, en contraste con proyectos operativos vigentes (SQM en Salar de Atacama), le otorgan un potencial explotable de medio a bajo el que aumenta al considerar salares vecinos como los de La Isla y El Aguilar, u otros cercanos.

## **Dedicatoria**

Para todos los que creyeron en mí, los que nunca perdieron la fe, aquellos que me ayudaron a levantarme en los momentos duros, los llevo siempre conmigo.

Dedicada en especial para mi buen amigo, cordada y entrenador Ariel Castillo Núñez, nos vemos pronto en la cumbre amigo mío....

## Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecerle a mi familia, motor que impulsó a que todo esto fuese posible, mis hermanos que fueron apoyo incondicional todo este tiempo y en especial a mis padres, fruto de su esfuerzo y sacrificio tuve la oportunidad de formarme como profesional, sin duda son mi mejor referente, mi mejor guía, todo lo bueno que me puede caracterizar hoy comenzó gracias a ellos.

En particular esta memoria no hubiese sido posible sin la ayuda del profesor Igor Aguirre, el me brindó la oportunidad de realizar este trabajo, su ayuda junto con el apoyo del Comité de Minería no Metálica CORFO fueron clave para realizar a cabalidad con éxito este trabajo. Le doy las gracias a la que fue mi compañera y vecina de memoria Loreto Valdivia, sin duda fue un aporte importantísimo en el desarrollo de toda esta investigación, juntos tuvimos que superar muchos obstáculos, pero al final todo se vio recompensado, sin duda fue un placer poder trabajar junto con una mujer tan profesional. Agradezco a Mauricio González por todo el apoyo brindado en terreno y en el posterior trabajo de gabinete. También quiero agradecer a la minera Gold Fields por su inmenso apoyo para la campaña de terreno, sin duda todo hubiese sido mucho más difícil sin su ayuda.

Al Laboratorio Químico de SERNAGEOMIN, y a los geólogos Edmundo Polanco, Omar Cortés, Mario Pereira quienes con sus cargos directivos facilitaron la realización de los análisis químicos e isotópicos presentados en presente estudio.

No quiero olvidarme de una parte importante en esta etapa, mis compañeros de universidad, a lo largo de los años tuve la suerte de conocer personas notables que me brindaron su amistad, tesoro importante que guardo conmigo y del cual me siento infinitamente bendecido, gracias a la sección 4 y a la gente de plan común, aquí conocí personas con las cuales compartí toda esta etapa universitaria, mención honrosa se la llevan Bulnes, Esteban, Gringo, Lucas, Chico, Giovannini, entre muchos. También quiero nombrar mis compañeros de Geología, son muchos los buenos momentos vividos que me permitieron conocer a mis futuros colegas, grandes personas y profesionales, muchas gracias a todo el vinchucazo por tantas risas, a la Ara y a la Coni por soportarme cuando ando idiota, a Juanito por su sencillez, a la Magda por el apoyo incondicional y al Cristian por ser poeta.

Finalmente quiero darle gracias a toda la gente del Departamento de Geología, profesores y funcionarios, todos fueron parte de este camino, muchas gracias a todos, en particular a la Blanca, su apoyo incondicional y buena disposición fueron claves para esta etapa.

## Tabla de Contenido

Resumen.....	I
Dedicatoria.....	II
Agradecimientos.....	III
1. Introducción.....	17
1.1 Aspectos generales.....	17
1.2 Objetivos del estudio.....	18
1.2.1 Objetivo general.....	18
1.2.3 Objetivos específicos.....	18
1.3 Ubicación y accesos.....	18
1.4 Limitaciones.....	20
2. Marco Teórico.....	21
2.1 Salares.....	21
2.1.1 Definición de Salar.....	21
2.1.2 Tipos de salares.....	21
2.1.3 Química de salmueras.....	23
2.2 El litio: Su situación en Chile y en el mundo.....	26
2.2.1 Ocurrencia.....	26
2.2.2 Recursos.....	27
2.2.3 Producción de litio.....	27
2.2.4 Demanda de litio.....	28
3. Marco Geológico.....	29
3.1 Unidades Morfoestructurales.....	29
3.1.1 Cordillera occidental.....	30
3.1.2 Altiplano-Puna de Atacama.....	30
3.1.3 Cuencas Endorreicas.....	31
3.2 Geomorfología del área de estudio.....	31
3.3 Geología de la zona de estudio.....	33
3.3.1 Formación La Tabla (Carbonífero? - Pérmico) (García, 1967).....	35
3.3.2 Granito Parinas (Pérmico) (Naranjo y Cornejo 1992).....	35
3.3.3 Volcanes del Mioceno Inferior (Mioceno Inferior).....	35
3.3.4 Ignimbrita Pajonales (Mioceno inferior a medio) (Naranjo y Cornejo 1992).....	35
3.3.5 Volcanes del Mioceno medio a superior (Mioceno medio a superior).....	35

3.3.6	Gravas de Atacama (Mioceno inferior a medio) (Mortimer, 1973) ....	36
3.3.7	Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno) .....	36
3.4	Geología estructural .....	37
3.5	Hidrología .....	39
3.5.1	Clima .....	39
3.6	Flora y Fauna .....	39
3.7	Hidrogeología .....	42
3.7.1	Unidades Hidrogeológicas .....	42
4.	Metodología .....	44
4.1	Delimitación de la cuenca hidrográfica del Salar de las Parinas .....	44
4.2	Caracterización de geología de superficie .....	47
4.3	Caracterización hidrogeológica .....	47
4.3.1	Definición de unidades hidrogeológicas .....	48
4.4	Caracterización hidrológica .....	49
4.4.1	Estimación de la precipitación media de la cuenca .....	49
4.4.1	Estimación de la Recarga .....	50
4.4.3	Estimación coeficiente y caudal de escorrentía .....	51
4.4.4	Estimación de la Evaporación .....	52
4.4.5	Balance hídrico estimado .....	53
4.5	Caracterización hidroquímica del Salar de las Parinas .....	54
4.5.1	Muestreo de aguas superficiales .....	54
4.5.2	Análisis químico de muestras de agua .....	57
4.5.3	Métodos gráficos para clasificación de aguas .....	57
4.5.4	Determinación cualitativa de vías evolutivas de aguas evaporadas .	60
4.5.5	Análisis de muestras de costra salina .....	61
4.5.6	Análisis de isótopos .....	61
4.6	Identificación de humedales y generación de zonas de protección .....	67
4.7	Estimación del potencial del litio .....	67
4.7.1	Cálculo del Volumen del Salar .....	68
4.7.2	Estimación de la porosidad eficaz .....	69
4.7.3	Estimación de la concentración de litio en salmueras .....	69
5.	Resultados .....	70
5.1	Hidrografía de la zona de estudio .....	70
5.1.1	Delimitación de la cuenca hidrográfica del Salar de las Parinas .....	70
5.2	Geología de la cuenca del salar de las Parinas .....	73

5.3 Hidrogeología del Salar de las Parinas .....	80
5.3.1 Unidades Hidrogeológicas .....	80
5.4 Hidrología de la cuenca del Salar de las Parinas.....	83
5.4.1 Estimación de la precipitación media de cuenca .....	83
5.4.2 Estimación del coeficiente de escurrimiento y cálculo de caudal de escurrimiento.....	84
5.4.3 Estimación de la recarga de la cuenca .....	85
5.4.4 Estimación de la evaporación .....	85
5.4.5 Balance hídrico estimado.....	86
5.5 Hidrogeoquímica del Salar de Las Parinas .....	86
5.5.1 Análisis en costras salinas .....	87
5.5.2 Análisis químico de muestras de agua .....	88
5.5.3 Análisis isotópico de muestras de agua.....	98
5.6 Identificación de humedales y generación de zonas de protección .....	102
5.7 Modelo conceptual hidrogeológico del Salar de las Parinas .....	104
5.8 Estimación del Potencial de litio.....	106
5.8.1 Cálculo del volumen estimado de la cuenca.....	106
5.8.2 Estimación de la Porosidad eficaz ( $S_y$ ).....	109
5.8.3 Estimación de la concentración de litio en salmuera .....	111
5.8.4 Potencial de litio estimado del Salar de Las Parinas .....	113
6. Discusiones .....	115
6.1 Hidrografía de la cuenca del Salar de Las Parinas .....	115
6.2 Geología de la cuenca del Salar de Las Parinas .....	116
6.3 Hidrogeología de la cuenca del Salar de Las Parinas.....	116
6.4 Hidrología de la cuenca del Salar de Las Parinas.....	117
6.5 Hidroquímica de la cuenca del Salar de Las Parinas.....	118
6.6 Identificación de humedales y generación de zonas de protección .....	120
6.7 Potencial de litio del Salar de Las Parinas .....	120
7. Conclusiones.....	123
8. Recomendaciones.....	126
Bibliografía .....	128
Anexo .....	133
Anexo A. Muestras solidas de costra salina.....	133
Anexo A-1. Fichas descriptivas de muestras de costra salina.....	133
Anexo A-2. Resultados de análisis de difracción de rayos X de costras salinas.....	137

Anexo B Hidrología de la cuenca del Salar de las Parinas .....	145
Anexo B-1. Mapa de isoyetas de cuencas altoandinas de la Región de Atacama, Amphos 21, 2016.....	145
Anexo B-2. Tabla de desarrollo de estimación de recarga de la cuenca del Salar de las Parinas.....	146
Anexo C Hidroquímica .....	147
Anexo C-1. Base de datos hidroquímica.....	147
Anexo C-2. Diagramas Stiff.....	160
Diagramas Stiff de muestras de agua Risacher 1999.....	160
Diagramas Stiff de muestras de agua Troncoso 2016.....	161
Diagramas Stiff de muestras de agua terreno CORFO 2018.....	163
Anexo D Estimación de Potencial de litio.....	165
Anexo D-1. Estimación de volumen del Salar de Las Parinas .....	165
Anexo D-2. Estimación de Potencial de litio el Salar de las Parinas.....	169

## Índice de Tablas

Tabla 1 Especies animales identificadas en campaña de línea base de proyecto 7 salares, compañía Salares Lithium Inc.....	41
Tabla 2 Distribución de valores de conductividad hidráulica y permeabilidad. (Freeze and Cherry, 1979) .....	49
Tabla 3. Valores de coeficiente de infiltración ( $C_i$ ) en función de la permeabilidad cualitativa de las rocas. Fuente DICTUC (2009).....	51
Tabla 4 Rangos de salinidad (Santibañez, 2000).....	59
Tabla 5 Parámetros Morfométricos obtenidos de la cuenca del Salar de las Parinas .....	71
Tabla 6 Cálculo de áreas comprendidas entre isoyetas y ponderación por precipitación media entre isoyetas .....	83
Tabla 7 Estimación de la precipitación media anual de la cuenca del Salar de Las Parinas .....	84
Tabla 8 Resultados de la estimación del coeficiente de escorrentía de la cuenca del Salar de Las Parinas .....	84

Tabla 9 Resultados de la estimación del caudal de escorrentía de la cuenca del Salar de Las Parinas .....	84
Tabla 10 Estimaciones de las entradas de la cuenca del Salar de Las Parinas .....	85
Tabla 11 Resultados de estimación de evaporación de la cuenca del Salar de Las Parinas .....	85
Tabla 12 Balance hídrico de la cuenca del Salar de Las Parinas.....	86
Tabla 13 Resultados de análisis de difracción de rayos X de muestras tomadas en terreno enero 2018.....	88
Tabla 14 Resultados de análisis químicos de las muestras de costra salina del terreno de enero 2018.....	88
Tabla 15 Resultados de la estimación de la profundidad del salar de Las Parinas .....	106
Tabla 16 Resultados de la estimación de volumen del salar a partir de modelos de elevación de la zona.....	109
Tabla 17 Tabla de datos recopilados de proyectos similares al caso de estudio .....	110
Tabla 18 Rango de valores de porosidad eficaz de los estudios de Health (1983) y de Morris and Johnson (1967) .....	111
Tabla 19 Rangos de concentraciones de las zonas delimitadas para el salar de Las Parinas .....	112
Tabla 20 Resultados de la estimación de Potencial de Litio del Salar de Las Parinas con datos de los proyectos en los salares de Maricunga, Salinas Grande, Llamara y Olaroz .....	113
Tabla 21 Resultados de la estimación de Potencial de litio del Salar Parinas con datos bibliográficos de Health (1983) y Morris and Johnson (1967).....	114
Tabla 22 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-01, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	137
Tabla 23 Difractograma de muestra ULP-COST-01, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	138

Tabla 24 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-02, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	139
Tabla 25 Difractograma de muestra ULP-COST-02, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	140
Tabla 26 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-03, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	141
Tabla 27 Difractograma de muestra ULP-COST-03, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	142
Tabla 28 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-04, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	143
Tabla 29 Difractograma de muestra ULP-COST-04, Laboratorio SERNAGEOMIN .....	144
Tabla 30. Resultados de la recarga directa y lateral de las unidades hidrogeológicas. ....	146
Tabla 31 Muestras de aguas Risacher <i>et al.</i> 1999 .....	147
Tabla 32 Continuación tabla de muestras de agua Risacher <i>et al.</i> , 1999. ....	148
Tabla 33 Balance Químico de Muestras de Risacher <i>et al.</i> 1999.....	148
Tabla 34 Análisis químico de muestras de agua Troncoso <i>et al.</i> (2016).....	149
Tabla 35 Continuación tabla anterior, muestras de agua Troncoso <i>et al.</i> (2016) .....	150
Tabla 36 Tabla de elementos minoritarios de los estudios de Troncoso <i>et al.</i> (2016).....	151
Tabla 37 Parámetros químicos y relaciones iónicas de muestras Troncoso <i>et al.</i> (2016).....	152
Tabla 38 Balance Químico de muestras Troncoso <i>et al.</i> (2016).....	153
Tabla 39 Análisis químico de muestras de agua terreno enero 2018.....	154
Tabla 40 Continuación tabla anterior, análisis químico de muestras de agua terreno enero 2018.....	155

Tabla 41 Resultados de elementos minoritarios del Salar de las Parinas, enero 2018 .....	156
Tabla 42 Parámetros químicos y relaciones iónicas de muestras del presente estudio.....	157
Tabla 43 Balance ionico de las muestras salinas del presente estudio.....	158
Tabla 44 Resultado de análisis isotópicos de muestras salinas obtenidas en terreno del presente estudio.....	159
Tabla 45 Resumen de resultados de puntos de profundidad estimados del Salar de Las Parinas .....	165
Tabla 46 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con datos obtenidos del proyecto del Salar de Maricunga.....	169
Tabla 47 Calculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con valor promedio de $S_{\gamma}$ obtenidos del proyecto del Salar de Maricunga. ....	169
Tabla 48 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con valor promedio de $S_{\gamma}$ obtenidos del proyecto del Salar Olaroz. ....	170
Tabla 49 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con datos obtenidos de estudios de Health (1983) .....	170
Tabla 50 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con datos obtenidos de estudios de Morris and Johnson (1967) .....	171

## Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación y accesos al Salar de las Parinas, Región de Atacama. Elaboración propia. Fuente: elaboración propia.....	19
Figura 2 Modelos que ilustran las diferencias entre salares maduros e inmaduros. En los salares maduros la extensión y la recesión de las facies marginales son resultado del tectonismo y de las variaciones climáticas que otorgan la posibilidad de que ingresen al núcleo aguas diluidas. Por otro lado, los salares inmaduros, las facies marginales son menos complejas y la transmisión de aguas diluidas al núcleo del salar también es posible. El parámetro K se refiere a la conductividad hidráulica en las diferentes unidades. Extraído y modificado de Houston et al., 2011. ....	23

Figura 3 Ilustración creada según los estudios de Hardie y Eugster (1970) de la zonación típica de salares según las solubilidades de los minerales precipitados. Fuente: elaboración propia .....	24
Figura 4 Costos de producción de carbonato de litio según tipo de explotación. Fuente: Cochilco 2014 .....	28
Figura 5 Evolución demanda mundial de litio durante 2002-2012. Fuente: Informe COCHILCO 2013 .....	28
Figura 6 Demanda futura de litio en el periodo 2013-2030. Fuente SQM .....	29
Figura 7 Perfil esquemático geomorfológico del Norte de Chile. Extraído y modificado de presentación de Aníbal Gajardo, "Salares del Norte de Chile: Potenciales fuente de litio", CEPAL 10-11 noviembre 2010, Santiago, Chile...	29
Figura 8 Mapa de localización de la zona del Altiplano-Puna. Se distinguen las principales unidades fisiográficas de la zona, además de los volcanes y calderas presentes en la zona, mostradas como triángulos y círculos respectivamente. Extraído y modificado de Houston <i>et al.</i> , 2011.....	31
Figura 9 Imagen satelital de la zona del Salar de las Parinas, Región de Atacama. Fuente: elaboración propia.....	32
Figura 10 Mapa geológico de la zona del salar de Las Parinas, en base a la carta "geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, Región de Atacama, escala 1:100.000, realizado por Naranjo <i>et al.</i> , 2013.....	34
Figura 11 Mapa de estructuras de la zona del Salar de las Parinas. Fuente: elaboración propia en base a los estudios de Naranjo <i>et al.</i> , 2013. ....	37
Figura 12 Mapa de lineamientos regionales en el límite de Chile, Argentina y Bolivia. Con una estrella roja se identifica la ubicación del salar de estudio Extraído y modificado de Chernicoff <i>et al.</i> 2002.....	38
Figura 13 Fisonomía de vega salina de <i>Puccinellia frígida</i> en salar Parinas. Fuente: Ilustración extraída de informe DIA Proyecto Exploración Salares 7, Anexo C Línea base del medio biótico. ....	40
Figura 14 Imágenes de especímenes de la zona del salar de las Parinas. Extraído de informe Línea Base del Medio Biótico, Salares de Atacama Sociedad Contractual Minera, junio 2012.....	42
Figura 15 Vista de perfil de una depresión antes y después del relleno. (Como funciona FILL: ArcGIS Desktop website, 2017).....	45

Figura 16 Ilustración de la codificación de la dirección de flujo. (Como funciona Dirección de Flujo: ArcGIS Desktop website,2017).....	45
Figura 17 Mapa conceptual de la construcción de la red y cuenca hidrografica a partir de un modelo de elevación. Fuente: elaboración propia .....	46
Figura 18 Ilustración sobre la metodología seguida para la elaboración de la cuenca hidrográfica. Fuente: elaboración propia.....	46
Figura 19 Esquema de colores de clasificación de tipos de acuíferos. Extraído y editado de Struckmeier y Margat, 1995.....	48
Figura 20 Imágenes de sondas multiparámetros utilizadas en terreno. A) Sonda multiparámetro HANNA HI98192 B) HANNA HI98129. Fuente: HANNA Instruments.....	55
Figura 21 Fotografía de extracción de muestra de agua en laguna superficial, Salar de las Parinas, Región de Atacama. Fotografía de elaboración propia ..	56
Figura 22 Muestras entregadas y refrigeradas en laboratorio de SERNAGEOMIN. Fotografía de elaboración propia .....	57
Figura 23. Ejemplo de diagrama Piper (Piper, 1944) .....	58
Figura 24 Diagrama Stiff (Santibañez, 2000) .....	59
Figura 25. Diagrama de evolución de aguas evaporadas según Hardie y Eugster (1970). Extraído y editado de Risacher <i>et al.</i> , (1999).....	60
Figura 26. Esquema de distribución isotópica durante el ciclo hidrológico. Extraído de García & Pinto, 2017 .....	63
Figura 27. Línea Meteórica Mundial y procesos fraccionadores. Extraído desde Soler et al., 2015. ....	64
Figura 28 Variación temporal $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de sulfatos en evaporitas marinas. Extraído de Claypool et al. (1980) .....	65
Figura 29. Variaciones en la $\delta^{34}\text{S}$ del azufre y los compuestos de azufre. Extraído de Warren, 2016. ....	66
Figura 30 Variaciones de $\delta^{34}\text{S}$ y los compuestos de azufre en diferentes materiales naturales y compuestos antrópicos. Extraído de Vitoria et al. (2004) .....	66

Figura 31 Ilustración de los modelos de elevación utilizados para la delimitación de la cuenca. A) Modelo utilizado con el programa ArcGIS/ Arhydro, la zona del salar fue categorizada como un “cuerpo de agua” para el modelamiento y no fue necesario removerla. B)- Modelo utilizado con los programas ArcGIS / Hydrology y Global Mapper 15, al presentar problemas en la construcción de la red de drenaje, se removió los datos de la zona del salar. Fuente: elaboración propia .....	70
Figura 32 Mapa Hidrográfico de la cuenca del salar de las Parinas. Fuente: elaboración propia.....	72
Figura 33 Mapa geológico de la cuenca del Salar de las Parinas a partir de los trabajos de Naranjo <i>et al.</i> , 1992 y Naranjo <i>et al.</i> , 2013 .....	73
Figura 34 Mapa zonificado de la distribución de la costra salina del Salar de las Parinas elaborado a partir de datos tomados en terreno, enero 2018. Fuente: elaboración propia.....	74
Figura 35 Fotografías de la zona de carbonatos / clástica del Salar de las Parinas. A)- Sedimentos no consolidados con predominancia de carbonatos que caracteriza dicha zona. Fotografía tomada en punto D2-P2. B)- Sedimentos de los depósitos aluvial/coluvial adyacentes en la zona suroriental del salar. Se destaca la predominancia de clastos volcánicos de colores negros. Fotografía tomada en punto D3-P1. C)- Perfil de la zona suroriental del Salar de las Parinas. Fotografía tomada en punto D2-P2. D)- Perfil delimitado de la transición de los diferentes depósitos en la zona suroriental del Salar de las Parinas. En tono amarillo corresponde a los depósitos aluvial/ coluvial y en tonos naranjas la zona de carbonatos. Fotografía tomada en punto D2-P2. ...	75
Figura 36 Fotografías de la zona de sulfatos del Salar de las Parinas. A)- Loma perteneciente a la zona de sulfatos, ubicada en la zona oriental del salar. Fotografía tomada en punto D3-P1. B)- Fotografía de detalle de la loma oriental, se aprecian los cristales de yeso inmersos en una matriz pardo de similar composición, con trazas de carbonatos. Fotografía tomada en punto D3-P2. C)- Loma de sulfatos de la zona oriental por su flanco occidental. Fotografía tomada en punto D3-P2. D)- Loma de sulfatos en la zona norte del salar, se caracteriza por ser la más alta (> 7 mts). Fotografía tomada en punto D3-P4 .	76
Figura 37 Fotografía tomada en el punto D3-P4, de la zona de sulfatos y cloruros del Salar de las Parinas. A)- Perfil de la zona occidental del Salar de las Parinas. B)- Perfil delimitado de la zona occidental del Salar de las Parinas. En tonos rojos corresponde a la zona de sulfatos y en tonos verdes la zona de Cloruros.....	77
Figura 38 Fotografías de texturas de la costra salina en la zona norte del Salar de las Parinas. A)- Costra con textura rugosa que sobresale del suelo del salar. Fotografía tomada en punto D1-P1. B)- Costra salina con grietas de reseca. Fotografía tomada en punto D2-P6 .....	78

Figura 39 Fotografías de las lagunas de la zona norte del Salar de las Parinas. A)-Zona de vertientes difusas en la zona norte del salar, el flujo de agua es muy débil y se caracteriza por ser un sector muy pantanoso. Fotografía tomada en punto D1-P2 B)- Lagunas someras en la zona norte del salar, se caracteriza por tener una capa de sales cristalinos al fondo de ella, lo que indica una gran saturación de sales en estas aguas. Fotografía tomada en punto D3-P5 ..... 78

Figura 40 Fotografías de costras salinas en la zona sur del Salar de las Parinas. A)-Limite de costra salina con laguna somera, en donde se distinguen los clastos volcánicos que están inmersos en la costra salina. Fotografía tomada en punto D3-P3. B)- Costra salina en la zona sur del salar con su característica textura rugosa, de colores blanco-marrón. Fotografía tomada en punto D2-P7. .... 79

Figura 41 Fotografías de la zona sur del Salar de las Parinas. A)-Laguna de la zona sur del salar, se caracteriza por sus aguas turbias color marrón. Fotografía tomada en punto D2-P8. B)- Foto panorámica del borde sur del salar, se destaca la amplia presencia de vega salina. Fotografía tomada en punto D2-P2 C)-Fotografía de vertientes hacia el centro del salar en el borde sur, se destaca la presencia de vega salina siempre asociada a las vertientes. Fotografía tomada en punto D2-P9. D)-Fotografía de flamencos en la zona sur del salar de las Parinas. Fotografía tomada en punto D2-P4. .... 79

Figura 42 Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Las Parinas, Región de Atacama. Fuente: elaboración propia..... 82

Figura 43 Mapa de la cuenca del Salar de las Parinas intersecada con las Isoyetas generadas por Amphos21, 2016. Fuente: elaboración propia ..... 83

Figura 44 Mapa de ubicación de muestras de agua y de costra salina tomadas en enero 2018. Fuente: elaboración propia..... 87

Figura 45 Diagrama Piper de muestras de agua recopiladas de los estudios de Risacher *et al.* (1999) ..... 89

Figura 46 Diagrama Piper de muestras de aguas recopiladas de los estudios de Troncoso *et al.* (2016) ..... 90

Figura 47 Diagrama Piper de muestras tomadas en terreno Salar de Las Parinas, enero 2018 ..... 91

Figura 48 Diagramas Stiff de muestras salinas de los estudios de Risacher *et al.* (1999) ..... 92

Figura 49 Diagramas Stiff de las muestras salinas de los estudios de Troncoso *et al.* (2016) ..... 92

Figura 50 Mapa de Diagramas Stiff de las muestras tomadas. Salar de Las Parinas, enero 2018. ....	93
Figura 51 Gráficos comparativos de litio con respecto a los elementos mayores de las muestras obtenidas en terreno (enero, 2018) .....	95
Figura 52 Gráficos comparativos de litio con respecto a los elementos mayores de las muestras del presente estudio, junto con las muestras de Risacher et al. (1999) y Troncoso et al. (2016). ....	96
Figura 53 Diagrama de elementos minoritarios y trazas de las muestras salinas de los estudios de Troncoso <i>et al.</i> (2016) .....	97
Figura 54 Diagrama de elementos minoritarios y trazas de las muestras salinas recopiladas en enero 2018 .....	98
Figura 55 Composición isotópica de muestras obtenidas del Salar de Las Parinas en enero 2018, contrastadas con la línea meteórica mundial (LMM). .	99
Figura 56 Gráfico de variación isotópica de deuterio% VSMOW con respecto a la altura .....	100
Figura 57 Gráfico de variación isotópica de <sup>18</sup> O% VSMOW con respecto a la altura .....	101
Figura 58 Gráfico de variación isotópica de <sup>34</sup> S% V-CDT con respecto al SO <sub>4</sub> .....	101
Figura 59 Análisis de imágenes Landsat 8 y Rapid Eye junto con el índice de vegetación (NDVI) .....	102
Figura 60 Mapa de zonas de protección de humedales del Salar de las Parinas .....	103
Figura 61 Modelo hidrogeológico de la cuenca del Salar de Las Parinas, región de Atacama .....	105
Figura 62 Resultados del cálculo de volumen del Salar de las Parinas, ilustrados en un modelo de elevación (DEM) generado a partir del modelo de triángulos irregulares (TIN).....	107
Figura 63 Esquema de la estructura interna propuesta para el Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia.....	108
Figura 64 Ilustración de los tres casos propuestos de potencias inferidas para el Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia.....	109

Figura 65 Mapa de puntos de muestreo de aguas superficiales y concentraciones de litio de muestras analizadas, junto a los trabajos de Risacher <i>et al.</i> (1999), Troncoso <i>et al.</i> (2016) y puntos tomados en este trabajo. ....	111
Figura 66 Mapa de concentración de litio delimitado por zonas del Salar de las Parinas a partir de muestras de aguas superficiales. ....	112
Figura 67 Mapa de isoyetas de las cuencas Altoandinas de la región de Atacama. Amphos 21, 2016 .....	145
Figura 68 Diagramas Stiff de muestras de agua PAR-1 a 7, Risacher 1999..	160
Figura 69 Diagramas Stiff muestras de agua LPA-RT-001 a 006, Troncoso 2016 .....	161
Figura 70 Diagramas Stiff de muestras de agua LPA-RT-007 a 011, Troncoso 2016. ....	162
Figura 71 Diagramas Stiff de muestras salinas del Salar de Las Parinas, ULP-01 a ULP-06, enero 2018. Fuente: elaboración propia.....	163
Figura 72. Diagramas Stiff de muestras salinas del Salar de Las Parinas, ULP-06 a ULP-12, enero 2018. Fuente: elaboración propia.....	164
Figura 73 Mapa de perfiles topográficos realizados en software ArcGIS, en la cuenca del Salar de las Parinas. Fuente: elaboración propia .....	165
Figura 74 Perfiles 1-3 con proyección de laderas adyacentes en Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia.....	166
Figura 75 Perfiles 4-6 con proyección de laderas adyacentes en Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia.....	167
Figura 76 Perfiles 7-9 con proyección de laderas adyacentes en Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia.....	168

# 1. Introducción

## 1.1 Aspectos generales

Los salares corresponden a depósitos salinos continentales localizados en cuencas endorreicas, generados debido a altas tasas de evaporación y bajas precipitaciones. Estos depósitos se componen de costras salinas, salmueras y fracciones clásticas. Generalmente en los salares podemos encontrar carbonatos, sulfatos, cloruros y boratos, en diferentes concentraciones, tanto en la costra salina como en la salmuera. La relevancia hoy en día de este tipo de depósitos radica en que poseen altas concentraciones de elementos de interés económico, como lo son el Potasio, Boro y en particular el litio, elemento cotizado en los últimos años por su emergente y creciente demanda en la industria tecnológica.

En la zona norte de Chile existen alrededor de 60 salares comprendidos en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama (Troncoso *et al.*; 2016). Todos estos salares se ubican en la precordillera y cordillera de los Andes, lo que permite clasificarlos en salares pre andinos y salares andinos (Chong *et al.*, 1984). Esta ocurrencia masiva de salares en el norte de Chile no es casualidad, sino que es el resultado de diversos factores geológicos y climáticos, que desencadenan la generación de estos depósitos evaporíticos salinos. Entre los factores determinantes para la formación de dichos salares están:

- 1- La tectónica, que causa la formación de cordones montañosos, los cuales generan cuencas cerradas
- 2- El volcanismo cenozoico el cual aporta componentes químicos mediante la lixiviación de rocas volcánicas
- 3- El clima hiper-árido el cual permite altas tasas de evaporación y bajas precipitaciones (Risacher *et al.*, 1999).

En Chile, estos depósitos salinos de la zona norte del país han sido objeto de numerosos estudios para evaluar su potencial minero, tanto de litio como de potasio. El 2017, Chile fue considerado el segundo productor de litio a nivel mundial (U.S. Geological Survey, January 2017), donde se destaca la explotación de las salmueras del salar de Atacama, el cual corresponde a una de las mayores reservas conocidas de litio a nivel mundial (U.S. Geological Survey, January 2017) y su explotación abarca casi la totalidad de la producción de litio del país. Cabe destacar que los yacimientos chilenos poseen grandes ventajas comparativas para su explotación debido a las altas concentraciones de litio y al bajo costo de producción que tienen las salmueras frente a un yacimiento mineral. A futuro se estima un alza en el mercado del litio debido al aumento del consumo de baterías de litio, cerámicas y fundentes principalmente.

El salar de Las Parinas se ubica en la provincia de Chañaral, Región de Atacama, a 170km hacia el Este de Diego de Almagro. El salar se encuentra en la zona Noroeste de la región, próximo a la frontera con Argentina, el cual además limita al oeste con el salar de la Isla. Este salar se encuentra rodeado por diversos centros volcánicos, los cuales posiblemente contribuyeron con la

concentración de litio y potasio, mediante la lixiviación de rocas volcánicas y la actividad hidrotermal de la zona.

En particular, el salar de Las Parinas ha sido objeto de evaluaciones preliminares debido a su potencial en litio. El estudio *“Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones, Chile”* (Risacher et al., 1999) entrega diversos análisis de aguas de manantiales y entrega estudios básicos de evolución geoquímica de los salares de las regiones mencionadas. El trabajo *“Informe bibliográfico sobre los salares del Norte Grande, Chile”* (Ercilla & Carrasco, 2012) realiza una compilación de antecedentes sobre los salares del Norte hasta la fecha, mostrando aspectos fundamentales de la geología y los análisis de laboratorio realizados en dichos salares. Finalmente, el trabajo *“Estudio del potencial de litio en salares del Norte de Chile”* (Troncoso et al., 2013) valida en terreno la información existente de los salares y aporta más antecedentes químicos de sus costras salinas y sus salmueras, dando énfasis a las concentraciones de litio. Los resultados del estudio anterior clasificaron al salar de Las Parinas con un potencial de litio medio a alto, no obstante, no existe aún una cuantificación del total de litio extraíble y ni mucho menos un modelo hidrogeológico que pueda sustentar una explotación viable de este recurso

El presente trabajo se centró en abordar por primera vez una evaluación cuantitativa del potencial de litio en el Salar de Las Parinas, mediante la recopilación y adquisición de nuevos datos químicos, se generó una estimación del recurso geológico disponible a partir de un modelo hidrogeológico conceptual. Es importante mencionar que este proyecto fue apoyado por el Comité de Minería No Metálica de CORFO, el SERNAGEOMIN y la Universidad de Chile.

## **1.2 Objetivos del estudio**

### **1.2.1 Objetivo general**

El objetivo general del presente estudio es caracterizar la hidrogeología y estimar el potencial de litio del Salar de Las Parinas, Región de Atacama, Chile.

### **1.2.3 Objetivos específicos**

Para lograr el objetivo general anteriormente propuesto, se plantean los siguientes objetivos específicos.

- Caracterizar y clasificar el salar en sus aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos.
- Generación de un estudio hidrogeológico del Salar Parinas
- Estimación de potencial del litio del Salar Las Parinas.

## **1.3 Ubicación y accesos**

El presente trabajo se centra en el salar de Las Parinas, ubicado en la comuna de Diego de Almagro, provincia de Chañaral, Región de Atacama, en la zona Nororiental de la región, a 170 km hacia el Este de Diego de Almagro, próximo a la frontera con Argentina, al Oriente del salar de La Isla (Figura 1)

Para acceder al salar se debe tomar, desde la ciudad de Copiapó, la ruta C-17 para llegar a la ciudad de Diego de Almagro, una vez ahí se debe seguir

por la ruta C-13, pasando por la ciudad de El Salvador, hasta las cercanías del Salar de Pedernales, donde se debe tomar un desvío hacia el sur bordeando al salar, luego de varios kilómetros se ubica el campamento de la minera Gold Fields, donde siguiendo un camino al noreste de dicho campamento, pasando por el borde norte del Salar Grande, se llega a la zona sur del Salar de La Isla, donde se sigue su borde oriental para poder llegar por la zona norte al Salar de las Parinas (Figura 1).

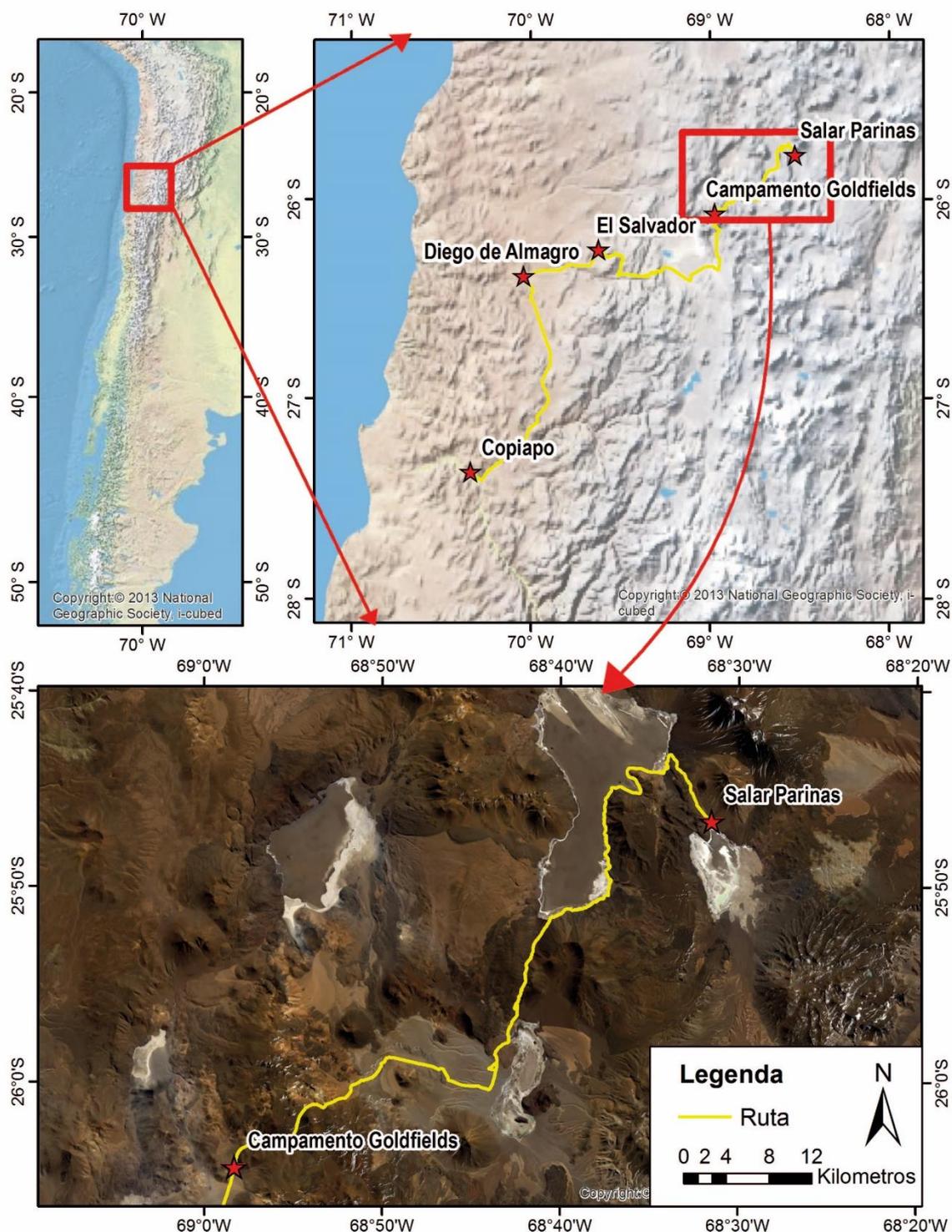


Figura 1 Mapa de ubicación y accesos al Salar de las Parinas, Región de Atacama. Elaboración propia. Fuente: elaboración propia

## 1.4 Limitaciones

En este trabajo una de las grandes limitantes para su realización es la escasez de datos disponibles. El salar de Las Parinas se trata de un salar pequeño en comparación con otros salares de la misma zona (40 km<sup>2</sup>) y gran parte de los trabajos realizados lo han estudiado en conjunto con todos los demás salares de la zona, realizándose solo análisis químicos de aportes a la cuenca, costras salinas y salmueras (Risacher *et al.*, 1999; Ercilla *et al.*, 2012; Troncoso *et al.*, 2014). Ninguno de estos trabajos se ha centrado particularmente en el salar de estudio, por lo tanto, la cantidad de muestras tomadas en el salar de Las Parinas son escasas. Además, en ninguno de estos trabajos se estudió el subsuelo de la zona, lo que deja incertezas acerca de la estructura interna del salar. El acceso a estos estudios se vio facilitado ya que estos se encuentran publicados abiertamente.

Por otro lado, el salar de Las Parinas también ha sido objeto de estudios por empresas privadas, las cuales han liberado parte de sus resultados en informes presentados para el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). No obstante, los resultados entregados no son suficientes y solo revelan aspectos generales de sus estudios, los datos tanto de habilitación de pozos, estratigrafía y prospecciones geofísicas no fueron presentadas.

El salar de Las Parinas, como se dijo anteriormente se encuentra en un sector de difícil acceso adyacente a la frontera con Argentina, cerca de los 4000 m.s.n.m. La dificultad en el acceso a la zona de estudio generó desafíos para la gestión misma del terreno a realizar, ya que produjo que el traslado tanto de personal, como de equipo de muestreo fuese bastante complejo. Además, se agrega el hecho que la campaña de muestreo fue única y de corta duración, lo cual limita la cantidad de muestras y descarta la posibilidad de analizar la variable estacional (invierno-verano) de los datos.

Otra limitante para el presente estudio fue que la red de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) no cuenta con estaciones pluviométricas en la cuenca de estudio, por lo tanto, no existen datos de precipitaciones, evaporación y escurrimiento en la zona de estudio. Los datos utilizados debieron ser recopilados de estudios sobre estimaciones de precipitaciones en la zona y de estimaciones a partir de las estaciones más cercanas.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Salares

#### 2.1.1 Definición de Salar

El concepto de salar corresponde a depósitos salinos continentales ubicados en cuencas endorreicas, las cuales están sometidas a altas tasas de evaporación y escasas precipitaciones. A causa de la predominancia de la evaporación por sobre las precipitaciones, comienza un proceso de depositación de múltiples minerales evaporíticos compuestos de los elementos en solución del agua “entrampada” en la cuenca. Dichos minerales suelen ser carbonatos, sulfatos y predominantemente cloruros.

La zona del Altiplano-Puna es la segunda meseta más extensa del mundo ubicada a grandes altitudes (Houston *et al.*, 2011) y en esta, se ubican un gran número de salares, los cuales contienen grandes concentraciones de Li entre otros elementos de interés. La causa de la existencia de estos salares tiene componentes tanto geológicos, como también climáticos, los que esencialmente son (Risacher *et al.*, 1999):

- **La tectónica:** causante de la formación de cordones montañosos, los cuales generan cuencas cerradas.
- **El volcanismo cenozoico:** aporta componentes químicos que, mediante la lixiviación de rocas volcánicas por circulación de fluidos, son transportados a las zonas más profundas de la cuenca.
- **El clima hiper-árido:** permite la condición de altas tasas de evaporación y bajas precipitaciones necesarias para la precipitación de sales.

#### 2.1.2 Tipos de salares

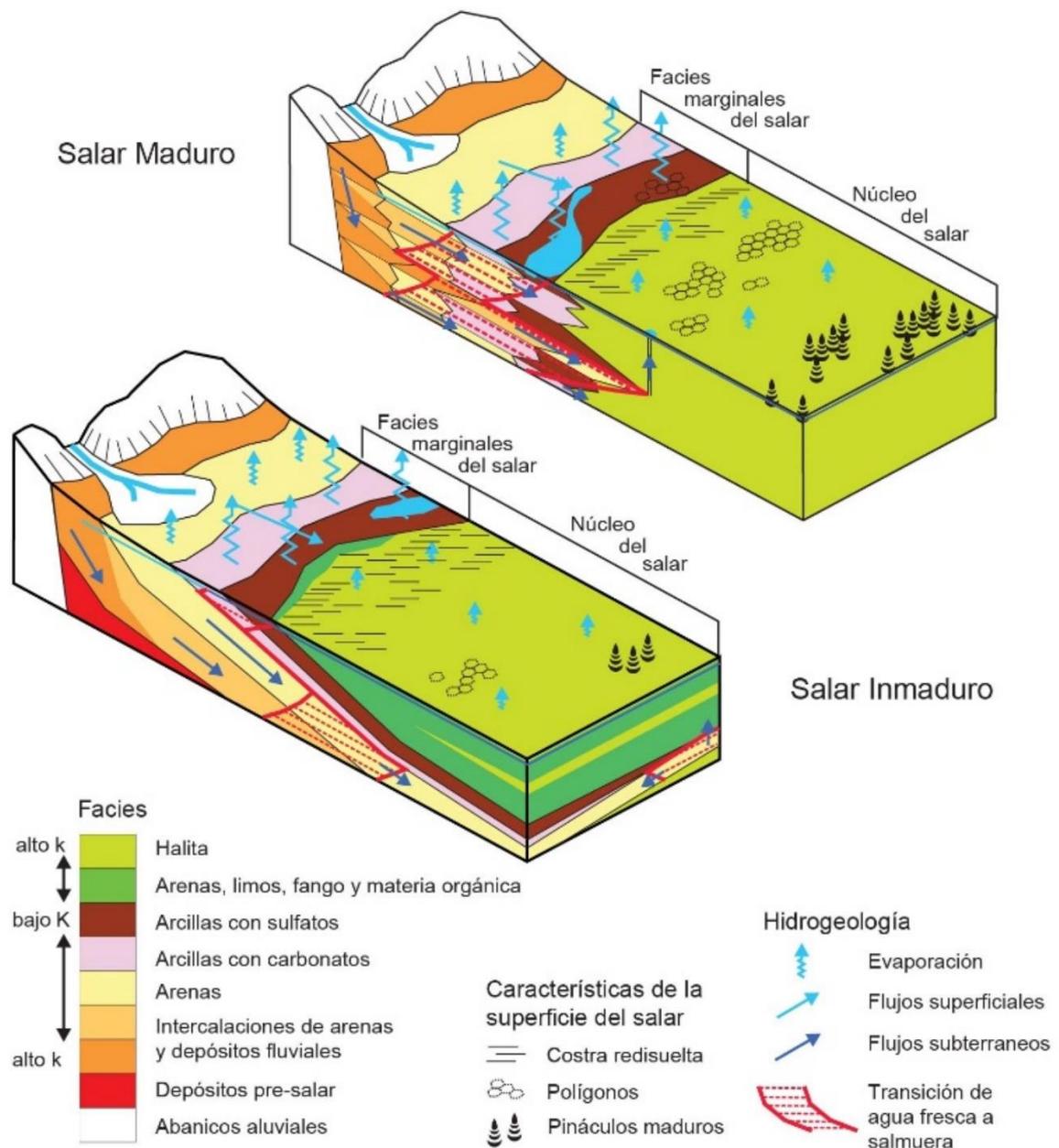
A lo largo del tiempo, múltiples estudios han clasificado de diversas formas los salares existentes del Norte de Chile. En base a una clasificación morfológica, Stoertz y Ericksen (1974) propone 3 tipos de salares:

- Lagunas salinas: cuerpos de agua salina permanentes, en donde toda el área del salar es ocupada por el agua salina.
- Salares tipo “playa”: constituidos por sedimentos salinos finos, muy poco permeables, sobre los cuales existen lagunas de extensión variable. Debajo de los sedimentos, en un rango de los centímetros a los metros, existen napas con salmueras sin conexión con las aguas superficiales. Estos salares son los más comunes en la zona del Altiplano
- Costras de sales: corresponden a costras porosas y permeables de halita (NaCl) o yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), las cuales contienen salmueras intersticiales. Se pueden encontrar en la Precordillera, por debajo de los 3500 mts de altura.

Otra clasificación según la posición geográfica de los salares es dada por Chong (1984), el cual agrupa los salares en pre-andinos y andinos. Por su parte Risacher (1999), notando la variación de la evaporación potencial del Norte de Chile desde la costa hasta la Cordillera de los Andes, propone 2 grupos: los salares de la costa y del valle central y los salares de la Cordillera de los Andes.

Según el trabajo de Houston (2011) se plantean 2 modelos de salares en base a características tanto de superficie como de subsuelo, estos corresponden a salares maduros e inmaduros (figura 2). Los salares inmaduros se caracterizan por tener regímenes más húmedos, ubicándose en zonas más elevadas, al Norte y al Este del Altiplano-Puna. Están compuestos por secuencias alternadas de sedimentos finos y capas evaporíticas de halita y/o ulexita, lo que evidencia periodos de aumento y disminución del aporte de sedimentos debido variaciones climáticas y tectónicas. En las salmueras, el contenido de halita apenas llega al nivel de saturación, lo que sugiere que el clima de formación no fue excesivamente hiperárido, con respecto al yeso, este suele encontrarse en completa saturación en las salmueras, dando lugar a la ocurrencia de este mineral en las secuencias del salar. Las variaciones climáticas entre climas secos y húmedos a menudo generan desequilibrios entre la tasa de evaporación y la tasa de concentración de la salmuera, generando periodos de transición entre aumentos o disminuciones de la concentración de la salmuera debido a la variación de la evaporación. Dichas variaciones climáticas también explican la ocurrencia de capas de halita en la parte más baja de la secuencia sedimentaria, las cuales corresponderían a periodos más secos en la formación del salar.

Los salares maduros se caracterizan por tener regímenes de baja humedad (bajas precipitaciones), por lo tanto tienden a ubicarse en la zonas más secas del Altiplano- Puna. Estos salares suelen presentar una relativa, uniforme y gruesa secuencia de halita, depositada bajo condiciones subaereas a subacuaticas (Bobst *et al.*, 2001). No obstante, estos salares tambien pueden presentar secuencias de arcillas a causa de inundaciones pasadas y abanicos aluviales o tambien secuencias de material volcanico como consecuencia de la denudacion de los edificios volcanicos cercanos. Estas secuencias generan variaciones en la permeabilidad, generando niveles permeables e impermeables los cuales se acuñan en los bordes del salar.



**Figura 2 Modelos que ilustran las diferencias entre salares maduros e inmaduros. En los salares maduros la extensión y la recesión de las facies marginales son resultado del tectonismo y de las variaciones climáticas que otorgan la posibilidad de que ingresen al núcleo aguas diluidas. Por otro lado, los salares inmaduros, las facies marginales son menos complejas y la transmisión de aguas diluidas al núcleo del salar también es posible. El parámetro K se refiere a la conductividad hidráulica en las diferentes unidades. Extraído y modificado de Houston et al., 2011.**

### 2.1.3 Química de salmueras

Los salares a grandes rasgos poseen una fase sólida y una líquida. La primera se conforma por una costra salina que corresponde a un conjunto de minerales evaporíticos, en donde predomina la halita, y de detritos de origen aluvial y/o coluvial. La segunda, corresponde a una salmuera, la cual se genera

producto del exceso de evaporación por sobre la recarga del acuífero del salar. Dicho proceso genera una gran concentración de sales disueltas en la salmuera, llegando a precipitar de ella diversos tipos de minerales evaporíticos cuando el grado de saturación exceda el límite

La química de las salmueras posee múltiples factores que dominan su comportamiento, estos pueden ser tanto geológicos como climáticos, pero dentro de todos, el principal factor incidente en la química es la erosión de las rocas circundantes al salar por la infiltración y el paso de las precipitaciones a través de ellas (Risacher *et al.*, 2003; Houston *et al.*, 2011). Este factor toma real importancia en la zona Norte de Chile, en donde la presencia y la erosión de rocas volcánicas contribuye de gran manera en el aporte de componentes en solución a las salmueras (Risacher *et al.*, 1999)

Las salmueras alojadas en acuíferos de los salares muestran un aumento típico en la concentración desde sus márgenes hacia el núcleo. Es característico que los gradientes de concentración más altos ocurran en salares con ambientes en donde la evaporación es muy alta (Houston *et al.*, 2011).

Otra característica de las salmueras es el desarrollo de divisiones químicas a causa de la concentración por la evaporación (Hardie y Eugster, 1970). El modelo de evolución de la composición química de las aguas a raíz de la evaporación fue establecido por Hardie y Eugster (1970) y establece que cuando un agua evapora, sus componentes disueltos se concentran y precipitan una secuencia de minerales según un orden acorde a las solubilidades crecientes, es decir, primero precipitan los minerales con menor solubilidad y más hacia el centro precipitan los minerales con mayores solubilidades. A causa de este fenómeno, los salares tienen una zonación característica, donde a grandes rasgos, los primeros minerales en precipitar son los carbonatos, luego los sulfatos y finalmente los cloruros, los cuales tienen las mayores solubilidades (Figura 3). La continua concentración de elementos en la salmuera residual debido a la evaporación conduce a la existencia de altas concentraciones de elementos de interés económico como lo son el litio y el potasio, transformando al núcleo del salar en un gran potencial minero.

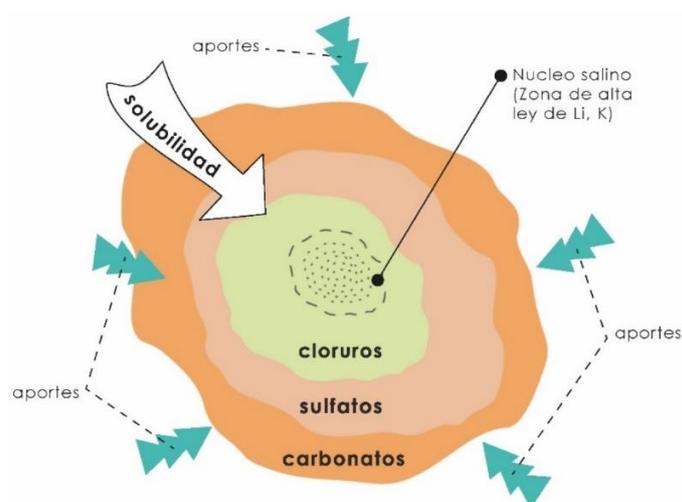


Figura 3 Ilustración creada según los estudios de Hardie y Eugster (1970) de la zonación típica de salares según las solubilidades de los minerales precipitados. Fuente: elaboración propia

Como se dijo anteriormente, a causa de la evaporación y de la precipitación de minerales, el agua residual de los salares va variando su composición química. Según el modelo de evolución química de Hardie y Eugster (1970) interpreta que existen 5 alternativas de vías evolutivas para la química de las aguas, las cuales son:

- Vía Carbonatada
- Vía sulfatada directa
- Vía sulfatada alcalina
- Vía sulfatada neutra
- Vía cálcica

El factor que determina que vía evolutiva sigue un agua evaporada es la composición inicial del agua que ingresa a la cuenca, pequeñas diferencias en las concentraciones iniciales de los compuestos pueden generar salmueras muy distintas unas de otras. Lo dicho anteriormente se debe a que la evaporación funciona como un mecanismo que amplifica las diferencias iniciales de los compuestos de las salmueras (Risacher *et al.*, 1999).

Estas cinco vías evolutivas generan tres tipos o familias de salmueras, las salmueras carbonatadas (Na / CO<sub>3</sub> – Cl), sulfatadas (Na / SO<sub>4</sub> -Cl) y las cálcicas (Na-Ca /Cl). En la zona del Altiplano- Puna, según diversos estudios a lo largo de los años (Rettig *et al.*, 1980; Igarzábal *et al.*, 1984; Risacher *et al.*, 1991, 1999, 2003 y Houston *et al.*, 2009-2011), han llegado a la conclusión de que el tipo de salmuera más común en esta zona son las salmueras sulfatadas (Na / SO<sub>4</sub> -Cl) y las cálcicas (Na-Ca /Cl) (Houston *et al.*, 2011).

Particularmente varios salares existentes en la zona del Altiplano-Puna presentan núcleos salinos ricos en elementos de gran importancia económica como lo son el litio, potasio y el boro. Las concentraciones de estos elementos generalmente son directamente proporcionales a las concentraciones de sodio y cloruro, no obstante, en la zona del Altiplano-Puna existen notables desviaciones de este patrón, ya que ciertos salares poseen concentraciones mucho más grandes de lo esperadas de dichos elementos, como ejemplo de esto se encuentran los salares de Atacama, Uyuni, Hombre Muerto, entre otros (Houston *et al.*, 2011).

La presencia de altas concentraciones de Potasio, Boro y por sobre todo de litio en los salares del Altiplano-Puna aún se encuentra en debate, diversos estudios postulan que el reciclado de salares antiguos y la redisolución de costras salinas puede contribuir a la concentración de dichos elementos de interés (Li-K-B), esto basado en relaciones Na/Cl y Ca/SO<sub>4</sub> de muestras de salmueras, no obstante, esta hipótesis no explica las altas concentraciones de litio (Risacher *et al.*, 1999; Risacher *et al.*, 2003; Orti and Alonso, 2000). Los estudios de Orti y Alonso (2000) y Kay (2010) proponen que la meteorización de rocas volcánicas del cenozoico puede contribuir a las altas concentraciones de litio, sin embargo, esta hipótesis no explica la alta relación Li/Mg (usualmente mayor a 0,2) característica de los salares del Altiplano-Puna.

Finalmente, la actividad hidrotermal ha sido postulado como candidato a mecanismo de concentración de litio, ya que a altas temperaturas se puede tener bajas concentraciones de Magnesio con respecto al litio, debido a que la clorita que se genera en dichos sistemas secuestra Magnesio, dejando al litio en solución (Orti y Alonso, 2000; Gibert *et al.*, 2009; Lowenstein y Risacher, 2009).

## **2.2 El litio: Su situación en Chile y en el mundo.**

El litio es un metal alcalino el cual hoy en día, ha ganado mucha relevancia a nivel mundial. Este metal posee propiedades fisicoquímicas notables como su alto potencial electroquímico y su bajo peso específico, lo que lo ha llevado a convertirse en un elemento clave en el desarrollo de nuevas tecnologías portables, siendo parte de baterías de larga duración y de bajo peso. El litio también es aprovechado en la industria para la generación de aleaciones, vidrios cerámicos y medicamentos. El consumo del litio para la creación de baterías recargables ha tenido un alza significativa en los últimos años, creciendo en un 12% a nivel mundial en 2016, (Mineral commodity Summaries 2017, USGS) y se estima que este crecimiento continúe, con el emergente mercado de los vehículos eléctricos y la masificación de tecnologías portables.

### **2.2.1 Ocurrencia**

En la naturaleza, el litio está presente en la corteza terrestre en una concentración promedio de 0,006% (Yaksic 2008, Pimentel 1998, Moscoso 2003, Cochilco, 2009), dentro del cual puede presentarse tanto en forma mineral, como también disuelto en salmueras. Se conocen aproximadamente 150 minerales de litio siendo los cuatro más importantes, desde el punto de vista económico, la ambligonita, espudomena, petalita y lepidolita (Mineral commodity Summaries 2017, USGS).

Los minerales de litio son posibles encontrar en rocas pegmatíticas y en rocas sedimentarias (hectorita como mineral principal) además, como se dijo anteriormente, también se encuentra disuelto en las salmueras de salares, campos de petróleo y geotermales. El litio también se puede encontrar en los océanos, aunque en éstos existe una concentración de aproximadamente 0,17 ppm de litio (Yaksic 2008), lo que lo hace una gran fuente de reservas, pero debido a su baja concentración su explotación es económicamente inviable.

Los salares del Norte de Chile, ubicados entre las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, presentan grandes concentraciones de litio (Ercilla *et al.*, 2012 y Troncoso *et al.*, 2013) y su gran ventaja en el ámbito minero, son los bajos costos de explotación que tienen las salmueras en salares, en comparación a la explotación mineral de litio. Además del litio, en los salares del Norte de Chile se pueden encontrar altas concentraciones de Potasio y de Boro (Eriksen and Salas; 1989 y Houston *et al.*, 2011), los cuales también son recursos explotables. En vista de todo esto, los salares del Norte de Chile son un gran potencial para la minería, no obstante, la escasez de estudios detallados dificulta la explotación de estos recursos, siendo hoy en día el salar de Atacama el único que se encuentra en explotación por compuestos de litio, Potasio y Boro (Informe Comisión del litio 2015).

## 2.2.2 Recursos

Las estimaciones sobre los volúmenes mundiales de recursos de litio han diferido a lo largo del tiempo, no obstante, después de una evaluación de diversas fuentes, Cochilco en sus investigaciones de mercado del litio, ha estimado que los recursos ascienden a 36,7 millones de toneladas (COCHILCO 2013), esto sin considerar el litio contenido en el agua de mar.

Los recursos de litio mundial se pueden clasificar según el tipo de depósito, un 82% de los recursos se encuentran en salmueras de salares (salmueras de Argentina, Bolivia, Chile, China y Estados Unidos), 15% en rocas minerales y un 3% en otras fuentes como salmueras geotermales o campos petrolíferos (COCHILCO, 2009).

Como se mencionó anteriormente, Chile posee grandes reservas de litio a nivel mundial. Según el servicio geológico de estados unidos (USGS), las reservas mundiales de litio alcanzarían unos 13 millones de toneladas, de los cuales 7,5 millones corresponden a reservas chilenas (Mineral commodity Summaries 2017, USGS). Hoy en día, Chile es el segundo productor de carbonato de litio a nivel mundial con 12.000 toneladas en el año 2016, solamente superado por Australia el cual tiene una producción de 14.300 toneladas en el mismo año (Mineral commodity Summaries 2017, USGS). Cabe mencionar nuevamente que en Chile el único salar en explotación de litio es el salar de Atacama, el cual además por sí solo tiene una de las reservas más grandes de litio a nivel mundial.

## 2.2.3 Producción de litio

Hoy en día, básicamente el litio se explota desde dos fuentes, de salmueras de salares y de rocas pegmatíticas. Para la explotación de estos dos tipos de depósitos se siguen a grandes rasgos los siguientes dos tipos de procesos:

- **En salmueras de salares:** Extracción de salmueras y concentración mediante evaporación solar. La solución concentrada es tratada en plantas químicas para la posterior precipitación de carbonato de litio.
- **En rocas pegmatíticas:** Explotación de minerales de litio como el ambligonita, espudomena, petalita y lepidolita. Los yacimientos de estos minerales generalmente están cerca de la superficie, lo cual permite su explotación por el método de rajo abierto. Para la producción de concentrados de minerales de litio se siguen procesos estándares de chancado, molienda y clasificación. El concentrado obtenido luego es tratado en plantas químicas para la obtención de hidróxido o carbonato de litio.

Comparativamente, la extracción de litio en rocas pegmatíticas supone un gasto energético mucho mayor que la extracción de litio en salmueras, por lo tanto, sus costos de explotación son mayores. En la figura 4 se puede notar esta diferencia de costos de explotación entre los dos tipos de operaciones, las empresas dedicadas a explotaciones en salmueras (SQM, Rockwood, FMC, Zabuye y Taijinaier) exhiben claramente costos de producción menores por tonelada de carbonato de litio producido, siendo en particular las operaciones en Chile las que muestran un menor costo.

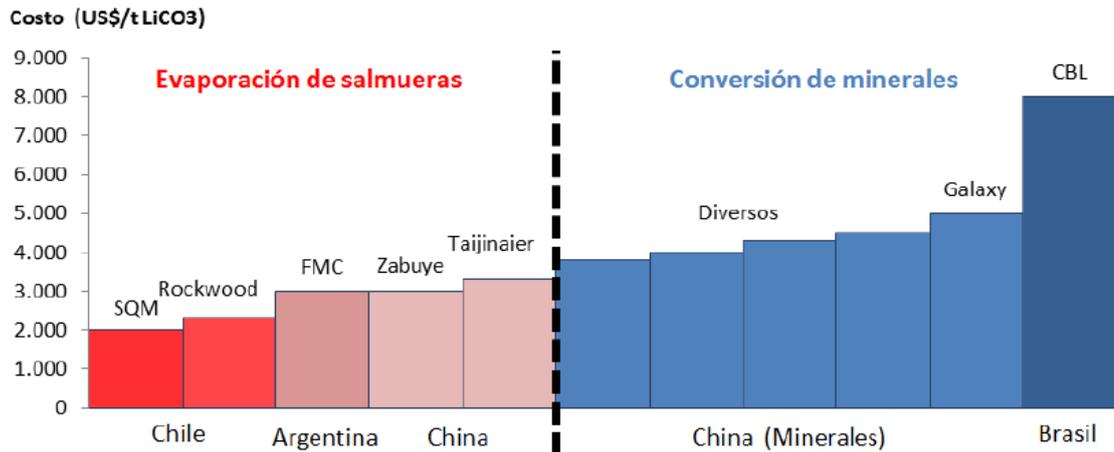


Figura 4 Costos de producción de carbonato de litio según tipo de explotación. Fuente: Cochilco 2014

### 2.2.4 Demanda de litio

En los últimos años, debido al crecimiento de la industria tecnológica, la demanda de litio ha experimentado un notorio aumento. En estudio realizados de COCHILCO realizados en los periodos de 2002 al 2012, se descubrió que la demanda de litio se duplicó en dicho periodo, pasando desde las 70.000 toneladas hasta las 150.000 toneladas de litio (Figura 5). Entre los países que se destacan sus alzas en sus demandas de Litio son China y Corea del Sur (Figura 5), debido a su rápido crecimiento en la industria de baterías recargables.

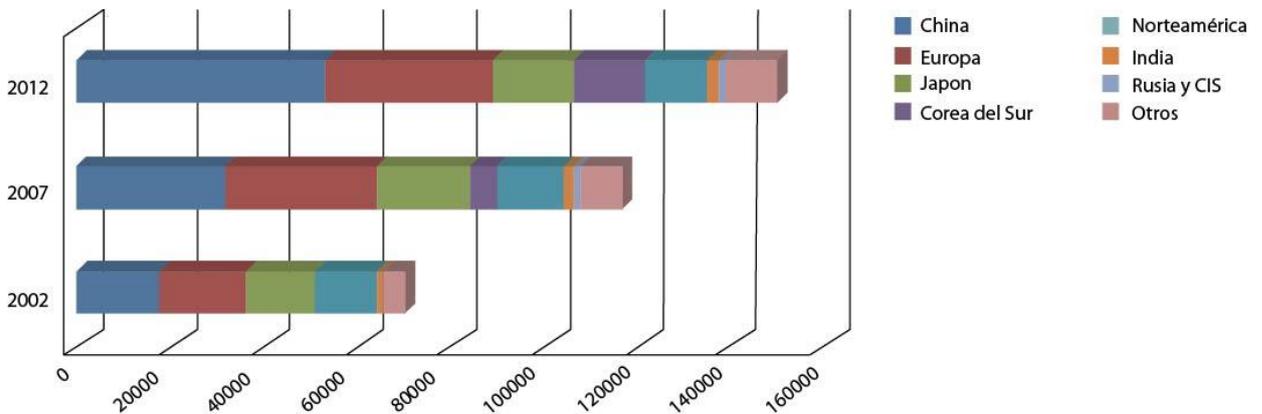


Figura 5 Evolución demanda mundial de litio durante 2002-2012. Fuente: Informe COCHILCO 2013

En estudios realizados por SQM los cuales aportaron para la Comisión del litio, estimaron que la demanda durante el periodo 2013 - 2020, la tasa de crecimiento anual compuesta (Compound annual growth rate CAGR) tendría un valor de 8,6% y aumentaría a un 9,4% en el periodo 2020 -2030, por el crecimiento del mercado de los vehículos eléctricos (figura 6).

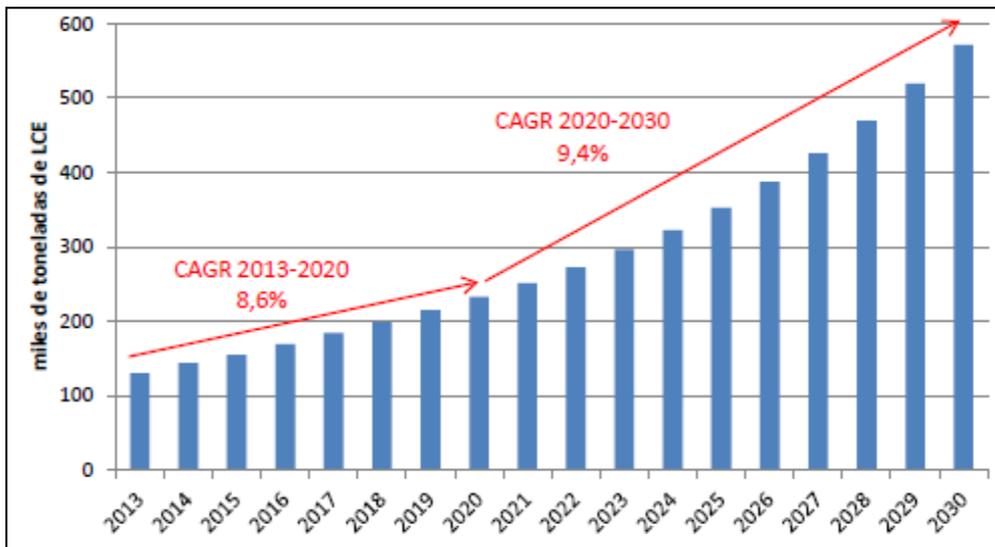


Figura 6 Demanda futura de litio en el periodo 2013-2030. Fuente SQM

### 3. Marco Geológico

#### 3.1 Unidades Morfoestructurales

La zona continental chilena se encuentra ubicada adyacente a la zona de subducción placas, en donde la placa de Nazca se inserta por debajo de la placa Sudamericana, lo que ha provocado que en los últimos 250 millones de años haya una actividad tectónica intensa, reflejada en la presencia de una serie de valles y cordilleras orientados N-S, paralelos al borde de subducción.

En vista de lo mencionado anteriormente, las principales unidades morfoestructurales presentes en Chile, de Oeste a Este son: (1) Cordillera de la Costa, (2) Depresión intermedia, (3) la Precordillera, (4) la Depresión Pre Andina o cuencas Pre Andinas y (5) la Cordillera Andina, compuesta por la Cordillera Occidental, el Altiplano-Puna y la Cordillera Oriental (Risacher *et al.*, 2003) (Figura 7).

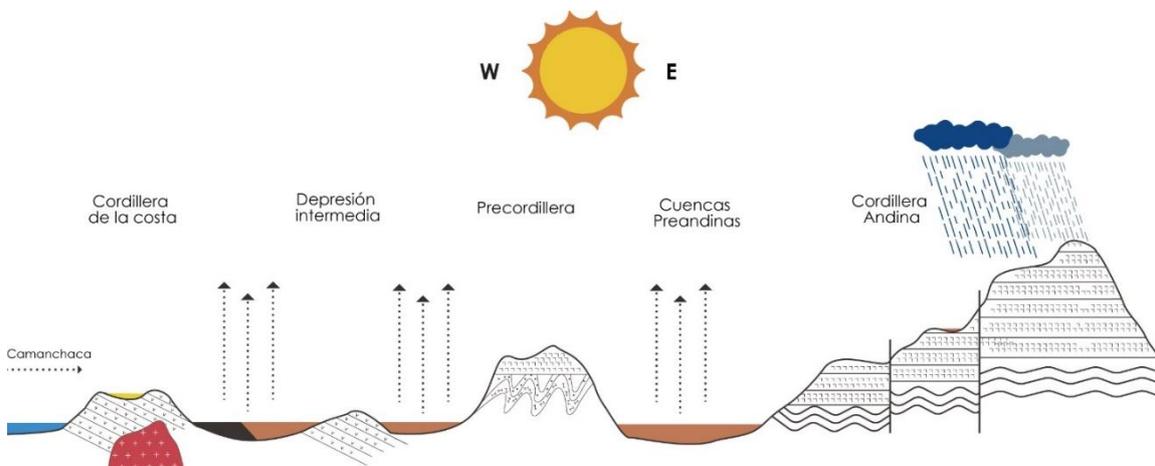


Figura 7 Perfil esquemático geomorfológico del Norte de Chile. Extraído y modificado de presentación de Aníbal Gajardo, "Salares del Norte de Chile: Potenciales fuente de litio", CEPAL 10-11 noviembre 2010, Santiago, Chile.

La zona de estudio, como se mencionó anteriormente, se ubica en el Norte de Chile en la zona del Altiplano-Puna. A continuación, se definirá en detalle las unidades fisiográficas cercanas al Salar de Las Parinas

### **3.1.1 Cordillera occidental**

El ciclo orogénico Andino Abarca desde el Mesozoico al Presente, comprendiendo una serie de arcos magmáticos los cuales han ido migrando progresivamente hacia el Este (Charrier *et al.*, 2007). Se han distinguido cuatro sistemas de arcos magmáticos: Jurásico a Cretácico Temprano; Cretácico Medio; Cretácico Tardío a Paleógeno; y Mioceno al Reciente (Coira *et al.*, 1982; Reutter *et al.*, 1988; Scheuber y Reutter, 1992). El volcanismo de arco actual se desarrolla en la Cordillera Occidental y describe a la actividad volcánica desarrollada durante el Mioceno – Reciente. Esta cordillera se compone por un conjunto de edificios volcánicos que forman parte del Complejo Volcánico de los Andes Centrales (Silva *et al.*, 1989a).

### **3.1.2 Altiplano-Puna de Atacama**

En el Norte de Chile, una de las características distintivas de los Andes centrales es la presencia del plateau altiplánico, el segundo más alto del mundo, después del Tíbet, con alturas entre 3700 a 4200 m.s.n.m, el cual se extiende paralelamente al margen continental por 1800 km, con anchos que varían entre 350 a 400 km. Esta meseta andina se correlaciona espacial y temporalmente con el magmatismo de arco andino, sin embargo, su alzamiento se debe principalmente a un engrosamiento cortical como respuesta al acortamiento horizontal de una litósfera de menor densidad y de mayor temperatura. (Allmendinger *et al.*, 1997).

Cabe mencionar que esta meseta andina de los Andes Centrales se divide en dos secciones, una al Norte de los 22°S llamada “Altiplano” y otra al Sur, que se denomina “Puna”. Esta diferencia es establecida por diferencias en sus características morfológicas, estructurales y en las edades de alzamiento (Allmendinger *et al.*, 1997) (figura 8).

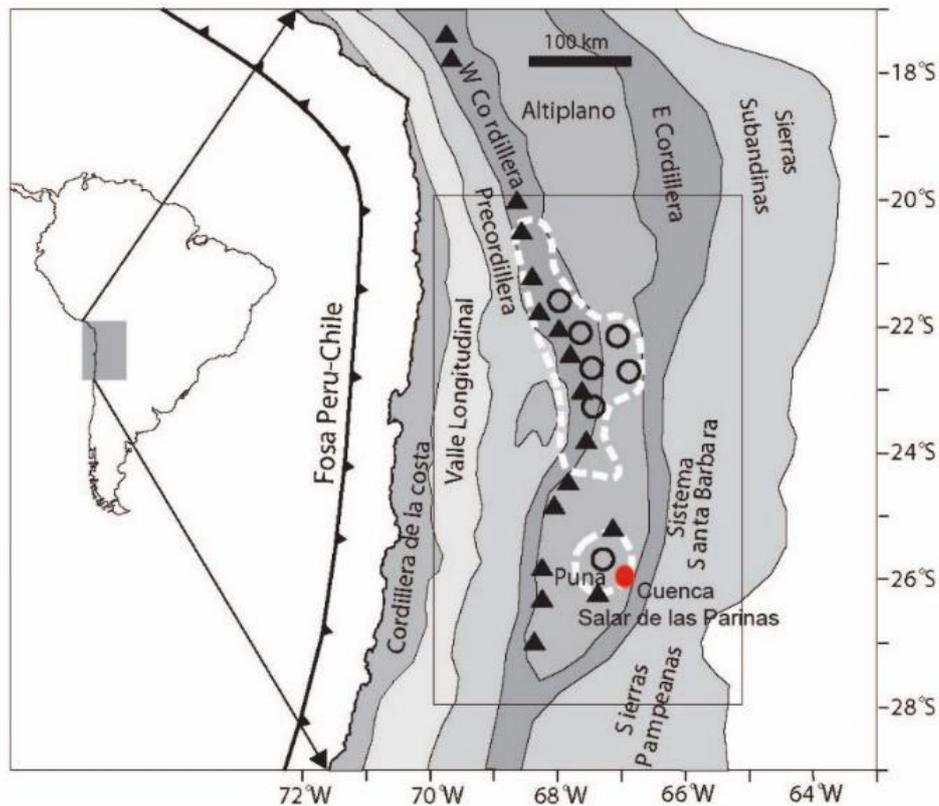


Figura 8 Mapa de localización de la zona del Altiplano-Puna. Se distinguen las principales unidades fisiográficas de la zona, además de los volcanes y calderas presentes en la zona, mostradas como triángulos y círculos respectivamente. Extraído y modificado de Houston *et al.*, 2011.

### 3.1.3 Cuencas Endorreicas

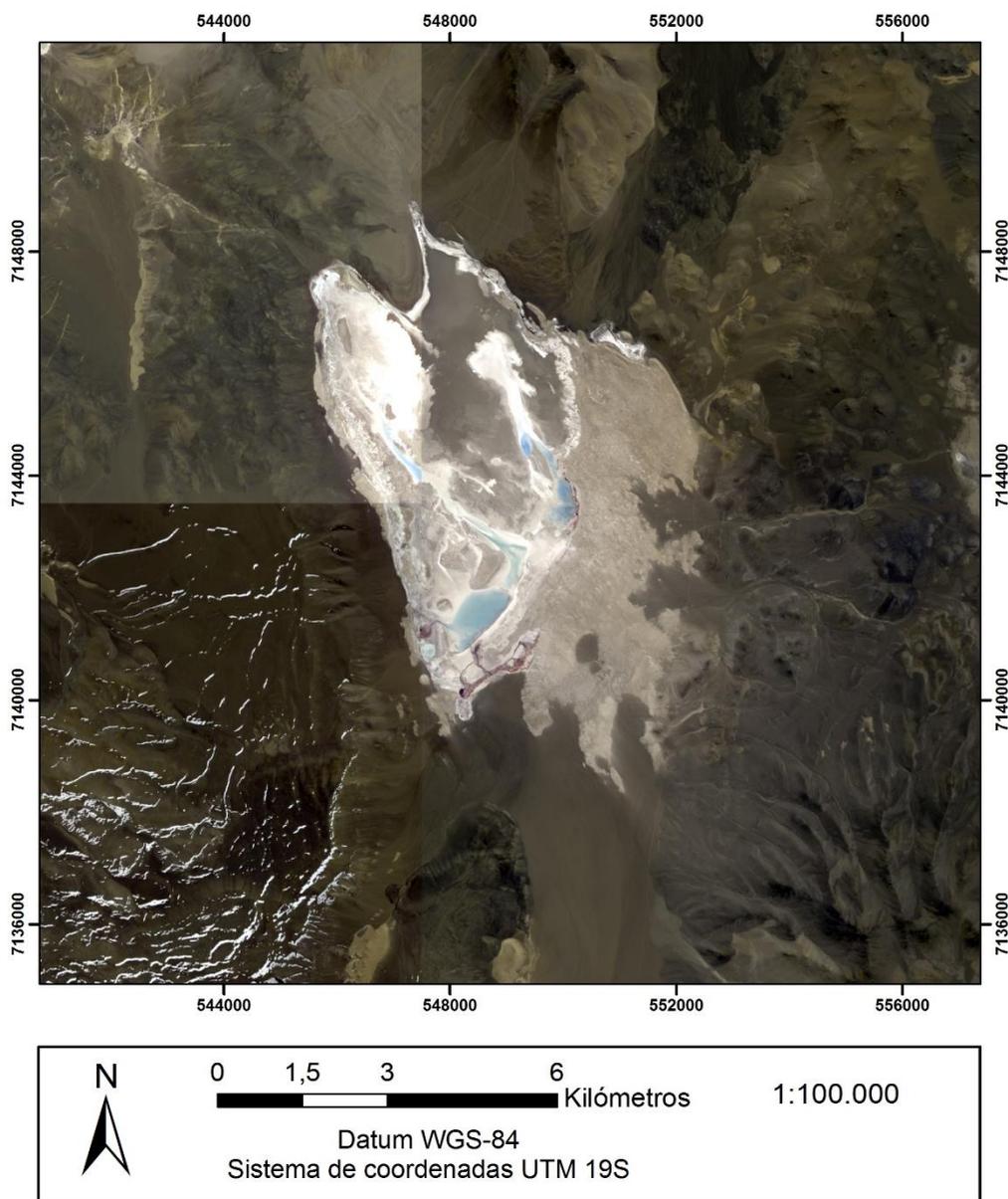
A causa del volcanismo y al régimen tectónico que gobierna Los Andes centrales, se producen las condiciones estructurales para la existencia de cuencas cerradas o endorreicas, las cuales son cuencas en donde la circulación de agua se ve restringida hacia el punto topográfico más bajo de la superficie de la cuenca. Cualquier tipo de precipitación que caiga en una cuenca de este tipo, permanecerá allí, abandonando el sistema únicamente por infiltración o evaporación.

El activo volcanismo mioceno presente en el Altiplano, permitió la formación de pequeñas cuencas endorreicas, las que se situaron entre los edificios volcánicos, a alturas cercanas a los 4000 m.s.n.m. El régimen tectónico también jugó un rol importante en la génesis de estas cuencas, ya que la presencia de cadenas montañosas orientadas N-S como la cordillera de la Costa, La cordillera de Domeyko y Los Andes Occidental - Oriental, funcionan como barreras topográficas y cortan los cauces fluviales, centrando la dirección del flujo hacia dentro de las cuencas.

### 3.2 Geomorfología del área de estudio

El salar de Las Parinas se emplaza en una cuenca elipsoidal, en dirección Norte-Sur, de 9km de largo y 5km de ancho, que forma parte de la cuenca de drenaje Endorreica entre Frontera y Vertiente del Pacífico (Mapa hidrogeológico de Chile, DGA 1986). Al oeste se encuentra el salar de la Isla, con el cual están separados por un cordón montañoso de rocas volcánicas pertenecientes a dos

estratovolcanes del Mioceno Medio a Superior, ubicados en la zona norte y oeste del salar de estudio. Por el lado sur y este del salar se ubican rocas sedimentarias pertenecientes a las gravas de atacama y a rocas del basamento de la Formación La Tabla (figura 9)



**Figura 9 Imagen satelital de la zona del Salar de las Parinas, Región de Atacama. Fuente: elaboración propia.**

En las costas Norte del salar se ubican diversos conos aluviales los cuales nacen de los flancos de los centros volcánicos. Estos conos son bastante extensos, llegando la costa del salar y además se sobreponen a coladas de lava pertenecientes a los volcanes Miocenos. Por el lado Sur del salar también se ve la presencia de abanicos aluviales, estos a diferencia de los del Norte, son mucho más invasivos e incluso se introducen dentro del salar. En estos abanicos se pueden identificar las redes de drenaje trenzadas lo que indica una alta carga de detrito.

Particularmente en el salar, en la zona sur existen varias lagunas y pozas en las cercanías del borde. Una laguna de mayores dimensiones se ubica en la zona Norte del salar, la cual es alimentada por varios flujos, cuyas aguas están saturadas en sales, las cuales han precipitado en el fondo de los cauces dejando una capa blanca de halita de pequeño espesor.

El salar de las Parinas posee dos costras fácilmente diferenciables, ubicadas en las zonas Norte y Sur. En la zona sur la costra salina presenta colores rosado a blanco, con fragmentos de roca de color negro, entre unos milímetros hasta 2 centímetros de longitud, posiblemente proveniente de las planicies del sur, transportados por el viento. En el sector Norte la costra es predominantemente blanca, con gran presencia de halita y al igual que en el Sur, estas costras se ven afectadas por material de origen eólico el cual torna la capa salina de tonos marrones.

### **3.3 Geología de la zona de estudio**

La geología del área del salar de Las Parinas está fuertemente dominada por la presencia de rocas volcánicas andesíticas pertenecientes a volcanes del Mioceno Medio a Superior, por toda la parte Norte y Oeste que circunda al salar. Por el margen Este se pueden ubicar tobas y pórfidos riolíticos de la Formación La Tabla y por el Sur se pueden encontrar rocas sedimentarias pertenecientes a las Gravas de Atacama y a depósitos Cuaternarios.

A continuación, se expondrá las unidades estratigráficas que rodean al salar de Las Parinas, según la carta geológica de Naranjo *et al.*, (2013) (figura 10)

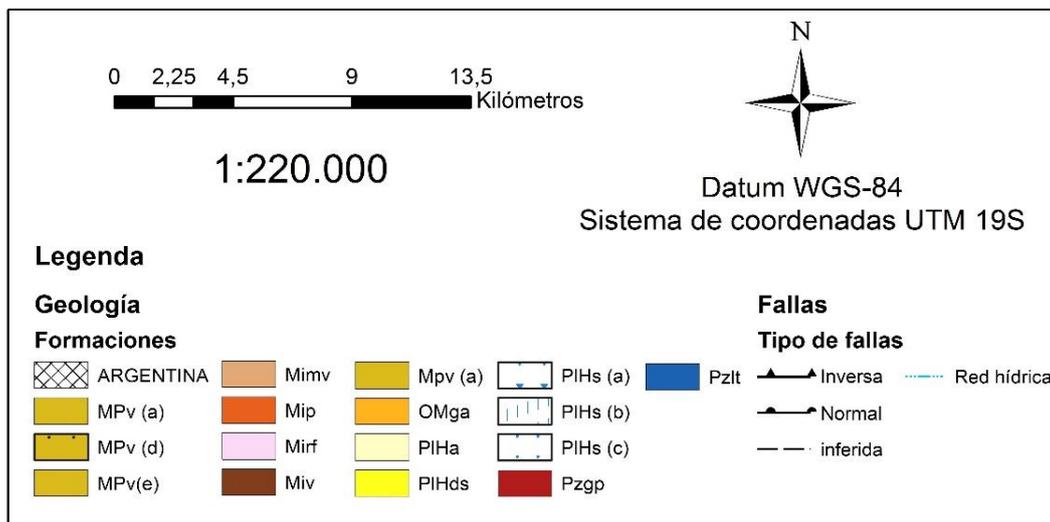
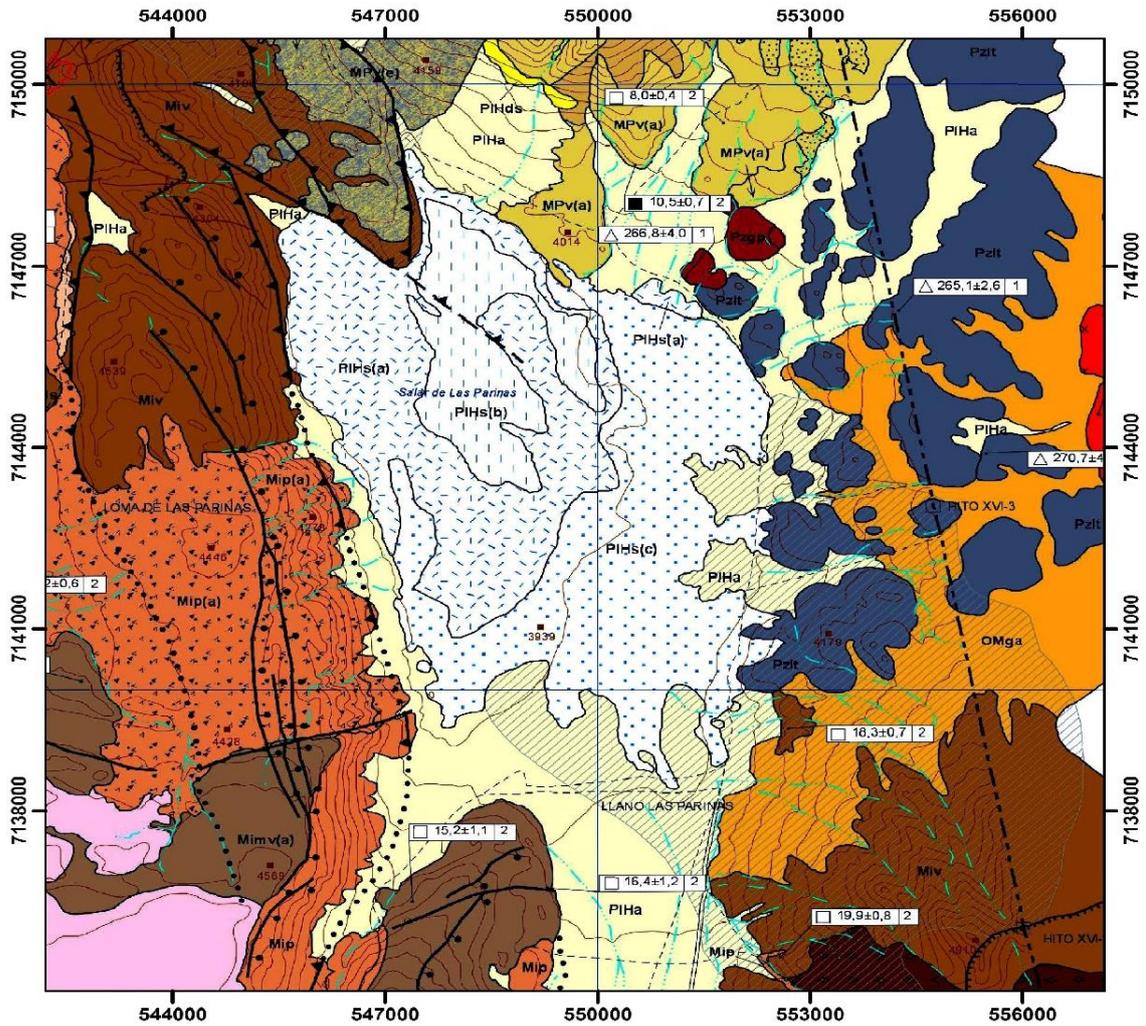


Figura 10 Mapa geológico de la zona del salar de Las Parinas, en base a la carta “geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, Región de Atacama, escala 1:100.000, realizado por Naranjo et al., 2013.

### **3.3.1 Formación La Tabla (Carbonífero? - Pérmico) (García, 1967)**

Esta unidad fue definida por García (1967) como una unidad formada por mantos de lava porfírica grises intercalados con brechas volcánicas. En la carta geológica de las áreas salar Aguilar y portezuelo de León muerto (Naranjo 2013) definen la unidad como tobas soldadas y pórfidos riolíticos, con lavas macizas de color morado y grises verdosos a anaranjados.

En la zona de estudio esta unidad se puede encontrar al Este del Salar de Las Parinas, donde los afloramientos muestran un contacto transicional con cuerpos porfídicos hipabisales del Granito Parinas y parcialmente cubiertos por los depósitos de las Gravas de Atacama.

### **3.3.2 Granito Parinas (Pérmico) (Naranjo y Cornejo 1992)**

Corresponde a un intrusivo monzogranítico rosado, de textura porfídica gruesa y micrográfica. En la zona de estudio, esta unidad aflora en la zona Este, presentando un contacto gradual con los pórfidos riodacíticos de la Formación La Tabla. Las texturas porfídicas y micrográficas de cuarzo y feldespatos potásico en la masa fundamental indican un emplazamiento hipabisal.

### **3.3.3 Volcanes del Mioceno Inferior (Mioceno Inferior)**

Esta unidad se compone de un conjunto de estratovolcanes, secuencia de lavas y piroclastos estratificados, moderada a intensamente erosionados, los cuales se encuentran en parte cubiertos por las Gravas de Atacama. Estos volcanes muestran grados de erosión notablemente más profundos que a menudo dejan al descubierto parte de la estratificación interna de los edificios

Esta unidad volcánica se puede encontrar al Sureste del salar de Las Parinas y su litología predomina la andesita de orto y clinopiroxeno. La intensa erosión que ha afectado a la zona Suroriental del área de estudio permite el afloramiento de un pórfido félsico de grano medio, pardo verdoso con feldespatos potásico, plagioclasas con borde de reacción, biotita y otros ferromagnesianos.

### **3.3.4 Ignimbrita Pajonales (Mioceno inferior a medio) (Naranjo y Cornejo 1992)**

Se compone de un conjunto de flujos ignimbríticos ubicados en la base de la sierra Las Parinas, donde se exponen dos niveles proximales de las ignimbritas de hasta 40 metros de potencia, los que infrayacen discordantemente a lavas de los volcanes del Mioceno inferior a medio. La ignimbrita inferior es una toba de ceniza, no soldada color rosáceo, presenta un 10-15% de pómez de hasta 3 cm de diámetro y 5% de líticos subangulosos (1 cm aprox.). En la parte superior aflora una ignimbrita rosácea a pardo pálido, soldada, con fiammes oscuras aplastadas (5%), presentando a lo menos 3 poblaciones de pómez blancas a grises (15-20%) de hasta 90 cm de longitud.

### **3.3.5 Volcanes del Mioceno medio a superior (Mioceno medio a superior)**

A esta unidad corresponden un grupo de estratovolcanes compuestos, en su mayoría de grandes dimensiones, los cuales presentan un grado de erosión débil a medio. Algunos edificios volcánicos presentan calderas de avalancha y estructuras de domos. Las lavas de estos volcanes cubren a rocas volcánicas

erosionadas de las unidades anteriores y localmente sobreyacen a depósitos de la Ignimbrita Pajonales.

Los afloramientos de esta unidad se ubican al norte del salar de Las Parinas y corresponden a depósitos piroclásticos de caída en la zona alta de los volcanes, con intercalaciones de lavas subordinadas. Las lavas corresponden a riolacitas de biotita y cuarzo.

### **3.3.6 Gravas de Atacama (Mioceno inferior a medio) (Mortimer, 1973)**

Esta unidad corresponde a una denominación dada para los depósitos polimícticos de gravas, bolones mal seleccionados, generalmente no consolidados, aunque en ocasiones cementados, de amplia extensión presentes en el Norte de Chile (Mortimer, 1973). En la zona de estudio, las Gravas de Atacama cubren rocas paleozoicas de la Formación La Tabla y el Granito Parinas.

Las Gravas de Atacama constituyen acumulaciones de flujos de detritos generados a partir de la denudación del orógeno Andino, que dio origen al piedemonte de la Cordillera de los Andes (Naranjo y Paskoff, 1985). El emplazamiento de estos detritos se produjo en un medio semi-árido a árido con disposición de humedad suficiente para generar extensas avenidas (Alpers y Brimhall, 1988). La erosión de los terrenos alzados se produjo contemporáneamente con la construcción de numerosos aparatos volcánicos y las intercalaciones de ignimbritas en las Gravas de Atacama al norte de la carta de Naranjo (2013), lo cual permite asignarle una edad miocena (18,5-15 Ma).

### **3.3.7 Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)**

Corresponden a depósitos heterogéneos de bloques, gravas, arenas y limos producidos por la denudación e incisión de las unidades preexistentes. En general no se reconoce estratificación en los componentes más gruesos, no así en los sedimentos más finos donde se puede notar un mayor desarrollo de la estratificación.

En esta unidad, los depósitos aluviales corresponden a materiales que han descendido por quebradas en forma de flujos de barro, producto de lluvias torrenciales, muy esporádicas, generando abanicos aluviales al extenderse en sectores abiertos no encajonados.

Los depósitos coluviales corresponden a materiales producidos principalmente por procesos gravitacionales. Su distribución está controlada por la presencia de faldeos abruptos de escarpes, quebradas y cerros. Generalmente estos depósitos son monomícticos y con clastos angulosos, gradando lateralmente a depósitos aluviales transportados por flujos torrenciales, que, en coalescencia, forman llanuras aluviales.

Los procesos de denudación del terreno que originan estos depósitos se han desarrollado desde el Mioceno, no obstante, se ha extendido la edad hasta el Cuaternario en consideración a que localmente, estos procesos se mantienen activos, aunque en forma disminuida.

### 3.4 Geología estructural

En la región de Atacama, la zona del Altiplano-Puna se destaca por sus múltiples sistemas de fallas con orientaciones N-S y NNW, directamente vinculados al alzamiento de este plateau altiplánico (Allmendiger *et al.*, 1997). La denudación de este alzamiento dio lugar a la depositación de las Gravas de Atacama en el Mioceno Inferior (Naranjo y Paskoff, 1985).

Contemporáneo al alzamiento y erosión de estos terrenos, debido a la actividad volcánica, se produjo la construcción de múltiples edificios volcánicos y la actividad de la Caldera Aguilar, cuya morfología se vio altamente alterada por procesos tectónicos, no obstante, se estima que tuvo dimensiones de a lo menos 40 km de diámetro y generó las Ignimbritas Río Frío (Mioceno Inferior) y Pajonales (Mioceno Inferior-Medio) (Naranjo *et al.*, 2013).

En la zona del Salar de la Parinas, respecto a sus características estructurales, destaca la presencia de un sistema de fallas ubicado en la zona norte, entre este salar y el salar de la Isla, conformado por diversas fallas inversas de orientación N-S y NNW. Además de este sistema, se pueden identificar un conjunto de fallas normales de rumbo N-S que afecta el borde oeste del salar (figura 11) (Naranjo *et al.*, 2013).

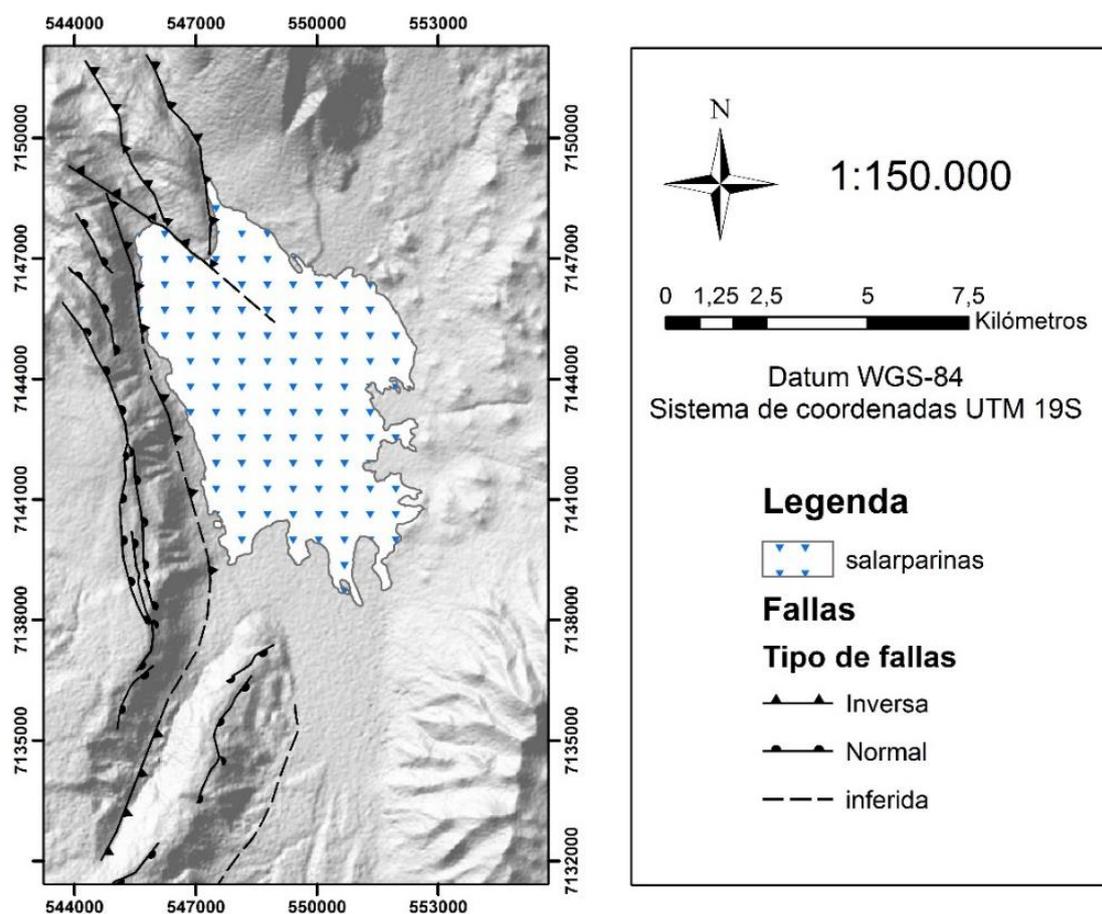


Figura 11 Mapa de estructuras de la zona del Salar de las Parinas. Fuente: elaboración propia en base a los estudios de Naranjo *et al.*, 2013.

El sistema de fallas que conecta el salar de La Isla y el salar de Las Parinas parece coincidir con la Falla de Culampaja (Chernicoff *et al.*, 2002) y podrían formar parte de un sistema de fallas de orientación NNW de escala regional a través del Altiplano-puna (Ricketts y Hutcheon, 2012) (figura 12).

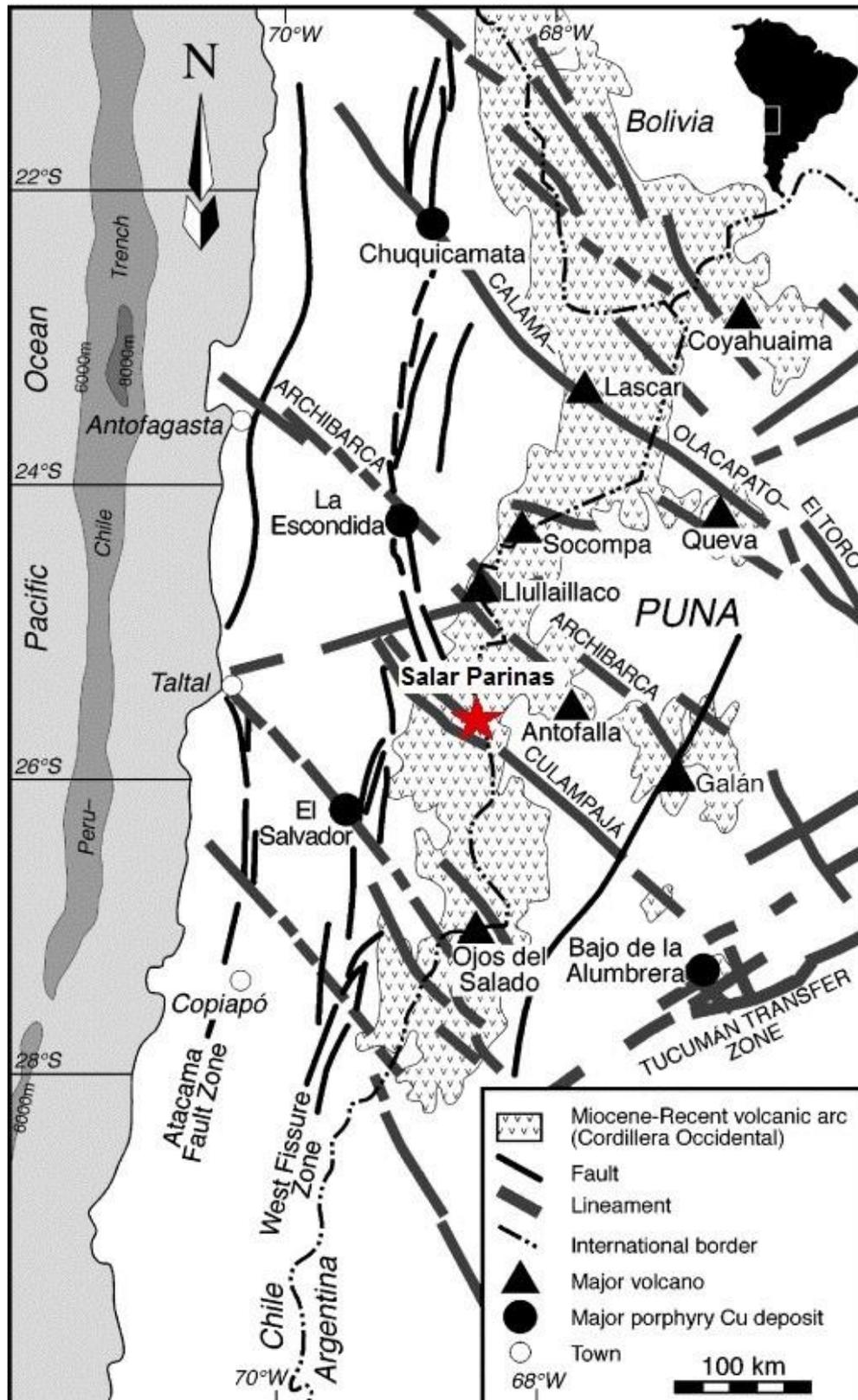


Figura 12 Mapa de lineamientos regionales en el límite de Chile, Argentina y Bolivia. Con una estrella roja se identifica la ubicación del salar de estudio Extraído y modificado de Chernicoff *et al.* 2002.

## **3.5 Hidrología**

### **3.5.1 Clima**

La Región de Atacama se caracteriza por tener un clima semiárido- árido, con escasas precipitaciones y altas temperaturas. Dicho clima, se vuelve progresivamente más frío y menos árido hacia el Este, en donde las precipitaciones comienzan desde los 2000 m.s.n.m y aumentan con la altura, en dirección hacia el Altiplano (Risacher *et al.*, 1999)

Este clima presente en el Altiplano es resultado de múltiples factores, tales como la presencia de la ascendente y fría corriente de Humboldt en la costa oeste de Sudamérica, la cual disminuye la evaporación y evita la precipitación en zonas costeras, la presencia del Anticiclón del pacífico, el cual con sus altas presiones estables reduce las precipitaciones (Houston & Hartley 2003)., y el efecto “sombra de lluvia” de la cordillera de Los Andes, la cual actúa como una barrera topográfica para circulación atmosférica, aislando la humedad proveniente desde el Este (Amazonia) (Houston & Hartley 2003; Bookhagen & Strecker, 2008).

Particularmente la zona del Salar de Las Parinas, ubicado en el Altiplano de la Región de Atacama, posee un clima frío y seco, con temperaturas promedio de 2-3 °C (Carpenter, T.H 2009). La zona del Salar de Las Parinas, según la clasificación climática de Köppen y Geiger (1930) (modificada por Kottek *et al.*, 2006), correspondería a un clima frío de tundra (EB), con precipitaciones estivales, esencialmente en forma de nieve.

Las precipitaciones en el Salar de Las Parinas principalmente ocurren en los meses de enero y febrero, en el conocido “Invierno Boliviano”, y en los meses de junio hasta agosto. La intensidad de estas precipitaciones se ve significativamente afectada por los fenómenos del Niño y de la Niña (Houston *et al.*, 2006).

### **3.6 Flora y Fauna**

La zona de la Puna de Atacama se caracteriza por tener un clima desértico muy hostil, no obstante, esta zona posee una gran variedad de flora y fauna, las cuales componen ecosistemas muy complejos, adaptados para desenvolverse en climas con escasez de agua, alta oscilación térmica y alta radiación solar. Por esta misma condición de complejidad, estos ecosistemas son muy sensibles a posibles intervenciones antrópicas que pueden significar una operación minera, por esta misma razón en la zona se han realizado diversos estudios de línea base de Flora y Fauna desarrollados en las etapas de exploración de diversas mineras.

La compañía Salares Lithium Inc (SLI) en junio del 2011 realizó evaluaciones para determinar la factibilidad de explotar litio en 5 salares de la Región de Atacama (Salar de Agua Marga, Aguilar, Isla, Parinas y Grande). Ante la posible intervención humana en la zona de los salares estudiados, la compañía SLI levantó campañas de caracterización y elaboración de la línea base de los

componentes de Flora y Vegetación. Dichas campañas se realizaron en otoño y primavera del 2011 y verano del 2012

### 3.6.1 a) Flora

Las formaciones vegetacionales identificadas en el área, en los estudios de la compañía SLI, siguiendo la clasificación de Ahumada y Faúndez (2009) son:

- Vega salina: Estas formaciones se desarrollan en lugares con niveles freáticos superficiales, con contenido de materia orgánica en el suelo de medio a bajo. Estas especies presentan crecimientos rizomatoso, desarrollando un césped parejo o con desarrollo de pequeños cojines herbáceos
- Bofedal salino: Esta formación se desarrolla en sectores con permanente humedad en el suelo y se ubican cerca de cursos de agua o lagunas con renovación de aguas. Las especies presentan crecimiento en cojines en forma semi-globosa, originando cuerpos compactos.

En particular, en el Salar Parinas se pudo identificar la siguiente unidad vegetacional, la cual se detalla a continuación.

- Vega salina de *Puccinellia frígida*: Unidad homogénea que se emplaza de manera continua por el borde Norte del salar de Las Parinas. Se aprecia que esta unidad tiene una gran cobertura por todo el borde del salar, en donde se aprecia que el nivel freático está muy cercano a la superficie (figura 13)



Figura 13 Fisonomía de vega salina de *Puccinellia frígida* en salar Parinas. Fuente: Ilustración extraída de informe DIA Proyecto Exploración Salares 7, Anexo C Línea base del medio biótico.

### 3.6.2 b) Fauna

En el mismo estudio realizado por la compañía Salares Lithium Inc (SLI), se registró la identificación y distribución de 8 especies animales en la zona de estudio mediante la instalación de puntos de observación de fauna (POF).

Las especies identificadas mediante registro directo e indirecto son las siguientes (Tabla 1)

**Tabla 1 Especies animales identificadas en campaña de línea base de proyecto 7 salares, compañía Salares Lithium Inc.**

Orden	Familia	Nombre científico	Nombre Común	Estado de conservación
<b>Reptil</b>				
Squamata	Tropiduridae	<i>Liolaemus rosenmanni</i>	Lagartija de Rosenmann	Rara y en peligro de extinción
<b>Aves</b>				
Phoenicopteriformes	Phoenicopteridae	<i>Phoenicopterrus chilensis</i>	Flamenco chileno	Vulnerable
		<i>Phoenicoparrus</i>	Flamenco andino	Vulnerable
Charadriiformes	Charadriidae	<i>Charadrius alticola</i>	Chorlo de la puna	-
	Scolopacidae	<i>Calidris bairdii</i>	Playero de Baird	-
Columbiformes	Columbidae	<i>Metriopelia melanoptera</i>	Tortolita cordillerana	-
Passeriformes	Furnariidae	<i>Geositta punensis</i>	Minero de la puna	-
	Tyrannidae	<i>Lessonia rufa</i>	Colegial del norte	-
<b>Mamífero</b>				
Artiodactyla	Camelidae	<i>Vicugna vicugna</i>	Vicuña	En peligro de extinción

Existen 2 especies en peligro de extinción y 2 especies en estado vulnerable según la Ley de Caza N°19.473 (D.S. N°05/98 Ministerio de Agricultura) y Libro rojo (CONAF, 1993). Se destaca la especie Lagartija de Rosenmann como la única especie endémica de la zona (figura 14).



Figura 14 Imágenes de especímenes de la zona del salar de las Parinas. Extraído de informe Línea Base del Medio Biótico, Salares de Atacama Sociedad Contractual Minera, junio 2012

### 3.7 Hidrogeología

A partir de trabajos de mapeo de Naranjo *et al.* (1992), los estudios de Rickets y Hutcheon (2012) clasificaron a grandes rasgos las unidades hidrológicas del área del proyecto 7 salares, en donde se ubica además el salar de estudio.

#### 3.7.1 Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrológicas propuestas por Rickets y Hutcheon (2012) a grandes rasgos son las siguientes:

##### 3.7.1.a) Abanicos aluviales

Los abanicos aluviales en la zona de estudio comúnmente traspasan los límites de las costas del salar. Funcionan como grandes “canales” para el agua subterránea y son de vital importancia para la recarga del salar. Al tratarse de un clima árido, su evolución es intermitente y están condicionados por el derretimiento de la nieve estacional o las inundaciones repentinas

Depósitos eólicos:

Los fuertes vientos son frecuentes en la zona de estudio. El viento cumple la función de generar la ablación de los depósitos superficiales, en donde se

redistribuye los sedimentos finos, concentrando el material clástico más grueso. Las ráfagas de polvo comúnmente cubren las costras salinas de los salares y las cavidades de estas. Este polvo se incorporará en la estratigrafía de la cuenca como una capa permeable.

En los mecanismos de deposición en climas áridos predominan los tipos flujos cargado de barro y escombros, e inundaciones; ambos tipos de flujos son discontinuos y por lo general de corta duración. El material más grueso tiende a ser depositado cerca del vértice del abanico y los márgenes exteriores de los flujos, y el material más fino hacia el abanico exterior.

#### **3.5.1.b) Coluvios:**

Los coluvios cubren la mayoría de todas las franjas de roca volcánica y la antigua base de roca sedimentaria, incluyendo los edificios volcánicos en la zona de estudio. El espesor varía desde los centímetros hasta unos pocos metros, y es generalmente más grueso cerca del margen del salar, donde las pendientes tienden a aplanarse. La composición típica del coluvio depende netamente de la composición de la roca de origen de los detritos, además los clastos normalmente suelen ser altamente angulares. La porosidad y la permeabilidad tienden a ser mayores en depósitos coluviales de composición más félsica, debido a que estos presentan menor cantidad de arcillas en comparación con los depósitos coluviales de rocas más básicas.

#### **3.5.1 c) Rocas volcánicas fracturadas:**

Todo el lecho de roca volcánica en la zona de estudio está fracturado debido a que han sido objeto de la tensión que se ha formado en respuesta al estrés tectónico regional. Las fracturas son planas a curvilíneas, y verticales a subverticales. Las fracturas que se inclinan en ángulos bajos comúnmente se asocian con estructuras preexistentes como el bandeado de flujo de riodacita. La mayoría de estas fracturas son extensionales en su origen, posiblemente causado por la elevación regional.

#### **3.5.1 d) Costas y capas cristalinas de halita-yeso-anhidrita:**

En la zona más baja de la cuenca se ubican extensos depósitos evaporativos los cuales están compuestos de costras salinas de halita-yeso-anhidrita. A pesar de que la corteza de las evaporitas en superficie suele ser muy rugosa y permeable, en profundidad se vuelve más compacta y su permeabilidad decrece abruptamente, intercalaciones con sedimentos pueden hacer variar en profundidad los niveles de permeabilidad de estas unidades

## 4. Metodología

En el presente estudio se fue basado en análisis hidrográficos, hidrológicos e hidroquímicos de la cuenca del salar de las Parinas, con el fin de generar un modelo hidrogeológico y poder así estimar un potencial del litio. En todo los análisis se realizó una recopilación de antecedentes, los cuales fueron evaluado para su posible incorporación. De las fuentes consultadas destacan los trabajos de investigación realizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), la Dirección General de Aguas (DGA) y los informes del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). A las fuentes anteriores se le suman los antecedentes de estudios publicados en revistas científicas, seminarios, charlas y trabajos de título como memorias y tesis.

Los estudios hidrogeológicos se caracterizan por integrar información de diferentes ramas de las ciencias de la tierra, por lo tanto, para las diversas etapas del estudio se utilizaron distintas metodologías, las cuales serán descritas a continuación

### 4.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica del Salar de las Parinas

En primer lugar, para este estudio es de suma importancia el trabajo hidrográfico que compone la delimitación de la cuenca que contiene al salar de estudio. Para esta delimitación se consultaron diversos estudios, siendo la principal fuente de información los Modelos de Elevación Digital (DEM, *Digital Elevation Model*) obtenidos de la NASA, junto con los mapas de cuencas hidrográficas del levantamiento hidrogeológico de las regiones XV, I, II y III realizado por DICTUC 2009.

Para la construcción de una cuenca hidrográfica se precisa utilizar de un DEM y un software de Sistemas de Información Geográficos (SIG), que permita procesar la información, para poder así delimitar la cuenca. En esta ocasión se utilizó un DEM del satélite ALOS PALSAR, obtenido en febrero de 2011 (Dataset: JAXA/METI ALOS PALSAR L1.0 2011 Accedido por ASF DAAC 2/02/2011), y los softwares Global Mapper y ArcGIS, con sus módulos de Hydrology y Archydro.

A grandes rasgos, todos los softwares utilizados usan un método similar para el cálculo de la red y las cuencas hidrográficas. En primer lugar, se procede a realizar una corrección al DEM a utilizar, identificando y rellenando las celdas con datos en depresión con respecto a la superficie que los rodea. Este relleno de las celdas en depresión las lleva al nivel de terreno promedio de los alrededores, obteniendo una "superficie" más continua para la elaboración de los modelos siguientes (figura 15) (Como funciona FILL: ArcGIS Desktop website, 2017).

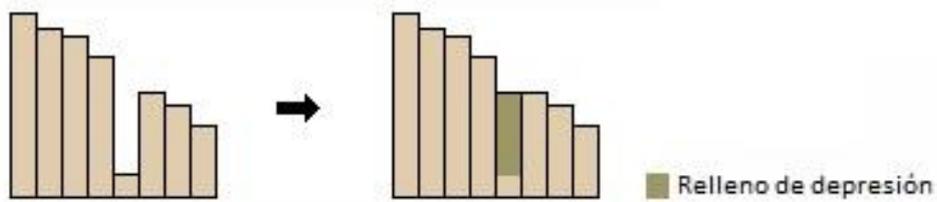


Figura 15 Vista de perfil de una depresión antes y después del relleno. (Como funciona FILL: ArcGIS Desktop website, 2017)

Una vez obtenido un DEM corregido se procede a generar el modelo de flujos, el cual consiste en un modelo donde se expresa el camino descendente de una celda a otra. Este modelo deja expresada las direcciones numéricamente en 8 posibles direcciones, según postulado por Jenson y Domingue (1988) (figura 16) (Como funciona Dirección de Flujo: ArcGIS Desktop website, 2017)

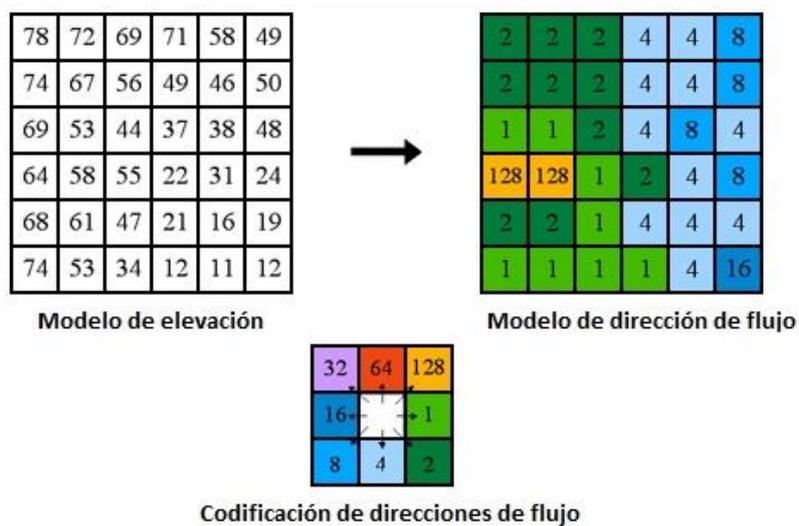
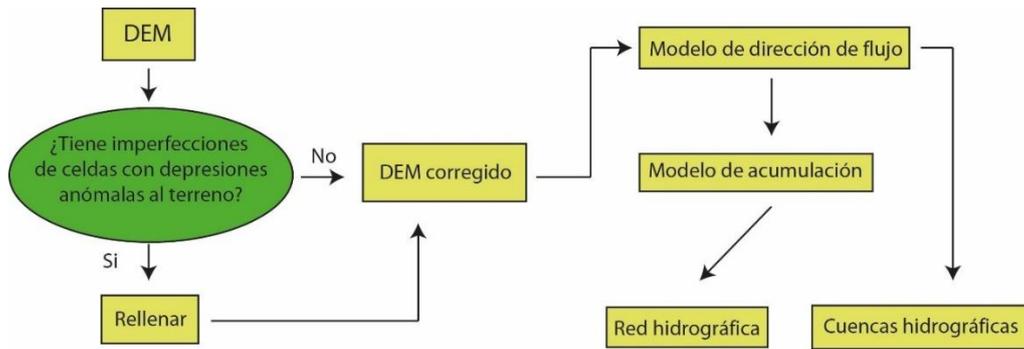


Figura 16 Ilustración de la codificación de la dirección de flujo. (Como funciona Dirección de Flujo: ArcGIS Desktop website,2017)

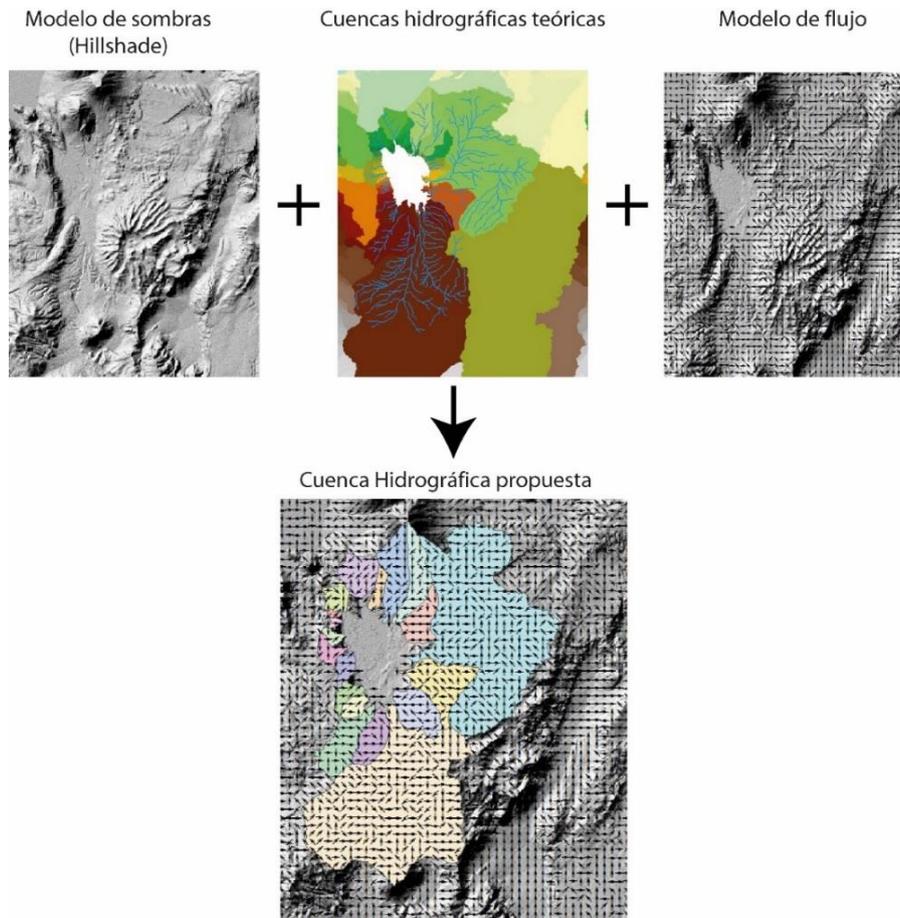
Luego a partir del modelo de flujo, se construye el modelo de acumulación de flujo, el cual consiste en un modelo donde se determina para cada celda, el número de celdas aguas arriba que vierten sobre esta. De este último modelo se puede construir la red hídrica de la zona, realizando una clasificación a las celdas con una acumulación de flujo superior a un umbral específico. El valor umbral se debe definir en función de las características de la zona, ya que valores muy altos del pixel producirán que solo los cauces de alto orden conformen la red hídrica, si por el contrario el valor es muy bajo, muchos pixeles formaran parte de la red y esta se sobrepoblara de cauces menores.

Con la red hídrica construida, se pueden definir los puntos donde se cortan los drenajes, para luego con el modelo de flujo definir puntos de salida de las cuencas a construir. Finalmente con estos puntos y el modelo de flujo se construye las cuencas teóricas para la zona de estudio, un resumen del procedimiento se puede ver en el figura 17



**Figura 17 Mapa conceptual de la construcción de la red y cuenca hidrográfica a partir de un modelo de elevación. Fuente: elaboración propia**

Luego de obtener el resultado de las cuencas teóricas con los 3 softwares (*Global Mapper* y *ArcGis -Modulo hidrology* y *Archydro*), se procedió a corregirlo manualmente, tomando en cuenta las direcciones de flujo, un modelo de sombras (Hillshade) y las cuencas construidas por el DICTUC el año 2009 (figura 18). Esta corrección consistió en ajustar los bordes de las cuencas obtenidas según la topografía y la dirección de flujo superficial. Cabe destacar que sumado a las consideraciones mencionadas se tuvo como referencia los trabajos antes realizados por DICTUC.



**Figura 18 Ilustración sobre la metodología seguida para la elaboración de la cuenca hidrográfica. Fuente: elaboración propia**

## 4.2 Caracterización de geología de superficie

Toda la geología de superficie de la zona de estudio se ubica en la Puna de Atacama, donde se compone principalmente de rocas volcánicas, intrusivas y depósitos sedimentarios. Se generó un mapa geológico de la cuenca de estudio en base a la digitalización de la carta “*Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo del León Muerto, Regiones de Antofagasta y Atacama*” (Naranjo *et al.*, 2013), utilizando además en complemento los estudios del proyecto 7 salares de la empresa Talison (Rickets y Hutcheon, 2012).

Sumado a los estudios anteriores se utilizó la información recopilada en terreno, la cual brindó la posibilidad de generar un mapa de detalle del salar en particular. Los datos tomados se contrastaron con el modelo teórico de precipitación de sales expuesto anteriormente en el marco teórico, en la sección de química de salares.

## 4.3 Caracterización hidrogeológica

Con toda la información geológica recopilada y generada, se procedió a generar una caracterización y clasificación hidrogeológica de la cuenca de estudio. Mediante los datos recopilados en terreno y las referencias bibliográficas, se clasificó mediante unidades hidrogeológicas los diferentes paquetes rocosos de la zona.

Una unidad hidrogeológica es una agrupación de rocas o depósitos sedimentarios, que por su petrología, textura o estructura poseen propiedades hidrogeológicas uniformes, limitadas específicamente (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie, 1997). Para la elaboración de la definición de dichas unidades, se debe tomar como base múltiples antecedentes, tales como la geología de la zona, geomorfología, geofísica, hidrología, hidrogeología e hidrogeoquímica. La integración de todos los factores anteriormente nombrados genera como producto unidades de comportamiento hidrogeológico similar.

En particular, la zona del Altiplano-Puna se caracteriza por tener escasos estudios del punto de vista hidrogeológico, se destaca la ausencia de estaciones de meteorológicas, ausencia de pozos y la poca accesibilidad a datos de propiedad privada en la zona. Debido a esta razón, muchos de los estudios hidrológicos realizados anteriormente son estimaciones y modelaciones del comportamiento hidrológico de la zona.

En este estudio, se abarcó la hidrogeología de la zona desde un punto de vista cualitativo, contrastando la información ya existente con los datos obtenidos de terreno. Se realizó un trabajo de cartografía hidrogeológica donde se clasificó las unidades de roca según su carácter hidrogeológico. La clasificación se realizó sobre la base de consideraciones de permeabilidad relativa, derivadas de la relación de la geología (tipos de roca) y sus potenciales hidrogeológicos (valores de K) (Struckmeier y Margat, 1995).

Se procedió a caracterizar hidrogeológicamente la cuenca del Salar de Las Parinas a partir del análisis de la carta geológica de Naranjo (2013), los reportes del proyecto 7 salares de la empresa Talison (Rickets y Hutcheon, 2012) y de los datos obtenidos del terreno realizado en el salar de estudio en el mes de enero del 2018.

### 4.3.1 Definición de unidades hidrogeológicas

En base a los datos de la geología superficial obtenidos de la carta geológica de las áreas del Salar de Aguilar y Portezuelo del León Muerto, realizado por Naranjo *et al.*, 2013, y los datos obtenidos de terreno, se realizó una clasificación de las unidades de roca (o depósitos) según su carácter hidrogeológico, es decir, sobre la base de su capacidad de transmitir y/o almacenar agua. Para esta clasificación se utilizó como referencia el trabajo de Struckmeier y Margat 1995, en donde proponen una clasificación que permite distinguir entre materiales porosos y fisurados, dicho de otro modo, distingue entre el tipo de régimen de flujo en las rocas (figura 19). De acuerdo con Struckmeier y Margat (1995), este sistema de clasificación es semicuantitativo y agrupa las unidades hidrogeológicas en: formaciones permeables (unidades de importancia altamente productivos y permeables), formaciones semipermeables (unidades menos productivas: acuitardos y capas resistentes en acuíferos multicasas) y formaciones impermeables (acuicludos y acuífugos)

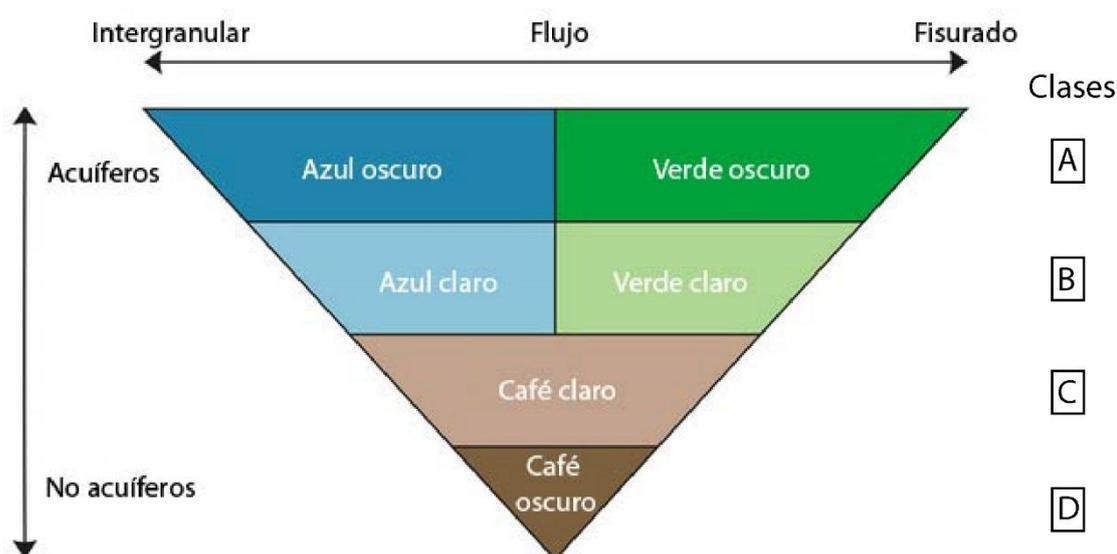


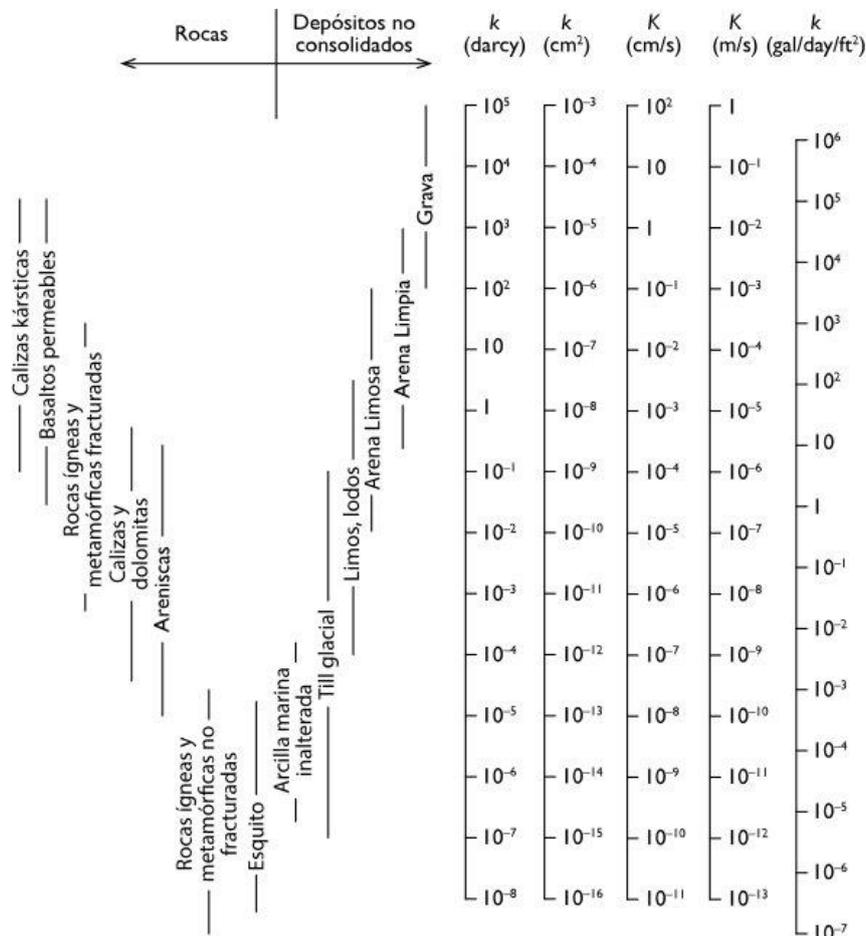
Figura 19 Esquema de colores de clasificación de tipos de acuíferos. Extraído y editado de Struckmeier y Margat, 1995

Con esta clasificación se agrupará paquetes litológicos con propiedades hidrogeológicas similares, como tipo de régimen de flujo (intergranular o fisurado), permeabilidades (estimadas cualitativamente) y potencial hidrogeológico productivo. La clasificación de unidades la siguiente:

- Unidades de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (Clase A).
- Unidades de alta importancia hidrogeológica en rocas fisuradas (Clase A).
- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (Clase B).
- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en rocas fisuradas (Clase B).
- Unidades de baja importancia hidrogeológica (Clase C).
- Unidades de nula importancia hidrogeológica (Clase D).

Para la clasificación de unidades anteriormente nombrada, se le asociará un coeficiente hidráulico estimado a partir de la composición de los paquetes rocosos que componen las unidades. La distribución de valores de conductividad hidráulica con los que se trabajará corresponde a los descritos por Freeze y Cherry (1979) (tabla 2) y a los de Struckmeier y Margat (1995)

**Tabla 2 Distribución de valores de conductividad hidráulica y permeabilidad. (Freeze and Cherry, 1979)**



## 4.4 Caracterización hidrológica

### 4.4.1 Estimación de la precipitación media de la cuenca

La recarga de las cuencas Altiplánicas tiene como fuente principal la precipitación, la cual se infiltra y es transportada hacia acuíferos en las zonas más bajas de la cuenca (DICTUC, 2009). El proceso de recarga de estos acuíferos es fuertemente favorecido por eventos de mayor envergadura, donde las precipitaciones llegan a saturar el suelo de agua (DICTUC, 2009). Las precipitaciones en las cuencas del Altiplano, según los estudios de DICTUC (2009), son del tipo orográficas, donde las tormentas de invierno son la principal fuente hídrica (nieve), sumado a la influencia de tormentas estivales de precipitación líquida correspondientes al denominado “Invierno Boliviano”

En la zona del Altiplano-Puna de la región de Atacama presenta un gran déficit de información hidrológica, producto de la escases de estaciones meteorológicas. A pesar de que en los últimos años se han implementado varias estaciones, sus registros de datos son muy cortos (menos de 5 año), además se suma el hecho de que las estaciones no siempre presentan los instrumentos para medir de forma eficiente la precipitación sólida y líquida, lo que dificulta el análisis de los aportes de cada tipo de precipitación.

En particular en la cuenca del Salar de Las Parinas no existe ninguna estación meteorológica, esto sumado a el déficit de estaciones en todo el Altiplano, imposibilita la opción de estimar de forma cuantitativa la precipitación media de la cuenca. No obstante, diversos estudios, tomando toda la información disponible en las regiones XV, I, II y II, han construido mapas de isoyetas para dichas regiones. Entre los estudios destacan los realizados por DICTUC (2009), DGA- Aquaterra (2013), DGA-Arcadis (2015) y DGA-Amphos21 (2016).

Para la estimación de la precipitación media de la cuenca del Salar de Las Parinas se tomaron los mapas de isoyetas de DGA-Amphos 21 (2016) (Anexo C Hidrología de la cuenca del Salar de Las Parinas) por ser los más actualizados y se procedió a utilizaron el método de las isoyetas para el cálculo de la precipitación media de la cuenca.

El método de las isoyetas consiste en trazar curvas de igual precipitación (isoyetas) y calcular las áreas entre líneas limítrofes, multiplicando por el promedio de precipitación del área correspondiente entre isoyetas

$$PM = \frac{\sum A_i * P_i}{\sum A_i}$$

Donde:

- $A_i$ = lésima área del polígono
- $P_i$ = Precipitación media entre dos isoyetas consecutivas que encierran a  $A_i$
- $PM$  = Precipitación media de la cuenca.

#### 4.4.1 Estimación de la Recarga

La estimación de la recarga se realizó mediante la metodología del estudio de DICTUC (2009), a partir de los modelos hidrográficos e hidrogeológicos propuestos en este estudio. Esta metodología considera la litología de superficie de la cuenca y su interacción con la precipitación, la influencia morfológica de la cuenca y el carácter endorreico de esta misma.

A continuación, la recarga media anual de la cuenca correspondería a la suma de la recarga directa, dada por la precipitación que cae en depósitos o rocas de buen potencial hidrogeológico, y la recarga lateral, producida por la precipitación que cae en rocas semipermeables a impermeables

$$R_T = R_D + R_L$$

$$R_D = C_I * P_P * A_D$$

$$R_L = C_I * C_E * P_P * A_L$$

Donde:

- $R_T$ = Recarga total,  $R_D$  =Recarga directa y  $R_L$ = Recarga lateral
- $P_P$  =Precipitación media de la cuenca
- $A_D$ = Área acuífera,  $A_L$ =Área no acuífera
- $C_I$ = Coeficiente de infiltración,  $C_E$ = Coeficiente de escorrentía

Se utilizará con las expresiones anteriores la precipitación media anual estimada de la cuenca de estudio. Las áreas acuíferas y no acuíferas corresponden a las unidades de alto potencial hidrogeológico (Clases A y B) y bajo potencial hidrogeológico (Clases C y D), las cuales serán calculadas mediante el software ArcGIS 10.3. El coeficiente de infiltración es un valor adimensional que los estudios de DICTUC (2009) ha estimado entre 0,05 y 0,30, que se le asigna a cada unidad hidrogeológica acorde a su grado de permeabilidad (tabla 3). El coeficiente de escorrentía se estima a partir de parámetros geomorfológicos de la cuenca tales como la superficie de la cuenca, longitud del cauce principal, ancho equivalente, y factor de forma.

Tabla 3. Valores de coeficiente de infiltración ( $C_I$ ) en función de la permeabilidad cualitativa de las rocas. Fuente DICTUC (2009)

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

#### 4.4.3 Estimación coeficiente y caudal de escorrentía

La escorrentía superficial corresponde a los flujos de agua que circulan sobre la superficie de la cuenca. En la cuenca de estudio, la escorrentía se alimenta principalmente en los periodos de invierno, producto de los deshielos de la nieve precipitada y en menor medida de las precipitaciones líquidas del “Invierno Boliviano” (DGA-Aquaterra, 2013).

El coeficiente de escorrentía, mencionado anteriormente corresponde a un valor adimensional calculado a partir de parámetros geomorfológicos de la cuenca. En los estudios de DGA-Aquaterra (2013) proponen que su cálculo es el siguiente:

$$C_E = 0,23 * F$$

Donde F corresponde al factor de forma de la cuenca, dado por:

$$F = \frac{M}{L} \text{ si } M < L$$

$$F = \frac{L}{M} \text{ si } L < M$$

Donde:

- M= ancho equivalente de la cuenca, definido como  $M = \frac{A}{L}$
- A= Área aportante de la cuenca.
- L= longitud del cauce principal

Una vez obtenido el coeficiente de escurrimiento se puede estimar el caudal de escorrentía media por medio del método de precipitación-escorrentía, descrito en los estudios de DGA-Aquaterra (2013), el cual se basa en la siguiente relación:

$$Q = C_E * A_L * P_P$$

Donde:

- Q= caudal medio anual
- C<sub>E</sub>= Coeficiente de escorrentía
- A<sub>L</sub>= Área no acuífera
- P<sub>P</sub>= Precipitación media anual

#### 4.4.4 Estimación de la Evaporación

En la zona de estudio, la escasez de zonas vegetales provoca que toda la evaporación de la cuenca esté relacionada con la evaporación directa de aguas superficiales y la evaporación desde la napa freática. La ausencia de estaciones meteorológicas impide el cálculo directo de la evaporación de la cuenca de estudio. No obstante, el trabajo de DGA-Amphos21 (2016), a partir de datos de lisímetros en diversas cuencas del altiplano, generó estimaciones de la evaporación media de todas las cuencas del Altiplano, los cuales se considerarán para el cálculo posterior del balance.

Otro método que se utilizará es estimar la evaporación directa superficial, a partir del trabajo de DGA-DICTUC (2009), utilizar la estimación de la evaporación potencial de la zona del altiplano de la región de atacama y aplicarlo a la cuenca de estudio de la siguiente manera.

$$E = E_P * A_S$$

Donde:

- E = Evaporación media de la cuenca
- E<sub>P</sub> = Evaporación potencial de la región de atacama
- A<sub>S</sub> = Área del salar

Se destaca que para el cálculo de la evaporación se utilizará el área del específica del salar ya que corresponde al área "terminal" de los aportes de agua de la cuenca y se asume como un cuerpo de agua debido a su somero nivel freático. Se toman estas consideraciones ya que no hay manera de relacionar la evaporación potencial con las aguas subterráneas debido a la falta de datos de los niveles piezométricos de la cuenca.

#### 4.4.5 Balance hídrico estimado

Para realizar un balance hídrico se debe en primera instancia cuantificar todas las entradas y salidas del sistema. Según Custodio y Llamas (1996) el balance hídrico de una cuenca queda dado por la siguiente expresión

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \pm \Delta \text{Variación del almacenamiento}$$

$$P_p + Q_{si} + Q_{ui} - Q_{so} - Q_{uo} - E - E_t + \eta = \Delta S$$

Donde:

- $P_p$ = Precipitación
- $Q_{si}$ = Caudal afluente superficial a la cuenca
- $Q_{ui}$ =Caudal afluente subterráneo a la cuenca
- $Q_{so}$ = Caudal efluente superficial de la cuenca
- $Q_{uo}$ =Caudal efluente subterráneo de la cuenca
- $E$ = Evaporación
- $E_t$ = Evapotranspiración
- $\eta$  = término residual de discrepancia
- $\Delta S$ = Variación del almacenamiento de la cuenca

En la cuenca del Salar de las Parinas, la entrada principal de agua hacia la cuenca tiene como fuente principal la precipitación (DGA-DICTUC, 2009). Se descartan otro tipo de entradas como Caudales superficiales y subterráneos provenientes de otras cuencas ya que la cuenca posee un comportamiento Endorreico y no se poseen datos para confirmar una interconexión con cuencas adyacentes. La mayoría de precipitación se infiltra en las zonas porosas, no obstante, existen épocas donde ocurre escorrentía superficial debido a los deshielos en épocas invernales.

La cuenca, al tener un comportamiento endorreico, genera que todos los drenajes terminen dentro de la cuenca, en su zona más baja, por lo tanto, los caudales efluentes tanto superficial como subterráneo se estiman nulos, ya que además no se tiene evidencia de alguna posible interconexión con cuencas adyacentes.

La zona de estudio posee muy baja o nula vegetación, concentrándose específicamente en los humedales periféricos del salar, donde predomina la “*vega salina*”. Debido a esta escasez de cubierta vegetal, la evapotranspiración se estima como muy baja o nula.

Debido a estos antecedentes es que se estima que el balance hídrico de la cuenca del Salar de Las Parinas corresponde a la siguiente expresión.

$$R_t + Q_e - E = \Delta S$$

Donde:

- $R_t$ = Recarga total
- $Q_e$ = Caudal de escorrentía
- $E$ = Evaporación

- $\Delta S$ = Variación del almacenamiento de la cuenca

## **4.5 Caracterización hidroquímica del Salar de las Parinas**

Con la recopilación de antecedentes anteriormente nombrada, se realizó un catastro de antecedentes químicos de la zona del salar de estudio, dentro del cual abarca muestras de agua de vertientes y de lagunas del salar, como también muestras de costra salina. Con las muestras recopiladas se generó una base de datos hidroquímicos, la cual fue utilizada para la planificación del muestreo realizado en terreno.

Se realizó una única campaña de terreno, en las fechas de 8 al 12 de enero del 2018. La campaña se centró en la toma de muestras de salmueras y de manantiales periféricos del salar. Esta campaña se diseñó escogiendo nuevos puntos de muestreo, prefiriendo zonas de alto niveles de litio, a modo de corroboración de los datos, además de agregar datos en sectores anteriormente no explorados. Sumado a las muestras de agua, se tomaron muestras de costra salina, para tener un muestreo más completo que ayudase a la posterior generación de un modelo hidrogeológico.

La metodología de muestreo fue realizada bajo los estándares internacionales de tomas de muestras de aguas. Dicho protocolo seguido se expone a continuación.

### **4.5.1 Muestreo de aguas superficiales**

#### ***4.5.1-A Medición de parámetros fisicoquímicos***

Para realizar un muestreo geoquímico de aguas en terreno, en primer lugar, se necesita medir los parámetros fisicoquímicos del punto de muestreo, dichos parámetros son temperatura, conductividad eléctrica, pH y Eh. La finalidad de medir y conocer estos parámetros radica en que cambian según las condiciones ambientales en que se encuentre la muestra, por ende, el registro de estos datos es de suma importancia en la preparación de las muestras para su posterior análisis químico e isotópico en laboratorio. Para dicha medición, se utilizó en esta ocasión las sondas multiparámetros HANNA HI98192 para aguas altamente concentradas ( $> 20$  mS/cm) y HANNA HI98129 para aguas más diluidas ( $< 20$  mS/cm) (figura 20)



Figura 20 Imágenes de sondas multiparámetros utilizadas en terreno. A) Sonda multiparámetro HANNA HI98192 B) HANNA HI98129. Fuente: HANNA Instruments.

Para la realización de la medición de los parámetros fisicoquímicos se utilizaron vasos plásticos desechables, los cuales previo a cada muestreo, fueron ambientados 3 veces con el agua a muestrear. El proceso de ambientado consistió en rellenar completamente y enjuagar el contenedor utilizado con el agua a muestrear, el agua utilizada debe ser vaciada lejos del punto de muestreo para no afectar el muestreo. Luego de la ambientación se procede a insertar la sonda del equipo, procurando que el sensor quede totalmente cubierto y se espera a la estabilización de los parámetros a muestrear. Luego de la estabilización y el registro de los datos se procede a limpiar inmediatamente la sonda de los equipos con agua destilada.

Para el registro de los datos muestreados se utilizó una libreta de terreno, en conjunto con fichas previamente impresas para cada punto de muestreo.

#### **4.5.1-B Toma de muestras de agua**

En el terreno realizado, debido al mal estado de los pozos existentes, solo se pudo muestrear aguas superficiales de vertientes y lagunas dentro del salar de estudio. Para dicho muestreo, se seleccionó el lugar más apto y representativo, intentando evitar aguas estancadas, ni aguas tan cercanas a las orillas. En primera instancia como se dijo anteriormente, se registran los parámetros fisicoquímicos in situ del lugar a muestrear, luego con el mismo contenedor utilizado para la medición anterior, previamente ambientado 3 veces, se procede a la toma de la muestra (figura 21).



**Figura 21 Fotografía de extracción de muestra de agua en laguna superficial, Salar de las Parinas, Región de Atacama. Fotografía de elaboración propia**

Para cada punto de muestreo se obtuvo un set de 3 botellas de muestra: una botella de 1 lt para análisis de elementos mayores, una botella de 125ml para análisis de elementos trazas y una botella de 125ml para análisis de isotopos de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ , adicionalmente en algunos puntos se agregó otra botella de 125ml para análisis de isotopos de S. Cada una de estas botellas contó con sus respectivas tapas y contratapas, además estas fueron previamente lavadas con agua destilada y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), previo a la realización del terreno. Luego de haber obtenido la muestra se procedió a etiquetar los envases con fichas en blanco autoadhesivas, en donde se especificó el código, la fecha y el tratamiento a la muestra, todo esto fue recubierto por cinta adhesiva plástica para evitar su deterioro.

Una vez completada la toma de muestra, estas se guardaron en neveras, procurando mantenerlas en frío ( $4^\circ\text{C}$  aproximadamente). Luego de su traslado desde el terreno hacia Santiago, inmediatamente fueron entregadas y refrigeradas en los laboratorios de Sernageomin (figura 22). Cabe señalar que las metodologías de muestreo para elementos mayores, trazas e isotopos corresponden a los estándares necesarios para el análisis en el laboratorio de SERNAGEOMIN, el cual cuenta con la acreditación del Instituto Nacional de Normalización (INN) bajo la norma NCh-ISO 17025:2005, en el análisis químico de aguas.



Figura 22 Muestras entregadas y refrigeradas en laboratorio de SERNAGEOMIN. Fotografía de elaboración propia

#### 4.5.2 Análisis químico de muestras de agua

En laboratorio, se analizó el pH por Potenciometría, la conductividad por Conductivimetría y por Volumetría la alcalinidad y la acidez. La concentración de cationes mayores (Ca, Mg, Na, K y Li) fue determinada por Espectrometría de Absorción Atómica y los aniones ( $\text{SO}_4$ , Cl y  $\text{NO}_3$ ) por Cromatografía Iónica. Los elementos trazas (Al, Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, P, Pb, Sb, Se, Sn, V y Zn) fueron determinados mediante análisis directo de ICP-MS. Otros análisis realizados fueron la determinación de la concentración de mercurio por vapor frío por Espectrometría de Fluorescencia Atómica y por método de Ion selectivo la concentración de fluoruros. A estos análisis se suma el cálculo de la Dureza y la Suma de Sólidos Disueltos de las muestras.

Fue verificado en los resultados químicos de las muestras de agua que la suma de miliequivalentes de cationes fuese igual a la suma de miliequivalentes de aniones, tomando como error (Custodio y Llamas, 1999):

$$\text{Error (\%)} = 200 * \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}}$$

Tanto para la base de datos hidroquímicos, como a los análisis de las muestras de terreno se les calculó el error, tomando un error de 10% como máximo admisible.

#### 4.5.3 Métodos gráficos para clasificación de aguas

En general, la representación de datos de análisis de aguas suele ser mediante métodos gráficos, ya que simplifican el manejo de grandes cantidades de datos y presentan la información de una manera más clara y concisa. Los métodos más comunes para visualizar la química del agua son los diagramas Piper (1944) y Stiff (1951). Estos diagramas son de gran utilidad para la comparación de múltiples análisis químicos de un mismo lugar.

#### 4.5.4 -A) Diagrama Piper

Los diagramas Piper brindan una visión de la composición química relativa de las aguas. Este tipo de diagramas permite la presentación de diversos parámetros en una combinación de dos diagramas triangulares, uno de aniones y otro de cationes, unidos por un tercer diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los dos grupos de elementos mencionados. Las muestras son proyectadas con un punto en cada uno de los diagramas (figura 19).

La concentración de cada especie se expresa como un porcentaje normalizado de cada grupo, expresado en miliequivalentes. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas definidas, las cuales son asociadas a diferentes tipos de clases o facies hidroquímicas (figura 23)

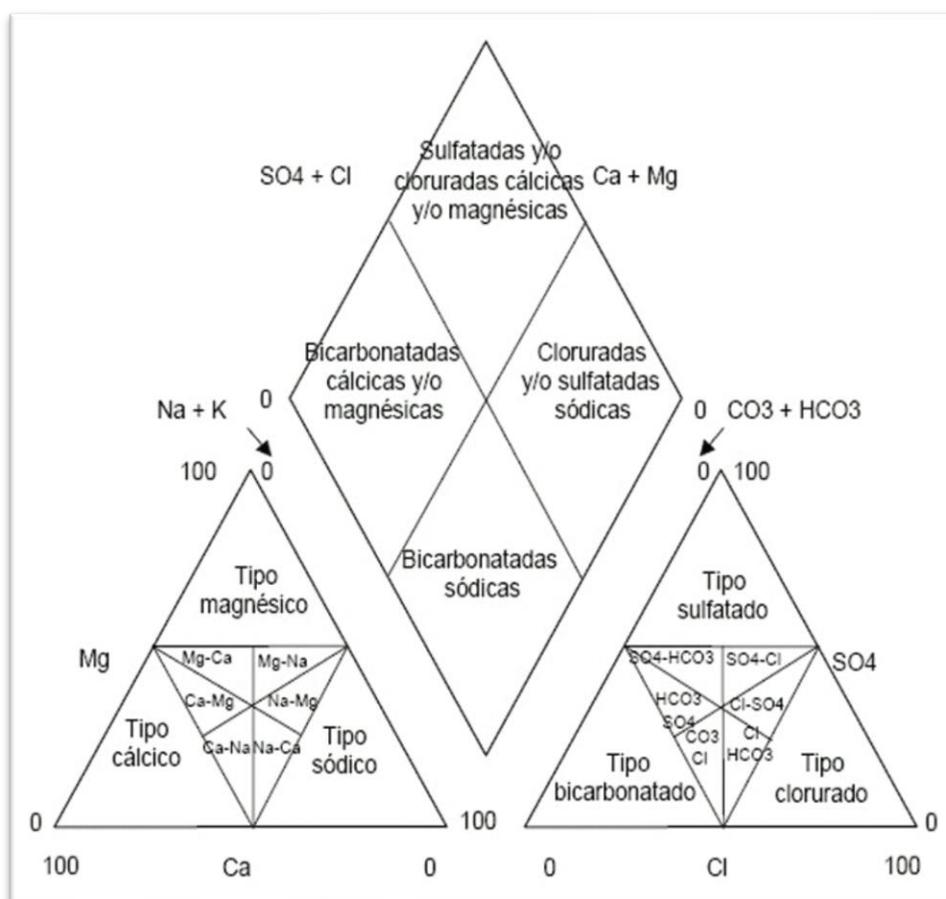


Figura 23. Ejemplo de diagrama Piper (Piper, 1944)

#### 4.5.2 -B) Diagrama Stiff

Los diagramas de Stiff, además de indicar las composiciones de las aguas, permiten visualizar la concentración de las muestras de agua. Se utiliza para el análisis de muestras individuales, las cuales se suelen presentar en figuras georeferenciadas directamente en los mapas hidrogeológicos. De esta manera se pueden visualizar las variaciones composicionales y los aumentos de concentraciones a lo largo de los sentidos de flujo a medida que la proporción de los elementos aumenta o disminuye, o a medida que atraviesan sistemas hídricos particulares.

Estos diagramas son polígonos que sirven para identificar fácilmente el tipo de agua que se tiene en un determinado punto. Se encuentran divididos mediante una línea vertical, quedando los aniones del lado derecho y los cationes del lado izquierdo (figura 24). Todas las concentraciones de los iones se encuentran expresadas en miliequivalentes por litro (meq/l) y la escala gráfica corresponde al largo de las líneas horizontales, es decir, cuanto más ancho es un diagrama, mayor es la concentración.

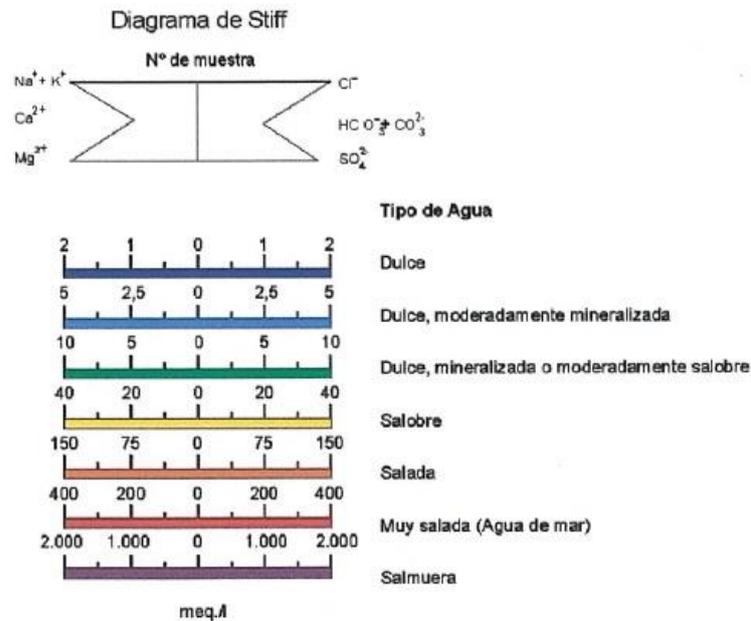


Figura 24 Diagrama Stiff (Santibañez, 2000)

Dado que existen áreas que pueden presentar aguas altamente concentradas, se ha elaborado un método para facilitar la representación gráfica, el que consiste en usar una escala de colores para rellenar el polígono del diagrama de Stiff. Se ha utilizado el parámetro correspondiente al total de sólidos disueltos para elaborar una escala de salinidades, que va desde aguas dulces a salmueras (tabla 4). Para cada rango de TDS, se le asigna un determinado color y escala (figura 24)

Tabla 4 Rangos de salinidad (Santibañez, 2000)

Tipo de agua	TDS (ppm)
Dulce	0-100
Dulce, moderadamente mineralizada	100-500
Dulce, mineralizada	500-1.000
Salobre	1.000-5.000
Salada	5.000-20.000
Muy salada	20.000-50.000
Salmuera	>50.000

#### 4.5.4 Determinación cualitativa de vías evolutivas de aguas evaporadas

Este método descrito en los estudios de Risacher *et al.*, (1999) se basa en la noción de alcalinidad como la diferencia entre la suma de los cationes de bases fuertes y la suma de aniones de ácidos fuertes ( $[alc] = ([Na] + [K] + [Li] + [Ca] + [Mg]) - ([Cl] + [SO_4] + [NO_3])$ ). Mediante un modelamiento donde se asume la precipitación en cadena de minerales en función de su solubilidad creciente se puede llegar a ciertas relaciones entre estos componentes que permiten identificar la vía evolutiva de los aportes de la cuenca. Las relaciones necesarias para la identificación de la vía evolutiva son las siguientes:

- $[alc] > [Ca]$  y  $[alc] > [Ca] + [Mg]$   $\implies$  Vía Carbonatada
- $[alc] > [Ca]$  y  $[alc] < [Ca] + [Mg]$   $\implies$  Vía sulfatada alcalina o directa
- $[alc] < [Ca]$  y  $[alc] + [SO_4] > [Ca]$   $\implies$  Vía sulfatada neutra
- $[alc] > [Ca]$  y  $[alc] + [SO_4] < [Ca]$   $\implies$  Vía Cálctica

Una vez teniendo la vía evolutiva es posible clasificar las salmueras producidas por la evaporación de las aguas de los aportes en alguna de las tres familias de salmueras: tipo carbonatada, sulfatada o cálcica (figura 25).

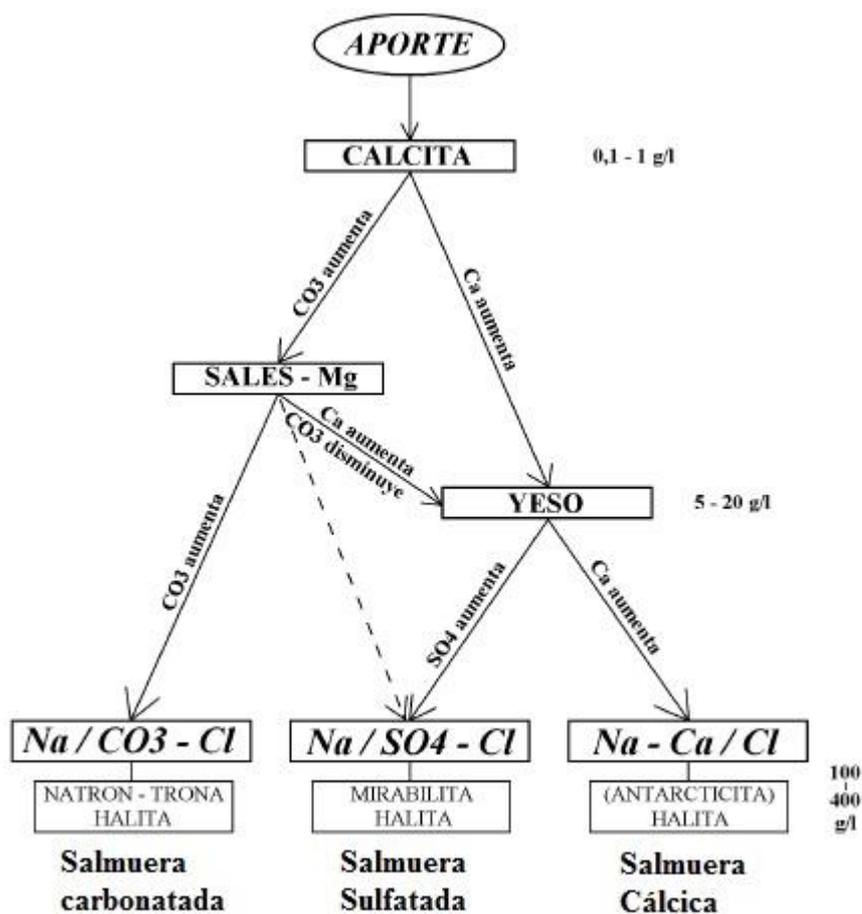


Figura 25. Diagrama de evolución de aguas evaporadas según Hardie y Eugster (1970). Extraído y editado de Risacher *et al.*, (1999)

#### 4.5.5 Análisis de muestras de costra salina

Las muestras de costra salina en primera instancia fueron descritas visualmente, inmediatamente en terreno al momento de su obtención. Dichos antecedentes están dispuestos en el Anexo A. "Fichas de muestras solidas de costra salina".

Además de la descripción visual, estas muestras fueron enviadas al laboratorio del SERNAGEOMIN para el análisis de su mineralogía mediante una difracción de rayos X, utilizando el difractómetro Panalytical, modelo X'Pert PRO y el programa High Score Plus para la realización de los análisis.

En laboratorio las muestras de costras salinas fueron molidas y cuarteadas 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 para su posterior barrido en el difractómetro.

Además de los análisis de difracción de rayos X, se obtuvieron de este mismo laboratorio análisis químicos de cationes/aniones mayores y de elementos trazas. Para dicho análisis se utilizaron un titulador automático, cromatógrafo iónico, un espectrómetro de absorción atómica y un espectrómetro de acoplamiento inductivo con detector de masa (ICP-MS).

#### 4.5.6 Análisis de isótopos

Los estudios isotópicos ambientales en aguas permiten trazar el movimiento de estas e identificar algunos procesos de fraccionamiento natural durante su ciclo, los cuales hacen variar sus razones isotópicas. Para el caso del agua las variaciones isotópicas analizadas son en base a sus dos componentes, el hidrogeno y oxígeno. Los isotopos que se pueden encontrar, para el caso del hidrogeno ( $^1\text{H}$ ) corresponden al deuterio ( $^2\text{H}$ ) y el tritio ( $^3\text{H}$ ), para el caso del oxígeno ( $^{16}\text{O}$ ) existen isótopos desde el  $^{14}\text{O}$  al  $^{20}\text{O}$

Como se dijo anteriormente, para cada punto de muestreo de aguas superficiales se contempló además realizar muestreos isotópicos de  $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$  y  $^{34}\text{S}$ . Estos análisis también fueron realizados en los laboratorios del SERNAGEOMIN, utilizando un espectrómetro de masa complementado con periféricos "multiflow" que permite conocer la composición isotópica en muestras de aguas, entregando datos isotópicos de  $\text{d}^{18}\text{O}$  y  $\text{d}^2\text{H}$  de aguas y  $\text{d}^{34}\text{S}$  en sulfatos disueltos.

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

$$\delta = \frac{R_{(muestra)} - R_{(Estandar)}}{R_{(Estandar)}} * 1000$$

Siendo R la razón entre el isotopo menos abundante con respecto al más abundante.

De la fórmula de la desviación isotópica se desprende que para valores positivos se tiene un enriquecimiento del isótopo menos abundante con respecto al patrón de referencia en cambio para valores negativos se tiene un empobrecimiento del isotopo menos abundante.

#### **4.5.6-A) Patrón de referencia VSMOW y relación $\delta D - \delta^{18}O$**

Uno de los patrones de referencia utilizados para análisis de isotopos de agua es el Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), el cual corresponde a los valores isotópicos medios para el agua oceánica, representando gran parte del agua existente en la tierra. 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  $R_{VSMOW-^{18}O} = (2005,20 \pm 0,45) \cdot 10^{-6}$ .

En el agua natural los contenidos de deuterio y  $^{18}O$  sufren variaciones a lo largo de todo el ciclo hidrológico, siendo afectados por los diversos cambios de fase que sufre el agua en torno a este ciclo (figura 26). Los isótopos más ligeros son más volátiles que los más pesados debido a efectos de la gravedad, por lo que, en procesos de evaporación los isotopos más livianos tienden a evaporarse más fácilmente, empobreciendo al liquido residual en isotopos livianos. Para los casos de condensación los isotopos pesados tienen a precipitar con más facilidad con respecto a los isotopos livianos, generando un enriquecimiento de isotopos pesados en las precipitaciones.

Todos estos procesos generan que en el mar se encuentren aguas más pesadas en comparación a las aguas dulces y al vapor de agua derivado de evaporación. Las nubes, empobrecidas de isotopos pesados, con cada precipitación irán perdiendo cada vez más isotopos pesados, los cuales se integran a flujos de agua que desembocan en el mar.

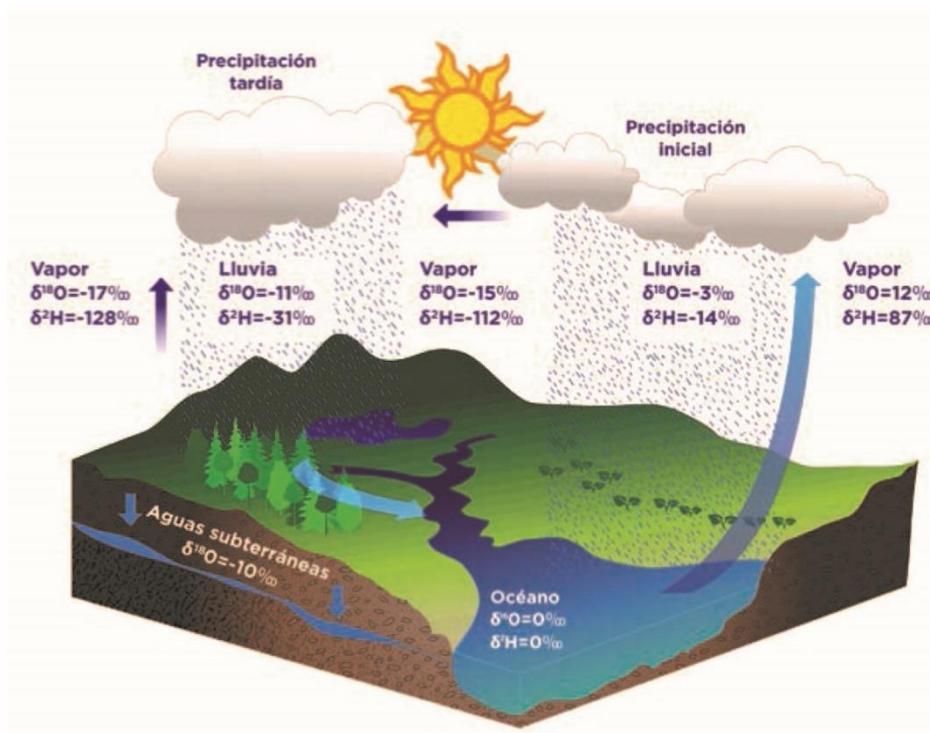


Figura 26. Esquema de distribución isotópica durante el ciclo hidrológico. Extraído de García & Pinto, 2017

Los procesos anteriores se pueden identificar a partir de la relación existente entre las desviaciones isotópicas de deuterio y  $^{18}\text{O}$ , en donde la mayoría de las precipitaciones se sitúan en la Línea Meteórica Mundial (figura 27) definida por Craig (1961) como:

$$\delta D = 8 * \delta^{18} O + 1000$$

Como se dijo anteriormente la mayoría de procesos isotópicos del ciclo hidrológico se pueden identificar en la línea meteórica mundial, no obstante, no son los únicos que pueden influir en la distribución de los isotopos de deuterio y  $^{18}\text{O}$ . En la figura 27 se puede ver que la relación entre deuterio y  $^{18}\text{O}$  puede verse modificada por diferentes procesos, provocando que sus puntos representativos de composición se alejen de la línea meteórica mundial.

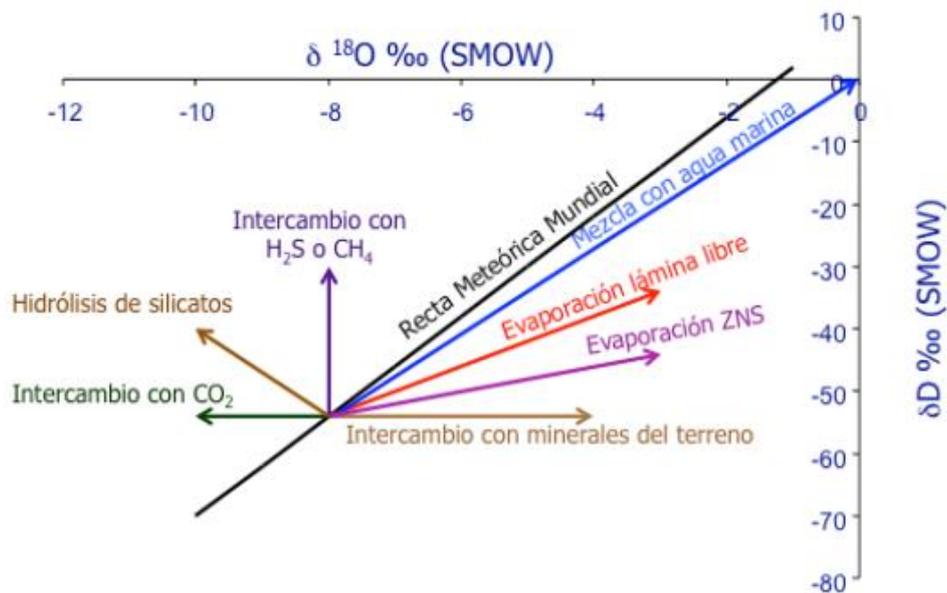
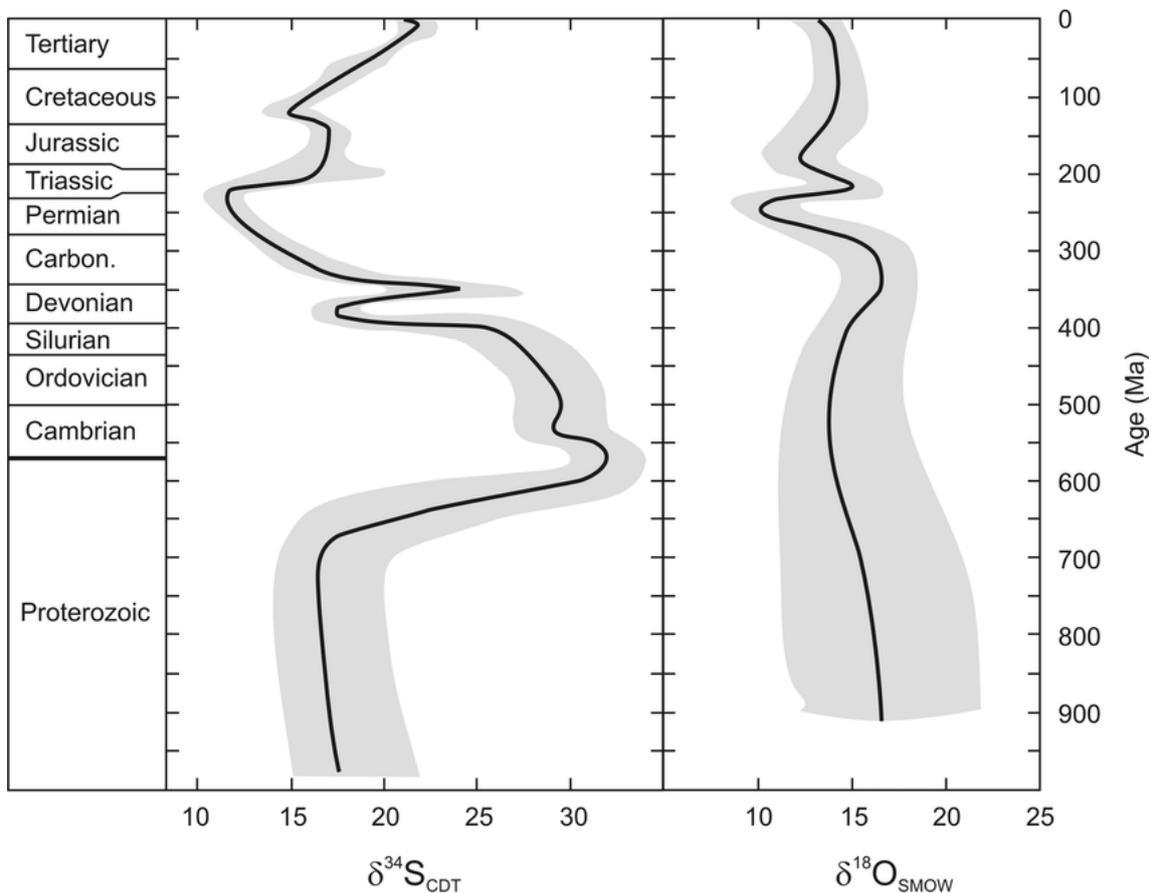


Figura 27. Línea Meteorítica Mundial y procesos fraccionadores. Extraído desde Soler et al., 2015.

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

El patrón más común utilizado para los isótopos de  $^{34}\text{S}$  corresponde al meteorito Troilita ( $\text{FeS}$ ) del Cañón del Diablo (USA) el cual representa el valor inicial del ciclo del azufre, cuyo valor referencial para el  $^{34}\text{S}$  con respecto al  $^{32}\text{S}$  corresponde a  $R_{CTD} = 22,22$ .

Los sulfuros presentes en rocas con un origen directo o indirecto en el manto presentan valores de  $\delta^{34}\text{S}$  cercanos al 0‰, indicando fraccionamientos muy pequeños o inexistentes, no obstante la composición isotópica del azufre en el sulfato disuelto se ve afectada notablemente por las reacciones de oxidación y reducción. La composición isotópica del sulfato marino ha sufrido cambios importantes a lo largo de los tiempos geológicos (Claypool et al., 1980), con valores de  $\delta^{34}\text{S}$  más altos debidos a la pérdida de  $^{32}\text{S}$  por procesos de reducción bacteriana de sulfato y precipitación de pirita, y valores más bajos de  $\delta^{34}\text{S}$  debidos a periodos geológicos en los que predomina el aporte de sulfato enriquecido en  $^{32}\text{S}$  procedente de la oxidación de sulfuros, la cual no conlleva fraccionamiento isotópico. Estas variaciones de la  $\delta^{34}\text{S}$  del sulfato marino han quedado reflejadas en el transcurso de los tiempos geológicos en las evaporitas marinas (figura 28)



**Figura 28 Variación temporal  $\delta^{34}\text{S}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de sulfatos en evaporitas marinas. Extraído de Claypool et al. (1980)**

La composición isotópica del sulfato marino actual es de +21‰. Las evaporitas terrestres muestran valores generalmente más ligeros, a no ser que correspondan a sulfatos marinos reciclados, en la figura 29 se puede notar las variaciones isotópicas de  $\delta^{34}\text{S}$  con respecto al patrón cañón del diablo triolite (CDT) en diversos compuestos de azufre, se destaca que los valores más pequeños de  $\delta^{34}\text{S}$  corresponden a rocas ígneas y sulfuros volcánicos, en cambio los valores más amplios corresponden a evaporitas (calizas) y a pizarras. En el trabajo de Vitoria et al. (2004) se muestra otro gráfico e variaciones de  $\delta^{34}\text{S}$  y los compuestos de azufre en diferentes materiales naturales y compuestos antrópicos (detergentes y fertilizantes), de cual se destaca una diferenciación en el rango de  $\delta^{34}\text{S}$  en evaporitas, dando un rango entre -15‰ a 10‰ para evaporitas continentales y un rango entre 10‰ a 35‰ para evaporitas marinas (figura 30).

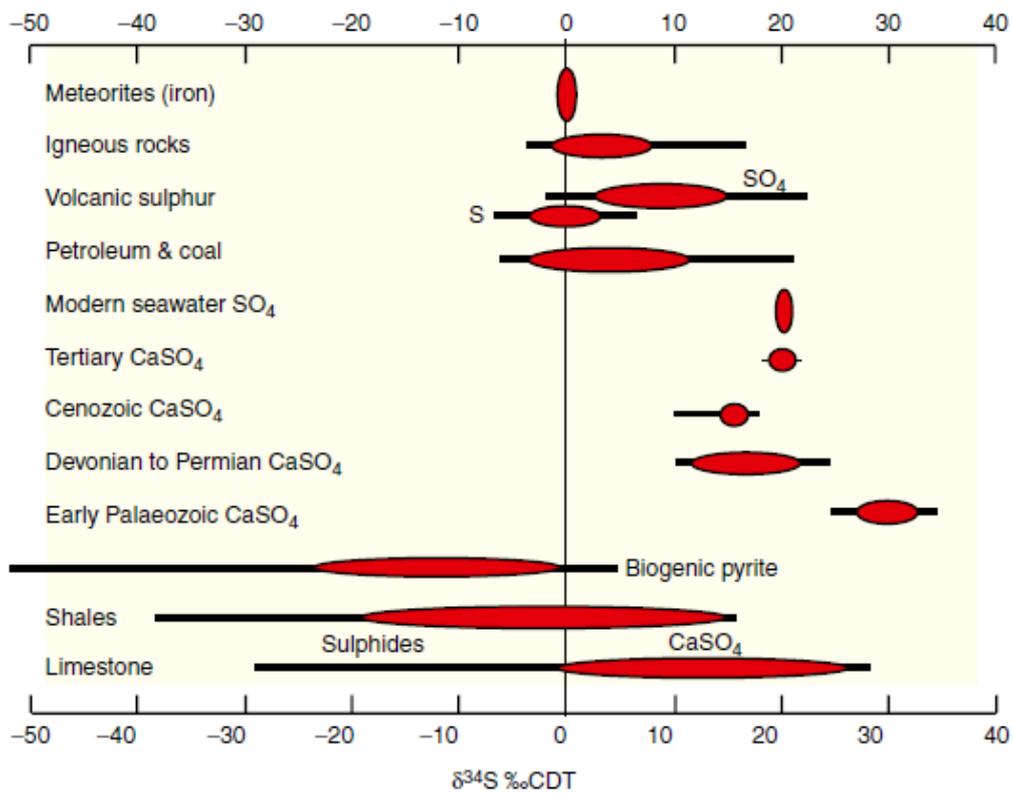


Figura 29. Variaciones en la  $\delta^{34}\text{S}$  del azufre y los compuestos de azufre. Extraído de Warren, 2016.

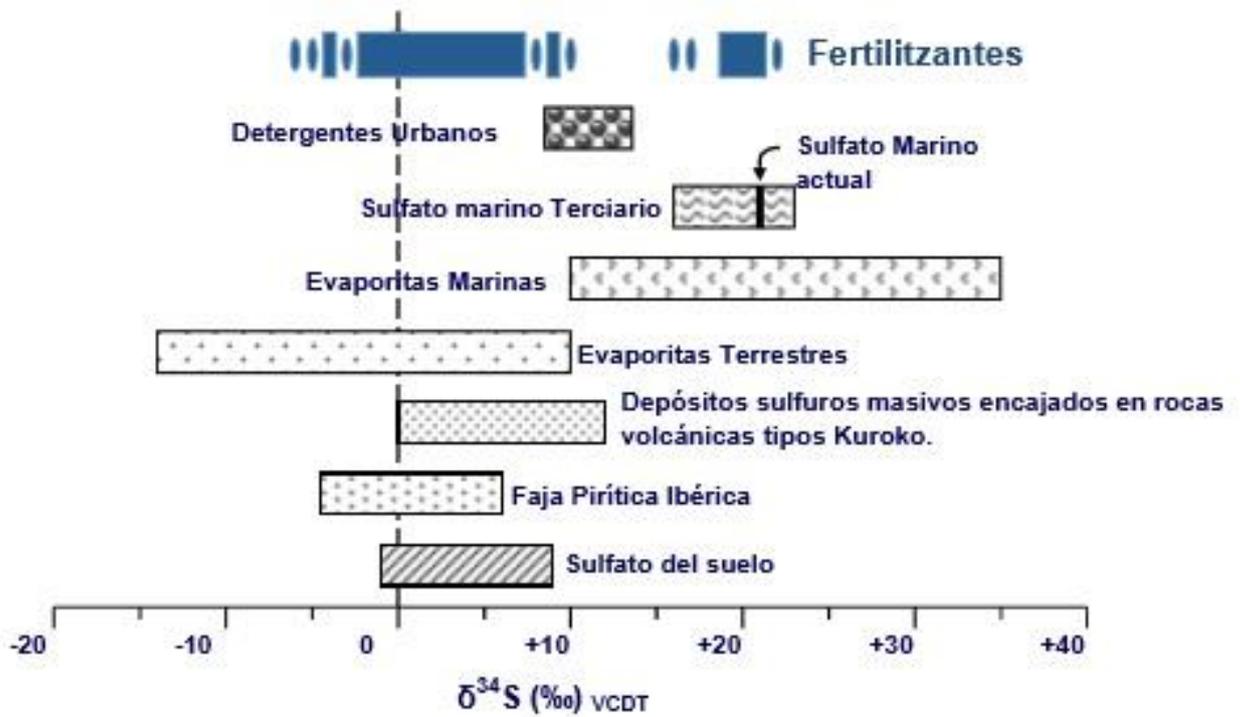


Figura 30 Variaciones de  $\delta^{34}\text{S}$  y los compuestos de azufre en diferentes materiales naturales y compuestos antropicos. Extraído de Vitoria et al. (2004)

#### 4.6 Identificación de humedales y generación de zonas de protección

Para la identificación de humedales se trabajó con imágenes satelitales Landsat 8 obtenidas del USGS y con imágenes Rapid Eye provistas por el Comité de Minería No Metálica de CORFO.

En primera instancia se procedió a analizar ambas imágenes, intentando identificar zonas donde se pudiese distinguir vegetación y aguas superficiales, no obstante delimitar claramente era complejo debido a la gran variedad de tonos presentes en las imágenes y a la escala de estas. Para apoyar el análisis, a partir de la imagen satelital Landsat 8 se generó un índice de vegetación de diferencia normalizada o más conocido como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), el cual es comúnmente utilizado para estimar la vegetación debido a la alta reflectancia que tiene la vegetación en general en el campo del infrarrojo cercano. El cálculo del NDVI se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

En donde:

- NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada
- NIR= Banda del infrarrojo cercano
- VIS= Banda del rojo visible

Con los análisis tanto de las imágenes satelitales a color real, como los obtenidos con el índice NDVI, se propondrá un mapa de protección a las zonas de humedales como medida de protección frente a cualquier alteración antrópica.

#### 4.7 Estimación del potencial del litio

Para lograr generar una estimación de los recursos explotables de un salar, a modo general se necesita un volumen total de salmuera y la concentración del elemento de interés a extraer. Ambos factores varían en el espacio, por un lado, la concentración del elemento de interés depende del grado de su grado de solubilidad y el volumen de salmuera depende de la porosidad de la unidad geológica contenedora de esta.

Según Houston (2011), los recursos extraíbles de un salar se pueden ser calculados a partir de la geometría del acuífero, la porosidad drenable que este tenga y la concentración del elemento de interés en la salmuera. La expresión que relaciona los parámetros anteriores para cada punto del salar es la siguiente:

$$G_{xyz} = S_{y_{xyz}} * C_{xyz} * b_{xyz}$$

Donde:

- $G_{xyz}$  = unidad de volumen en toneladas en xyz
- $S_{y_{xyz}}$  = Porosidad eficaz (*Specific Yield*) en xyz
- $C_{xyz}$  = concentración elemento de interés en xyz
- $b_{xyz}$  = espesor de la celda en xyz

Siendo finalmente el recurso, la sumatoria de estas variables en el espacio y profundidad como se muestra a continuación.

$$\text{Recursos Inferidos} = \sum_{xyz=1}^j G^{xyz}$$

Para la estimación del potencial de litio en el Salar de Las Parinas se procederá como se explicó anteriormente, no obstante, dicha estimación presenta grandes desafíos debido a la incertidumbre que genera la falta de información del subsuelo del salar. A continuación, se detallará la metodología para la obtención de cada parámetro, en base a estimaciones y comparación con casos vecinos similares al salar de estudio. Cabe destacar que los alcances de esta metodología solo llegarán a una estimación de recursos inferidos.

#### 4.7.1 Cálculo del Volumen del Salar

Para el cálculo del volumen del salar, como se dijo anteriormente existe el gran desafío de la ausencia de información de subsuelo en la zona. En vista de esto, se realizó una recopilación de información de casos similares al salar de estudio, donde destacan casos de los salares de Maricunga, Llamará y Salinas Grande. A los datos anteriores se suman los datos de perforaciones del proyecto 7 salares (Talison, 2011), no obstante, no se pudo obtener información de detalle de dichas perforaciones.

El otro enfoque con que se abordará la estimación de volumen del salar será trabajando con modelos de elevación (DEM) de la zona de estudio, en donde se procederá a prolongar en profundidad las pendientes de las laderas adyacentes al salar, buscando el punto de intersección de laderas opuestas, estimando así una profundidad de la base del salar. Este procedimiento se trabajará asumiendo que la forma de la cuenca del salar no se vio afectada desde su cierre y que las pendientes de las unidades adyacentes (mayoritariamente edificios volcánicos) no varían mayormente en profundidad.

Con dichos puntos estimados, se creará curvas de nivel hipotéticas del piso del salar mediante el software ArcGIS. El método de interpolación utilizado será el *Spline* el cual nos otorga una superficie que minimiza la curvatura general, produciendo una superficie suave entre los puntos. La ventaja de esta interpolación es que dicha superficie obtenida va más allá de los puntos ingresados, obteniendo así una estimación más amplia de la base del salar, además la mínima curvatura de la superficie de esta interpolación resulta una buena aproximación a la morfología estimada del salar

Una vez teniendo esta interpolación, se procederá a generar un modelo irregular de triángulos (Triangular Irregular Networks, TIN) del salar, con el cual se calculará su volumen mediante la herramienta *Volumen de polígonos* del software ArcGIS, asumiendo una altura media del salar de 3987 m.s.n.m de la superficie del salar.

#### **4.7.2 Estimación de la porosidad eficaz**

En el método de estimación de recursos propuesto por Houston (2011) hace mención del parámetro "Porosidad Eficaz" (*Specific Yield, S<sub>y</sub>*) como a la porosidad drenable que posee un acuífero inicialmente saturado, es decir el volumen de salmuera extraíble por gravedad mediante bombeo

Al igual que el caso anterior del volumen del salar, no se poseen datos del subsuelo del salar, debido a esto se realizó una recopilación de información de casos similares al salar de estudio, para poder así estimar rangos del parámetro buscado. Dentro de los trabajos consultados se destacan los casos de los salares de Maricunga, Lllamará y Salinas Grande

#### **4.7.3 Estimación de la concentración de litio en salmueras**

Para la estimación de la concentración de litio en salmueras se tomarán en consideración las concentraciones de las muestras superficiales recopiladas de estudios anteriores (Risacher *et al.*, 1999 y Troncoso *et al.*, 2016) y las muestras tomadas en terreno. Con dichos datos se construirán curvas de igual concentración de litio mediante interpolaciones realizadas con el software ArcGIS, esto con el fin de poder delimitar el salar en zonas según el grado de concentración de litio de sus salmueras en superficie. Lamentablemente los datos superficiales son insuficientes para una estimación más precisa del potencial de litio del salar debido a que en el subsuelo las concentraciones de litio varían según la posición del núcleo salino del salar.

Para complementar los datos obtenidos, al igual que las estimaciones anteriores, se recopilará información de casos similares al salar de estudio para poder contrastar y poder estimar rangos de concentración en profundidad

## 5. Resultados

### 5.1 Hidrografía de la zona de estudio

#### 5.1.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica del Salar de las Parinas

Para la delimitación de la cuenca del salar de las Parinas se utilizaron los softwares Global Mapper y ArcGIS, con sus módulos de Hydrology y Archydro. Todos los softwares poseen consideraciones similares a grandes rasgos para el cálculo teórico de una cuenca hidrográfica, no obstante, para este caso en particular se trabajó con cuidado ya que la cuenca de estudio es endorreica, es decir, su drenaje confluye dentro de ella.

El problema que se presenta es que los drenajes de la cuenca de estudio confluyen dentro de esta misma, en la zona más baja donde se ubica el salar de las Parinas. En esta zona la construcción de redes de drenaje se vuelve complicada, ya que los softwares modelan redes sobre el salar, bastante erróneas por tratarse de una superficie plana. La solución a este problema es asignarle una categoría especial a la zona específica del salar, de una forma de distinguir que el punto de salida de los drenajes sea el salar

El módulo de Archydro del software ArcGIS corresponde al programa más complejo de los 3 utilizados, teniendo más herramientas y consideraciones para trabajar, una de ellas es la posibilidad de delimitar “cuerpos de agua” en los cuales los drenajes confluyen. Con esta herramienta se delimitó la zona específica del salar y se le asignó la categoría de “lago”, lo cual evita los errores adyacentes a la creación de redes de drenaje sobre el salar, en terrenos “planos”, además les da una salida a las redes de drenaje de las subcuencas generadas. Para el caso de los softwares Global Mapper y el módulo hydrology de ArcGIS no es posible asignarle una categoría a la zona del salar, por lo tanto, se procedió a quitar los datos del DEM de esa zona, asumiendo que todo drenaje que termine en el centro será aporte para el salar (figura 31)

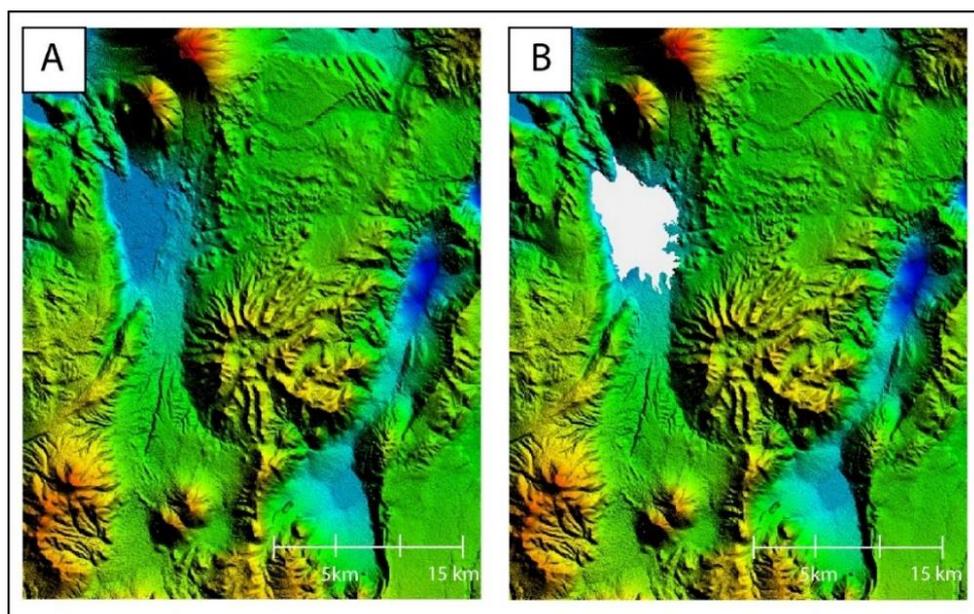


Figura 31 Ilustración de los modelos de elevación utilizados para la delimitación de la cuenca. A) Modelo utilizado con el programa ArcGIS/ Archydro, la zona del salar fue categorizada como un

“cuerpo de agua” para el modelamiento y no fue necesario removerla. B)- Modelo utilizado con los programas ArcGIS / Hydrology y Global Mapper 15, al presentar problemas en la construcción de la red de drenaje, se removió los datos de la zona del salar. Fuente: elaboración propia

Luego de la construcción de los modelos de flujo y acumulación de la cuenca, se procedió a generar la red de drenaje. Para construir la red de drenaje, a partir del modelo de acumulación, se tuvo que asignar un valor umbral de pixeles necesarios para conformar un cauce. Luego de varios análisis, sopesando múltiples valores se llegó a un umbral de 2000 pixeles para los 3 softwares. Cabe destacar que el resultado final de la red de drenaje fue corregido manualmente, mediante la comparación y análisis de un modelo de sombras (Hillshade) construido a partir del DEM utilizado.

Para finalizar, luego de la delimitación de diversas cuencas a partir de las redes de drenaje, se procede a la construcción manual de la cuenca del salar descrita anteriormente. El resultado obtenido fue de una cuenca de 594,28 km<sup>2</sup>, con 19 subcuencas que desembocan en la parte más profunda de la cuenca, donde se ubica el salar de estudio (figura 32). Algunos datos morfométricos de la cuenca resultante se pueden apreciar en la tabla 5

**Tabla 5 Parámetros Morfométricos obtenidos de la cuenca del Salar de las Parinas**

<b>Parámetros Morfométricos</b>		
Área (km <sup>2</sup> )	594	
Perímetro (km)	136	
Cota (m.s.n.m)	Mínima	3987
	Máxima	5803
	Promedio	4362

# Hidrografía de la cuenca del salar Parinas

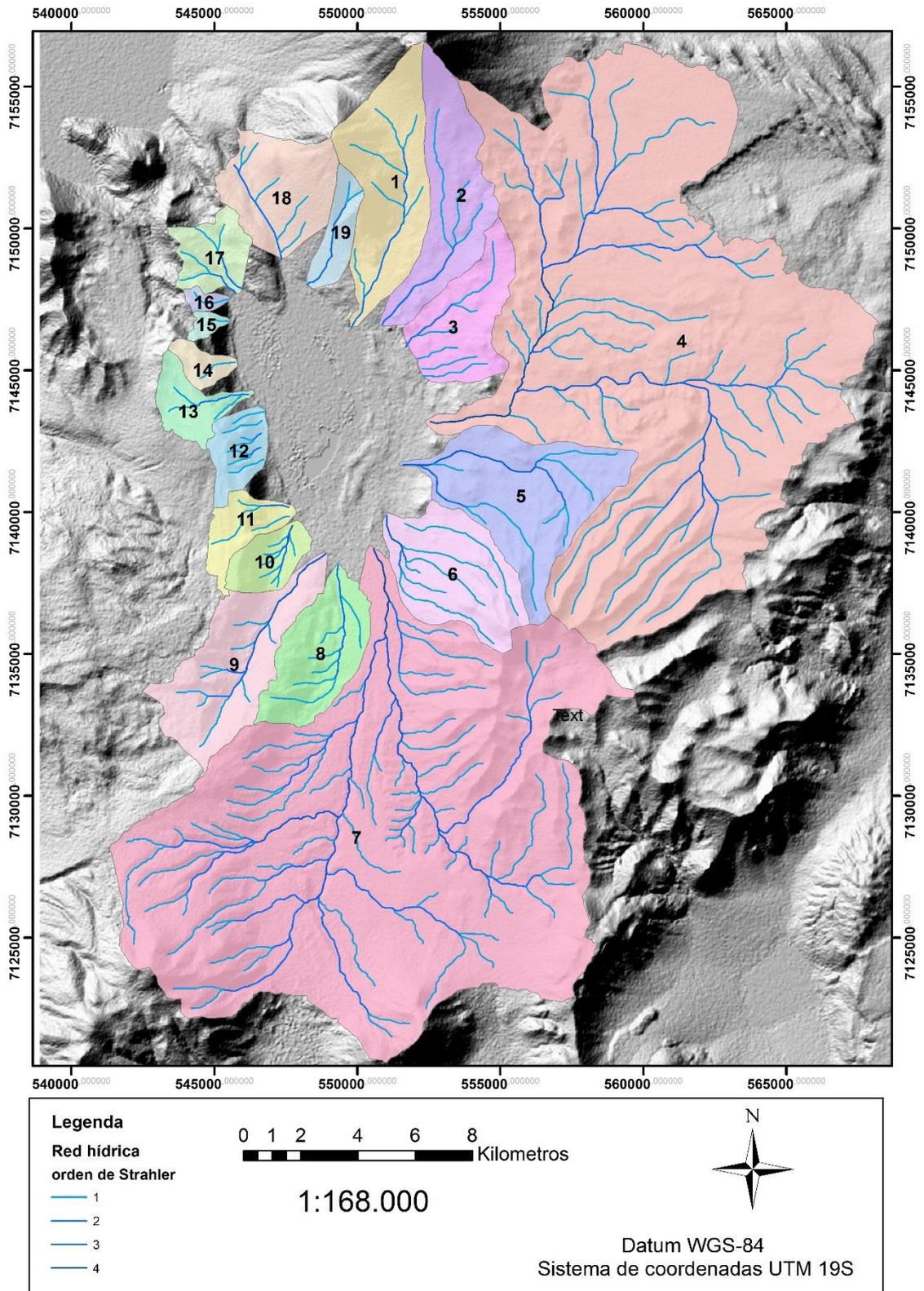


Figura 32 Mapa Hidrográfico de la cuenca del salar de las Parinas. Fuente: elaboración propia

## 5.2 Geología de la cuenca del salar de las Parinas

Con los resultados obtenidos de la delimitación hidrográfica de la cuenca del salar de las Parinas, junto con la recopilación bibliográfica de la geología local de la zona (Naranjo *et al.*, 1992 y Naranjo *et al.*, 2013) se generó un mapa geológico de la cuenca de estudio (figura 33)

### Geología de la cuenca del Salar de las Parinas

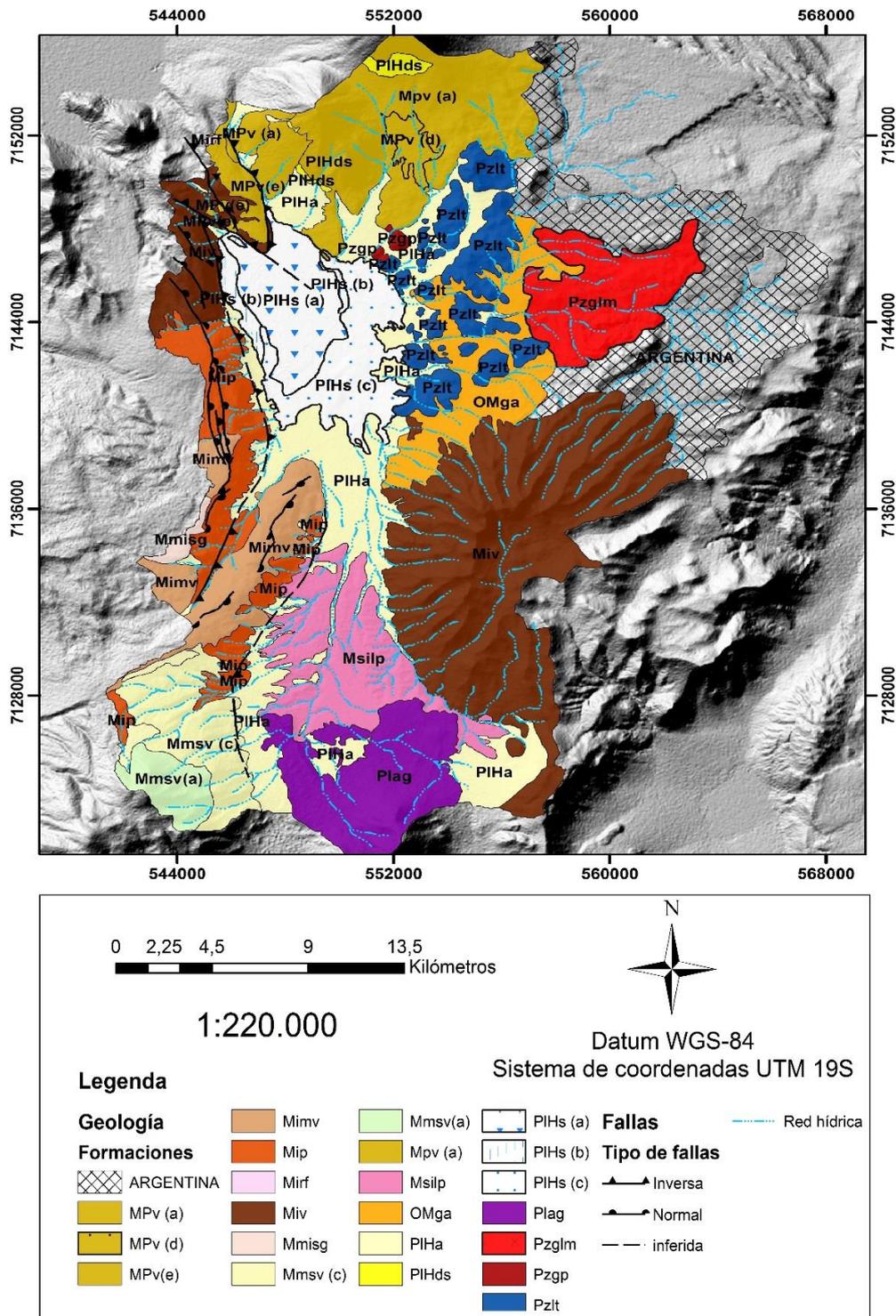


Figura 33 Mapa geológico de la cuenca del Salar de las Parinas a partir de los trabajos de Naranjo *et al.*, 1992 y Naranjo *et al.*, 2013

El mapa anteriormente expuesto corresponde a solo una recopilación de las formaciones expuestas en el trabajo de Naranjo *et al.* (1992 y 2013). No obstante, con los datos obtenidos del terreno realizado, se pudo generar un mapa de zonificado del salar de las Parinas (figura 34), con 3 zonas características descritas a continuación.

### Mapa zonificado de la costra salina del Salar de las Parinas

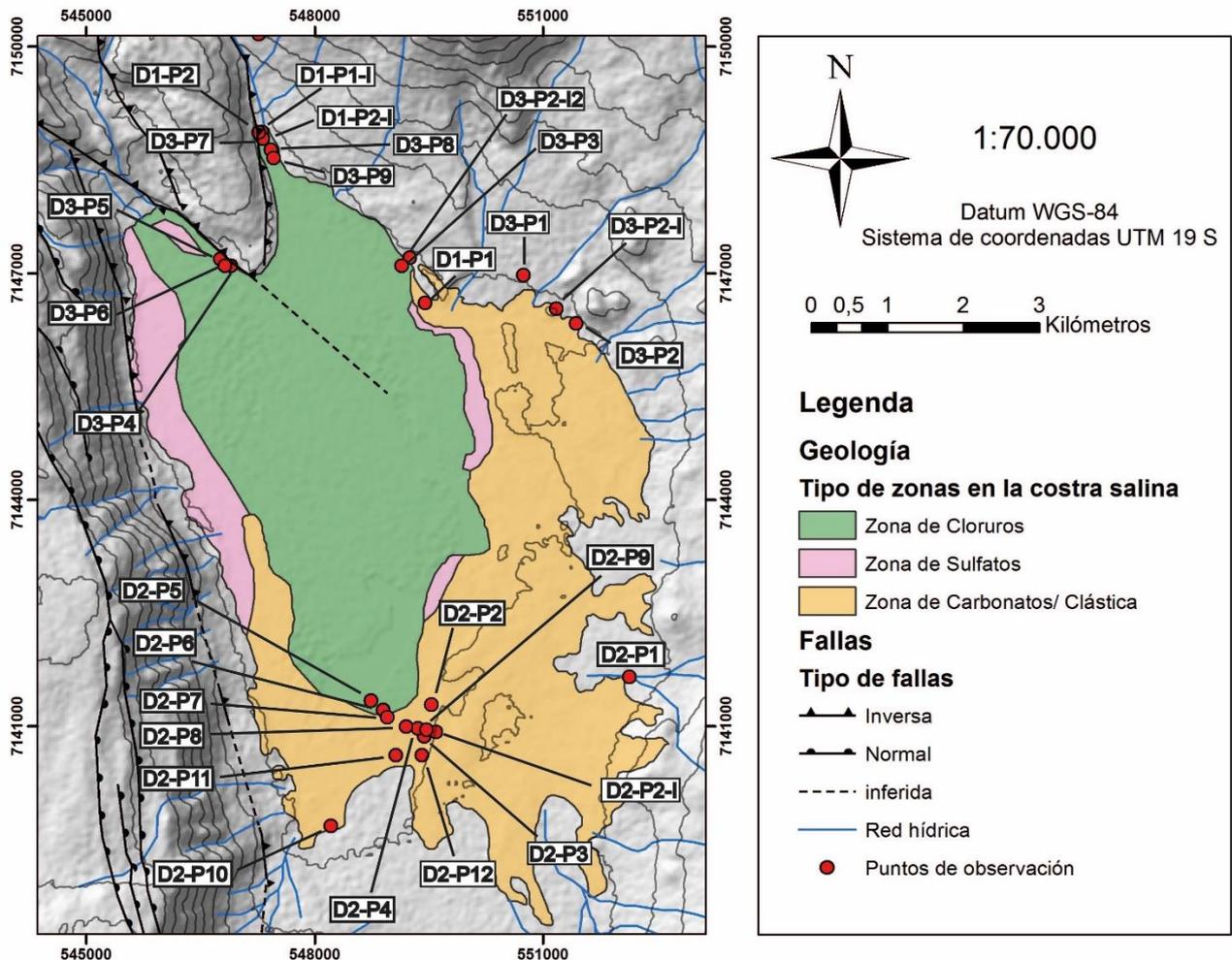


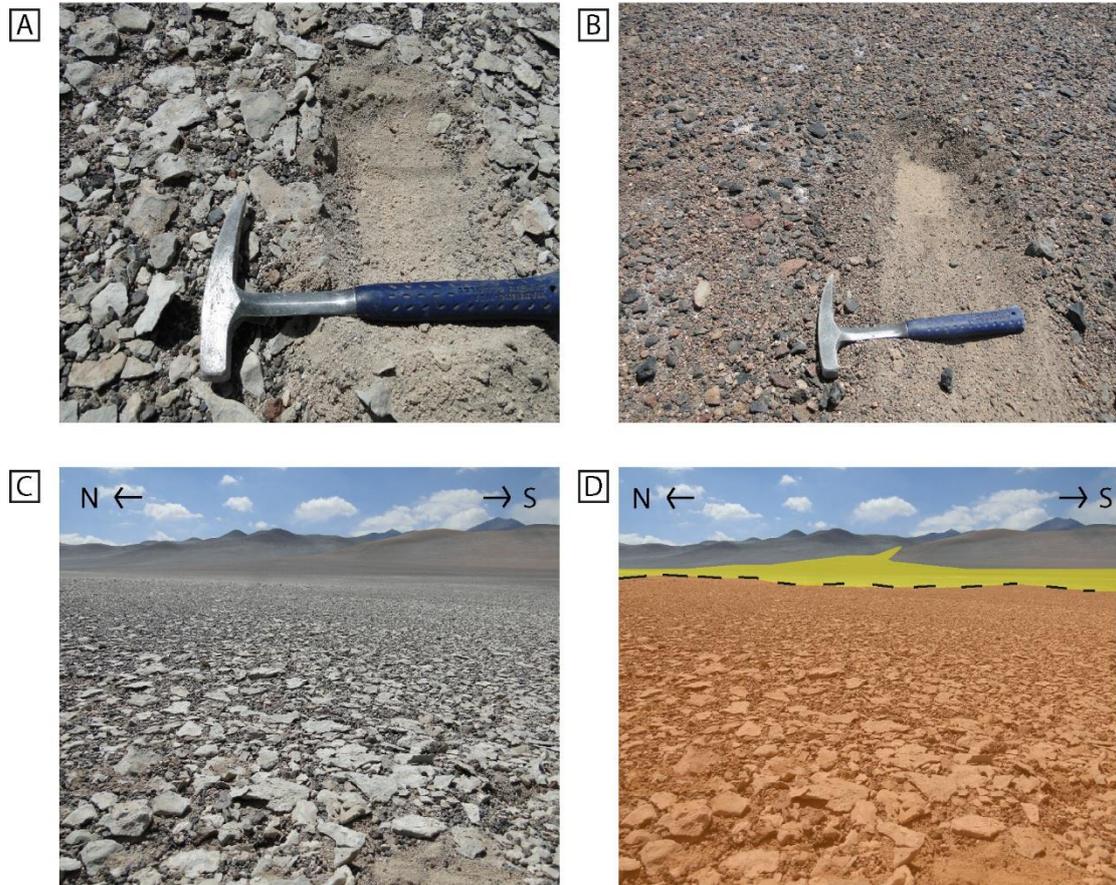
Figura 34 Mapa zonificado de la distribución de la costra salina del Salar de las Parinas elaborado a partir de datos tomados en terreno, enero 2018. Fuente: elaboración propia

- **Zona de carbonatos / clástica**

Esta zona abarca 19.6 km<sup>2</sup> y se compone de sedimentos no consolidados, en su mayoría carbonatos de color gris claro. Estos sedimentos poseen una capa de aproximadamente 5-8 cm de espesor de sedimentos tamaño arena gruesa, en donde los clastos de carbonato predominan en cantidad y en tamaño (0,5 – 5 cm). Debajo de esta capa, disminuye el tamaño de los sedimentos, llegando a ser arena media a fina, de color pardo claro.

Se diferencian de los depósitos aluviales/coluviales por la disminución notoria en la cantidad de carbonatos y por la predominancia de clastos volcánicos, los cuales brindan tonos negros a estos depósitos.

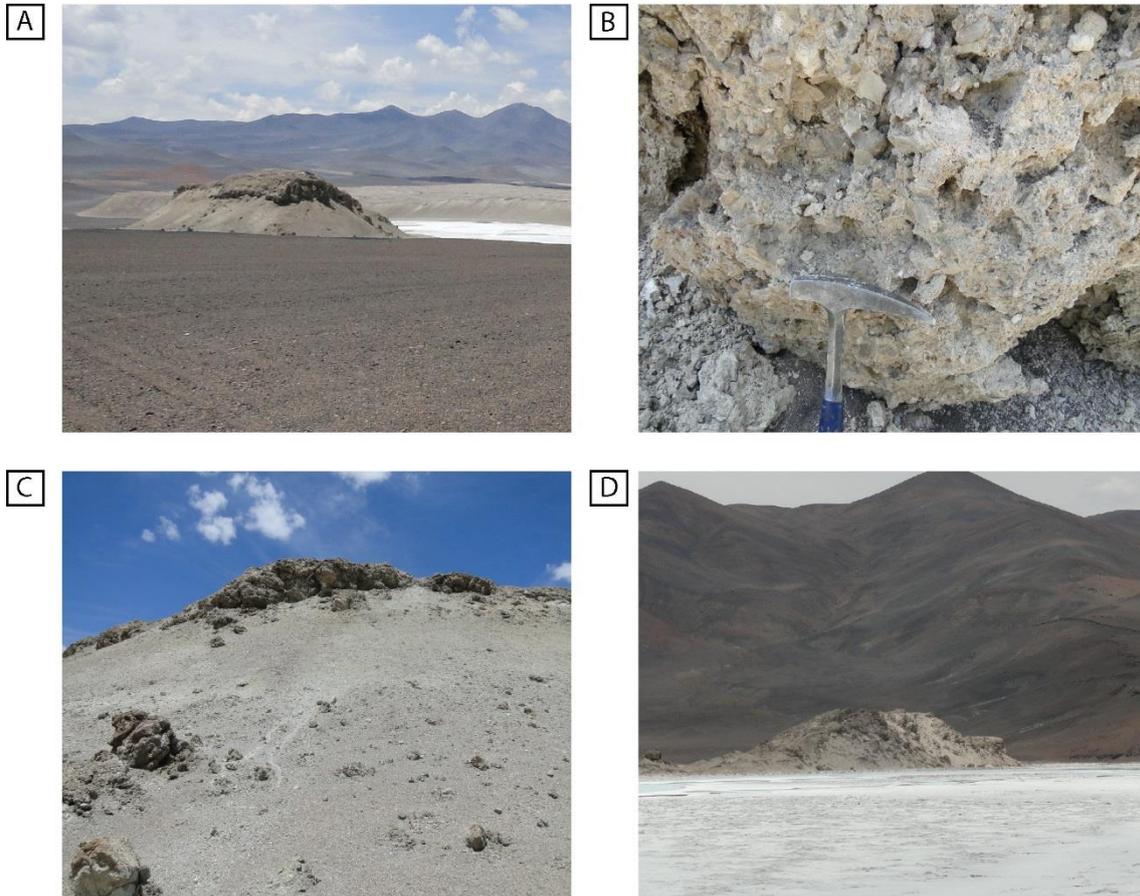
En terreno se puede distinguir el límite entre estos dos depósitos en todo el margen suroriental del salar. (figura 35)



**Figura 35** Fotografías de la zona de carbonatos / clástica del Salar de las Parinas. A)- Sedimentos no consolidados con predominancia de carbonatos que caracteriza dicha zona. Fotografía tomada en punto D2-P2. B)- Sedimentos de los depósitos aluvial/coluvial adyacentes en la zona suroriental del salar. Se destaca la predominancia de clastos volcánicos de colores negros. Fotografía tomada en punto D3-P1. C)- Perfil de la zona suroriental del Salar de las Parinas. Fotografía tomada en punto D2-P2. D)- Perfil delimitado de la transición de los diferentes depósitos en la zona suroriental del Salar de las Parinas. En tono amarillo corresponde a los depósitos aluvial/ coluvial y en tonos naranjas la zona de carbonatos. Fotografía tomada en punto D2-P2.

- **Zona de Sulfatos**

Esta zona abarca 3,2 km<sup>2</sup> y se compone de pequeños montículos o lomas que se elevan desde 3 a 7 mts del suelo, constituidos por múltiples cristales de yeso inmersos en una matriz de color pardo (figura 36).



**Figura 36** Fotografías de la zona de sulfatos del Salar de las Parinas. A)- Loma perteneciente a la zona de sulfatos, ubicada en la zona oriental del salar. Fotografía tomada en punto D3-P1. B)- Fotografía de detalle de la loma oriental, se aprecian los cristales de yeso inmersos en una matriz pardo de similar composición, con trazas de carbonatos. Fotografía tomada en punto D3-P2. C)- Loma de sulfatos de la zona oriental por su flanco occidental. Fotografía tomada en punto D3-P2. D)- Loma de sulfatos en la zona norte del salar, se caracteriza por ser la más alta (> 7 mts). Fotografía tomada en punto D3-P4

Estas “lomas” se ubican en los márgenes Norte y Este del salar, marcando la transición de la zona de carbonatos / clástica hacia la zona de Cloruros. En la zona Oeste se distingue débilmente su presencia, distinguiéndose de las demás por su aumento en la cantidad de carbonatos (figura 37).

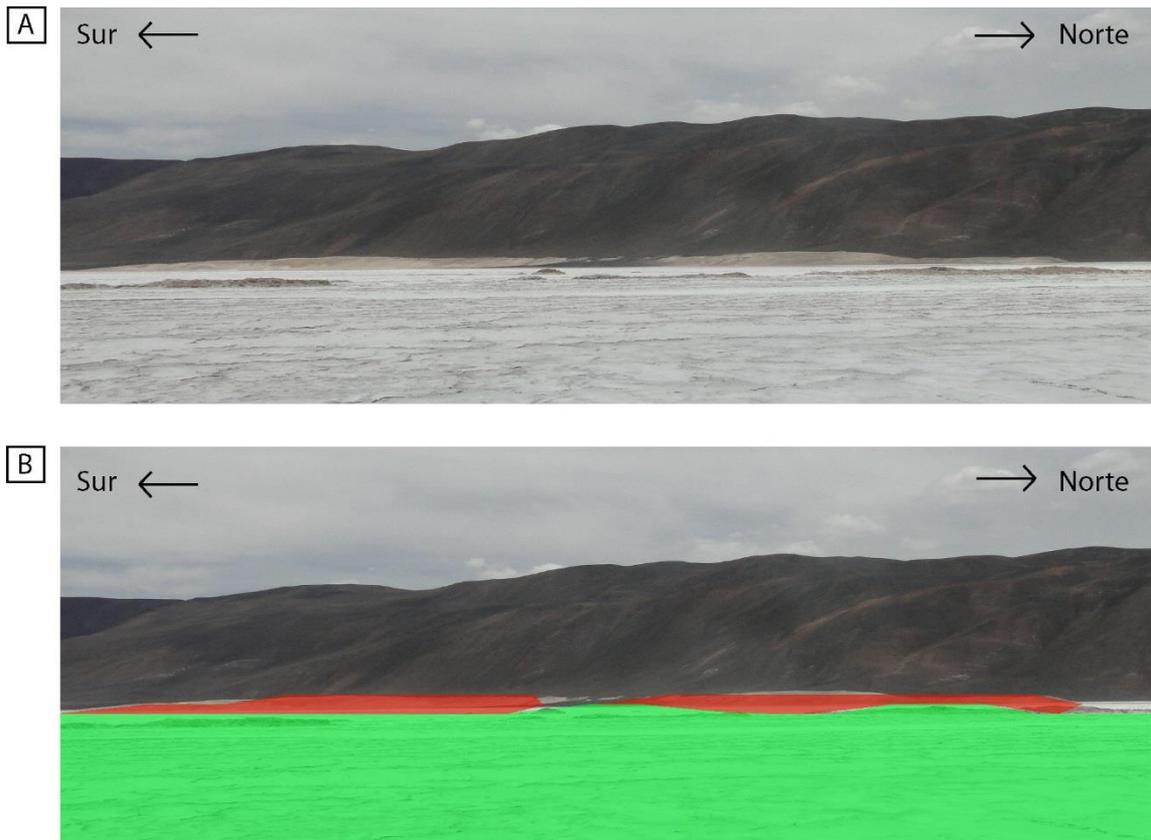
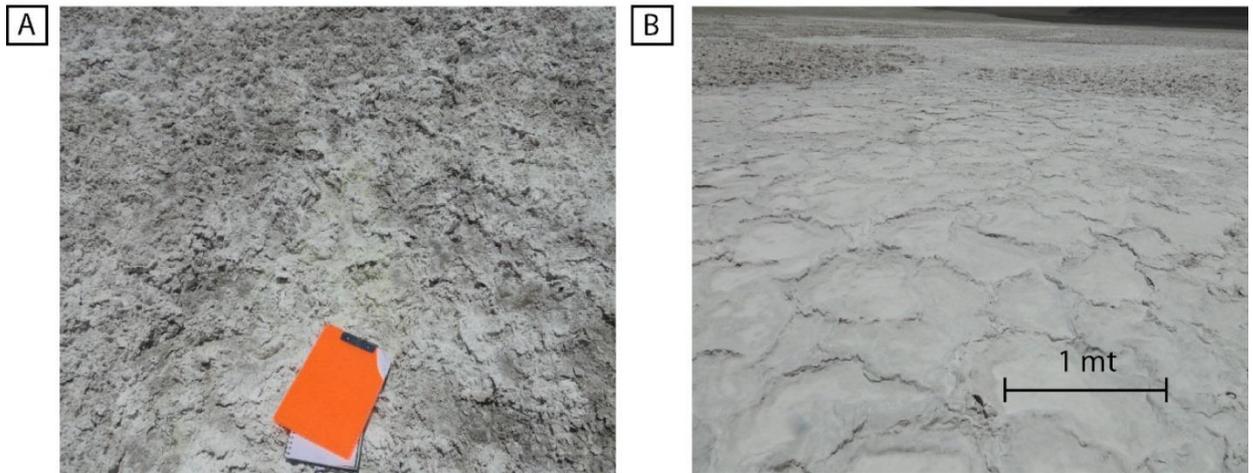


Figura 37 Fotografía tomada en el punto D3-P4, de la zona de sulfatos y cloruros del Salar de las Parinas. A)- Perfil de la zona occidental del Salar de las Parinas. B)- Perfil delimitado de la zona occidental del Salar de las Parinas. En tonos rojos corresponde a la zona de sulfatos y en tonos verdes la zona de Cloruros.

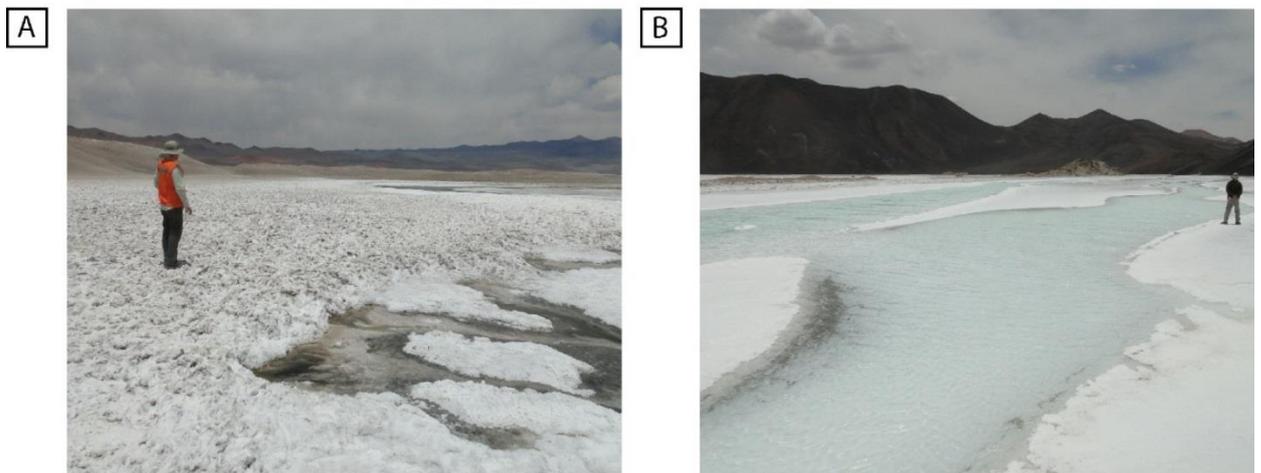
- **Zona de Cloruros**

Esta zona abarca 18,3 km<sup>2</sup> y corresponde a la parte central del Salar de las Parinas y se compone esencialmente de una costra salina rica en halita, la cual presenta diferentes texturas a lo largo del salar. En la zona norte se logra apreciar una costra salina muy dura, rica en halita, de tonos blancos a pardos, donde se distinguen zonas con texturas muy rugosas, unos 50 cm por sobre el suelo (figura 38- A). También en esta zona se encuentran texturas correspondientes a grietas de resecación (figura 38-B), posiblemente de zonas de inundación de las lagunas en periodos de alto ingreso de agua.

En la zona norte del salar existe un conjunto de lagunas someras de aguas muy cristalinas, en donde existe una capa de sales precipitadas al fondo de ellas (figura 39-B). También existen diversas vertientes difusas que drenan hacia el interior del salar, muy cercana a los bordes, las cuales generan toda una zona pantanosa, producto de la interdigitación de sales y de sedimentos (figura 39-A).

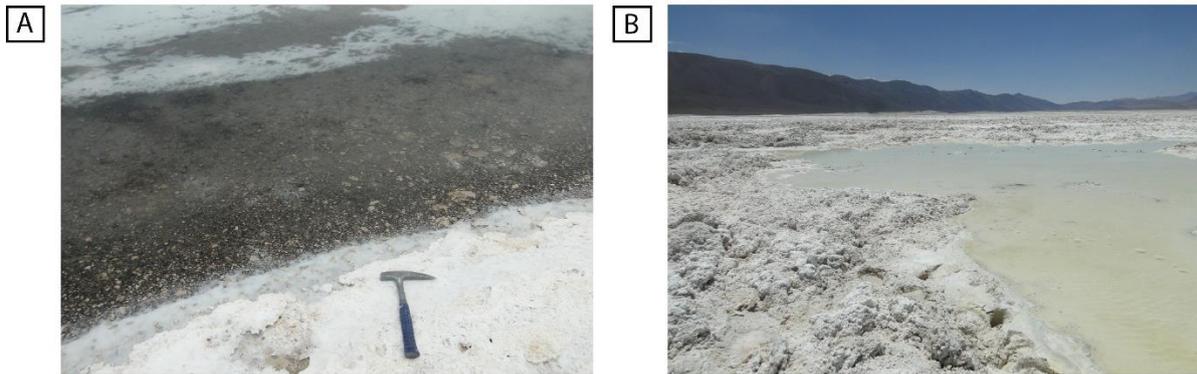


**Figura 38** Fotografías de texturas de la costra salina en la zona norte del Salar de las Parinas. A)- Costra con textura rugosa que sobresale del suelo del salar. Fotografía tomada en punto D1-P1. B)- Costra salina con grietas de reseca. Fotografía tomada en punto D2-P6



**Figura 39** Fotografías de las lagunas de la zona norte del Salar de las Parinas. A)-Zona de vertientes difusas en la zona norte del salar, el flujo de agua es muy débil y se caracteriza por ser un sector muy pantanoso. Fotografía tomada en punto D1-P2 B)- Lagunas someras en la zona norte del salar, se caracteriza por tener una capa de sales cristalinos al fondo de ella, lo que indica una gran saturación de sales en estas aguas. Fotografía tomada en punto D3-P5

Por otro lado, en la zona sur del salar, se puede encontrar una costra salina de tonos blancos a marrones, con presencia de sedimentos volcánicos de tamaño arena media, posiblemente provenientes de la planicie existente en todo el borde sur oriental del salar. La costra salina por su parte presenta predominantemente una textura rugosa, más blanda en comparación a la zona norte (figura 40)



**Figura 40** Fotografías de costras salinas en la zona sur del Salar de las Parinas. A)-Limite de costra salina con laguna somera, en donde se distinguen los clastos volcánicos que están inmersos en la costra salina. Fotografía tomada en punto D3-P3. B)- Costra salina en la zona sur del salar con su característica textura rugosa, de colores blanco-marrón. Fotografía tomada en punto D2-P7.

En la zona sur se puede distinguir un aumento en el tamaño de las lagunas y las vertientes, brindando un ambiente mucho más húmedo a la zona, lo que es propicio para la existencia de humedales en los bordes del salar. Se observa gran cantidad de vega salina y de flamencos, lo que aumenta la cantidad de materia orgánica en el suelo del salar. El agua de las lagunas es más turbia en comparación al norte, tornándose de colores marrones por el alto contenido de partículas en suspensión (figura 41).



**Figura 41** Fotografías de la zona sur del Salar de las Parinas. A)-Laguna de la zona sur del salar, se caracteriza por sus aguas turbias color marrón. Fotografía tomada en punto D2-P8. B)- Foto panorámica del borde sur del salar, se destaca la amplia presencia de vega salina. Fotografía tomada en punto D2-P2 C)-Fotografía de vertientes hacia el centro del salar en el borde sur, se destaca la presencia de vega salina siempre asociada a las vertientes. Fotografía tomada en punto D2-P9. D)- Fotografía de flamencos en la zona sur del salar de las Parinas. Fotografía tomada en punto D2-P4.

### 5.3 Hidrogeología del Salar de las Parinas

La hidrogeología de la cuenca del Salar de las Parinas, como se dijo anteriormente, se abordó de una forma cualitativa, caracterizando y estimando el comportamiento hidráulico de las rocas y depósitos de la cuenca. Se categorizó la zona mediante unidades hidrogeológicas, considerando agrupar las diferentes rocas y depósitos según sus similitudes desde el punto de vista hidrogeológico utilizando como referencia la clasificación de Struckmeier y Margat (1995). Además de la clasificación hidrogeológica, como se mencionó en el capítulo de metodología, se les asignaron a estas unidades conductividades hidráulicas teóricas de los estudios de Freeze y Cherry (1979) según la composición geológica de dichas unidades.

#### 5.3.1 Unidades Hidrogeológicas

- Unidades de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (Clase A) ( $K = 10^{-3}$  a  $10^{-1}$  m/día)

A esta unidad pertenecen parte de los Depósitos Salinos exteriores que componen el Salar de las Parinas y los Depósitos Aluviales y Coluviales. Dichos depósitos se ubican en la zona más baja de la cuenca y en los alrededores del salar adyacente a altos relieves de la cuenca respectivamente.

A los Depósitos Aluviales y Coluviales se les concede un alto potencial hidrogeológico al tratarse de depósitos no consolidados de bloques, gravas, arenas y limos, producto de la denudación de las formaciones existentes. Morfológicamente no se aprecian redes de drenaje sobre estos depósitos, por ende, se asume que toda el agua que precipita se infiltra dentro de estos depósitos.

Por otro lado, los Depósitos salinos exteriores del Salar de Las Parinas corresponden a Facies lacustres compuestas de intercalación de sedimentos aluvial/coluvial, con el salar. La permeabilidad de esta zona es asociada a la textura rugosa de las sales y a la presencia de las intercalaciones de sedimentos.

- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados (Clase B) ( $K = 10^{-4}$  a  $10^{-3}$  m/día).

En esta unidad se agruparon las Gravas de Atacama y los Depósitos Salinos interiores del Salar de las Parinas. Las Gravas de Atacama se ubican en el margen oriental de la cuenca mientras los depósitos salinos interiores se ubican en la zona más baja de esta.

Las Gravas de Atacama se tratan de depósitos semi-consolidados, de gravas con matriz de arena, cementados con carbonatos y sulfatos. Su potencial hidrogeológico es alto dentro de esta unidad, no obstante, se subestimó su potencial debido a la variabilidad de su consolidación.

Los Depósitos Salinos interiores del Salar de las Parinas corresponden a depósitos de sales que, si bien puede que tengan alta permeabilidad en superficie, en profundidad esta disminuye.

- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en rocas fisuradas (Clase B) ( $K = 10^{-6}$  a  $10^{-3}$  m/día).  
Este grupo lo componen los Volcanes Mioceno Inferior- Medio y Mioceno Superior-Plioceno Inferior y la Ignimbrita Pajonales. Estas unidades se encuentran en el margen occidental de la cuenca del Salar de las Parinas. La permeabilidad de estas rocas en primer lugar se le atribuye a su fracturamiento primario por enfriamiento, no obstante, en esta zona se emplaza un sistema de fallas el cual aumentaría su permeabilidad, debido al fracturamiento secundario que ocasionaron dichas fallas
- Unidades de baja importancia hidrogeológica (Clase C) ( $K = 10^{-9}$  a  $10^{-5}$  m/día)  
Esta unidad se compone por las Ignimbritas Pajonales, Parinas y Río Frío, los volcanes del Mioceno medio a superior y Mioceno Superior a Plioceno Inferior. Estas rocas se ubican principalmente en la zona norte y sur de la cuenca del salar, su permeabilidad principalmente se le atribuye a su fracturamiento primario debido al enfriamiento. En dichas rocas no se tienen registro ni se observaron fallas que aumenten el grado de permeabilidad de estas.
- Unidades de nula importancia hidrogeológica (Clase D) ( $K = 10^{-11}$  a  $10^{-9}$  m/día)  
A esta unidad pertenecen las tobas y lavas riolíticas de la Formación La Tabla, la Granodiorita de León Muerto, los Depósitos Solifluidales ricos en arcillas y las Ignimbritas riolíticas de Quebrada Onda y Tamberia. Principalmente las unidades de origen volcánico se ubican en el margen oriental de la cuenca, en tanto los Depósitos Solifluidales se ubican en zonas acotadas, de poca extensión en el margen norte de la cuenca. Todos estas rocas y depósitos restringen el flujo de agua subterránea por su baja permeabilidad, además no presentan estructuras que aumenten su potencial hidrogeológico.

A continuación, se presentará el mapa obtenido de la clasificación cualitativa del comportamiento hidrogeológico de las rocas de la cuenca del Salar de Las Parinas (figura 42)

# Hidrogeología de la cuenca del Salar de las Parinas

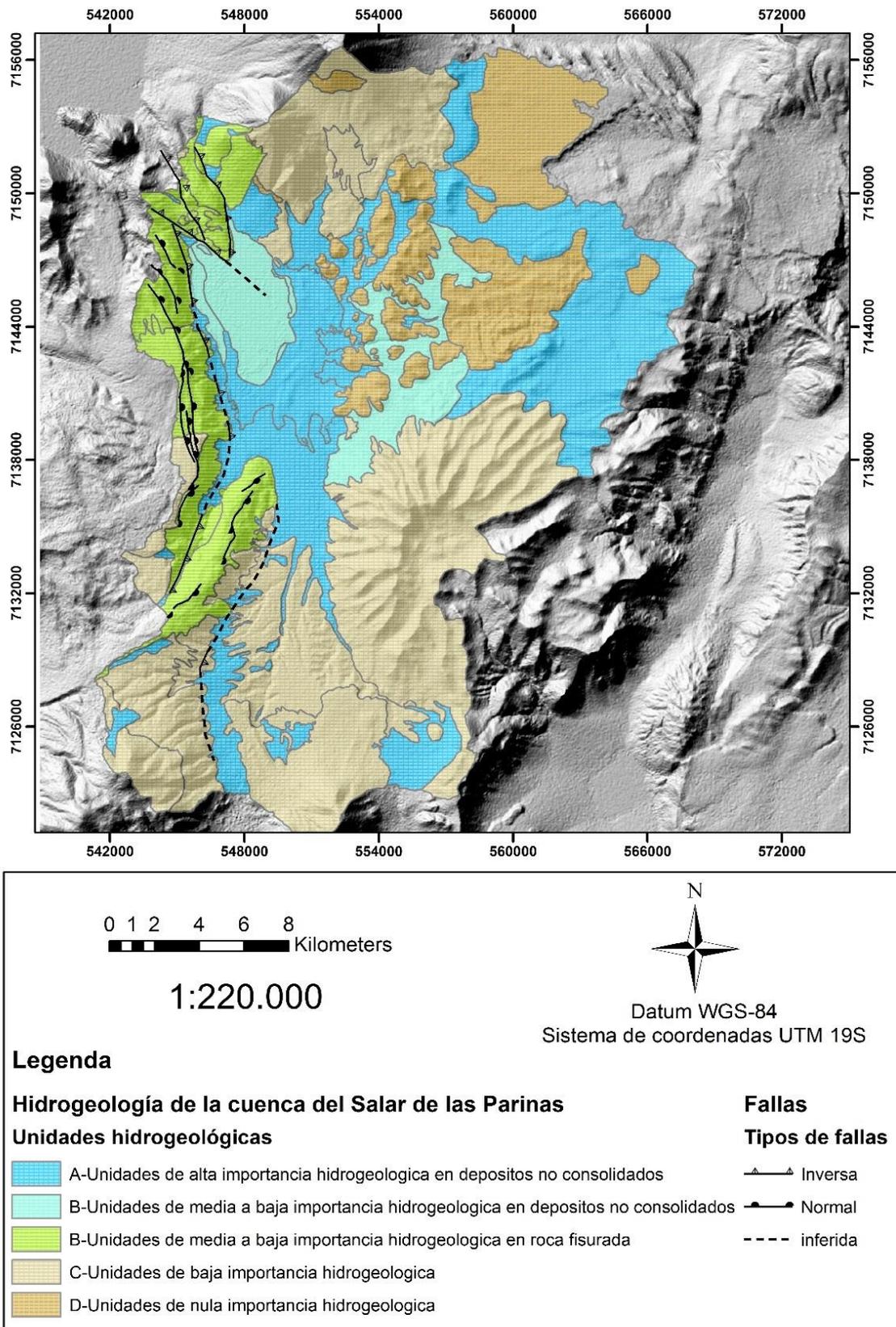


Figura 42 Mapa hidrogeológico de la cuenca del Salar de Las Parinas, Región de Atacama. Fuente: elaboración propia

## 5.4 Hidrología de la cuenca del Salar de las Parinas

### 5.4.1 Estimación de la precipitación media de cuenca

Para la estimación de la recarga, en primera instancia se estimó la precipitación anual media de la cuenca de estudio, a partir de las isoyetas generadas por DGA-Amphos 21 (2016) y del modelo hidrográfico de la cuenca generado en este estudio.

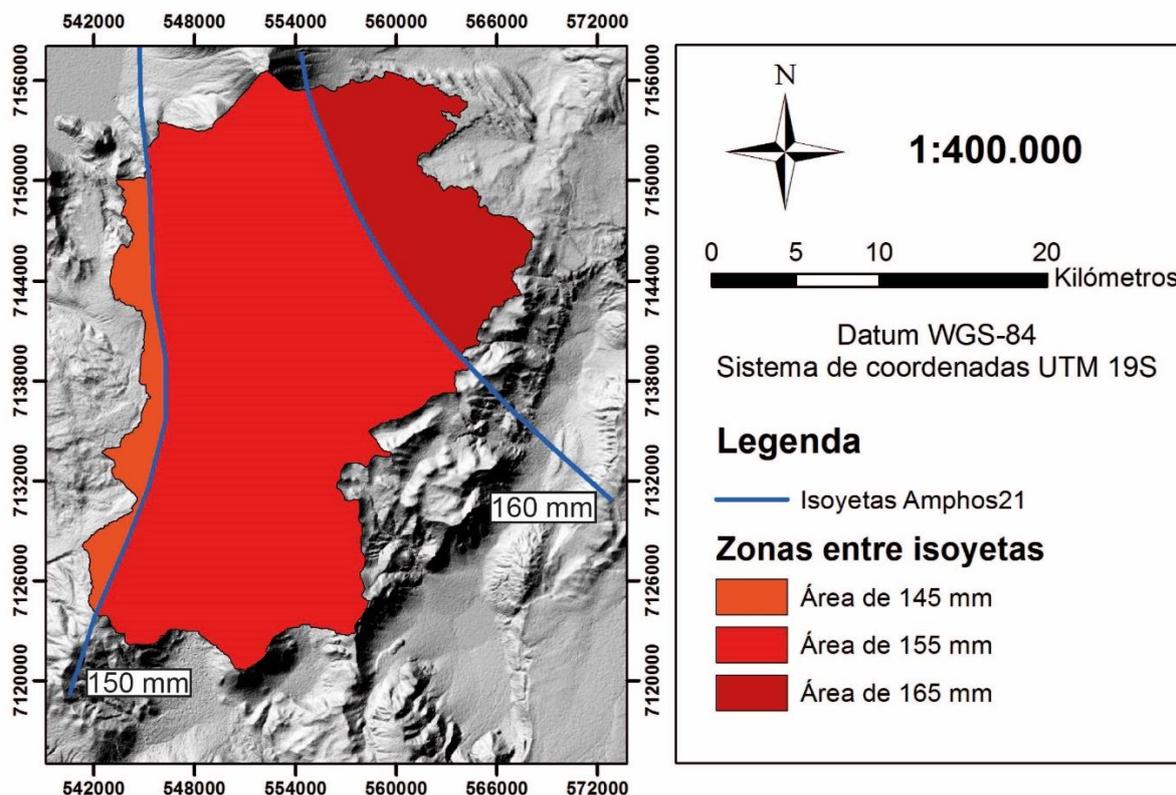


Figura 43 Mapa de la cuenca del Salar de las Parinas intersecada con las Isoyetas generadas por Amphos21, 2016. Fuente: elaboración propia

Se identificó que la cuenca se interseca con dos isoyetas, la de 150 mm y la de 160 mm, generando 3 zonas en la cuenca (figura 43). Se calculó el área de estas tres zonas y se pondero por la media anual de las isoyetas (tabla 6).

Tabla 6 Cálculo de áreas comprendidas entre isoyetas y ponderación por precipitación media entre isoyetas

Precipitación media anual entre isoyetas (mm)	Área comprendida entre isoyetas (m <sup>2</sup> )	Área (km <sup>2</sup> )	Pi*Ai
145	41104557	41,104	5960,160
155	441237122	441,237	68391,753
165	108128217	108,128	17841,155

Con los resultados anteriores, se procedió hacer el cálculo de la precipitación media anual de la cuenca mediante el método de las isoyetas. El resultado de la precipitación media de la cuenca se observa en la tabla 7

**Tabla 7 Estimación de la precipitación media anual de la cuenca del Salar de Las Parinas**

	Área total cuenca (km <sup>2</sup> )	Suma Pi*Ai	Precipitación media anual (mm /año)	Precipitación media anual (m/s)
<b>Total</b>	590,470	92193,070	156,135	4,951E-09

#### 5.4.2 Estimación del coeficiente de escorrentía y cálculo de caudal de escorrentía

Para poder estimar la cantidad de escorrentía superficial de la cuenca de estudio se utilizó el método de precipitación-escorrentía descrito por el estudio de DGA-Amphos 21 (2016), el cual es necesario el modelo de cuenca hidrográfica del área de estudio.

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía se utilizaron parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfica del salar construida en este estudio. A continuación, se observan en la tabla 8 los resultados del coeficiente de escorrentía estimado para la cuenca del Salar de las Parinas.

**Tabla 8 Resultados de la estimación del coeficiente de escorrentía de la cuenca del Salar de Las Parinas**

Nombre de la cuenca	Área total de la cuenca (m <sup>2</sup> )	Largo cauce principal (m)
Salar de las Parinas	594285399	20312
Ancho Equivalente M (m)	Factor de forma F	Coeficiente de escorrentía (CE)
29257,85	0,69	0,16

Una vez obtenido el coeficiente de escorrentía, se procedió al cálculo estimado del caudal medio anual de la cuenca. Los resultados de dicha estimación se observan a continuación en la tabla 9.

**Tabla 9 Resultados de la estimación del caudal de escorrentía de la cuenca del Salar de Las Parinas**

Nombre de la cuenca	PP media anual (m/s)	Área acuífera (m <sup>2</sup> )	Área no acuífera (m <sup>2</sup> )	Coeficiente de escorrentía (CE)	Caudal de escorrentía (l/s)
Salar de las Parinas	4,95E-09	265366088	328919311	0,16	260,03

### 5.4.3 Estimación de la recarga de la cuenca

Luego de obtener la estimación de la precipitación media de la cuenca y del factor de escorrentía se procedió a comenzar la estimación de la recarga de la cuenca según el método propuesto en el estudio de DGA-Amphos 21 (2016). Se estimaron coeficientes de infiltración para cada unidad hidrogeológica propuesta de forma cualitativa (Anexo C Hidrología de la cuenca del Salar de Las Parinas) y se calcularon sus correspondientes áreas. Los resultados de la estimación de la recarga total se pueden ver a continuación en la tabla 10.

Tabla 10 Estimaciones de las entradas de la cuenca del Salar de Las Parinas

Nombre de cuenca	Área total (km <sup>2</sup> )	Área salar (km <sup>2</sup> )	Altura media (m.s.n.m)
Salar de las Parinas	594,29	41,31	3987
Recarga directa (l/s)	Recarga lateral (l/s)	Recarga total (l/s)	Escorrentía (l/s)
289,65	24,00	313,65	260,03

### 5.4.4 Estimación de la evaporación

Como se dijo anteriormente, la cuenca del Salar de Las Parinas no cuenta con estaciones meteorológicas, ni mucho menos de lisímetros para calcular la evaporación directa de los acuíferos. Para estimar la evaporación se utilizó los estudios de DGA-DICTUC (2009) donde realizaron una estimación de la evaporación en la zona del Altiplano en la Región de Atacama. Dicha evaporación fue aplicada a la zona del Salar de Las Parinas y sus resultados se pueden ver en la tabla 11. Además de los estudios de DGA-DICTUC (2009), se consultó lo estudios de DGA-Amphos21(2016), donde realizaron una estimación de la evaporación en base a estudios de lisímetros cuencas perteneciente a la zona del Altiplano.

Tabla 11 Resultados de estimación de evaporación de la cuenca del Salar de Las Parinas

Evaporación Altiplánica/ Región Atacama. DICTUC, 2009 mm/año	Evaporación de la cuenca estimada (l/s)	Evaporación cuenca estimada. Amphos 21 (l/s)
812	556,96	572,30

#### 5.4.5 Balance hídrico estimado

Una vez estimadas todas las entradas y salidas del sistema, se realizó el balance hídrico para la cuenca del Salar de Las Parinas. En este balance no se consideraron flujos subterráneos y superficiales entre cuencas adyacentes debido a que no se dispone de información para realizar dichas estimaciones. Los valores de evaporación considerados para el balance fueron los obtenidos de los estudios de DGA-Amphos21 (2016), debido a que estos son más fidedignos al considerar la evaporación desde la napa freática. Se recalca de manera importante que este balance realizado es estimado, debido a la falta de información existente de cada variable involucrada en el balance. El resultado del balance hídrico para la cuenca del Salar de las Parinas se presenta a continuación en la tabla 12.

Tabla 12 Balance hídrico de la cuenca del Salar de Las Parinas

Nombre de la cuenca	Área total (km <sup>2</sup> )	Área salar (km <sup>2</sup> )	Altura media (m.s.n.m)
Salar de las Parinas	594,29	41,31	3987
Recarga Total (l/s)	Caudal de escorrentía (l/s)	Evaporación estimada (DICTUC 2009) (l/s)	Balance (l/s)
Entradas	Salidas		
313,65	260,03	572,30	1,38

#### 5.5 Hidrogeoquímica del Salar de Las Parinas

Se realizó una recopilación de antecedentes hidroquímicos del salar, consultando documentos de acceso público, donde se obtuvieron un total de 18 muestras de agua y 4 muestras de costra salina. Del total de muestras de agua recopiladas, 7 corresponden a los estudios de Risacher (1999) y 11 a los estudios de Troncoso (2016), por su parte todas las muestras de costra salina corresponden a los estudios de Troncoso (2016). Se tiene conocimiento de empresas privadas que realizaron estudios de exploración de litio en la zona, no obstante, no se pudo tener acceso a dicha información.

De la campaña de terreno realizada el 8 al 12 de enero del 2018 se obtuvieron 12 muestras de aguas (vertientes y lagunas) a las cuales se le realizaron análisis de elementos mayores, menores e isotópicos, además también se tomaron 4 muestras de costra salina a las cuales se le realizaron análisis de difracción de rayos X y análisis químicos de elementos mayores y trazas. En la figura 44 se puede apreciar la ubicación de las muestras extraídas.

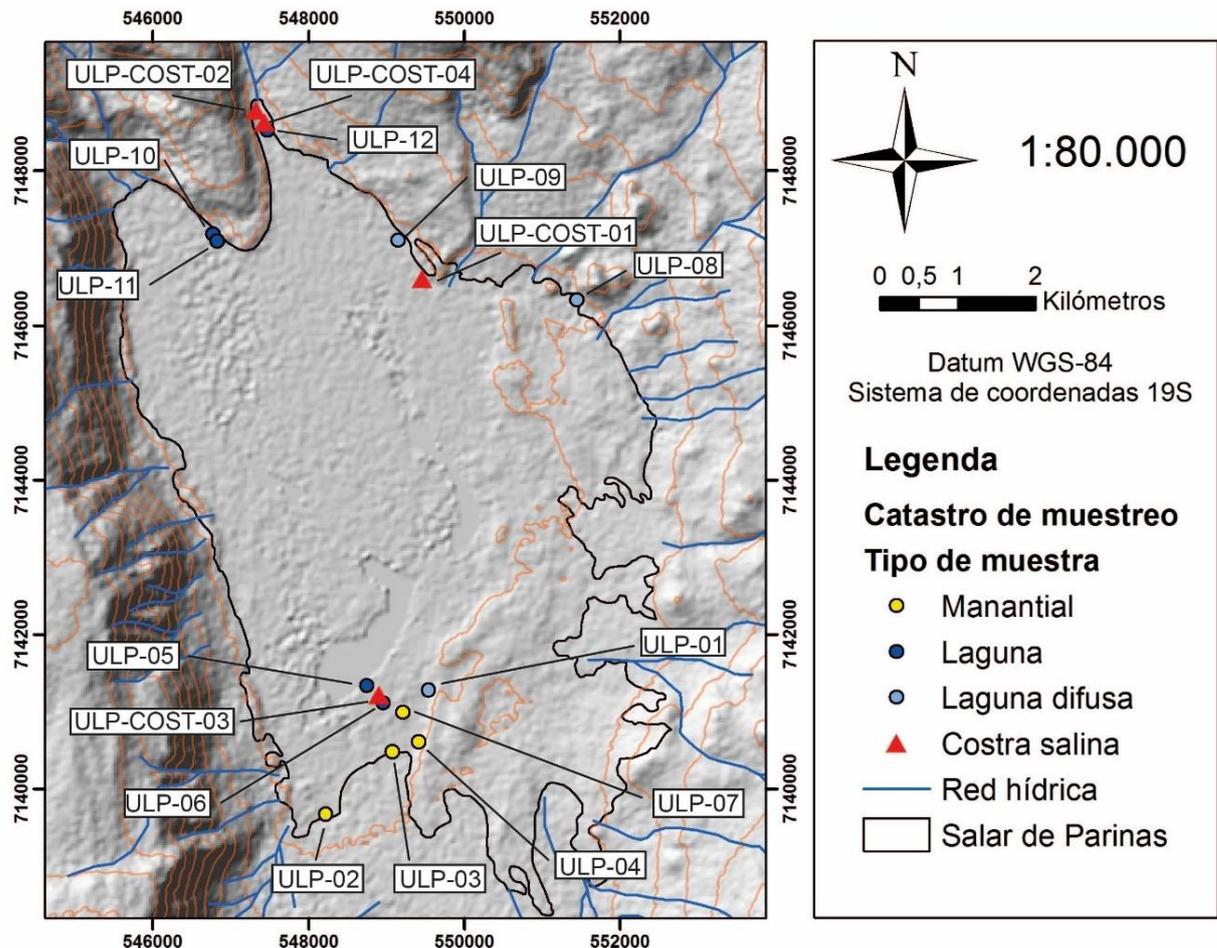


Figura 44 Mapa de ubicación de muestras de agua y de costra salina tomadas en enero 2018.  
Fuente: elaboración propia

### 5.5.1 Análisis en costras salinas

Las muestras de costra salina fueron extraídas en zonas libres de vertientes y lagunas, donde la costra se encontraba bien consolidada y con una humedad relativamente baja, las muestras ULP-COST-01, ULP-COST-02 y ULP-COST-04 se tomaron en la zona norte del salar y la muestra ULP-COST-03 en la zona sur. En primera instancia con la descripción visual de las muestras se pudo notar la predominancia de Halita en todas las muestras, con pequeña presencia de sedimentos de tamaño arena posiblemente transportados por el viento, ninguna de las muestras reaccionó con HCl por lo que se descartó la presencia de carbonatos.

Los resultados de los análisis de difracción de rayos X de las muestras se muestran a continuación en la tabla 13.

**Tabla 13 Resultados de análisis de difracción de rayos X de muestras tomadas en terreno enero 2018**

Código muestra	Fecha	Sistema de Coordenadas	Hora	UTM Norte	UTM Este	Altura (m.s.n.m)	Difracción de rayos x
ULP-COST-01	09/01/2018	WGS-84	14:55	549454	7146603	3963	Halita, Cuarzo, Yeso, Montmorillonita y Ulexita
ULP-COST-02	09/01/2018	WGS-84	15:08	547323	7148783	3966	Halita, Picromerita, Bloedita y Nitratina
ULP-COST-03	10/01/2018	WGS-84	14:45	548902	7141213	3961	Halita, Yeso, Bloedita y Polihalita
ULP-COST-04	11/01/2018	WGS-84	15:10	547430	7148630	3964	Halita, Yeso, Silvita, Inyoita y sulfato hidratado de aluminio y potasio

Con los análisis de difracción de rayos X se confirma la presencia de cloruros (halita y silvita) y de sedimentos (cuarzo y montmorillonita), también se obtiene evidencia de presencia de sulfatos (yeso, bloedita, picromerita, polihalita y sulfato hidratado de aluminio y potasio) en todas las muestras y presencia de boratos (inyoita y ulexita) y nitratos (nitratina) en las muestras obtenidas en el Norte del Salar.

En la tabla 14 se encuentran los resultados de los análisis químicos de las muestras de costra salina, en donde se puede confirmar la predominancia de halita descrita visualmente en todas las muestras por los altos porcentajes de sodio y de potasio. Las muestras con las concentraciones más altas de litio corresponden a las muestras ULP-COST-02 y ULP-COST-03 las cuales se obtuvieron más al interior del salar con respecto a las demás.

**Tabla 14 Resultados de análisis químicos de las muestras de costra salina del terreno de enero 2018**

Código muestra	Fecha	Litio (ppm)	Sodio %	Potasio %	Magnesio %	Calcio %	Cloruro %	Nitrato %	Sulfato %
ULP-COST-01	09/01/2018	297,00	30,40	0,40	0,34	0,62	50,47	<0,01	2,70
ULP-COST-02	09/01/2018	1380,00	27,15	2,51	1,30	0,12	45,50	<0,01	10,57
ULP-COST-03	10/01/2018	1093,00	22,70	1,41	0,75	4,47	37,65	<0,01	17,11
ULP-COST-04	11/01/2018	197,00	33,30	0,27	0,13	0,45	59,80	<0,01	1,73

### 5.5.2 Análisis químico de muestras de agua

Con los análisis químicos de las muestras de agua obtenidas en terreno, junto con las muestras del catastro previamente hecho, se procedió a generar diagramas de Piper y Stiff para cada grupo de muestras según sus estudios correspondientes, a continuación se pueden ver en las figuras 45 y 46 los diagramas Piper y Stiff de los estudios de Risacher *et al.* (1999) y Troncoso *et al.* (2016).

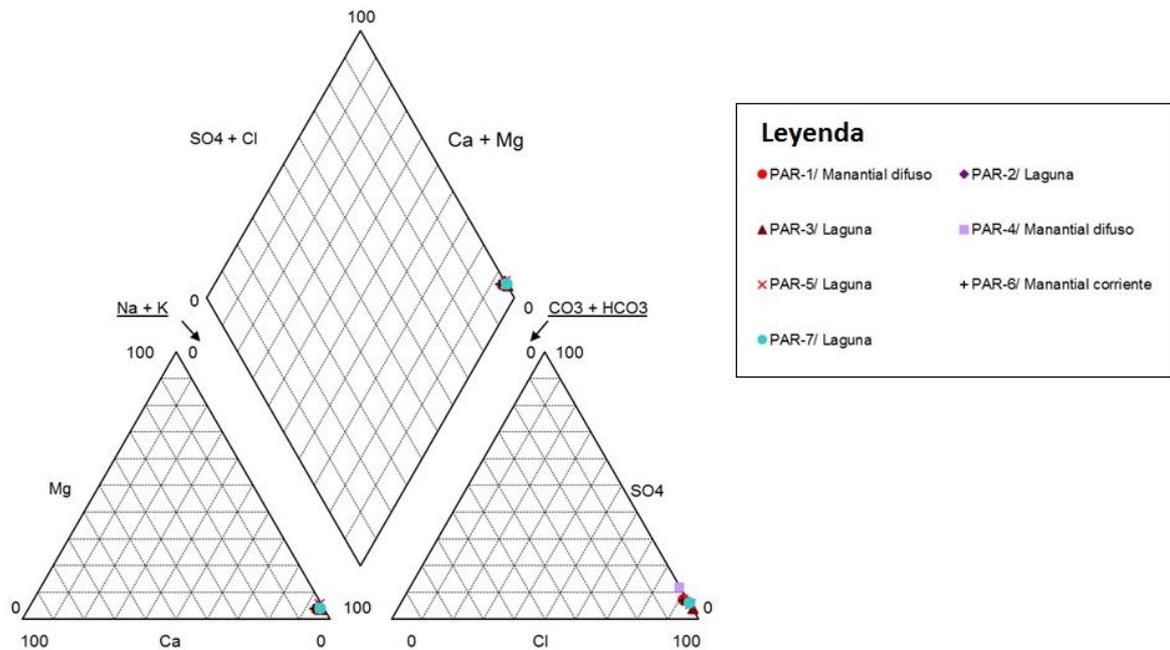
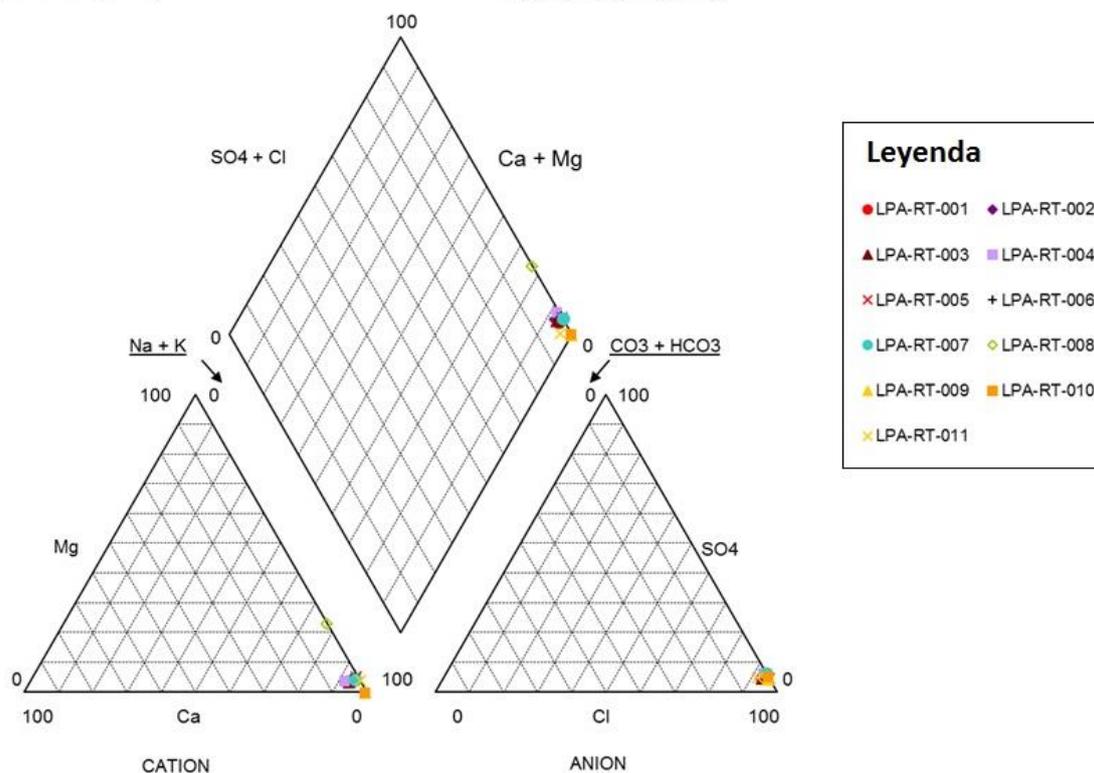


Figura 45 Diagrama Piper de muestras de agua recopiladas de los estudios de Risacher *et al.* (1999)

Como se puede apreciar en ambos estudios, todas sus muestras caen en el campo de composición cloruradas y/o sulfatadas sódicas, para el caso de las muestras de estudio de Risacher *et al.* (1999), según sus relaciones iónicas se le puede asociar a sus muestras vías evolutivas sulfatadas, por lo que se puede clasificar estas muestras de salmuera dentro del tipo sulfatado (Na/ SO<sub>4</sub>-Cl). Las concentraciones de litio varían desde 8,74 a 477 mg/L, siendo en el Norte la zona de mayor concentración (muestras PAR-03 y PAR-05), en esta misma zona también se encuentran altas concentraciones de Boro (639 mg/L) y Potasio (7820 mg/L) en los mismos puntos de alta concentración de litio (Anexo C "Hidroquímica").

Con respecto a las muestras de los estudios de Troncoso *et al.* (2016), como se mencionó anteriormente en el diagrama Piper todas sus muestras caen en campo de composición cloruradas y/o sulfatadas sódicas, no obstante las relaciones iónicas para definir la vía evolutiva de las muestras varía según su ubicación, siendo las muestras ubicadas en el margen occidental salmueras del tipo carbonatado (Na/ CO<sub>3</sub>-Cl) (con excepción de la muestra LPA-RT-10) y las muestras del margen oriental del tipo sulfatado (Na/SO<sub>4</sub>-Cl). Con respecto a las concentraciones de litio, estas varían de 7 a 470 mg/L y al igual que en los estudios de Risacher *et al.* (1999) las concentraciones más altas se encuentran en la zona Norte, acompañadas de altas concentraciones de Boro y Potasio (anexo C "Hidroquímica")



**Figura 46 Diagrama Piper de muestras de aguas recopiladas de los estudios de Troncoso *et al.* (2016)**

A continuación en la figura 47 se muestra el diagrama Piper de las muestras del presente estudio tomadas en enero del 2018. En primer instancia se puede ver a simple vista que las muestras reafirman los resultados de los estudios anteriores dando una clasificación de composición de agua del tipo cloruradas y/o sulfatadas sódicas a todas las muestras, no obstante sus cantidades de sulfatos y carbonatos difieren dependiendo de la ubicación y del tipo de muestras, siendo salmueras del tipo sulfatadas ( $\text{Na}/\text{SO}_4\text{-Cl}$ ) las muestras de lagunas ubicadas al norte del Salar, salmueras del tipo carbonatado ( $\text{Na}/\text{CO}_3\text{-Cl}$ ) las muestras de lagunas difusas y vertientes de la zona Sur del salar. Cabe mencionar que la muestra ULP-02 extraída de una vertiente presenta una salmuera del tipo cálcica ( $\text{Na-Ca}/\text{Cl}$ ) y es la muestra más lejana hacia el sur, casi en el borde del salar. Las concentraciones de litio de las muestras de este estudio varían de 4 a 1950 mg/L, en donde nuevamente los valores más altos se encuentran en la zona Norte del Salar, acompañados de altas concentraciones de Potasio, Magnesio y Boro, quedando en la zona Sur las muestras con concentraciones más bajas de estos elementos (anexo -C "Hidroquímica").

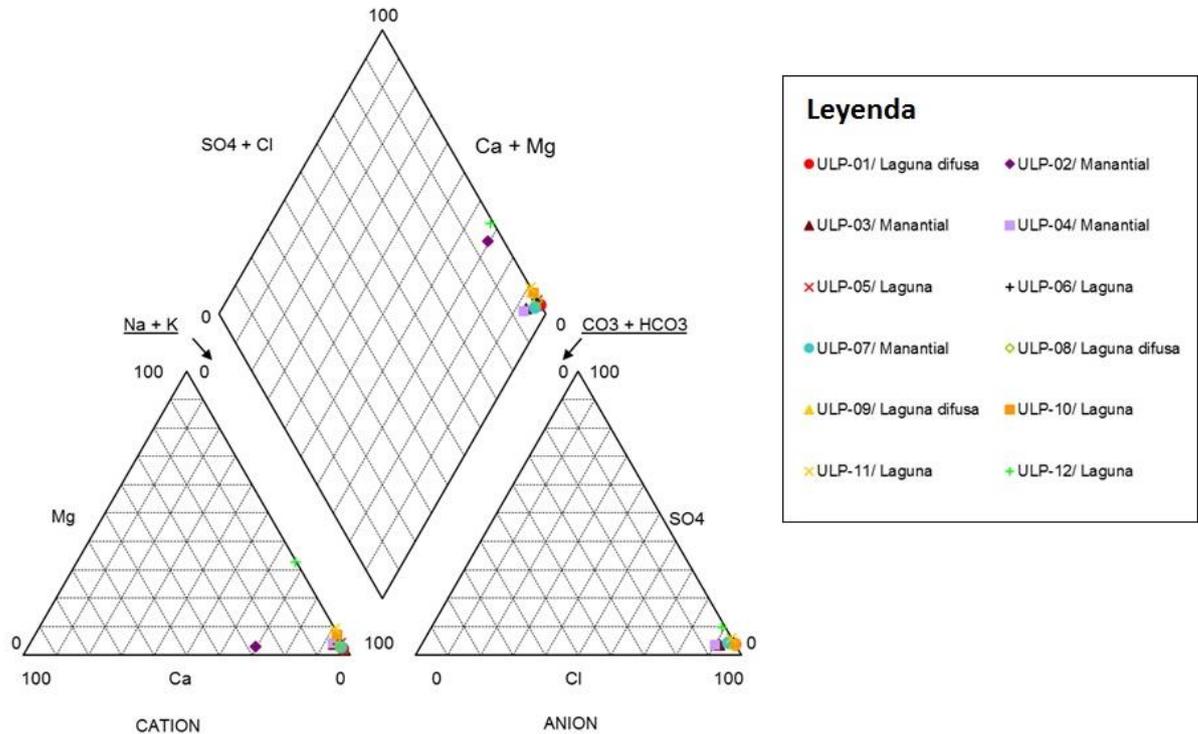


Figura 47 Diagrama Piper de muestras tomadas en terreno Salar de Las Parinas, enero 2018

A continuación, se pueden ver en las figuras 48 y 49 los diagramas Stiff georreferenciados de las muestras de los estudios de Risacher *et al.* (1999) y de Troncoso *et al.* (2016). En dichas figuras se puede notar que en ambos estudios se pueden encontrar muestras de agua saladas, muy saladas y salmueras según la clasificación de Santibañez (2000), con concentraciones muy elevadas de sodio- potasio y cloro. Como era de esperarse se puede notar una fuerte relación entre el origen de las muestras de agua y su concentración de TDS (*Total Dissolved Solids*), siendo las muestras de lagunas internas del salar las que presentan mayores concentraciones de TDS (salmueras) debido a la mayor exposición a la evaporación que han sufrido con respecto a las lagunas difusas y vertientes las cuales poseen menores concentraciones, ubicadas en los márgenes del salar.

Analizando el total de muestras recopiladas se puede notar que existe un dominio de salmueras altamente concentradas en la zona Norte del Salar, dejando en la zona Sur las muestras con menores concentraciones, lo que podría evidenciar que posiblemente la recarga del salar sea predominantemente por el Sur, al existir aguas superficiales menos concentradas. Las relaciones iónicas de Na/Cl (meq/L) en todas las muestras de Risacher *et al.* (1999) son muy cercanas a 1, tendencia que se repite en las muestras de Troncoso (2016) en donde los valores de esta relación varían entre 0,86 a 1,06 lo que indica un muy buen equilibrio entre estos dos iones, por otro lado, la relación iónica Ca/SO<sub>4</sub> (mmol/L) no presenta este equilibrio en ninguno de los dos estudios (anexo C "Hidroquímica").

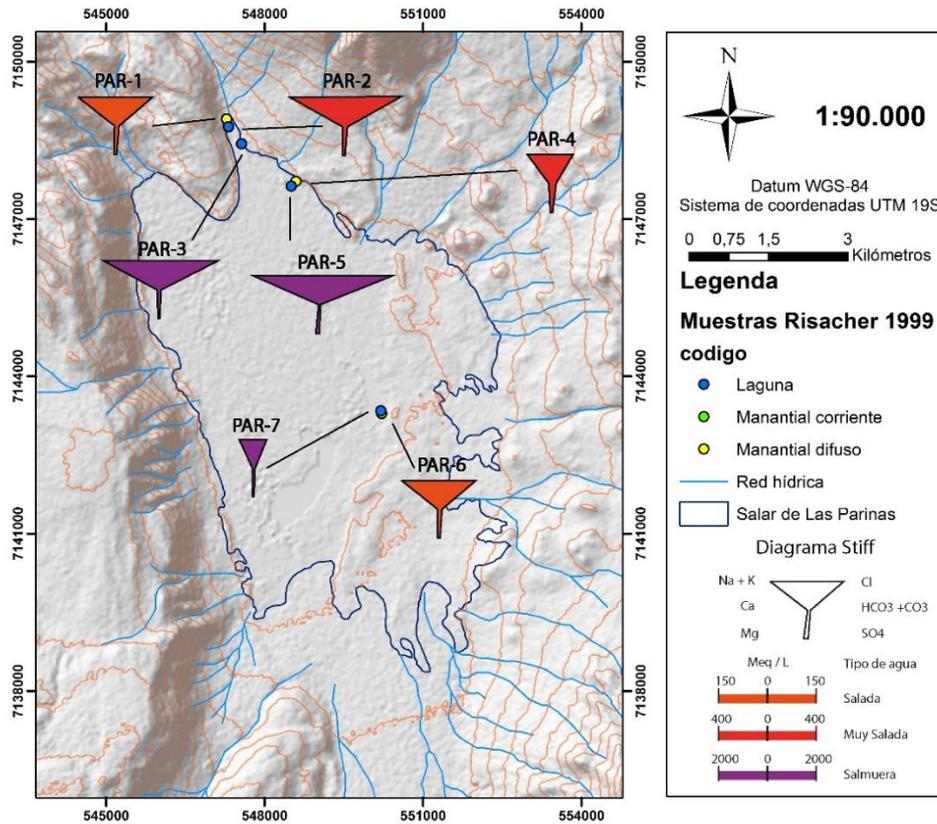


Figura 48 Diagramas Stiff de muestras salinas de los estudios de Risacher *et al.* (1999)

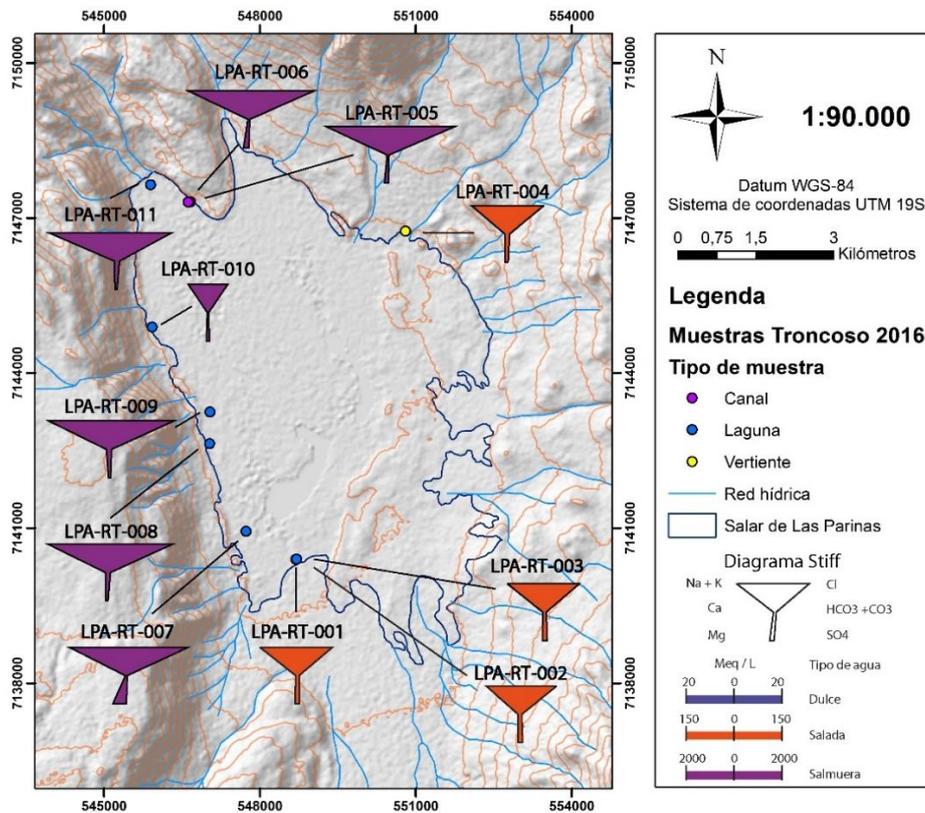


Figura 49 Diagramas Stiff de las muestras salinas de los estudios de Troncoso *et al.* (2016)

Los diagramas Stiff del presente estudio se pueden ver en la figura 50 en donde a primera vista se puede notar la total predominancia de salmueras con altísimas concentraciones de sodio-potasio y cloro en toda la zona Norte del salar, más hacia el Sur las muestras restantes muestran un descenso en las concentraciones lo que confirma la existencia de dos dominios de concentraciones encontrados en los estudios anteriores.

Analizando las relaciones iónicas de Na/Cl (meq/L) de las muestras, con la excepción de las muestras ULP-02 y ULP-12, todas las demás muestras poseen valores de relación Na/Cl muy cercanos a 1, variando de 0,92 a 1,16 lo que indica un muy buen equilibrio entre estos dos iones lo que confirma lo observado en estudios anteriores. La existencia de tan buen equilibrio químico entre el sodio y el cloro puede indicar que la proveniencia de estos iones puede ser debido a redisolución de cloruro de sodio (halita). Aunque en terreno no se obtuvo evidencia de la posible fuente de halita redisuelta, los estudios de Risacher *et al.* (1999) y Troncoso *et al.* (2016) postulan que la posible fuente se trate de un salar antiguo el cual fue cubierto por formaciones más recientes.

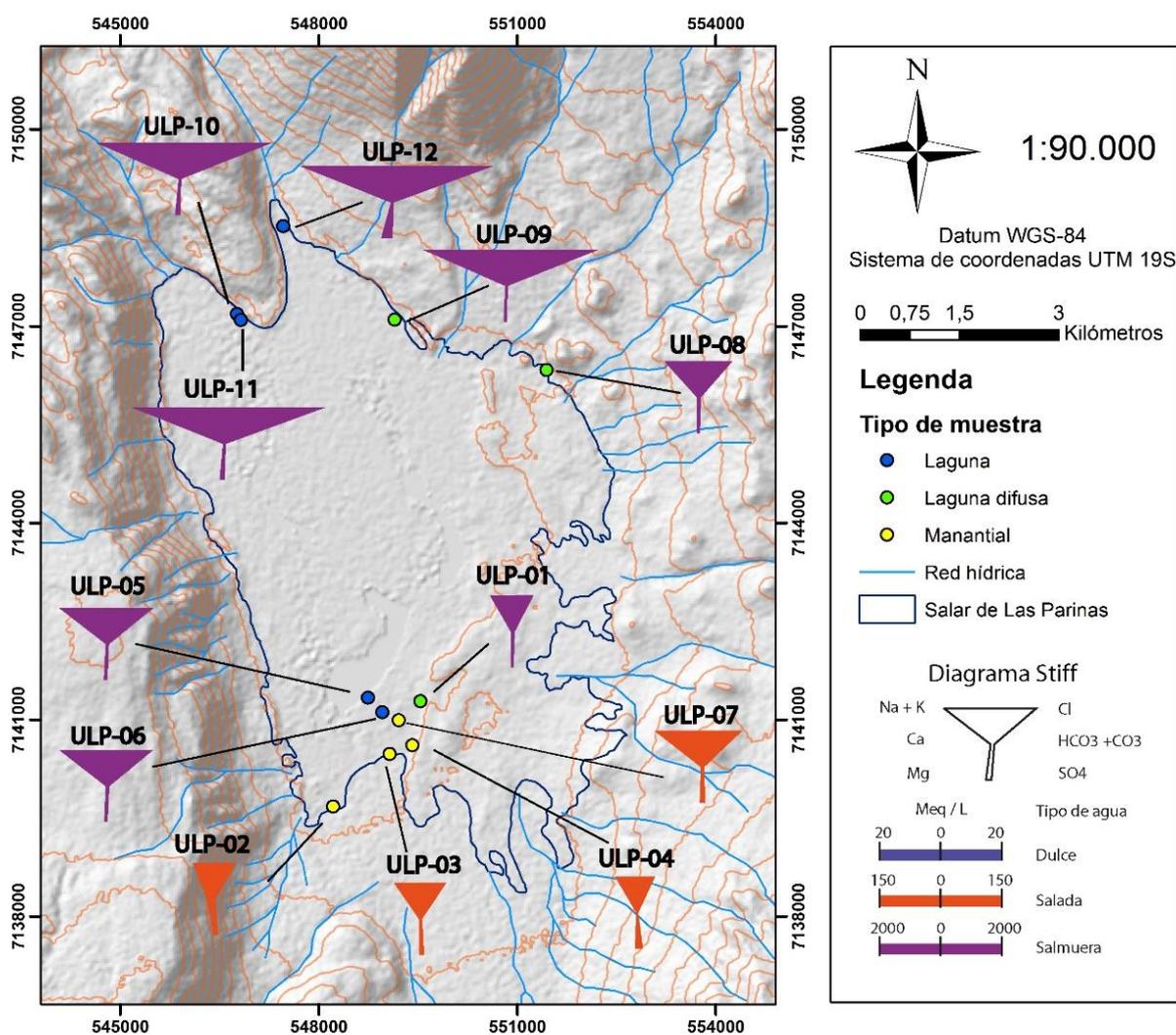


Figura 50 Mapa de Diagramas Stiff de las muestras tomadas. Salar de Las Parinas, enero 2018.

Con respecto a la relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  (mmol/L) de las muestras tomadas en el presente estudio, la mayoría presenta valores muy bajos, rondando los 0,1 con excepción de las muestras ULP-02, ULP-03 y ULP-04 las cuales tienen relaciones iónicas de  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  que varían entre 0,65 a 0,70. La mayoría de las muestras no presenta muy buena relación de  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  lo que descarta la posible disolución de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como proveniencia de estos iones.

Analizando el caso particular del litio en las muestras obtenidas en el presente estudio, las concentraciones de este elemento se comportan directamente proporcional con la mayoría de elementos mayores, a excepción del calcio, cloro y sodio (figura 51). En el caso particular de las concentraciones de litio con respecto al calcio, estas presentan una correlación un poco más difusa, siendo las muestras ULP-02, ULP-06 y ULP-08 las que muestran una mayor desviación (figura 51) posiblemente debida a redisolución de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Por otro lado, el litio con respecto al sodio y al cloro presenta una correlación directamente proporcional hasta un límite donde se estabiliza la concentración de estos elementos a medida que aumenta la concentración de litio, esto último podría deberse a la precipitación de halita ( $\text{NaCl}$ ) a causa de la saturación de estos elementos en el agua (figura 51).

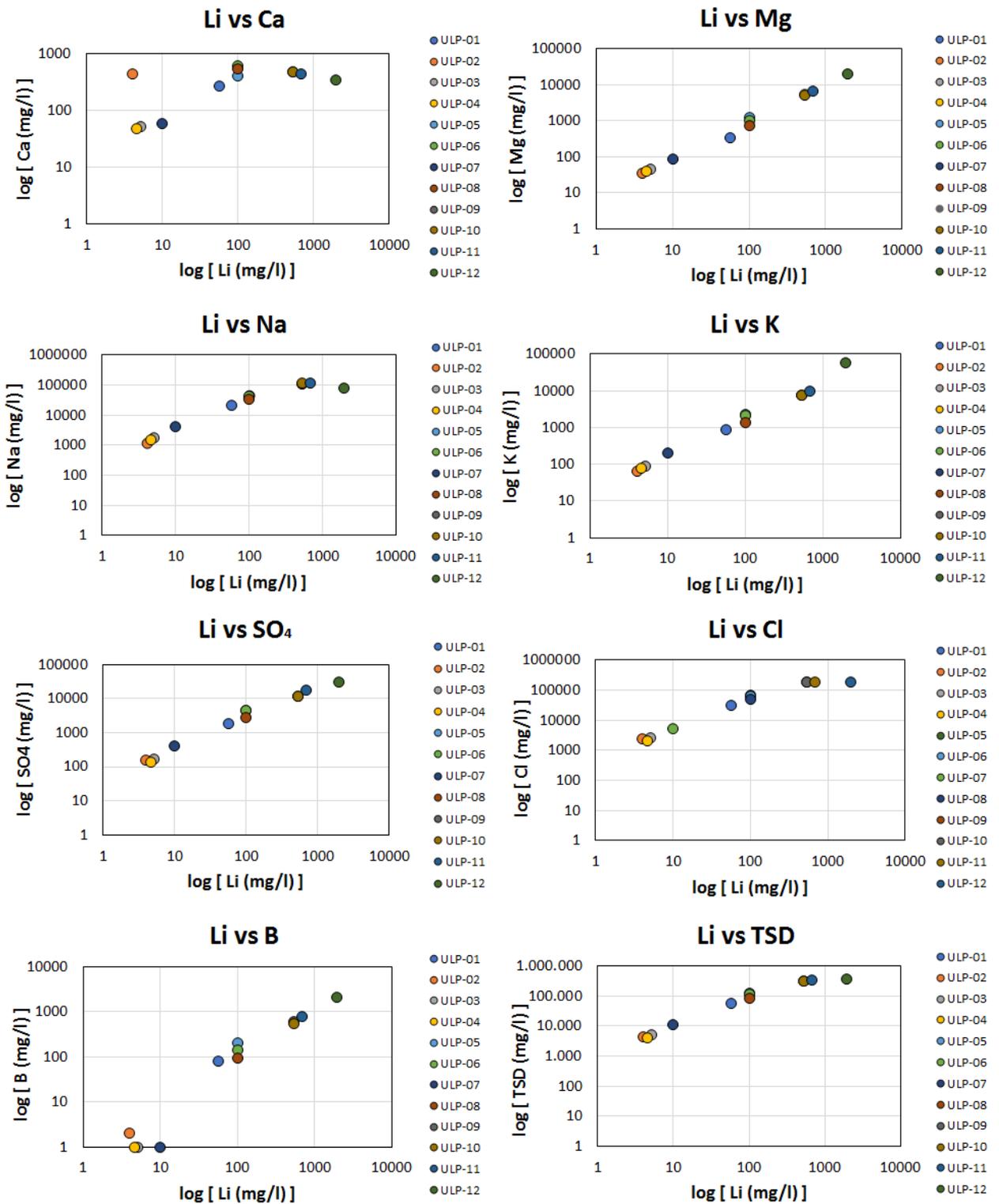
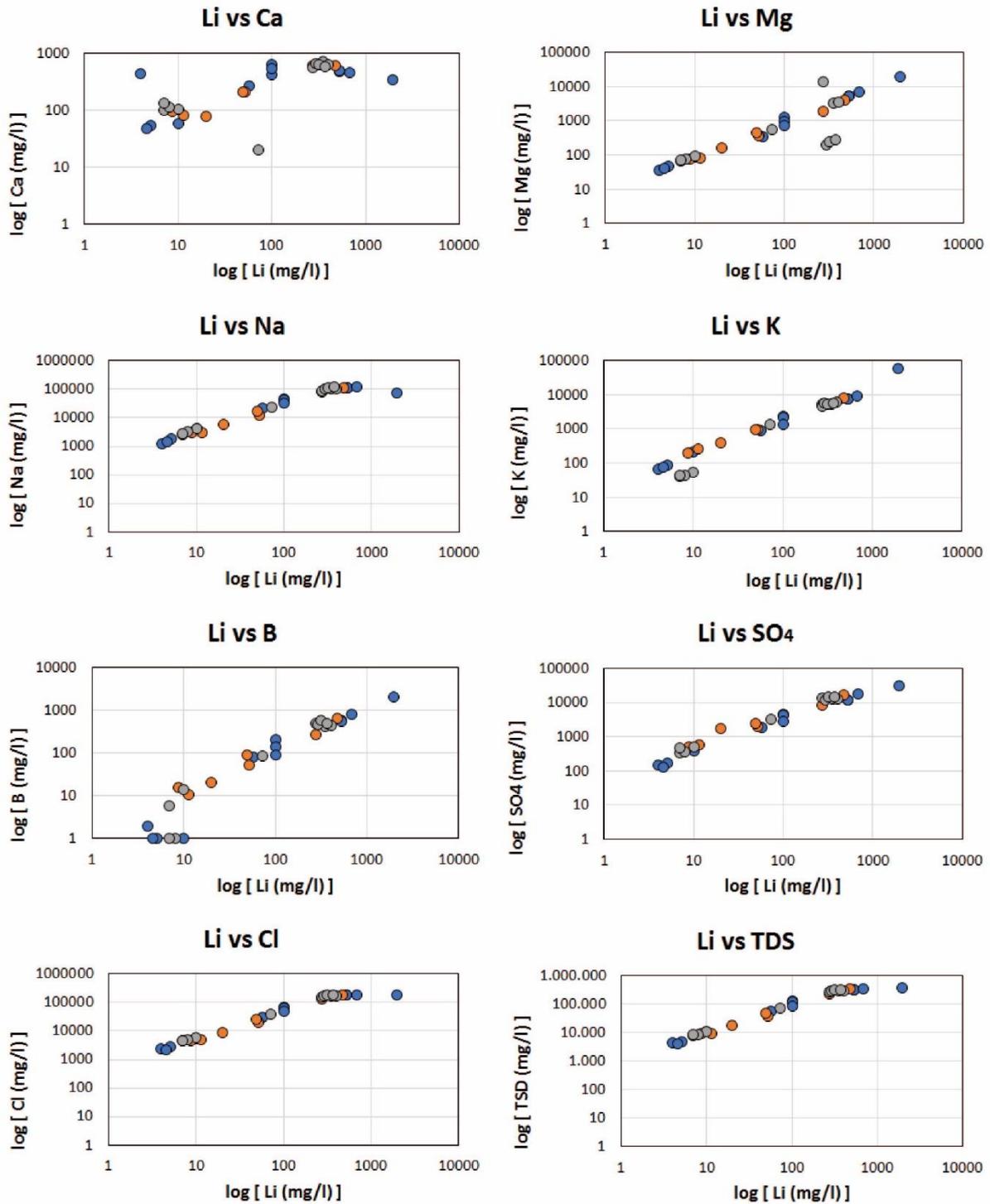


Figura 51 Gráficos comparativos de litio con respecto a los elementos mayores de las muestras obtenidas en terreno (enero, 2018)

Por otro lado, si se compara las concentraciones de litio de las muestras del presente estudio junto con las muestras de los estudios de Risacher *et al.* (1999) y Troncoso *et al.* (2016) se puede notar que todas las muestras presentan las mismas tendencias anteriormente mencionadas, lo que comprueba el comportamiento químico del litio con respecto a los elementos mayores (figura 52).

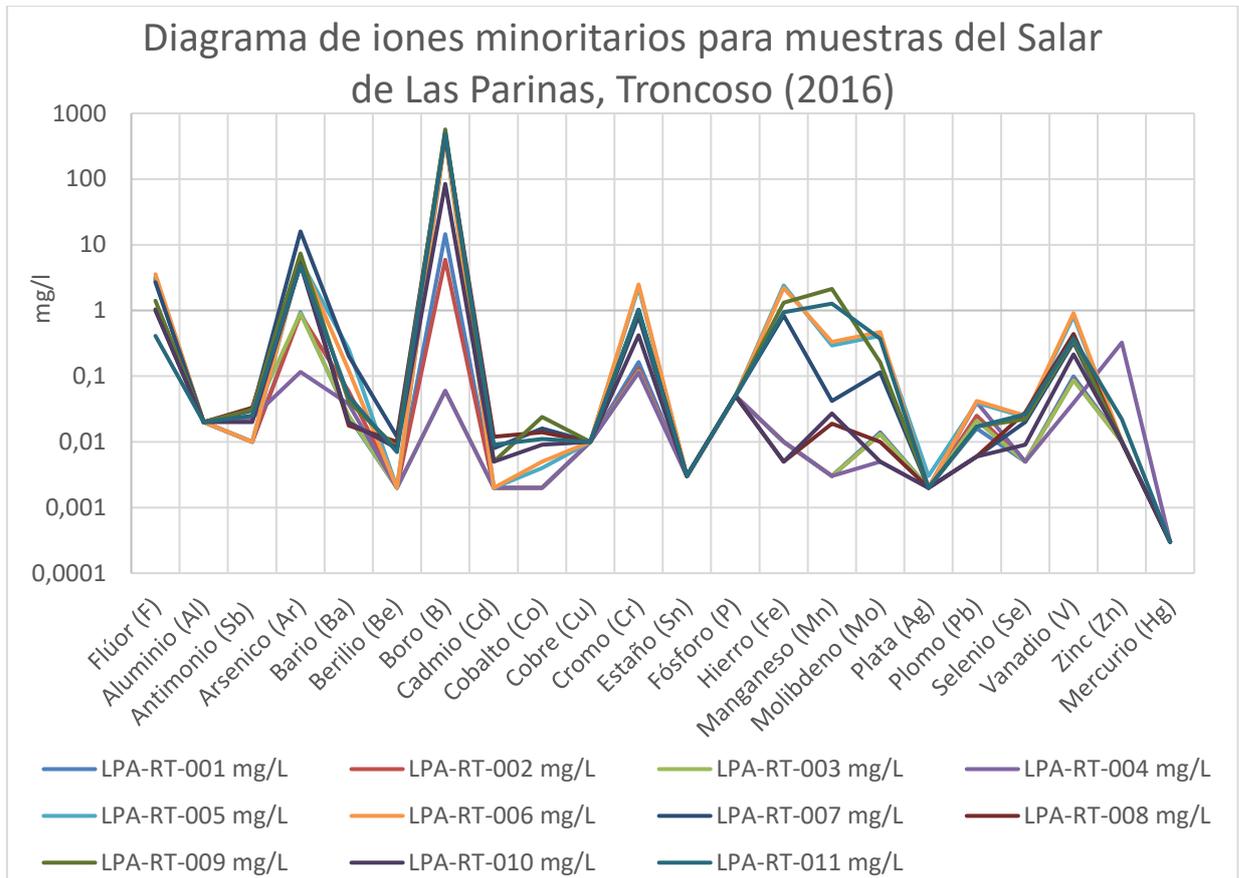


**Simbología**

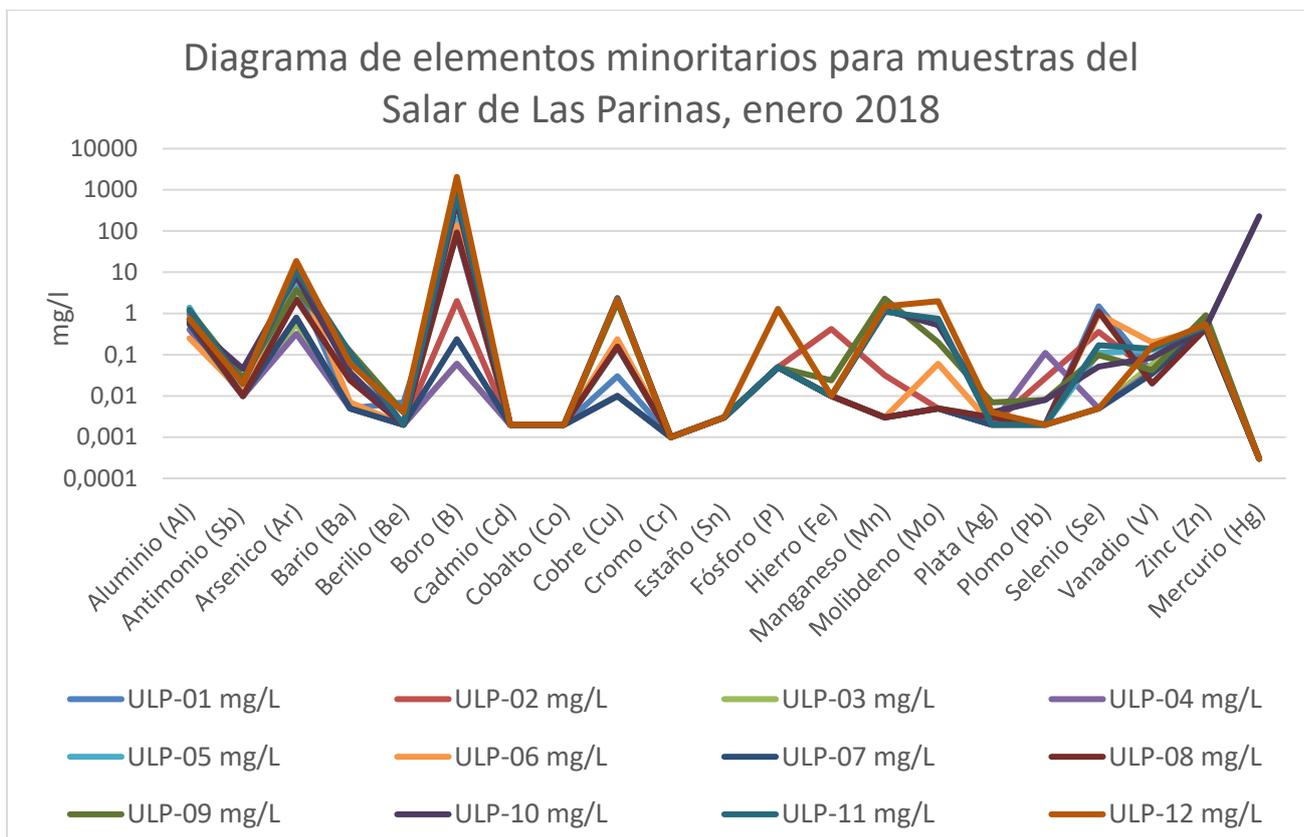
- Muestras tomadas en el presente estudio
- Muestras tomadas de los estudios de Risacher et al. (1999)
- Muestras tomadas de los estudios de Troncoso et al. (2016)

**Figura 52 Gráficos comparativos de litio con respecto a los elementos mayores de las muestras del presente estudio, junto con las muestras de Risacher et al. (1999) y Troncoso et al. (2016).**

A continuación, se muestra en la figura 53 y 54 los diagramas de elementos minoritarios y trazas de el estudio de Troncoso (2016) y del presente estudio respectivamente. En primera instancia comparando ambos gráficos se puede apreciar que las muestras prácticamente tienen un comportamiento químico muy similar, donde se destacan los peaks de concentraciones de Arsénico, Boro y de metales como el Cobre, Hierro, Manganeseo y Molibdeno en muestras ubicadas en las zonas centro y norte del salar.



**Figura 53 Diagrama de elementos minoritarios y trazas de las muestras salinas de los estudios de Troncoso et al. (2016)**

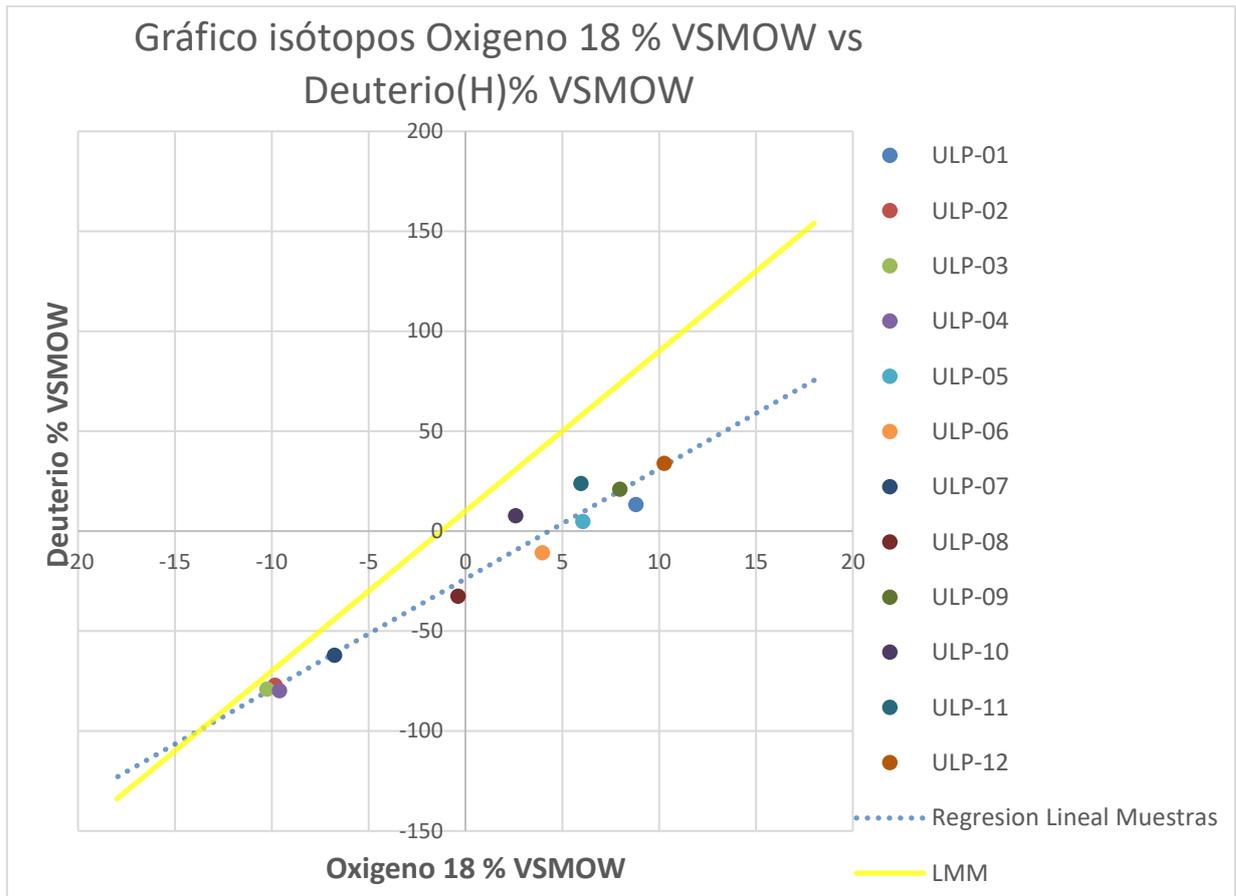


**Figura 54 Diagrama de elementos minoritarios y trazas de las muestras salinas recopiladas en enero 2018**

### 5.5.3 Análisis isotópico de muestras de agua

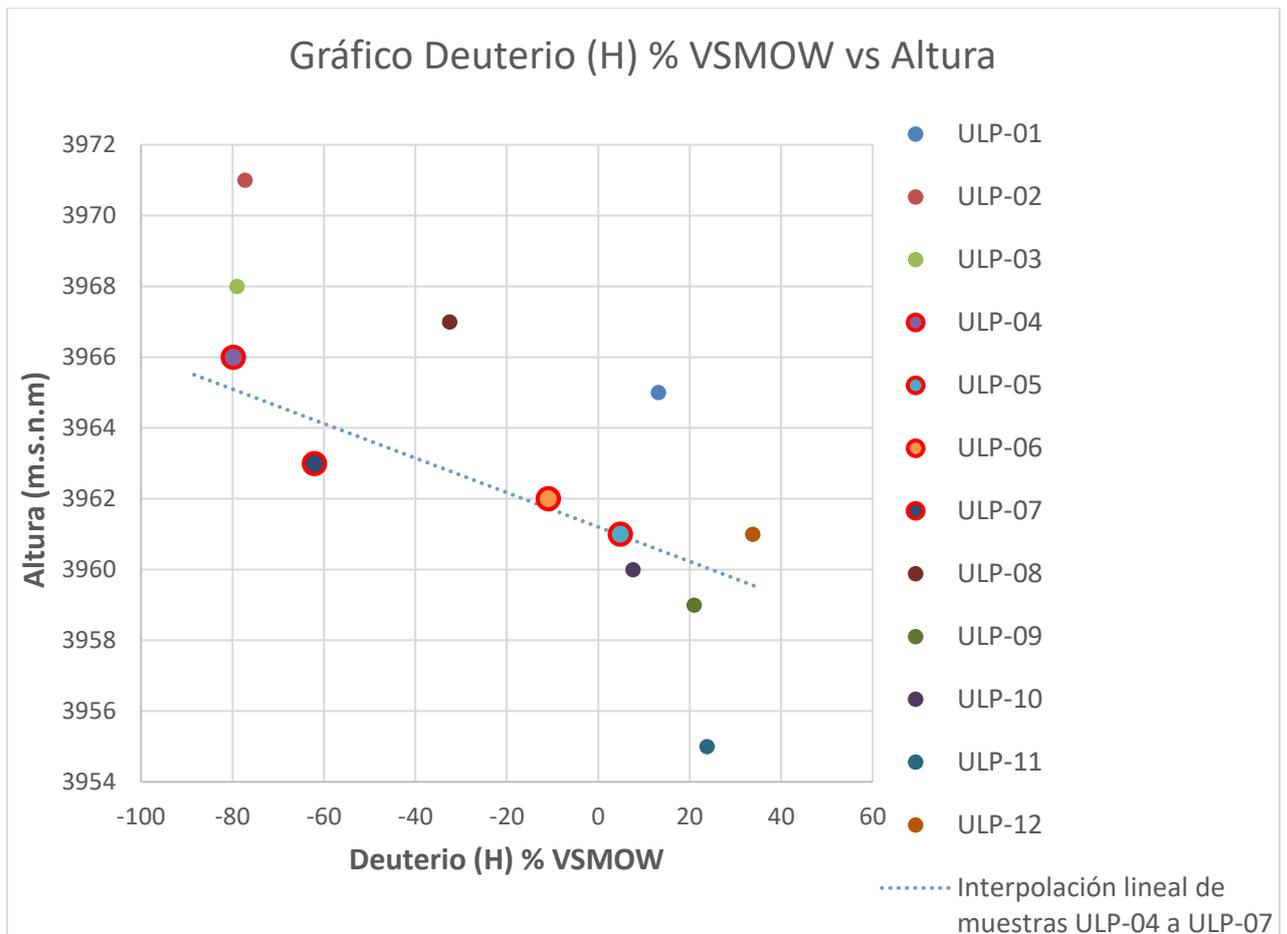
Además de los análisis químicos, se realizaron a estas mismas muestras análisis isotópicos de deuterio,  $^{18}\text{O}$  y  $^{34}\text{S}$ , en este último solo se analizaron hasta la muestra ULP-07. Los análisis completos se encuentran en el “anexo C Hidroquímica”.

Los resultados obtenidos de  $\delta^{18}\text{O}$  para la molécula de agua varían entre  $-10,52\text{‰}$ , y  $10,27\text{‰}$ , por otro lado, el  $\delta\text{D}$  varía entre  $-77,2\text{‰}$ , y  $33,8\text{‰}$ . Todos los resultados se pueden ver de forma gráfica en la figura 55, donde se obtuvo a partir de una interpolación lineal la recta  $\delta\text{D} = 5,5153 * \delta^{18}\text{O} - 23,833$  con  $R^2 = 0,9622$ . Contrastando con los procesos fraccionadores mencionados por Soler *et al.* (2015), las muestras han experimentado evaporación a partir de cuerpos de agua superficiales, lo que es esperable dentro de una cuenca endorreica con un clima árido. Se puede notar que las muestras ULP-02, ULP-03 y ULP-04 son las que presentan valores más próximos a la línea meteórica mundial lo que es esperable ya que se tratan de muestras de manantiales que alimentan al salar, por otro lado, todas las demás muestras se alejan considerablemente de la línea meteórica mundial, con énfasis en las muestras ULP-12, lo que nuevamente es esperable ya que se tratan de lagunas interiores expuestas a mucha radiación solar. Ninguna muestra presenta otro tipo de fraccionamiento isotópico diferente a la evaporación.



**Figura 55 Composición isotópica de muestras obtenidas del Salar de Las Parinas en enero 2018, contrastadas con la línea meteórica mundial (LMM).**

Para evaluar el efecto de la altitud, se estudia la relación de los valores isotópicos tanto de deuterio como de  $^{18}\text{O}$ . Como la idea es estudiar la evolución del agua que está ingresando al salar, se centró la atención en las muestras ULP-04, ULP-05, ULP-06 y ULP-07 ya que estas fueron tomadas en la zona sur del salar, desde la parte exterior hacia adentro, partiendo por manantiales hasta llegar a una serie de lagunas internas del salar conectadas entre sí. Los resultados isotópicos de deuterio con respecto a la altura se pueden apreciar en la figura 56, donde se puede notar resaltadas las muestras mencionadas de la zona sur, en las cuales se observa un empobrecimiento de deuterio con la altura, siendo las muestras ubicadas a mayor altura las que presentan menor cantidad de deuterio.



**Figura 56 Gráfico de variación isotópica de deuterio% VSMOW con respecto a la altura**

Por otro lado, los resultados de  $^{18}\text{O}$  con respecto a la altura se observan en la figura 57, donde al igual que en el caso anterior se centró la atención en las muestras mencionadas anteriormente de la zona sur. Como se esperaba, al igual que en el caso del deuterio, se observa en las muestras un empobrecimiento de  $^{18}\text{O}$  con respecto a la altura, siendo las muestras más livianas las ubicadas a mayor altura.

De los resultados isotópicos de  $\delta^{34}\text{S}$  se obtuvieron valores entre 5.72‰ a 6.92‰, con un promedio de 6,16‰, lo que indica que la fuente de los sulfatos estaría relacionada a rocas ígneas, sulfuros en roca volcánicas o evaporitas continentales. Dado a que no se tiene datos isotópicos de  $^{18}\text{O}$  en la molécula de sulfato no se puede acotar más la proveniencia. La figura 58 muestra la relación entre el contenido isotópico de  $\delta^{34}\text{S}$  y el sulfato ( $\text{SO}_4$ ), donde se puede notar que la muestras con mayores concentraciones de sulfato son aquella que presentan mayores salinidades, por ende, se puede decir que existe una relación proporcional entre la salinidad y el enriquecimiento de  $^{34}\text{S}$ ,

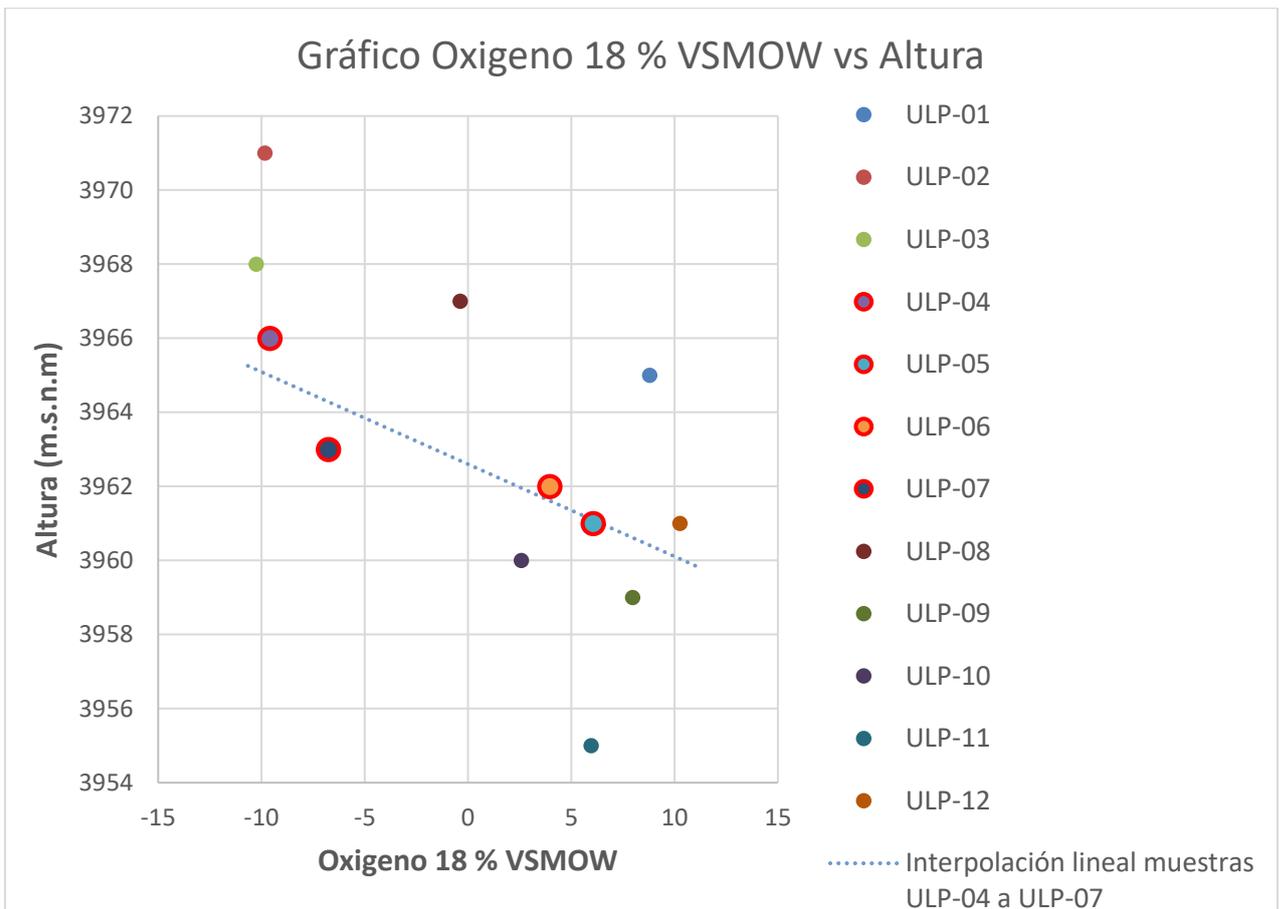


Figura 57 Gráfico de variación isotópica de  $^{18}\text{O}$ % VSMOW con respecto a la altura

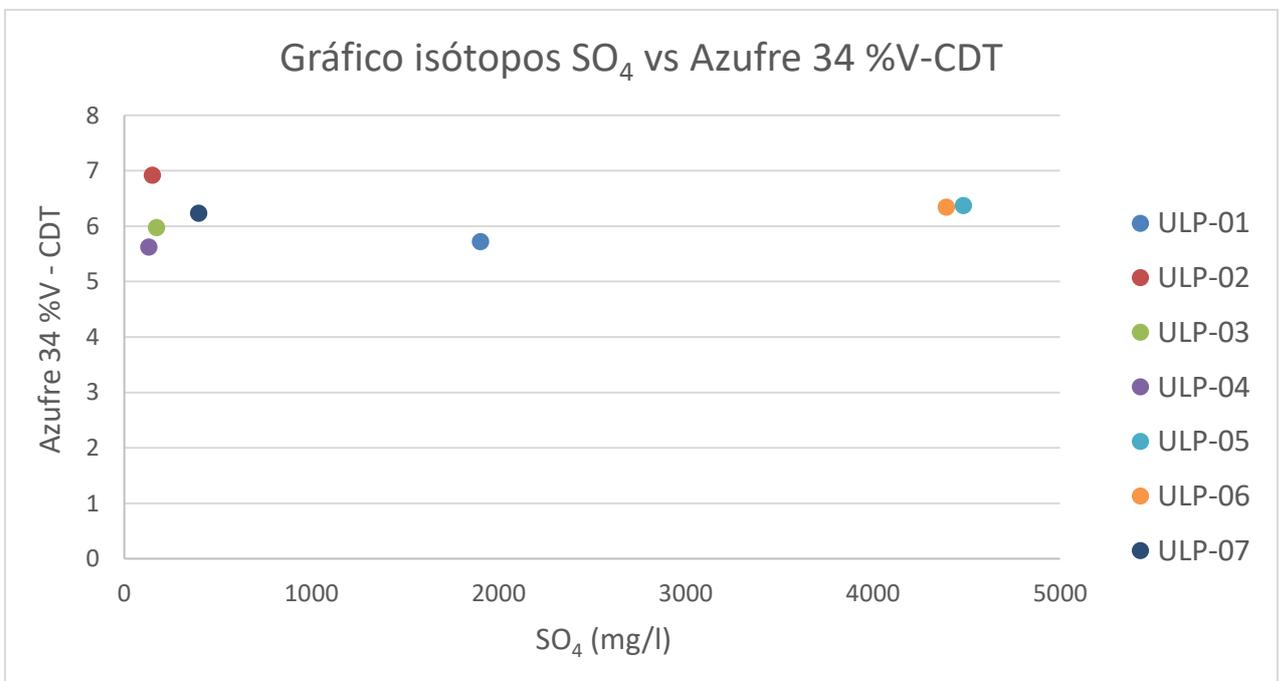


Figura 58 Gráfico de variación isotópica de  $^{34}\text{S}$ % V-CDT con respecto al  $\text{SO}_4$

## 5.6 Identificación de humedales y generación de zonas de protección

Previamente a la realización del terreno, se realizó un análisis de imágenes multiespectrales Landsat 8 y Rapid Eye para poder identificar posibles humedales en el Salar de las Parinas. Mediante el análisis de imágenes a color real y la utilización de un índice de vegetación (NDVI) se ubicaron tres zonas con presencia de aguas superficiales y de vegetación las cuales se pueden ver en la figura 59.

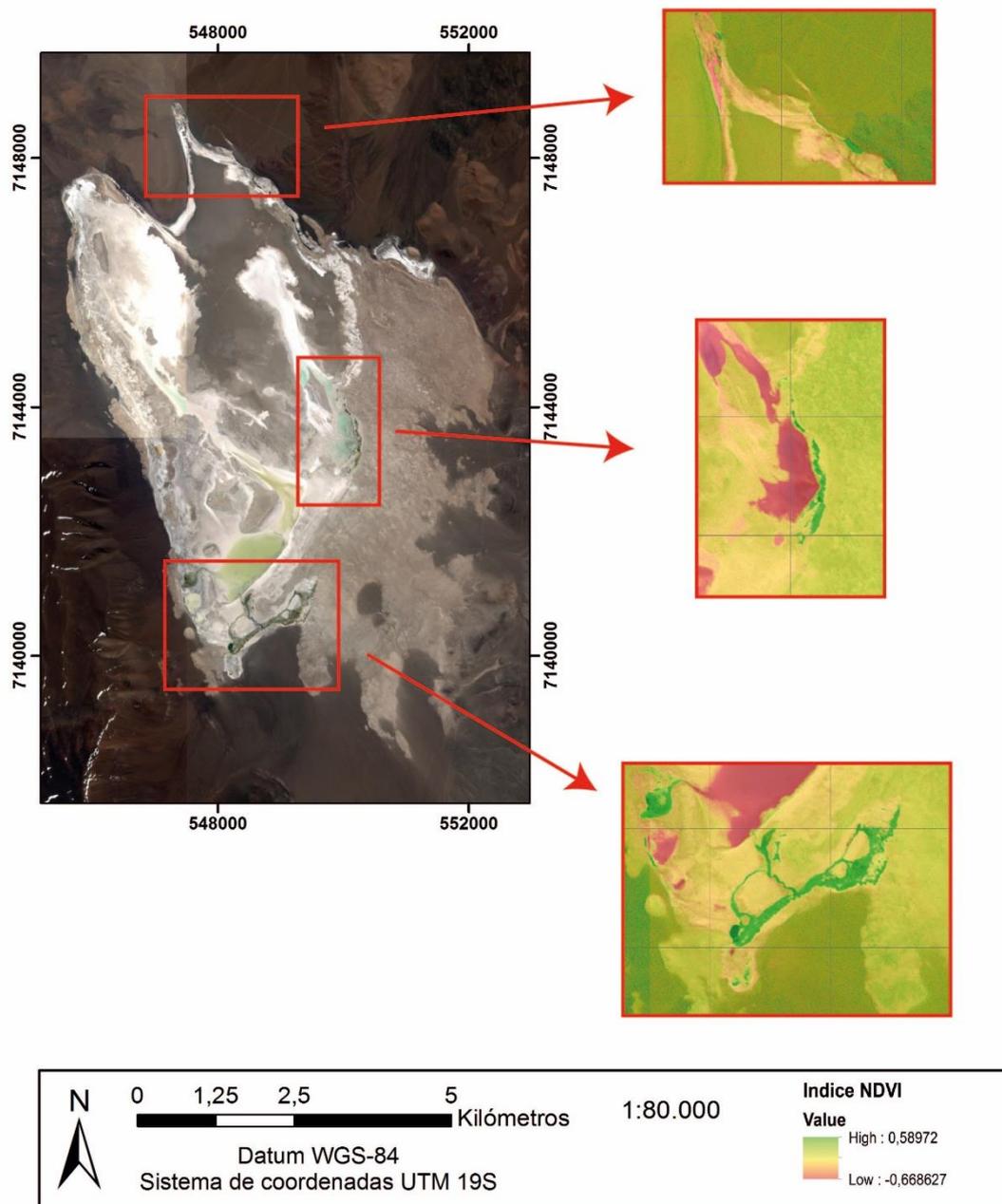


Figura 59 Análisis de imágenes Landsat 8 y Rapid Eye junto con el índice de vegetación (NDVI)

Con los datos obtenidos del terreno se pudo comprobar la presencia de humedales en las zonas mapeadas con anterioridad e incluso delimitar pequeños humedales no detectados por las imágenes en los márgenes del salar. Los ecosistemas que se desarrollan en los humedales son variados en especies, en terreno se pudo observar una amplia presencia de vega salina, numerosas bandadas de flamencos y mineros de puna en los alrededores de los humedales. Los humedales componen ecosistemas extremadamente frágiles, donde viven además algunas especies en estado vulnerable (flamenco chileno y flamenco andino) y en peligro de extinción (vicuña y la lagartija de Rosenmann). Para la conservación de estos ecosistemas se propone una zona de protección para los humedales donde se sugiere evitar cualquier interacción antrópica que pueda alterar el ambiente (figura 60).

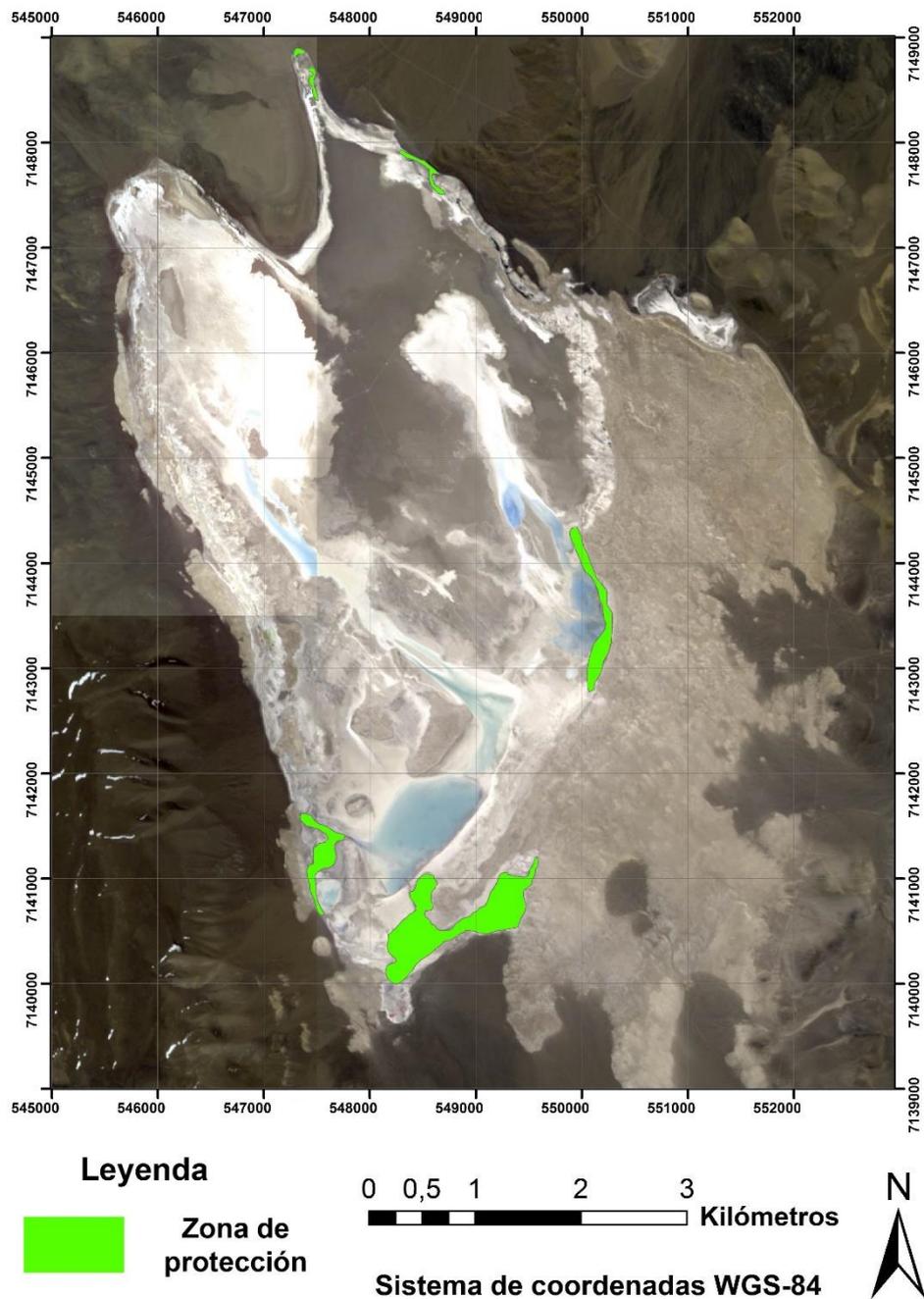


Figura 60 Mapa de zonas de protección de humedales del Salar de las Parinas

## **5.7 Modelo conceptual hidrogeológico del Salar de las Parinas**

En este capítulo haciendo uso de toda la información de los distintos análisis hidrográficos, hidrogeológicos, hidrológicos e hidroquímicos se procedió a generar un modelo hidrogeológico de la cuenca de estudio (figura 61). Debido a que en el presente estudio no se obtuvieron datos en profundidad de la cuenca de estudio, el modelo propuesto se centra principalmente en la superficie, teorizando flujos de agua subterránea en dirección al salar ya que este se encuentra en la zona más baja de la cuenca. A pesar de la carencia de datos del sub suelo, este modelo es un buen primer acercamiento al estudio de hidrogeológico de la zona.

# Modelo hidrogeológico de la cuenca del Salar de las Parinas

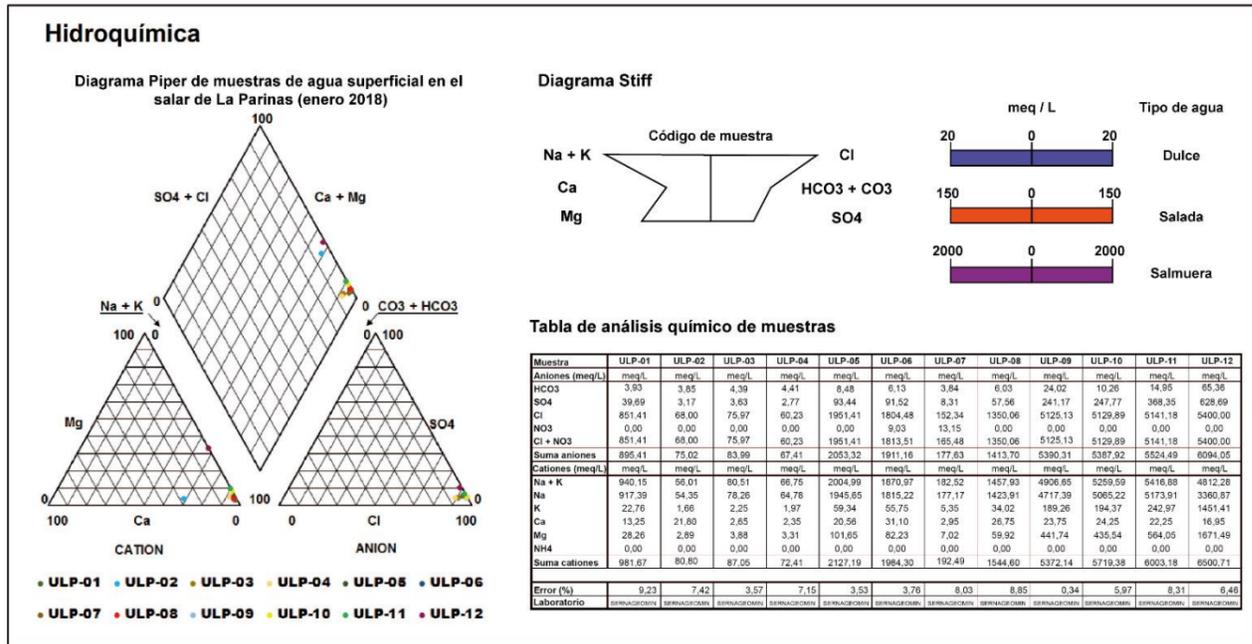
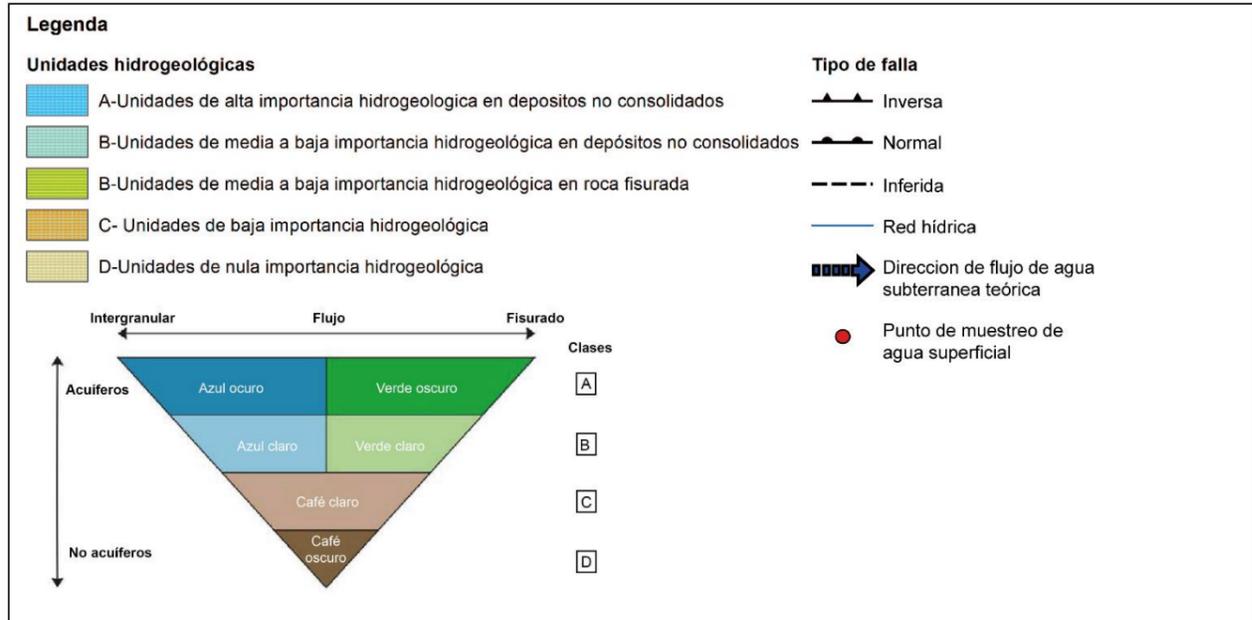
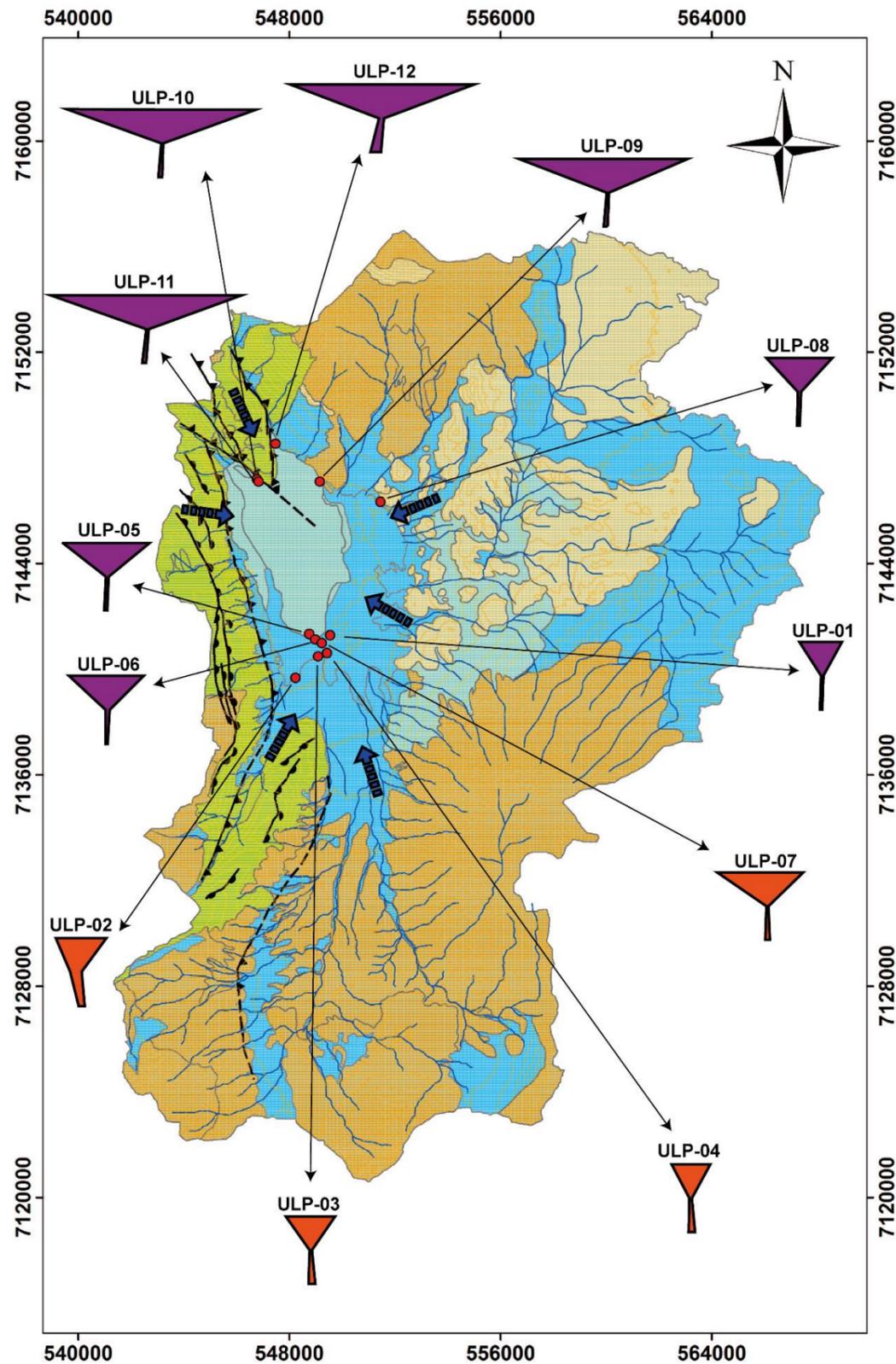


Figura 61 Modelo hidrogeológico de la cuenca del Salar de Las Parinas, región de Atacama

## 5.8 Estimación del Potencial de litio

### 5.8.1 Cálculo del volumen estimado de la cuenca

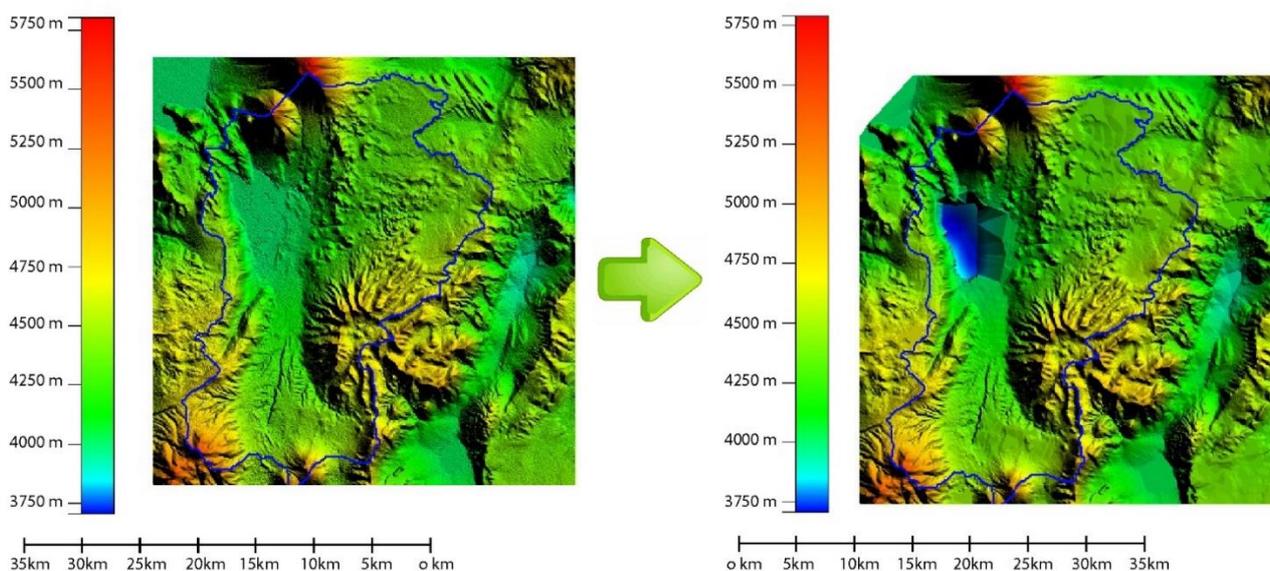
Para la estimación del volumen se trabajó con el mismo modelo de elevación utilizado para la delimitación de la cuenca hidrográfica construida anteriormente (Dataset: JAXA/METI ALOS PALSAR L1.0 2011 Accedido por ASF DAAC 2/02/2011). Como se explicó anteriormente se proyectaron las laderas opuestas adyacentes al salar para estimar su profundidad (anexo E, “Estimación de volumen del Salar de las Parinas”), los resultados esta estimación se ven en la siguiente tabla (tabla 15)

Tabla 15 Resultados de la estimación de la profundidad del salar de Las Parinas

N° Perfil	Coordenada comienzo perfil	Coordenada termino perfil	Distancia (km)	Posición intersección de laderas proyectadas	Nivel estimado (m.s.n.m)	Potencia (mts)
1	543254 / 7146652	555431 / 7146652	12,18	546132 / 7146652	3763	224
2	543254 / 7145338	555606 / 7145338	12,36	546226 / 7145338	3717	270
3	543692 / 7143936	554643 / 7143936	10,95	547088 / 7143936	3729	258
4	543876 / 7142622	554643 / 7142622	10,78	547151 / 7140344	3814	173
5	544568 / 7140344	555168 / 7140432	10,69	547346 / 7140344	3924	63
6	554643 / 7136402	543166 / 7153486	20,59	549168 / 7144551	3776	211
7	544993 / 7137384	553296 / 7149520	14,71	547798 / 7141816	3774	213
8	546913 / 7135103	549008 / 7152349	17,85	548545 / 7143775	3723	264
9	545175 / 7141399	550011 / 7151801	13,22	547509 / 7146858	3784	203

Con los puntos obtenidos de profundidades estimadas, se procedió a realizar la interpolación *Spline* del software ArcGIS con el fin de encontrar una superficie con la menor curvatura posible. Finalmente con dicha interpolación se procedió a construir un modelo de triángulos irregulares (Triangular Irregular

Networks, TIN), el cual correspondería a una estimación de la base del salar, los resultados se pueden ver en la figura 59

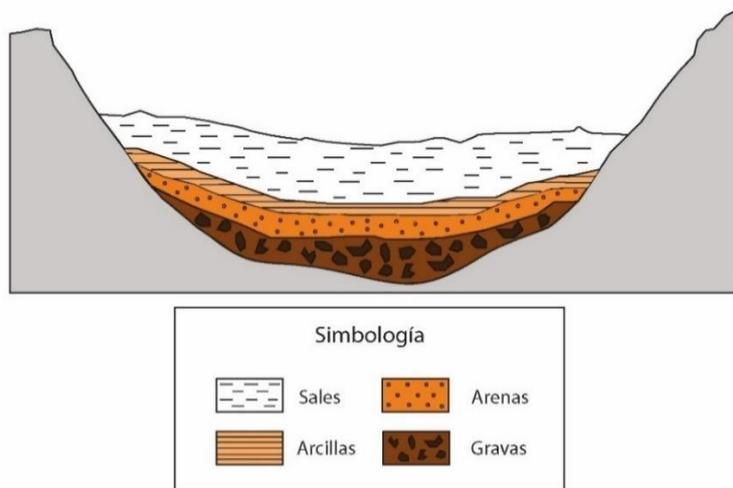


**Figura 62 Resultados del cálculo de volumen del Salar de las Parinas, ilustrados en un modelo de elevación (DEM) generado a partir del modelo de triángulos irregulares (TIN)**

A partir del modelo resultante, tomando como referencia una altura media de 3987 m.s.n.m de la superficie del salar, se pudo estimar un volumen total de 5,323 km<sup>3</sup>, con una potencia máxima de 270 metros para el salar de las Parinas.

Una vez generado el modelo de triángulos irregulares de la base del salar, se estimó una estructura interna del salar. Según la clasificación propuesta por Chong (1984) el salar de las Parinas corresponde a un Salar Andino, además según la clasificación de Houston (2011), se asume que este salar corresponde a un salar inmaduro debido a que se ubica al Este del Altiplano-Puna, zona que presenta regímenes más húmedos en comparación a las zonas del Oeste del Altiplano. Tomando en cuenta el modelo de Houston (2011) se estimó una estructura interna del salar compuesta de depósitos detríticos de gravas, arenas y arcillas, junto a depósitos evaporíticos.

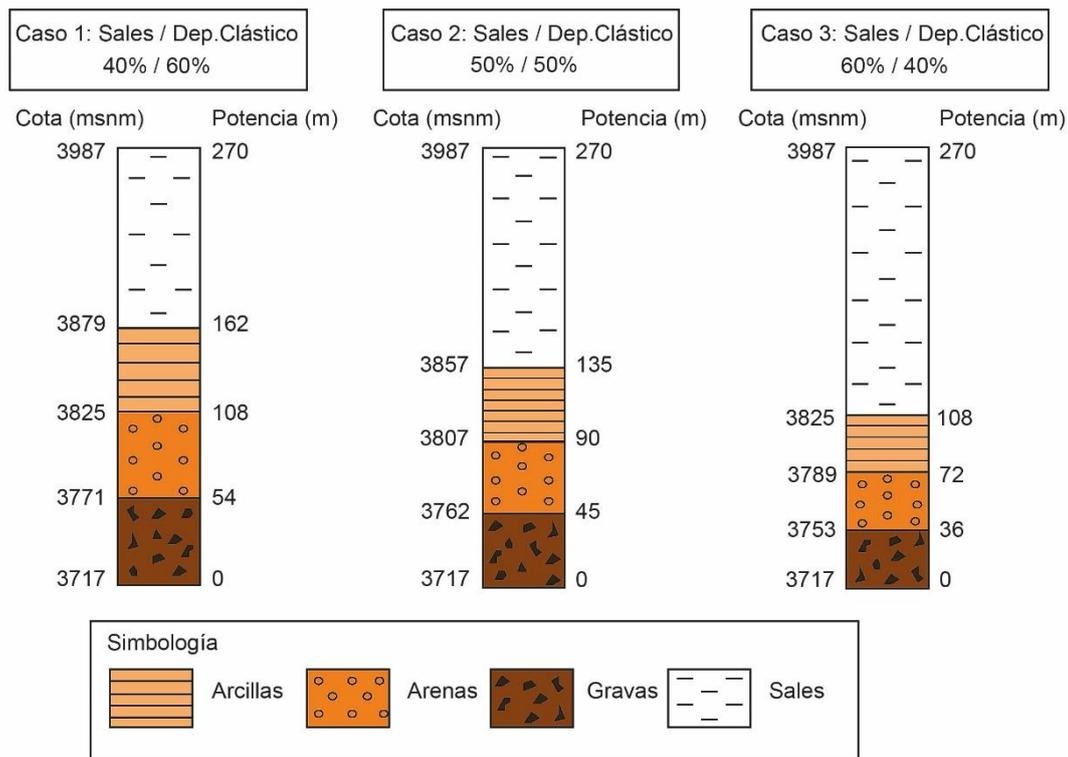
Para la disposición de las capas estratigráficas se asumió una gradación normal (descenso en la energía de transporte), aproximando a que el clima se vuelve estrictamente más seco durante el tiempo. Además a modo de simplificar el modelo se descartaron posibles acuñamientos de estratos con el núcleo salino. En la figura 60 se puede apreciar un esquema de modelo de la estructura interna propuesto para la estimación de recursos a realizar



**Figura 63 Esquema de la estructura interna propuesta para el Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia**

Para designar potencias a cada nivel estratigráfico del modelo interno propuesto, en primer instancia se consultó con antecedentes de proyectos antiguos y proyectos en salares similares. En los reportes de talison lithium (2011) mencionan que el nivel de la salmuera podría llegar hasta los 170 mts en el salar de la Isla (ubicado adyacentemente al salar de estudio), en estudios en los salares de maricunga y salinas grande la profundidad de las salmueras son variables pero van más allá de los 150 mts de profundidad.

Teniendo en cuenta los datos anteriores se proponen 3 casos diferentes para la distribución de las potencias de los estratos del salar, en donde se distribuye porcentualmente la potencia máxima del salar (270 mts) entre los depósitos evaporíticos (sales) y los depósitos clásticos (gravas, arenas y arcillas). Los 3 escenarios propuestos corresponden a 40%/60%, 50%/50% y 60%/40% de la relación entre depósitos evaporíticos y depósitos clásticos. Cabe mencionar que la cantidad asignada a los depósitos clásticos se distribuye equitativamente entre gravas, arenas y limos (figura 61).



**Figura 64 Ilustración de los tres casos propuestos de potencias inferidas para el Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia**

A partir de la estimación tanto de volumen, como de la estructura interna del salar, se calcularon los volúmenes de cada paquete sedimentario del salar para los 3 casos propuestos. Los resultados se pueden ver resumidos en la tabla 16 a continuación.

**Tabla 16 Resultados de la estimación de volumen del salar a partir de modelos de elevación de la zona**

Volumen total (km <sup>3</sup> )	5,323		
Escenario	1er Caso (60%/40%)	2do Caso (50%/50%)	3er Caso (40%/60%)
Volumen Gravass (km <sup>3</sup> )	0,269	0,367	0,476
Volumen Arenas (km <sup>3</sup> )	0,453	0,635	0,836
Volumen Arcillas (km <sup>3</sup> )	0,590	0,566	1,101
Volumen Sales (km <sup>3</sup> )	4,011	2,019	2,910

### 5.8.2 Estimación de la Porosidad eficaz (S<sub>y</sub>)

La porosidad eficaz (S<sub>y</sub>), como se mencionó anteriormente, corresponde a la relación de volumen de agua que puede ser drenado por gravedad de un medio poroso, es decir a la cantidad de salmuera extraíble de las unidades porosas.

Debido a la inexistencia de datos de subsuelo, la estimación de este parámetro se basó principalmente en recopilación de trabajos desarrollados en salares con características similares, cercanos a la zona de estudio y ha material bibliográfico. Dentro de los trabajos consultados se encuentran los realizados en los salares de Maricunga, Llamará, Salinas Grande y Olaroz. A continuación, en la tabla 17 se pueden ver los datos recopilados para dichos salares.

**Tabla 17** Tabla de datos recopilados de proyectos similares al caso de estudio

<b>Proyecto</b>	<b>Sales</b>	<b>Arcillas</b>	<b>Arena</b>	<b>Grava</b>	<b>Promedio</b>
<i>Technical Report on the Maricunga Lithium Project Region III, Chile</i>	0,034	0,012	0,062	0,13	0,059
<i>Technical Report on the Salinas Grandes Lithium Project Salta Province, Argentina</i>	-	0,012	0,16	-	0,041
<i>Exploration Potential and Mineral Resource Estimate for Potash Dragon Inc,'s Llamara Project, Salar de Llamara, Northern Chile</i>	-	-	-	-	0,125
<i>"Houston, J. and Gunn, M., 2011 - Technical report on the Salar de Olaroz lithium-potash project Jujuy Province, Argentina; prepared for Orocobre Limited, 305p."</i>	-	-	-	-	0,100

Como se puede ver los valores de la porosidad eficaz, además de estar incompletos (a excepción del proyecto de Maricunga), varían bastante sus valores entre cada proyecto, no obstante, los promedios de los proyectos de Maricunga y Salinas Grande se asemejan y en ambos casos se tiene que las arcillas poseen valores de porosidad eficaz más bajos. Por otro lado, los salares de Llamara y Olaroz tienen porosidades eficaces promedio bastante similares, los cuales corresponden a secuencias de sales combinadas con arcillas y arenas. Para la estimación se tomarán los valores del proyecto de Maricunga por encontrarse más completos y se utilizará el promedio para analizar su impacto en la estimación. Como los valores de los salares de Llamara y Olaroz rondan el 10% en porosidad eficaz, se utilizará este valor como otro caso extra para estimación.

Además de los datos recopilados de proyectos similares al caso estudio, se recopilaron datos teóricos sobre el comportamiento hidráulico de los diversos materiales rocosos existentes en el salar. Los datos de los estudios de Health (1983) y de Morris and Johnson (1967) hablan sobre el comportamiento de arcillas, arenas y gravas, donde se les asocia diversos valores para cada factor en su comportamiento hidráulico. Los datos teóricos de la porosidad eficaz de cada uno de estos materiales se pueden ver en la tabla 18, donde se aprecia una semejanza en el grado ascendente del valor de la porosidad eficaz según el tamaño de las partículas, no obstante, existe una gran diferencia de valores entre ambos estudios en materiales rocosos similares.

Tabla 18 Rango de valores de porosidad eficaz de los estudios de Health (1983) y de Morris and Johnson (1967)

Material	Porosidad eficaz (%), Health (1983)	Porosidad eficaz (%), Morris and Johnson (1967)
Arcillas	2%	6 %
Arenas	6 %	21 %
Gravas	19%	24 %

### 5.8.3 Estimación de la concentración de litio en salmuera

Para la estimación de la concentración de litio se tomaron en cuenta los datos de los estudios de Risacher *et al.* (1999) y de Troncoso *et al.* (2016), en conjunto con las muestras tomadas en el presente trabajo (enero del 2018). Todos los datos suman un total de 30 muestras, las cuales se pueden ver en la figura 62 a continuación.

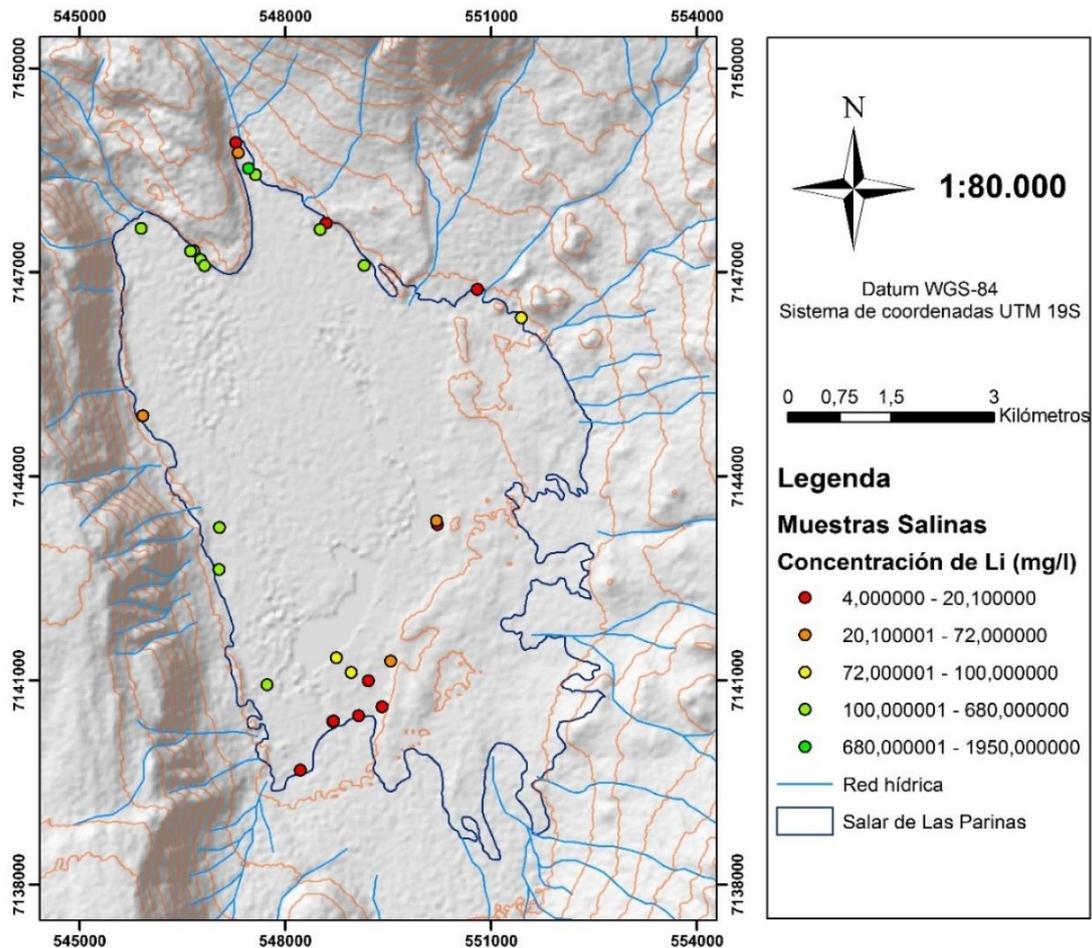
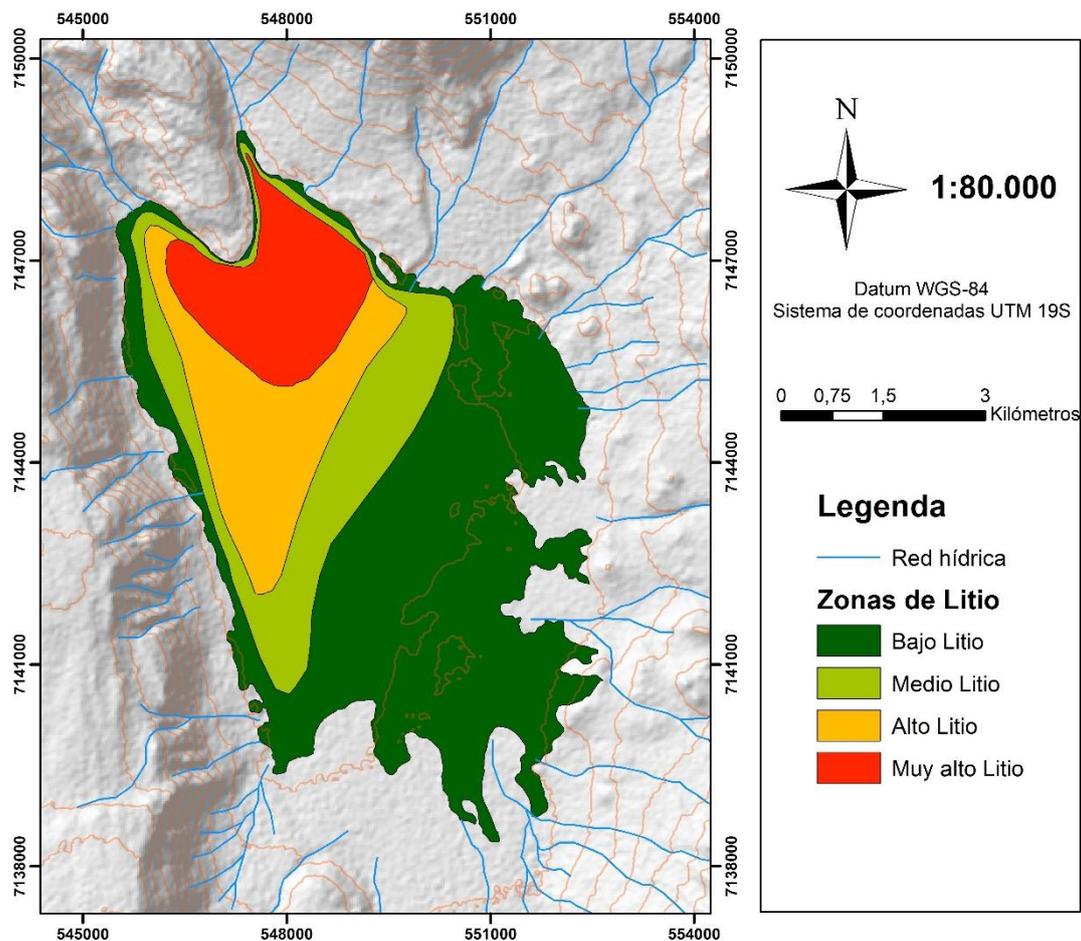


Figura 65 Mapa de puntos de muestreo de aguas superficiales y concentraciones de litio de muestras analizadas, junto a los trabajos de Risacher *et al.* (1999), Troncoso *et al.* (2016) y puntos tomados en este trabajo.

Con los datos recopilados y obtenidos del salar de estudio se procedió a generar una interpolación mediante la herramienta *Vecino Natural* del software

ArcGIS para obtener líneas de isoconcentraciones de litio. En base a estas líneas, se contruyó un mapa zonado del Salar según las concentraciones de litio (figura 63).



**Figura 66 Mapa de concentración de litio delimitado por zonas del Salar de las Parinas a partir de muestras de aguas superficiales.**

Los valores de los rangos de concentración de litio para las zonas propuestas se pueden ver en la tabla 19. El total de muestras tiene como promedio una concentración de 235,6 mg/L de litio, en donde las concentraciones más altas se ubican en la zona norte del Salar. Los datos obtenidos en este estudio se acercan bastante a los estudios de Risacher *et al.* (1999), Troncoso *et al.* (2016) y Talison Lithuim (2011), lo que confirma la distribución de las concentraciones de litio en las aguas superficiales.

**Tabla 19 Rangos de concentraciones de las zonas delimitadas para el salar de Las Parinas**

Zona Litio	Rango (mg/L)	Media (mg/L)
<b>Muy alto</b>	450- 1950	1200
<b>Alto</b>	300- 450	375
<b>Medio</b>	150-300	225
<b>Bajo</b>	150-0	75

#### 5.8.4 Potencial de litio estimado del Salar de Las Parinas

Siguiendo con la metodología de Houston (2011) para la estimación del potencial de litio en el Salar de Las Parinas, se tomaron las tres variables estimadas con anterioridad para realizar la estimación del potencial de litio en el Salar utilizando la ecuación descrita en la metodología.

Para la integración de las tres variables estimadas primero se proyectó las zonas de concentración de litio sobre el modelo teórico creado del salar de Las Parinas con sus 3 casos propuestos. Para cada unidad estratigráfica se le calculó el volumen correspondiente a la zona de concentración de litio que abarca dicha unidad y se le asocio la concentración media de litio de cada zona correspondiente. Luego por último se utilizaron los valores de porosidad eficaz de los reportes de proyecto en el Salar de Maricunga por encontrarse más completos y se procedió a estimar el potencial de litio para 3 casos. Se calculó dos casos más con valores promedio de porosidad eficaz de 0,05 y 0,10 que corresponden a los valores del grupo de salares Maricunga-Salinas Grande y Llamara-Olaroz. Los resultados de la estimación son los siguientes (tabla 20).

**Tabla 20 Resultados de la estimación de Potencial de Litio del Salar de Las Parinas con datos de los proyectos en los salares de Maricunga, Salinas Grande, Llamara y Olaroz**

<b>Casos estructurales propuestos</b>	<b>Toneladas de Litio</b>
<b>1er caso 40% sales/ 60% deposito clástico</b>	85.805
<b>2do caso 50% sales/ 50% deposito clástico</b>	80.616
<b>3er caso 60% sales/ 40% deposito clástico</b>	77.774
<b>4to caso Estructura homogénea (<math>S_V = 0,059</math>)</b>	119.771
<b>5to caso Estructura homogénea (<math>S_V = 0,100</math>)</b>	201.296

De los resultados obtenidos se puede observar que no existe mucha diferencia entre los 3 casos estratigráficos del salar propuestos, teniendo mayores tonelajes de litio los casos con mayor porcentaje de depósitos clásticos debido a la alta porosidad eficaz de estas unidades clásticas por sobre las unidades evaporíticas. El valor promedio de los tres primeros casos es de 81398,2263 toneladas de litio. Los casos cuarto y quinto se utilizaron valores promedio de porosidad eficaz, asumiendo una estructura interna del salar homogénea. Los tonelajes de litio estimados del cuarto y quinto caso muestran una gran alza en comparación a los tres primeros casos, siendo el quinto caso más del doble del promedio de los primeros tres casos. El promedio de los casos cuarto y quinto corresponde a 160533,536 toneladas de litio.

Una segunda ronda de estimaciones se realizó con los datos de porosidades eficaces de los estudios de Health (1983) y de Morris and Johnson (1967). De estos estudios se obtuvieron datos de arcillas, arenas y gravas, no obstante, no se encontraron datos sobre sales, por lo tanto, se mantuvieron los mismos valores de porosidad eficaz de la ronda anterior. Los resultados de estas estimaciones se observan a continuación (tabla 21).

**Tabla 21 Resultados de la estimación de Potencial de litio del Salar Parinas con datos bibliográficos de Health (1983) y Morris and Johnson (1967)**

<b>Datos de Health (1983)</b>	
<b>Casos propuestos</b>	<b>Toneladas de Litio</b>
1er caso 40% sales/ 60% deposito clástico	99.497
2do caso 50% sales/ 50% deposito clástico	91.344
3er caso 60% sales/ 40% deposito clástico	85.254
<b>Datos de Morris and Johnson (1967)</b>	
<b>Casos propuestos</b>	<b>Toneladas de Litio</b>
1er caso 40% sales/ 60% deposito clástico	176.927
2do caso 50% sales/ 50% deposito clástico	151.909
3er caso 60% sales/ 40% deposito clástico	127.196

De las estimaciones obtenidas se puede notar que con las porosidades eficaces de Health (1983), de la misma manera que con los datos del Salar de Maricunga, no existe mucha diferencia entre los 3 casos estratigráficos propuestos. El promedio de tonelaje de litio para estos tres primeros casos es de 92032. Por otro lado, con los datos de Morris and Johnson (1967) se puede notar un alza considerable con respecto a la estimación anterior, además se obtuvo grandes diferencias entre los casos, alcanzando aproximadamente las 30.000 toneladas entre cada caso propuesto. El valor promedio de estos tres casos corresponde a 152011 toneladas de litio.

## **6. Discusiones**

### **6.1 Hidrografía de la cuenca del Salar de Las Parinas**

Los resultados de la delimitación de la cuenca hidrográfica del Salar de Las Parinas obtuvieron una cuenca compartida con Argentina, de un área de 594 km<sup>2</sup>, una altura media de 4362 m.s.n.m y una superficie del salar alrededor de los 40 km<sup>2</sup>. Comparando los resultados con los trabajos anteriores de DICTUC (2009), la cuenca morfológicamente se asemeja bastante y su área total varía solo en un 3,25% con respecto al valor de área obtenido, lo que confirma la validez del resultado del presente estudio.

A pesar de la buena relación del resultado con trabajos anteriores, existen factores que incidieron en la precisión del trabajo hidrográfico. Un gran factor que afecta en la construcción de la cuenca es la calidad de los DEM's utilizados, estos inciden de gran manera en el resultado final ya que a partir de estos se generan todos los modelos previos a la construcción de la cuenca. La zona del Altiplano se caracteriza por presentar relieves poco pronunciados, suavizados por extensos depósitos aluviales/coluviales los cuales no han sido alterados por mayores agentes erosivos debido a la aridez de la zona, los mayores altos topográficos son producto del volcanismo cenozoico, el cual es responsable del carácter endorreico de la mayoría de las cuencas. Tanto el modelo de flujo como el modelo de acumulación se construyen a partir de la diferencia de los datos de la altura de los DEM, aplicado esto al caso de estudio, se tiene que esta diferencia es muy pequeña debido a que las pendientes de la superficie de la zona son muy bajas, produciendo gran incertidumbre en la construcción de la red de drenaje, ya que se tuvieron que elegir valores umbral (valor umbral de pixel del modelo de acumulación necesario para conformar la red de drenaje) muy bajos, teniendo como producto múltiples cauces de muy bajo orden para poder abarcar toda la zona de estudio. El trabajar con una red hidrográfica demasiado ramificada resulta complejo, debido a que muchas veces los cauces trazados siguen caminos que no representan del todo bien la realidad, siendo en muchos casos cauces de extensiones muy cortas o con trayectorias muy lineales. A pesar de que el DEM utilizado no presentaba una baja resolución (grilla de 12,5 mts), se estima que el resultado puede mejorar con la utilización de DEM's de mayor calidad y resolución, corregidos con mediciones de GPS's diferenciales.

Con respecto a la red de drenaje construida se puede notar que es bastante extensa y ramificada, teniendo cauces principales con órdenes de Strahler 4 en las microcuencas n° 4 y 7. Estos escurrimientos superficiales no se muestran de esta manera en terreno debido a que gran parte de la red se emplaza sobre zonas de depósitos aluviales/coluviales, en donde gran parte del agua se infiltra. Los flujos superficiales solo ocurren sobre las unidades volcánicas y estos existen en épocas deshielos, donde la recarga es mayor (DICTUC, 2009).

## **6.2 Geología de la cuenca del Salar de Las Parinas**

La geología de la cuenca del salar de estudio expuesta en el presente trabajo en su mayoría corresponde a una recopilación de información de los trabajos de Naranjo *et al.* (2013), en donde se puede destacar la gran predominancia de rocas de origen volcánico. Realizar un trabajo al detalle de la geología de la cuenca del salar tuvo que ser descartado por el acotado tiempo de terreno y por la gran extensión del área de la cuenca.

Con respecto a la geología de detalle realizada del salar, se realizó en base de observaciones realizadas en terreno y análisis de imágenes satelitales, contrastadas con el modelo de zonaciones de salares propuesto por Hardie y Eugster (1970). Las tres zonas generadas dieron una zonación elíptica centrada en el norte del salar, las zonas de cloruros y de carbonatos poseen un tamaño similar, no obstante, la zona de sulfatos posee una extensión bastante inferior a estas dos. Analizando la disposición de la zonación descrita se puede notar que en el sur del salar predomina la zona de carbonatos, la cual tiene una gran extensión y limita con los depósitos aluviales/coluviales. Al Norte del salar predomina la zona de cloruros, teniendo nula presencia de las otras dos zonas, que limita con el volcán Parinas.

Por la disposición de las zonaciones del salar se puede inferir que las aguas menos concentradas se ubican en el sur del salar, en donde predomina la zona de carbonatos, correspondiente a los primeros minerales en precipitar producto de la evaporación. Por otro lado, en la zona norte debido a la total predominancia de cloruros, los cuales son los últimos minerales en precipitar por la evaporación, se ubicarían las aguas con mayores concentraciones. Se infiere que la nula presencia de zona de carbonatos y sulfatos en el norte se puede deber a dos opciones: 1- estas zonas se encuentran cubiertas por los depósitos coluviales de los edificios volcánicos del norte del salar. 2- debido a una baja infiltración por los márgenes del salar y una mayor profundidad de la cuenca, las aguas residuales de la evaporación, empobrecidas de carbonatos y sulfatos, se van concentrando en esa zona. Esta última opción abre la posibilidad de estimar que la ubicación más probable del núcleo salino del salar se encuentra en el norte y que la mayor parte de la recarga del acuífero del salar sería por el sur, proveniente de la infiltración ocurrida en los depósitos aluviales/coluviales.

## **6.3 Hidrogeología de la cuenca del Salar de Las Parinas**

La caracterización hidrogeológica de la cuenca del Salar de las Parinas, como se dijo anteriormente, se abordó de una forma cualitativa, caracterizando y estimando el comportamiento hidráulico de las rocas y depósitos de la cuenca a partir de las caracterizaciones de las unidades geológicas de los estudios de Naranjo *et al.* (2013). Se categorizó la zona mediante unidades hidrogeológicas según la clasificación propuesta por Struckmeier y Margat (1995), considerando agrupar las diferentes rocas y depósitos según sus similitudes desde el punto de vista hidrogeológico y se le estimó coeficientes hidráulicos según los estudios de Freeze y Cherry (1979).

Como resultado se obtuvo cinco unidades hidrogeológicas, dentro de las cuales se encuentran dos unidades de alto y medio-bajo potencial hidrogeológico en depósitos no consolidados, una unidad medio-bajo potencial en roca fisurada y otras dos unidades de poco y nulo potencial hidrogeológico respectivamente.

Sobre las unidades hidrogeológicas en depósitos de roca no consolidados, no se discute mucho el potencial de las unidades de alta importancia hidrogeológica debido a que se comprobó cualitativamente en terreno su gran permeabilidad. Por otro lado, la unidad de media a baja importancia hidrogeológica presenta un grado de incerteza en su potencial debido a que no se pudo visitar en terreno los afloramientos de las Gravas de Atacama, por lo tanto, se desconoce el grado de consolidación y permeabilidad que presentaban. Para el caso de los depósitos salinos, si bien en superficie tienen gran permeabilidad, según los estudios de Houston *et al.* (2011) mencionan que en depósitos salinos la permeabilidad disminuye drásticamente en profundidad, presentando un horizonte acotado permeable para luego bajar drásticamente su permeabilidad nuevamente, por otro lado existe un gran grado de incerteza de las propiedades hidrológicas de esta unidad debido la posible existencia de intercalaciones con materiales clásticos, típico de salares inmaduros producto de transiciones de periodos áridos a más húmedos.

El resto de las unidades geológicas de la cuenca corresponden a rocas de origen volcánico donde su potencial hidrológico está estrechamente ligado al grado de fractura que estas presentan. Debido a esta razón, estas unidades se clasificaron con una nula a baja importancia hidrogeológica, en función de su fracturamiento descrito en los estudios de Naranjo *et al.* (2013), no obstante, la existencia de un sistema de fallas NNW en la zona norte del salar, generó la hipótesis de que las rocas afectadas por este sistema sufrieron de un fracturamiento secundario, aumentando su potencial hidrogeológico. Este último supuesto es debatible ya que la interconexión del fracturamiento de las rocas puede ser variable, además la ausencia de la zonación de carbonatos y sulfatos en el norte del salar podría indicar una menor recarga en este sector, debido a una baja infiltración en estas unidades.

#### **6.4 Hidrología de la cuenca del Salar de Las Parinas**

De todos los análisis expuestos en el presente trabajo, los estudios hidrológicos realizados puede que sean los que presentan más grados de incertidumbre debido a diversos factores. En primer lugar, la ausencia de estaciones meteorológicas y por ende de datos hidrológicos concretos en la cuenca de estudio incidió de gran manera ya que acotó los alcances de la investigación a solo estimaciones.

Los estudios hidrológicos presentados se centraron en el cálculo del balance hídrico de la cuenca de estudio, en base a trabajos regionales del Altiplano los cuales abordan los factores de recargas y descargas de las cuencas hidrográficas ubicadas en el Norte de Chile, desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Atacama. Entre los estudios recopilados se destacan los realizados por DGA- DICTUC (2009), DGA- Aquaterra (2013), DGA-Arcadis (2015) y DGA-Amphos21 (2016). El carácter de todos los estudios corresponde a estimaciones a escala regional, por lo tanto, su utilización para cálculos en la cuenca de estudio produce inevitablemente errores asociados a las diferentes escalas de trabajo

En todas las variables estimadas se puede notar una gran semejanza con los estudios anteriores de la zona, esto no es de extrañar debido a que se utilizaron las mismas estimaciones de precipitación y evaporación bajo metodologías semejantes, el único factor diferente fue la utilización de la cuenca

hidrográfica construida en el presente estudio para los cálculos morfométricos de la cuenca, por lo tanto, la buena correlación del balance hídrico es inevitable.

Muchos antecedentes de los estudios recopilados fueron de gran utilidad para comprender la dinámica de la recarga y descarga de la cuenca. La información respecto a la predominancia de recarga debido a precipitaciones solidas (nieve) y a la gran infiltración ocurrida en depósitos aluviales/coluviales dieron soporte para análisis hidrogeológicos e hidroquímicos. Acerca de las descargas de la cuenca estas se atribuyen principalmente a la evaporación ya que no se tienen evidencias de interconexiones con cuencas adyacentes, no obstante, no se descarta la opción debido a la presencia de un sistema de fallas al norte de la cuenca que cruza hasta la cuenca del salar de la Isla

Sobre los resultados del balance hídrico se puede notar que los valores obtenidos son bastante bajos, lo que implica que las condiciones de recarga y descarga del salar se encuentran en equilibrio. Esta conclusión es sumamente importante ya que nos indica que el salar continuamente se está concentrando en elementos y que la condición hídrica del salar se encuentra estable en el tiempo, por lo tanto, este es sumamente susceptible a posibles extracciones de salmueras en una futura explotación de litio.

## **6.5 Hidroquímica de la cuenca del Salar de Las Parinas**

La hidroquímica de las salmueras del salar quizás es el ámbito más relevante de este estudio ya que esta directamente relacionado con la cantidad de recursos de interés económico del salar. En el presente estudio los análisis hidroquímicos fueron realizados en base a la recopilación de antecedentes de los estudios de Risacher *et al.* (1999), Troncoso *et al.* (2013) y a la adquisición de nuevos datos mediante una campaña de muestreo realizada en enero del 2018. En total se muestrearon 12 puntos, repartidos entre las zonas norte, este y sur del salar, muestreando vertientes, lagunas difusas y lagunas internas del salar. Sumando las muestras de la campaña de muestreo con los antecedentes anteriores se tiene registro químico de 30 puntos donde se tiene información de elementos mayores y trazas.

A partir de los registros obtenidos de las muestras del salar, se puede concluir indudablemente que la composición de las aguas es fuertemente clorurada sódica, por otro lado, analizando las relaciones iónicas de las muestras (  $[alc]/[Ca]$ ,  $[alc]/[(Ca+Mg)]$  y  $[alc]+[SO_4]/[Ca]$  ) se obtuvo un dominio de salmueras tipo sulfatado realizado en el norte y una leve presencia de salmueras del tipo carbonatadas en los márgenes occidental y sur del salar. El dominio de las salmueras tipo sulfatadas era de esperarse, ya que la zona de estudio está comprendida en una cuenca volcano-sedimentaria, la cual incide en la química de las aguas durante la circulación. La presencia de salmueras tipo carbonatadas en los márgenes occidental y sur del salar puede ser producto de la circulación de estas aguas por la extensa zona de carbonatos que domina la zona sur, lo que produciría redisolución de estos minerales.

Con respecto a las concentraciones de las muestras, estas presentan una fuerte tendencia de ir en aumento hacia la zona norte del salar, lo que otorga un nuevo antecedente que respalda la suposición de que en esa zona se encuentra el núcleo salino. Otro factor destacable es la concentración de sodio y potasio, también centrada en la zona norte, con relaciones (Na/Cl) muy cercanas a 1 en

casi todas las muestras, lo que indica un muy buen equilibrio entre estos iones, lo que da fuerza a la hipótesis propuesta por Risacher *et al.* (1999) y Troncoso *et al.* (2013) de que el enriquecimiento de estas dos especies es causado por disolución de halita, no obstante no se tienen evidencias de la posible ubicación y origen de este mineral. Acerca de la relación  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  esta posee valores menores a 1 en la mayoría de las muestras, lo que descarta la posibilidad de que exista enriquecimiento por disolución de yeso. Es discutible proponer que el origen del enriquecimiento de sodio y potasio sea por disolución de sales de algún salar antiguo debido a que también debiese existir además disolución de yeso, el cual si bien no es el más abundante en salares, también está presente entre la transición de la zona de carbonatos a la de cloruros.

Centrándonos en las concentraciones de litio, estas tienen una fuerte correlación con la concentración de TDS de las muestras, por ende, también tienen una correlación con el tipo de aguas muestreadas, siendo las muestras en lagunas las que presentaban los valores más altos de concentración de litio. Con respecto a la distribución espacial de las concentraciones, existe una gran tendencia de grandes concentraciones en las muestras del norte del Salar, lo que podría ser un nuevo antecedente que respaldaría la teoría de que el núcleo salino se encuentra en esa zona, no obstante, las muestras corresponden a aguas superficiales y no necesariamente los procesos de concentración se comportan de la misma forma en el subsuelo.

Comparando las concentraciones de litio con los demás elementos mayores, es notorio que presentan una proporcionalidad directa en la mayoría de los casos, debido a que el litio posee un comportamiento conservativo en los aportes de agua en la cuenca y a medida que ocurre evaporación se concentra en las lagunas internas del salar. En los casos comparativos con el calcio, el sodio y el cloruro, la relación es un tanto más difusa, no obstante, en general sigue siendo proporcionalmente directa. Para el calcio se tienen que 3 muestras (ULP-02, ULP-06 y ULP-08) se desvían de la tendencia a causa de altas concentraciones de calcio, posiblemente debido a redisoluciones de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en los márgenes del salar. En los casos del sodio y cloruro la proporcionalidad directa es clara hasta un límite donde se estabiliza las concentraciones de sodio y cloruro, causado posiblemente por la precipitación de halita ( $\text{NaCl}$ ).

Acerca de los análisis de elementos minoritarios y trazas, se puede notar una gran correlación en los patrones de concentración tanto de las muestras propias de este estudio, con las de Troncoso *et al.* (2013). En general se tiene la tendencia de altas concentraciones de boro en muestras altamente concentradas y ubicadas en la zona norte del salar, junto con pequeños peaks de metales como cobre, hierro y molibdeno. La presencia de pequeñas concentraciones de metales dentro del salar puede ser producto de la lixiviación de rocas volcánicas durante la circulación de los aportes del salar.

Por último, los análisis isotópicos de deuterio y  $^{18}\text{O}$  de las muestras al contrastarlos con la línea meteórica mundial y los procesos fraccionadores de Soler *et al.* (2015), se pudo identificar que las aguas muestreadas han experimentado solo evaporación a partir de cuerpos de aguas superficiales, resultado esperable dentro de una cuenca endorreica con un clima árido y por el tipo de aguas muestreadas (lagunas y manantiales). No se identificó ningún otro

proceso fraccionador de deuterio y  $^{18}\text{O}$  en las muestras obtenidas posiblemente debido a que la alta intensidad de la evaporación se sobre impuso a algún otro posible proceso fraccionador. Acerca de los análisis de  $\delta^{34}\text{S}$  se pudo identificar que la fuente de estaría relacionada con rocas ígneas, sulfuros en rocas volcánicas o evaporitas continentales, estos resultados concuerdan con el ambiente circundante al salar, el cual está compuesto principalmente por unidades volcánicas, además la proveniencia de evaporita continentales concuerda con la posible presencia de salares antiguos propuesta por Risacher *et al.* (1999) y Troncoso *et al.* (2016).

## 6.6 Identificación de humedales y generación de zonas de protección

Para la realización de este trabajo el análisis de imágenes satelitales otorgó resultados satisfactorios en el reconocimiento y delimitación de grandes humedales. Tener un mapeo previo de zonas con vegetación permitió tener un terreno más eficiente, ya que en conjunto con las observaciones realizadas se pudo obtener una buena delimitación, integrando aquellas zonas con humedales pequeños donde la resolución de las imágenes no pudo mostrar del todo bien. Los trabajos de teledetección para zonas de difícil acceso como lo es el altiplano-puna del norte de Chile son una herramienta sumamente útil ya que otorgan buenos resultados sin la necesidad de un terreno.

El área de protección propuesta se puede considerar como una medida insuficiente para la protección de los ecosistemas que se desarrollan en los humedales debido a que se desconoce como estos varían en tamaño durante las diversas estaciones del año, además no se tiene antecedentes de como interactúan las aguas del humedal en profundidad con las aguas más concentradas del salar. La falta de información mencionada se puede obtener en exploraciones futuras, no obstante, se debe tener siempre presente la conservación de estos ecosistemas

## 6.7 Potencial de litio del Salar de Las Parinas

La evaluación del potencial del litio del Salar de Las Parinas expuesta en este trabajo corresponde a un conjunto de estimaciones de los tres factores fundamentales para la cuantificación de recursos de litio expuesta en el estudio de Houston *et al.* (2011). Estos factores corresponden al volumen del salar, la porosidad eficaz (*specific yield, S<sub>v</sub>*) y la concentración de litio en la salmuera. La razón por la cual esta evaluación solo tiene el alcance de una estimación es debido a la falta de información concreta de estos factores mencionados.

En la estimación del volumen del salar se consideró arbitrariamente que existía una correlación entre la morfología del salar en profundidad, con las pendientes de las laderas adyacentes a este mismo, asumiendo además de que no existieron episodios de deformación del fondo de la cuenca posterior a su cierre. Estas consideraciones son bastante debatibles debido a la existencia de unidades volcánicas adyacentes al salar, como son las Ignimbritas Pajonales, Salar Grande y Las Parinas, que pudieron haber sufrido abombamientos posteriores a su emplazamiento producto de domos resurgentes. Por otro lado, las hipótesis obtenidas de los estudios geológicos e hidroquímicos del salar podrían respaldar las consideraciones propuestas para la estimación del volumen, ya que partir de la distribución de las concentraciones de las muestras de agua y de las zonas minerales propuestas, mencionan la posibilidad de que

la morfología del salar tenga una forma elipsoidal, con lo que la estimación del volumen no estaría del todo errónea.

Acerca de la estructura interna propuesta del salar, esta corresponde a una generalización del caso debido al desconocimiento de la evolución climática local de la zona, que impidió realizar suposiciones acerca de posibles periodos más húmedos que pudieron haber permitido el transporte de sedimentos dentro del salar, generando intercalaciones de unidades clásticas y evaporíticas típicas en salares inmaduros.

Sobre la estimación de la porosidad eficaz ( $S_V$ ) de las unidades estratigráficas del salar existe una gran incertidumbre debido a que los valores utilizados son datos comparados con otros proyectos similares y datos bibliográficos (Health, 1983 y Morris and Johnson, 1967). A partir de esto es intuitivo pensar que los valores utilizados no se asemejan al real comportamiento hidráulico del salar, esto debido a que, analizando los datos recopilados de proyectos similares en los salares de Olaroz, Salinas Grande, Maricunga y Llamara, estos no presentaban los mismos valores para unidades estratigráficas similares, esto sucede de la misma manera con los datos de los estudios de Health (1983) y Morris and Johnson (1967).

En la estimación de las concentraciones de litio del salar, se utilizaron las concentraciones de las muestras superficiales para el modelamiento, asumiendo que los procesos de concentración de litio en profundidad son similares a los superficiales. Las consideraciones anteriores son debatibles debido a que se desconoce la ubicación exacta del núcleo salino, en el cual las concentraciones tienden a aumentar, por lo tanto, existe un rango de variabilidad de las concentraciones que no fue considerado en la estimación. Por otro lado, analizando los valores medios asociados a las zonas de concentración de litio propuestas, estos se asemejan bastante al comportamiento de la concentración de litio entre las profundidades de 0 a 150 metros de los proyectos en los salares Salinas Grande y Maricunga (Hains & Reidel, 2011 y Brooker, 2013), por lo que existe cierto respaldo a la estimación propuesta.

Para la integración de los tres factores fundamentales de la estimación del potencial de litio, al tener rangos de valores posibles en vez de datos concretos en las tres variables, se procedió a realizar múltiples escenarios con diversos valores para analizar la variabilidad del tonelaje de litio. Al analizar los valores obtenidos, estos varían entre 77.774,0420 a 201.295,9699 toneladas de litio con un promedio total de todas las estimaciones que bordea las 120.000 toneladas. La gran variabilidad de los resultados es producto de los amplios rangos de valores de porosidad eficaz utilizados, por lo que se podría decir que este corresponde al factor que brinda mayor incertidumbre a la estimación, seguido por la estimación del volumen y estructura interna del salar, ya que las variaciones entre la cantidad de sales y materiales clásticos generan grandes diferencias debido a los diferentes comportamientos hidráulicos de esas unidades (particularmente su porosidad eficaz).

Suponiendo el caso de que las reservas inferidas en este trabajo se asemejan al promedio de todas las estimaciones realizadas, como se dijo anteriormente, estas corresponderían alrededor de las 120 mil toneladas de litio

lo cual es interesante analizar para la situación actual de la explotación de litio en Chile. Como se mencionó en el marco teórico, según estudios del USGS, Chile es uno de los mayores productores de litio en el mundo con alrededor de 12.000 toneladas en el año 2016 (Mineral commodity Summaries 2017, USGS). Asumiendo el caso de una posible futura explotación de litio del Salar de las Parinas, bajo la misma eficiencia de extracción del Salar de Atacama, la vida útil del proyecto rondaría los 10 años aproximadamente.

Bajo los supuestos anteriores, el periodo de un posible proyecto en el salar es bastante acotado, sumado a que los recursos inferidos son muy menores a proyectos de gran minería como los realizados en el Salar de Atacama (reservas de 7 millones de toneladas de litio según Mineral commodity Summaries 2017, USGS), una posible explotación del Salar de Las Parinas se consideraría un proyecto de pequeña a mediana minería, no obstante la cercanía con varios salares en la misma zona, con potenciales de litio similares al caso de estudio, generan la posibilidad de realizar proyectos de explotación en varios de estos salares en forma simultánea, lo cual convierte a esta zona del altiplano en un lugar atractivo para proyectos de explotación de litio.

## 7. Conclusiones

Los análisis hidrográficos de la cuenca del Salar de las Parinas se llevaron a cabo en base a modelos de elevación (DEM) del satélite ALOS PALSAR, obtenidos de los servidores de la NASA. Se obtuvo una cuenca de 594 km<sup>2</sup> de área con una superficie del salar de 40 km<sup>2</sup> lo cual es muy similar a estudios anteriores (DICTUC, 2009). Si bien los resultados obtenidos fueron buenos para los alcances de este estudio, se destaca que la implementación de mejores modelos de elevación (DEM), con mayor calidad y resolución disminuirían el rango de incertidumbre a la hora de construir redes de drenaje en terrenos donde el relieve es tan suavizado como el de la cuenca de estudio.

El análisis de la geología de la cuenca se abordó como una recopilación de estudios anteriores debido a que se descartó el realizar un trabajo de detalle de la cuenca debido al acotado tiempo en terreno y a la gran extensión de la zona de estudio. Las unidades geológicas presentes en la zona de estudio, según Naranjo *et al.* (2013), en su gran mayoría corresponden a rocas volcánicas andesíticas pertenecientes a grandes estratovolcanes del Mioceno Medio a Superior que limitan la cuenca por el norte y el Oeste, Ignimbritas con edades entre el Mioceno Medio a Superior limitan los márgenes oeste y sur ( Ignimbrita Pajonales, Salar Grande y Las Parinas), y por el lado este aflora basamento Paleozoico, representado por la Formación la Tabla y Los Granitos Parinas y León Muerto. Sobre las estructuras presentes se destaca la presencia de un sistema de fallas ubicado en la zona norte del salar, conformado por diversas fallas inversas de orientación N-S y NNW.

Sobre la geología de detalle expuesta del salar corresponde a la comparación entre lo observado en terreno, con el modelo de zonación química expuesto por Hardie y Eugster (1970) donde se menciona que, en aguas evaporadas, los minerales precipitan según un orden ascendente de solubilidades, originando un horizonte exterior de carbonatos que varía a sulfatos y cloruros hacia el centro de los salares. Estos horizontes fueron encontrados con una disposición elíptica centrada al norte del salar, en donde predominan los cloruros, dicha disposición posiblemente esté relacionada con la forma del basamento del salar, el cual se estima que posee una forma cóncava. A partir de la disposición de las zonas minerales se estima que el núcleo salino se encuentra en la zona norte del salar, dejando las zonas periféricas de menor concentración al sur, donde posiblemente ocurra la mayor parte de la recarga debido a la conexión directa con los depósitos aluviales/coluviales de la zona.

En el análisis hidrológico de la cuenca se considera a las precipitaciones como el principal aporte a la recarga del salar, las cuales mayoritariamente ocurren de forma sólida (nieve) en los meses de junio a agosto y en forma líquida en los meses de enero y febrero en el denominado “invierno boliviano”. Las precipitaciones llegan al salar mediante infiltraciones en los depósitos aluviales/coluviales, los esporádicos escurrimientos superficiales ocurren en las múltiples unidades volcánicas de la zona y su mayoría termina infiltrándose en los depósitos aluviales/coluviales. Por otro lado, la descarga de la cuenca principalmente se le atribuye a la evaporación, aunque no se descarta la posibilidad de una interconexión por el norte de la cuenca, a causa de un sistema de fallas NNW que conecta con la cuenca del Salar de la Isla. Los resultados del balance hídrico revelan que tanto la recarga como la descarga de la cuenca se

encuentran en equilibrio, evidenciando un estatus hídrico estable, susceptible a posibles extracciones en proyectos de explotación de litio, no obstante, es importante mencionar que este resultado puede no estar del todo correcto ante una eventual interconexión con el salar de La Isla como se mencionó anteriormente.

El análisis hidrogeológico de la cuenca del Salar de las Parinas se abordó con un carácter cualitativo, clasificando según su potencial hidrogeológico y estimando coeficientes hidráulicos a las unidades presentes según material bibliográfico recopilado. A partir de la clasificación hidrogeológica de las unidades volcánicas y de los depósitos sedimentarios, se destaca la gran importancia hidrogeológica de los depósitos aluviales/coluviales, los cuales son el principal captador de precipitaciones mediante la infiltración del agua en ellos. Por su parte el resto de las unidades volcánicas presentan bajos potenciales hidrogeológicos debido a que su comportamiento hidráulico está relacionado solo con el fracturamiento primario de estas rocas, no obstante, se clasificaron con un mejor potencial hidrogeológico aquellas unidades afectadas por el sistema de fallas ubicado al norte del salar. Las unidades hidrogeológicas más relevantes respecto a su potencial de litio corresponden al menos en superficie a los depósitos salinos de la cuenca, por otro lado, para aquellas unidades que se encuentran subyaciendo a estos depósitos se espera confirmar su potencial con estudios adicionales.

Los estudios hidroquímicos por su parte, dieron como resultado de que las aguas superficiales del salar son de composición clorurada sódica, con una fuerte tendencia de altas salinidades en la zona norte del salar. Los valores cercanos a 1 de la relación Na/Cl apoya la hipótesis de autores anteriores (Risacher *et al.*, 1999 y Troncoso *et al.*, 2013) de que el enriquecimiento de sodio y potasio es producto de disolución de halita proveniente de un salar antiguo cubierto por formaciones posteriores. Por otro lado, los bajos valores de la relación de Ca/SO<sub>4</sub> descartan la posibilidad de enriquecimiento producto de disolución de yeso.

Las mayores concentraciones de litio tienen una fuerte tendencia a ubicarse en la zona norte del salar, en muestras con altas concentraciones de TDS, en las que se destacan los altos niveles de potasio y de boro. El comportamiento del litio en comparación a lo demás elementos mayores en las muestras obtenidas es directamente proporcional en la mayoría de los casos, esto a causa del carácter conservativo del litio. La ubicación predominante en la zona de cloruros de muestras con altas salinidades y altas concentraciones de litio dan fuerza a la teoría de que el núcleo salino se ubica en la zona norte del salar, no obstante, se requieren de muchos más antecedentes para poder afirmar esta suposición.

Los análisis isotópicos de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  indicaron que todas las muestras poseen un fraccionamiento isotópico debido a evaporación a partir de cuerpos de agua superficial, resultado esperable para muestras superficiales dentro de una cuenca endorreica con clima árido. Comparando los análisis de  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  con respecto a la altura de las muestras, en ambos casos ocurre un enriquecimiento de isótopos pesados a medida que disminuye la elevación (msnm), resultado causado nuevamente por la evaporación. Por otro lado, los resultados isotópicos de  $\delta^{34}S$  indicaron que la fuente de los sulfatos estaría

relacionada a rocas ígneas, sulfuros en roca volcánicas o evaporitas continentales. Dado a que no se tiene datos isotópicos de  $^{18}\text{O}$  en la molécula de sulfato no se puede acotar más la proveniencia, no obstante, las tres posibilidades de proveniencia del sulfato concuerdan tanto con el ambiente volcánico predominante en la cuenca, como con la hipótesis de Risacher *et al.* (1999) y Troncoso *et al.* (2016) acerca de la existencia de salares antiguos cubiertos por formaciones más recientes.

Acerca de los humedales ubicados en la periferia del salar, los análisis de imágenes satelitales Landsat 8 y Rapid Eye fueron bastante acertados para la ubicación y delimitación de grandes humedales previo a la realización del terreno. Junto con los datos recopilados del terreno se complementó los resultados obtenidos con puntos de observación para la delimitación de zonas de humedales más pequeños. Se destaca que los humedales forman parte de ecosistemas sumamente ricos en especies tanto de flora como de fauna, muchas de estas en situación vulnerable o en peligro de extinción. La zona de protección propuesta en el presente estudio sirve como medida protección para los ecosistemas que se desarrollan en los humedales, no obstante, se desconoce su variabilidad en tamaño durante las distintas estaciones del año, por lo tanto, es una medida de protección incompleta.

Finalmente, el potencial de litio propuesto para el Salar de Las Parinas corresponde a un recurso inferido, debido a que en su cálculo se utilizaron múltiples estimaciones para parametrizar la cantidad del recurso de interés. Los resultados obtenidos, como era esperado, poseen un gran rango de variabilidad yendo desde los 77.774 a 201.296 toneladas de litio, donde las estimaciones con menor tonelaje corresponden a las realizadas bajo un modelo estructural del salar propuesto, y las estimaciones con tonelajes más altos corresponden a aquellas con donde se consideró una estructura homogénea del Salar. Los valores promedio de todas las estimaciones rondan las 120 mil toneladas de litio, lo que le otorgaría el carácter de proyecto de mediana minería en comparación a otros proyectos de mayor envergadura (SQM en Salar de Atacama). No obstante, la oportunidad que brinda la cercanía de este salar con otros salares vecinos con potenciales de litio similares, otorga la posibilidad de generar proyectos de extracción de litio de manera simultánea en varios de estos, como ejemplo de la idea anterior se propone un clúster de explotación simultánea en el salar de estudio junto con el salar Grande y el Salar de la Isla, los cuales se estima que tienen potenciales similares o mayores al salar de Las Parinas.

Cabe mencionar que las estimaciones del potencial de litio presentadas son una aproximación de primer orden a la cuantificación de recursos de litio presentes en el salar estudiado. Con la implementación de datos concretos sobre la concentración de litio en profundidad (muestreo de salmueras en perforaciones), datos geofísicos (estudios gravimétricos, perfiles sísmicos y TEM) y estratigráficos para modelar el tamaño y estructura del salar y ensayos de capacidades hidráulicas para el cálculo de la porosidad eficaz, podrían generar cambios notables en la estimación del potencial, volviéndola mucho más precisa.

## 8. Recomendaciones

En vista de todo lo expuesto en este trabajo, para futuros proyectos se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Para los trabajos hidrográficos como lo son la delimitación de la cuenca hidrográfica se sugiere trabajar con modelos de elevación digital de mayor calidad (con tamaño de pixeles menores a 12,5 metros), los cuales además estén corregidos con puntos tomados en terreno utilizando un GPS diferencial. La ventaja de trabajar con un modelo de mayor calidad radica en que aumenta la calidad de la delimitación de la cuenca hidrográfica, la cual es la base para el análisis hidrológico e hidrogeológico de la cuenca.
- Acerca de la geología de la cuenca de estudio, se recomienda realizar un mapeo de detalle de la zona de la cuenca de estudio, a modo de caracterizar de una mejor manera las unidades geológicas presentes, con énfasis en las unidades ubicadas en la zona oriental de la cuenca, ya que tener información sobre el grado de fracturamiento de las rocas volcánicas o la extensión de los depósitos aluviales/coluviales serían una buena base para futuros estudios hidrogeológicos.
- En los análisis hidrológicos del presente estudio se tuvo la dificultad de que en la cuenca del Salar de las Parinas no existen estaciones meteorológicas, más aún en toda la zona del altiplano-puna del norte de Chile existe una insuficiencia de datos hidrológicos a causa de las pocas estaciones existentes, por lo tanto, es esperable sugerir que para futuros proyectos se implementen más estaciones a modo de tener datos más cercanos a la zona de estudio. Con la presencia de estaciones en la zona de estudio se propone estudiar con mayor detalle el comportamiento de la recarga y evaporación de las aguas del salar tanto en invierno como en verano, analizar sus variaciones y correlaciones con los fenómenos climáticos de mayor escala como lo son el niño y la niña.
- Para el estudio particular del subsuelo del salar, se sugiere la utilización de métodos de exploración geofísica, en particular el método del Trásiente Electromagnético (TEM), el cual es comúnmente usado para la delimitación de geométrica de acuíferos y estimación de otras características como salinidad y posición de nivel saturado. Para el caso particular del salar sería de gran ayuda para la delimitación de acuíferos en la cuenca, además la caracterización de tanto de la salinidad como de la permeabilidad en la zona del salar podría entregar información concreta de la ubicación y dimensión del núcleo salino.
- Para estudiar las estructuras presentes al noroeste de la cuenca se propone la utilización de métodos sísmicos de prospección geofísica. Con estos métodos se podría analizar el comportamiento y la disposición espacial de las fallas en profundidad y como estas afectan la morfología de la base del salar. El estudio de esta zona de falla podría otorgar mayores antecedentes para investigar una posible interconexión de aguas subterráneas con la cuenca del Salar de la Isla.

- Como método de exploración directa se sugiere realizar perforaciones en diversos puntos del salar con el fin de poder realizar análisis estratigráficos del salar e hidroquímica de las salmueras en profundidad. Se sugiere dar énfasis en la zona norte del salar para el muestreo de salmueras ya que en esta zona se estima que se encuentra el núcleo salino, no obstante, la planificación de perforaciones debe ser programada considerando los resultados de los estudios geofísicos previos. También se sugiere realizar perforaciones en las cercanías de los bordes del salar, esto con el fin de analizar la estratigrafía y la interconexión de las aguas subterráneas del salar con los humedales periféricos, lo cuales albergan ecosistemas sumamente frágiles frente a cualquier tipo de intervención antrópica.

## Bibliografía

- Amphos 21. (2016). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas altoandinas de la región de Atacama, Fase 3. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas*.
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe-Hydrogeologie. (1997). Hydrogeologische Kartieranleitung, Geologisches Jahrbuch Reihe G. Band G 2, 157 p. Hannover.
- Allmendinger, W., Jordan, T., Kay, S., & Isacks, B. (1997). The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Annual Review Earth Planet Science*, Vol 25, p. 139-174.
- Alpers, C., & Brimhall, G. (1988). Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: Evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geological Society of America Bulletin*, 100(10), p. 1640-1656.
- Aquaterra Ingenieros Limitada. (2013). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas altoandinas de la región de Atacama. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección general de Aguas*.
- Arcadis. (2015). Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas altoandinas de la región de Atacama, Fase 2. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas*.
- Bobst, A., Lowenstein, T., Jordan, T., Godfrey, L., Ku, T., & Luo, S. (2001). A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile: Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology. v. 173, p. 21-42.
- Bookhagen, B., & Strecker, M. (2008). Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes. *Geophysical Research Letters*, 35(6), pp.1-6.
- Brian, R., & Ian, H. (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. *Salares de Atacama Sociedad Contractual Minera (SCM)*.
- Brooker, M. (2013). Technical Report on the Salinas Grandes lithium project, Salta province, Argentina. *Orocobre Limited*.
- Carpenter, T. (30 de septiembre de 2013). *Technical report on the salares 7 property Region III, Chile. 83p. Calgary, Canada (online)*. Obtenido de [http://www.salareslithium.com/i/pdf/reports/salares\\_7\\_43101.pdf](http://www.salareslithium.com/i/pdf/reports/salares_7_43101.pdf)
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. *The Geology of Chile. Geological Society of London*, pp. 21-114.

- Chernicoff, C., Richards, J., & Zappettini, E. (2002). Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews*, Vol. 21, p. 127-155.
- Chernicoff, C., Richards, J., & Zappettini, E. O. (2002). Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: geological, geophysical and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews*, °21(3), 127-155.
- Chong, G. (1984). Die Salare Nordchile-Geologie, Struktur und Geochemie. *Geotektonische Forschungen*, Vol.67, p-146.
- Claypool, G. H. (1980). The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*, 28,199-260.
- Cochilco. (2009). Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio. Santiago. *Cochilco*.
- Cochilco. (2012). Mercado internacional del litio. Santiago. *Cochilco*.
- Cochilco. (2013). Mercado internacional del Litio. Santiago. *Cochilco*.
- Cochilco. (2013). Monitoreo de los minerales industriales de Chile, análisis de los recursos salinos 2013. Santiago. *Cochilco*.
- Cochilco. (2014). La explotación del litio en Chile en el contexto del mercado internacional. Santiago. *Cochilco*.
- Cochilco. (2014). Mercado internacional del litio y la posición competitiva de Chile. 1° Sesión Comisión del litio.
- Cochilco. (2015). Litio: Una fuente de energía, una oportunidad para Chile. Santiago. *Cochilco, Ministerio de Minería*.
- Como funciona Dirección de Flujo: ArcGIS Desktop website. (5 de Diciembre de 2017). Obtenido de ArcGIS Desktop website: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-direction-works.htm>
- Como funciona Fill: ArcGIS Desktop website. (5 de Diciembre de 2017). Obtenido de ArcGIS Desktop website: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fill-works.htm>
- Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas*.
- Dirección General de Aguas (DGA). (1986). Mapa Hidrogeológico de Chile. *Dirección General de Aguas (DGA) - Ministerio de Obras Públicas (MOP)*.

- Ercilla, H., & Carrasco, O. (2012). Estudio bibliográfico sobre los salares del Norte Grande, Chile: Informe de cumplimiento. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, 97 p.
- Ericksen, G., & Salas, R. (1989). Geology and resources of salars in the Central Andes, in: Ericksen, G.E et al eds. *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series*, v.11, pp.151-172.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). Groundwater. *Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall*, 604 p.
- García, A., & Floreal. (1967). Geología del Norte Grande de Chile, Santiago. *ENAP*.
- García, D. C., & Pinto, V. S. (2017). Isótopos en la Prehistoria y Arqueología valencianas. *Research Gate*.
- Garreaud, R., Molina, A., & Farias, M. (2010). Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 292 (1-2), pp.39-50.
- Gibert, R., Taberner, C., Sáez, A., Giralt, S., Alonso, R., Edwards, R., & Pueyo, J. (2009). Igneous origin of CO<sub>2</sub> in ancient and recent hot spring waters and travertines from the northern Argentinean Andes. *Journal of Sedimentary Research*, v. 79, p. 554–567.
- Hains, D., & Reidel, F. (2011). Technical Report on the Maricunga Lithium Project Region III, Chile. *Li3 Energy*.
- Hardie, L., & Eugster, H. (1970). The evolution of closed-basin brines. *Mineralogical Society of America Special Paper 3*, p. 273-290.
- Heath, R. C. (1983). *Basic Ground-Water Hydrology*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86p.
- Houston, J. (2006). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatiotemporal variations and their causes. *Journal of Hydrology*, 330, pp. 402-412.
- Houston, J., & Gunn, M. (2011). Technical report on the salar de Olaroz lithium-potash project Jujuy Province, Argentina. *Orocobre limited*, 305p.
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., & Godfrey, L. (2011). The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standars. *Economic Geology*, v. 106, pp. 1225-1239.
- Jenson, S. K. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, °54 (11): 1593-1600.
- Jenson, S., & Domingue, J. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, °54(11): 1593-1600.

- Kay, S., Coira, B., Wörner, G., Kay, R., & Singer, B. (2010). Geochemical, isotopic and single crystal  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age constraints on the evolution of the Cerro Galán ignimbrites. *Bulletin of Volcanology*, doi: 10.1007/s00445-010-0410-7.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol, Z* 3: 259-263.
- Lowenstein, T., & Risacher, F. (2009). Closed basin brine evolution and the influence of Ca-Cl inflow waters: Death Valley and Bristol Dry Lake, California, Qaidam Basin, China, and Salar de Atacama, Chile. *Aquatic Geochemistry*, v. 15, p. 71–94.
- Morris, D., & Johnson, A. (1967). *Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hidrologic laboratory of the U.S. Geological Survey*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1839, 42p.
- Mortimer, C. (2013). Exploración Potencial and Mineral Resource Estimate for Potash Dragon Inc, 's Llamara Project, Salar de Llamara, Northern Chile. *Potash Dragon Inc*.
- Moscoso, C. (2003). "Estudio económico-jurídico sobre una eventual liberalización de la explotación y comercialización del Litio". Informe Final. *Consultoría al Ministerio de Minería. Departamento de Ingeniería en minas. Universidad de Chile. Santiago*.
- Naranjo S, J. A., Villa C, V., & Venegas B, C. (2013). Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, región de Atacama, escala 1:100.000. *SERNAGEOMIN*.
- Naranjo, J. C. (1992). Hoja salar de la Isla. Carta Geológica de Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Mapa 1:250000.
- Naranjo, J., & Paskoff, R. (1985). Evolucion cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, Norte de Chie (18°-21°S). *In Congreso Geologico Chileno*, Vol. 4, p. 149-165.
- Orti, F., & Alonso, R. (2000). Gypsum-hydroboracite association in the Sijes Formation (Miocene, NW Argentina): Implications for the genesis of Mg-bearing borates. *Journal of Sedimentary Research*, v. 70, p. 664–681.
- Pimentel, S. (1998). Monografía: El Litio. *Serie Monografías de Recursos Mineros no Metálicos. Comisión Chilena del Cobre. Santiago*.
- Piper, A. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25, 914-923.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II y III regiones- Chile. *Convenio de Cooperacion DGA-UCN-IRD*, Volumen I-IV.

- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (2003). The origin of brines and salts in Chilean salars a hydrochemical review. *Earth- Science Reviews*, 63, pp. 249-293.
- Santibañez, I. (2000). Guía metodológica para la elaboración de mapas hidrogeológicos. Informe inédito. *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)*. Santiago, 14 p.
- Stiff, H. (1951). The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns. *Journal of Petroleum Technology*, v.3 n°10, section 1: p.15-16.
- Stoertz, G., & Ericksen, G. (1974). Geology of salars in northern Chile. *U.S Geological Survey Professional Paper*, 811. 65pp.
- Struckmeier, W., & Margat, J. (1995). Hydrogeological maps. A guide and a standard legend. . *International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology*, vol 17, 177 p. Heise, Hannover.
- Troncoso V., R., Ercilla H., O., Carrasco O., R., & Vivallo S., W. (2013). Estudio del Potencial de litio en salares del nortes de Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)*.
- Troncoso, R., & 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 (SERNAGEOMIN)*.
- U.S. Geological Survey. (January 2017). Mineral Commodity Summaries.
- Yaksic, A. (2008). "Análisis de la disponibilidad del Litio en el largo plazo". *Tesis para obtener grado de Magíster en Ingeniería. Escuela de Ingeniería. Universidad Católica de Chile. Santiago*.

## Anexo

### Anexo A. Muestras solidas de costra salina

#### Anexo A-1. Fichas descriptivas de muestras de costra salina

Tabla descriptiva de muestras de costra salina		
Código de muestra		ULP-COST-01
Coordenadas	Datum / cuadrante	WGS-84 / 19 S
	UTM Norte	549454
	UTM Este	7146603
	Altura (m.s.n.m)	3963
Fecha de muestreo		09/01/2018
Hora de muestreo		14:55
Imagen de la muestra		
		
Observaciones		
Reacciona con HCl	No	
Descripción	<p>Se observa halita masiva de color blanco, presenta crecimiento globular y fibroso. Posee zonas color marrón que corresponden a pequeñas intercalaciones de sedimentos clásticos, tamaño arena recubiertos por sales. Se le asocia cierto grado de porosidad asociada a la presencia de dichos sedimentos.</p>	

Tabla descriptiva de muestras de costra salina		
<b>Código de muestra</b>	ULP-COST-02	
<b>Coordenadas</b>	<b>Datum / cuadrante</b>	WGS-84 / 19 S
	<b>UTM Norte</b>	547323
	<b>UTM Este</b>	7148783
	<b>Altura (m.s.n.m)</b>	3966
<b>Fecha de muestreo</b>	09/01/2018	
<b>Hora de muestreo</b>	15:08	
Imagen de la muestra		
		
Observaciones		
<b>Reacciona con HCl</b>	No	
<b>Descripción</b>	Se observa presencia de sales masivamente, predominantemente halita de color blanco y marrón. Presenta crecimiento globular de pequeña escala (< 0,5 cm) y escasamente crecimiento fibroso. Existe poca presencia de sedimentos clásticos.	

Tabla descriptiva de muestras de costra salina		
<b>Código de muestra</b>		ULP-COST-03
<b>Coordenadas</b>	<b>Datum / cuadrante</b>	WGS-84 / 19 S
	<b>UTM Norte</b>	548902
	<b>UTM Este</b>	7151213
	<b>Altura (m.s.n.m)</b>	3961
<b>Fecha de muestreo</b>		10/01/2018
<b>Hora de muestreo</b>		14:45
Imagen de la muestra		
		
Observaciones		
<b>Reacciona con HCl</b>	No	
<b>Descripción</b>	Se observa un conjunto de sales masivas de colores blanco y marrones, con presencia predominantemente de halita. Las sales presentan crecimiento globular y masivo muy poroso. Poca presencia de sedimentos clásticos intercalados. Alta dureza en comparación al resto de muestras	

Tabla descriptiva de muestras de costra salina		
<b>Código de muestra</b>		ULP-COST-04
<b>Coordenadas</b>	<b>Datum / cuadrante</b>	WGS-84 / 19 S
	<b>UTM Norte</b>	547430
	<b>UTM Este</b>	7148630
	<b>Altura (m.s.n.m)</b>	3964
<b>Fecha de muestreo</b>		11/01/2018
<b>Hora de muestreo</b>		15:10
Imagen de la muestra		
		
Observaciones		
<b>Reacciona con HCl</b>	No	
<b>Descripción</b>	<p>Se observa sales masivas, predominantemente halita de color blanco y rosado, con crecimiento globular y fibroso (escaso). Presenta pequeñas zonas marrones que corresponden a sedimentos clásticos tamaño arena fina. Se le puede asignar un buen grado de porosidad, la cual está asociada a los espacios entre los glóbulos de sal y a la porosidad de los sedimentos</p>	

## Anexo A-2. Resultados de análisis de difracción de rayos X de costras salinas

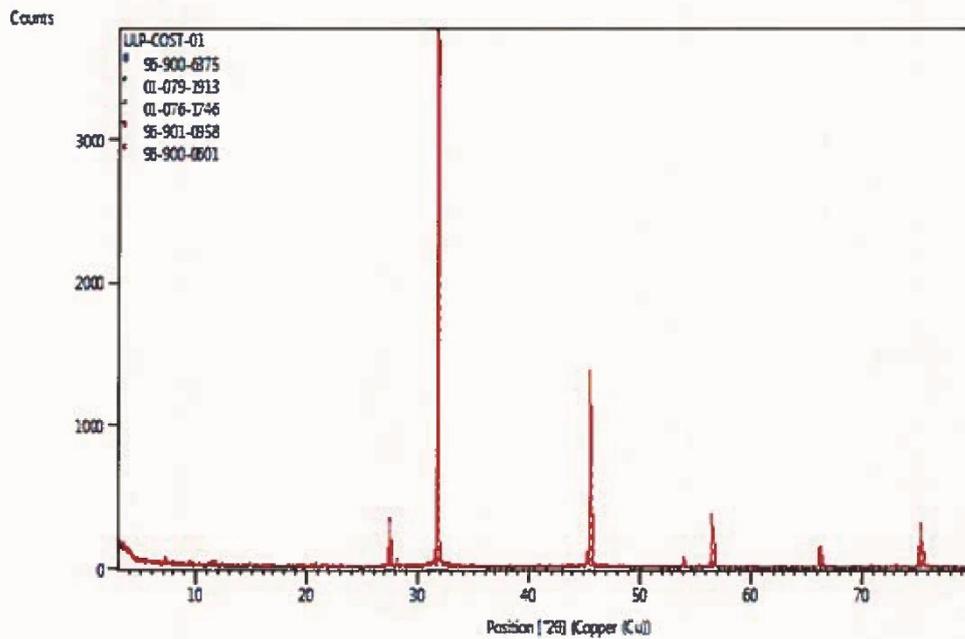
### Muestra ULP-COST-01

Tabla 22 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-01, Laboratorio SERNAGEOMIN

#### Anchor Scan Parameters

Dataset Name	ULP-COST-01
File name	C:\XRD Data\Arcillas\ULP-COST-01.xrdml
Sample Identification	ULP-COST-01
Comment	Configuration=SNGM_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001	
Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1	
Diffractometer system=XPERT-PRO	
Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}	
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={0010CE12-3D88-4B27-9965-55F90494AEAO}	
PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)	
Measurement Start Date/Time	02-06-2018 11:31:13
Operator	DRX
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2 $\theta$ ]	3.0042
End Position [°2 $\theta$ ]	79.9882
Step Size [°2 $\theta$ ]	0.0080
Scan Step Time [s]	24.8050
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2 $\theta$ ]	2.02
Offset [°2 $\theta$ ]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	40 mA, 45 kV
Diffractometer Type	000000000030722
Diffractometer Number	0
Gonimeter Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Tabla 23 Difractograma de muestra ULP-COST-01, Laboratorio SERNAGEOMIN



**Pattern List**

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	96-900-6375	68	Halite	0.000	0.323	Na4.00 Cl4.00
*	01-079-1913	8	Silicon Oxide	0.000	0.006	Si O2
*	01-076-1746	7	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.007	Ca S O4 ( H2 O )2
*	96-901-0958	7	Montmorillonite	0.000	0.002	Si7.80 Al1.72 Cs0.16 Fe0.20 Mg0.28 O20.00
*	96-900-0601	4	Ulexite	0.000	0.016	Ca2.00 Na2.00 B10.00 O34.00 H32.00

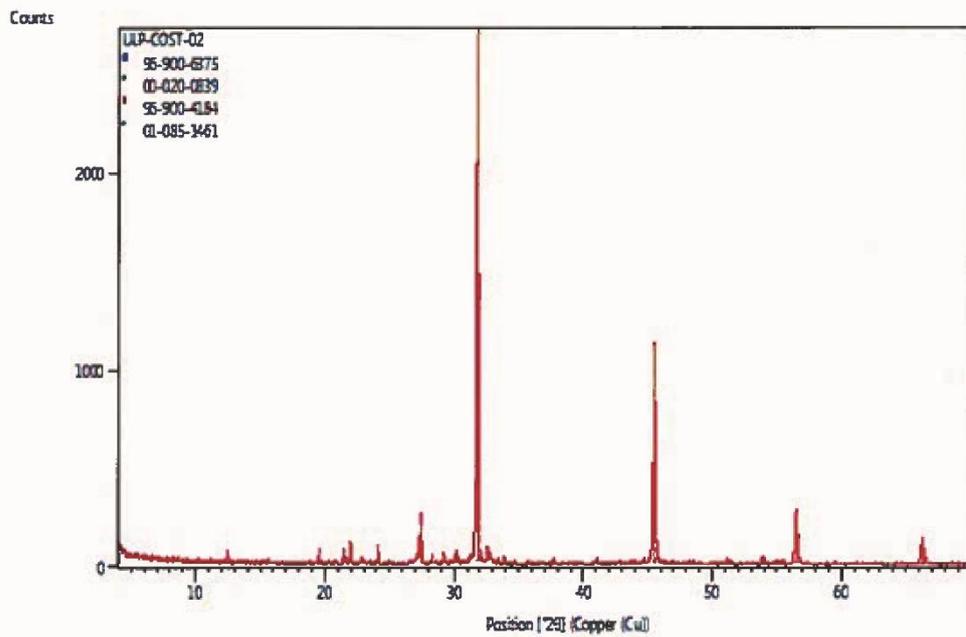
## Muestra ULP-COST-02

Tabla 24 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-02, Laboratorio SERNAGEOMIN

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name	ULP-COST-02
File name	C:\XRD Data\Arcillas\ULP-COST-02.xrdml
Sample Identification	ULP-COST-02
Comment	Configuration=SNGM_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001	
Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1	
Diffractometer system=XPERT-PRO	
Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={B0C588BA-5281-4DC0-BCF8-1F2B1C4DA5DD}	
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={C5B5346E-01A5-4DFD-9131-278B21CAF0A8}	
PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)	
Measurement Start Date/Time	02-05-2018 13:17:44
Operator	DRX
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2 $\theta$ ]	4.0032
End Position [°2 $\theta$ ]	69.9952
Step Size [°2 $\theta$ ]	0.0080
Scan Step Time [s]	24.8050
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2 $\theta$ ]	2.02
Offset [°2 $\theta$ ]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	40 mA, 45 kV
Diffractometer Type	000000000030722
Diffractometer Number	0
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Tabla 25 Difractograma de muestra ULP-COST-02, Laboratorio SERNAGEOMIN



Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	96-900-6375	55	Halite	0.000	0.644	Na <sub>4.00</sub> Cl <sub>4.00</sub>
*	00-020-0839	19	Potassium Magnesium Sulfate Hydrate	0.000	0.070	K <sub>2</sub> Mg ( S O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 16 H <sub>2</sub> O
*	96-900-4184	20	Blodite	0.000	0.041	Na <sub>4.00</sub> Mg <sub>2.00</sub> S <sub>4.00</sub> O <sub>24.00</sub> H <sub>16.00</sub>
*	01-085-1461	15	Sodium Nitrate	0.000	0.038	Na ( N O <sub>3</sub> )

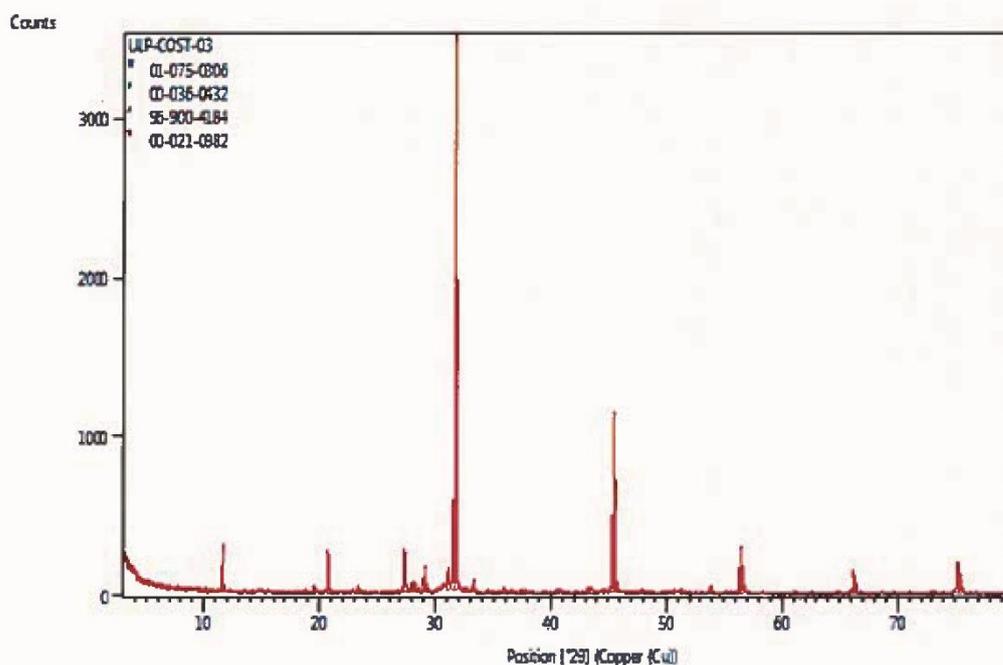
## Muestra ULP-COST-03

Tabla 26 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-03, Laboratorio SERNAGEOMIN

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name	ULP-COST-03
File name	C:\XRD Data\Arcillas\ULP-COST-03.xrdml
Sample Identification	ULP-COST-03
Comment	Configuration=SNMG_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001	
Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1	
Diffractometer system=XPERT-PRO	
Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={61B1E4A8-6DD4-4B32-83A9-F61426796818}	
Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={0010CE12-3D88-4B27-9965-55F90494AEAO}	
PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)	
Measurement Start Date/Time	02-06-2018 12:37:42
Operator	DRX
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2θ]	3.0042
End Position [°2θ]	79.9882
Step Size [°2θ]	0.0080
Scan Step Time [s]	24.8050
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2θ]	2.02
Offset [°2θ]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	40 mA, 45 kV
Diffractometer Type	000000000030722
Diffractometer Number	0
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Tabla 27 Difractograma de muestra ULP-COST-03, Laboratorio SERNAGEOMIN



**Pattern List**

Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-075-0306	62	Sodium Chloride	0.000	0.815	Na Cl
*	00-036-0432	46	Calcium Sulfate Hydrate	0.000	0.059	Ca S O4 ·12 H2 O
*	96-900-4184	12	Blodite	0.000	0.031	Na4.00 Mg2.00 S4.00 O24.00 H16.00
*	00-021-0982	14	Potassium Calcium Magnesium Sulfate Hydrate	0.000	0.016	K2 Ca2 Mg ( S O4 )4 ·12 H2 O

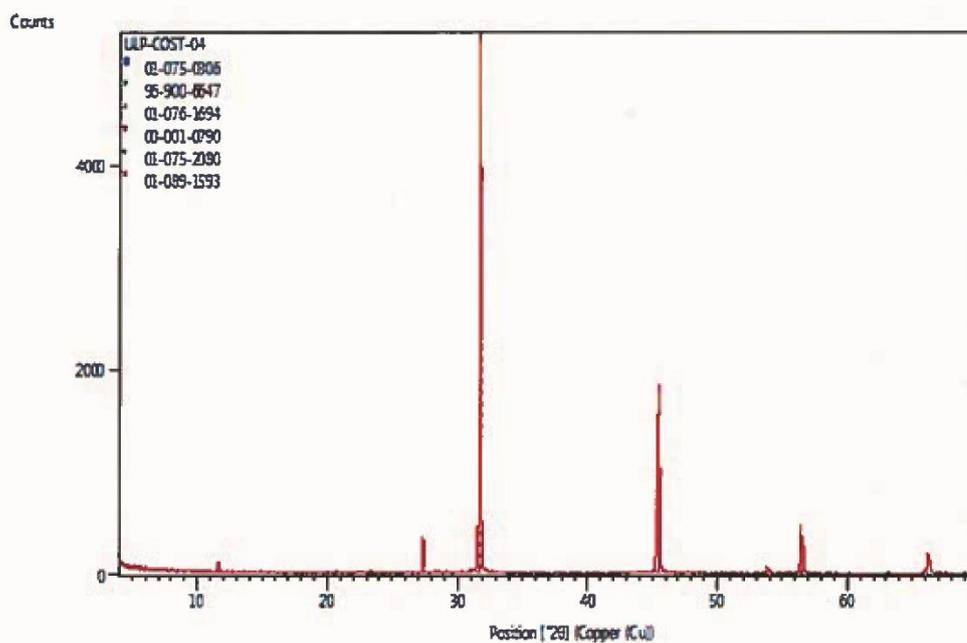
## Muestra ULP-COST-04

Tabla 28 Parámetros de escaneo para difracción de rayos X, Muestra ULP-COST-04, Laboratorio SERNAGEOMIN

### Anchor Scan Parameters

Dataset Name	ULP-COST-04
File name	C:\XRD Data\Arcillas\ULP-COST-04.xrdml
Sample Identification	ULP-COST-04
Comment	Configuration=SNMG_RT_SPINNER, Owner=User-1, Creation date=20-10-2016 12:17:22
	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
	Sample stage=Reflection-Transmission Spinner PW3064/60; Minimum step size Phi:0.1
	Diffractometer system=XPERT-PRO
	Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\ARCILLAS_RT_SPINNER.xrdmp, Identifier={B0C5B8BA-52B1-4DC0-BCF8-1F2B1C4DA5DD}
	Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\BATCH_SC.xrdmp, Identifier={C5B5346E-01A5-4DFD-9131-278B21CAF0A8}
	PHD Lower Level = 5.63 (keV), PHD Upper Level = 11.43 (keV)
Measurement Start Date/Time	02-05-2018 11:51:31
Operator	DRX
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2 $\theta$ ]	4.0032
End Position [°2 $\theta$ ]	69.9952
Step Size [°2 $\theta$ ]	0.0080
Scan Step Time [s]	24.8050
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2 $\theta$ ]	2.02
Offset [°2 $\theta$ ]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2177
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	25.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	40 mA, 45 kV
Diffractometer Type	000000000030722
Diffractometer Number	0
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	100.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Tabla 29 Difractograma de muestra ULP-COST-04, Laboratorio SERNAGEOMIN



Pattern List						
Visible	Ref.Code	Score	Compound Name	Displ.[°2θ]	Scale Fac.	Chem. Formula
*	01-075-0306	63	Sodium Chloride	0.000	0.681	Na Cl
*	96-900-6647	15	Gypsum (deuterated)	0.000	0.008	Ca8.00 S8.00 O24.00 D16.00
*	01-076-1694	8	Sodium Nitrate	0.000	0.003	Na N O3
*	00-001-0790	13	Potassium Chloride	0.000	0.003	K Cl
*	01-075-2080	5	Potassium Aluminum Sulfate Hydrate	0.000	0.009	K Al ( S O4 )2 ( H2 O )12
*	01-089-1593	2	Calcium Borate Hydroxide Hydrate	0.000	0.012	( Ca ( H2 O )3 ) ( B3 O3 ( O H )5 ) ( H2 O )

## Anexo B Hidrología de la cuenca del Salar de las Parinas

### Anexo B-1. Mapa de isoyetas de cuencas altoandinas de la Región de Atacama, Amphos 21, 2016.

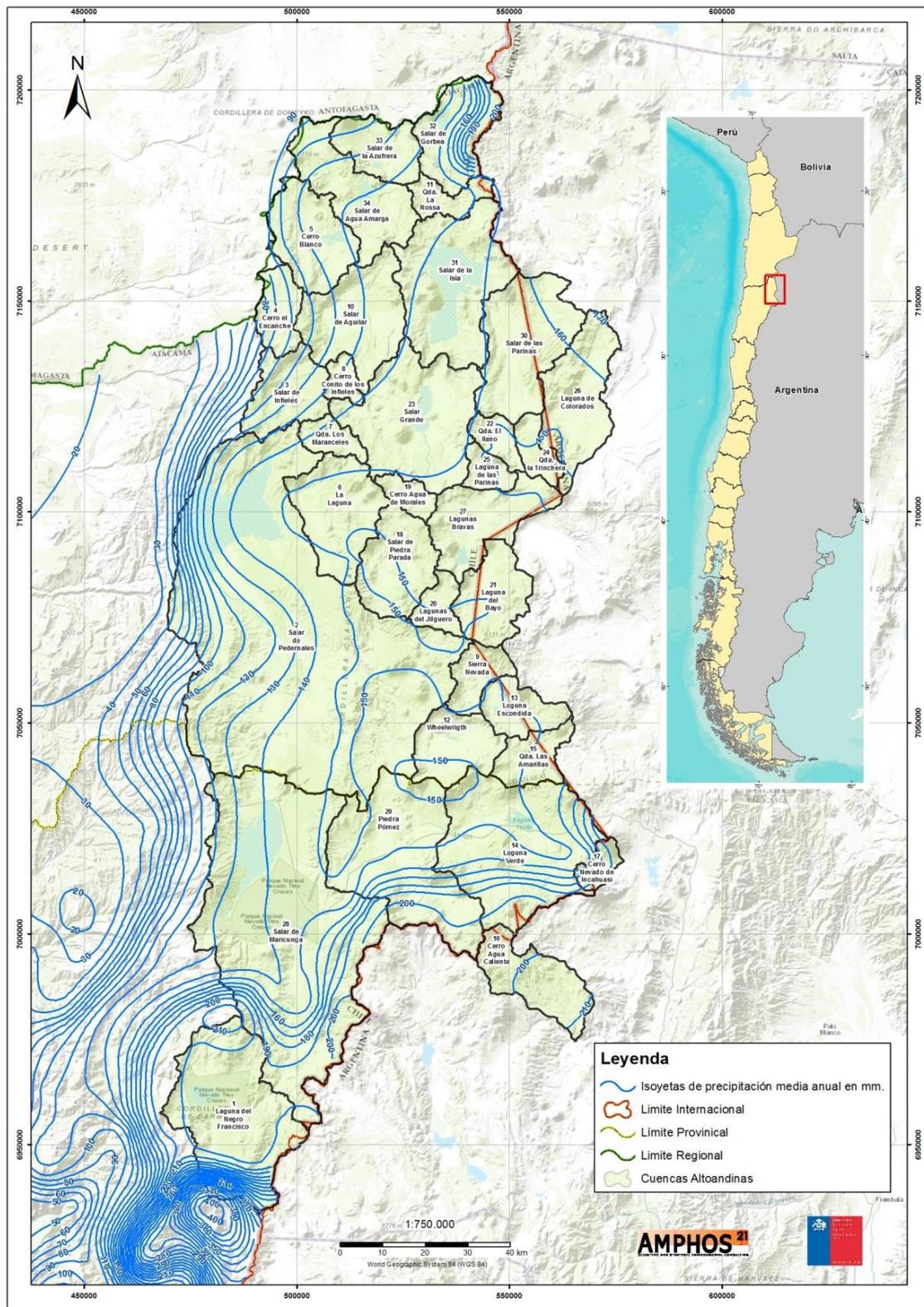


Figura 67 Mapa de isoyetas de las cuencas Altoandinas de la región de Atacama. Amphos 21, 2016

## Anexo B-2. Tabla de desarrollo de estimación de recarga de la cuenca del Salar de las Parinas

**Tabla 30. Resultados de la recarga directa y lateral de las unidades hidrogeológicas.**

Nombre de la formación	Unidades hidrogeológicas	Área (m <sup>2</sup> )	Coefficiente de infiltración	Recarga directa (l/s)	Recarga Lateral (l/s)	Recarga Total (l/s)
Ignimbritas Salar Grande	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	1627814	0,1	0,000	0,129	0,129
Volcanes del Mioceno Inferior a Medio	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	5526117	0,1	0,000	0,437	0,437
Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior	B- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en roca fisurada	276612	0,15	0,205	0,000	0,205
Volcanes del Mioceno Inferior	B- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en roca fisurada	13805018	0,15	10,252	0,000	10,252
Ignimbrita Pajonales	B- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en roca fisurada	18529803	0,15	13,761	0,000	13,761
Volcanes del Mioceno Inferior a Medio	B- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en roca fisurada	16125053	0,15	11,975	0,000	11,975
Ignimbrita Pajonales	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	11613229	0,1	0,000	0,918	0,918
Volcanes del Mioceno Medio a Superior	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	26286762	0,1	0,000	2,078	2,078
Depositos Avalancha Volcanica del Volcan Gemelos	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	30624774	0,12	0,000	2,905	2,905
Depositos Aluviales y Coluviales	A- Unidades de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados	139373704	0,25	172,510	0,000	172,510
Formacion La Tabla	D- Unidades de nula importancia hidrogeológica	25145506	0,05	0,000	0,994	0,994
Volcanes del Mioceno Inferior	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	91589748	0,1	0,000	7,241	7,241
Granito Parinas	D- Unidades de nula importancia hidrogeológica	892312	0,05	0,000	0,035	0,035
Gravas de Atacama	B- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados	24444110	0,22	26,625	0,000	26,625
Depositos Solifluidales	D- Unidades de nula importancia hidrogeológica	2180970	0,1	0,000	0,172	0,172
Ignimbritas Río Frio	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	149536	0,11	0,000	0,013	0,013
Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior	B- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en roca fisurada	11501606	0,15	8,542	0,000	8,542
Ignimbrita Las Parinas	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	31048469	0,1	0,000	2,455	2,455
Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior	C- Unidades de baja importancia hidrogeológica	46546047	0,1	0,000	3,680	3,680
Depositos Salinos	B- Unidades de media a baja importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados	21630849	0,2	21,419	0,000	21,419
Depositos Salinos	A- Unidades de alta importancia hidrogeológica en depósitos no consolidados	19679333	0,25	24,358	0,000	24,358
Granodiorita Leon Muerto	D- Unidades de nula importancia hidrogeológica	24368751	0,05	0,000	0,963	0,963
Quebrada Honda- ignimbrita riolitica a dacitica	D- Unidades de nula importancia hidrogeológica	1664524	0,08	0,000	0,105	0,105
Tamberia - ignimbrita riolitica a dacitica	D- Unidades de nula importancia hidrogeológica	29654752	0,08	0,000	1,875	1,875

## Anexo C Hidroquímica

### Anexo C-1. Base de datos hidroquímica

#### Muestras de Agua Risacher (1999)

Tabla 31 Muestras de aguas Risacher *et al.* 1999

Salar	Salar de Las Parinas						
Muestra	PAR-1	PAR-2	PAR-3	PAR-4	PAR-5	PAR-6	PAR-7
Fecha	17/03/1996	17/03/1996	17/03/1996	17/03/1996	17/03/1996	17/03/1996	17/03/1996
Hora	12:25	12:53	13:05	14:20	14:35	15:45	15:55
Tipo de muestra	manantial difuso	laguna	laguna	manantial difuso	laguna	manantial corriente	laguna
Sistema de coordenadas	WGS-84 / 19S	WGS-84 / 19S	WGS-84 / 19S	WGS-84 / 19S	WGS-84 / 19S	WGS-84 / 19S	WGS-84 / 19S
Coordenada UTM Norte	7148905	7148757	7148434	7147719	7147627	7143290	7143344
Coordenada UTM Este	547281	547315	547563	548594	548507	550218	550203
Cota (m.s.n.m)	3989	3987	3987	3988	3987	3987	3987

#### Parámetros fisicoquímicos de terreno

CE (mS/cm)	-	-	-	-	-	-	-
TEMP (°C)	17,2	23,6	21,2	14	21,2	10	15,4
pH	-	-	-	-	-	-	-

#### Parámetros fisicoquímicos de laboratorio

CE (uS/cm)	14770	50200	211000	24600	219000	14390	60700
pH	7,12	8,83	7,56	6,53	7,39	7,92	8,98

Aniones Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	144	88,5		99,4		187	72,6
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	590	2020	8580	1740	16800	498	2530
Cl <sup>-</sup>	4930	20200	132000	9020	188000	4720	25100
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	14,5	0,174	0,403	0,05	1,17	17,4	9,42
suma aniones	5678,5	22308,674	140580,403	10859,45	204801,17	5422,4	27712,02
Cationes Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Na <sup>+</sup>	3150	12600	80700	5820	114000	3040	16400
K <sup>+</sup>	267	938	5160	407	7820	199	962
Ca <sup>++</sup>	80,2	212	597	78,6	606	96,9	206
Mg <sup>++</sup>	80,4	379	1940	161	4060	74,1	447
Li <sup>+</sup>	11,4	51,6	273	20,1	477	8,74	49,3
suma cationes	3577,6	14129	88397	6466,6	126486	3410	18015

**Tabla 32 Continuación tabla de muestras de agua Risacher *et al.*, 1999.**

Análisis químico	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
ALC (meq/l)	2,38	4,48	16,1	1,64	23,1	3,22	6,34
Br	0,284	1,21	6,97	0,544	14,6	0,341	1,86
I	0,004	0,0483	0,352	0,0072	0,523	0,039	0,141
B	10,5	51,8	276	20,2	639	15,4	88,9
SI	30,8	27,4	29,7	31,1	21,3	37,8	33,3
As	0,097	0,24	1,2	0,082	3,76	0,65	2
STD	9317	36741	230278	17395	333939	8907	46223
CO2	14	0,13	-	36	-	3,3	0,08
o2	0,6	8,6	2	3,9	1	6,8	10

• **Balance Químico**

**Tabla 33 Balance Químico de Muestras de Risacher *et al.*, 1999.**

Muestra	LPA-RT-001	LPA-RT-002	LPA-RT-003	LPA-RT-004	LPA-RT-005	LPA-RT-006	LPA-RT-007
<b>aniones (meq/L)</b>	meq/L						
HCO3-	2,360655738	1,450819672	0	1,629508197	0	3,06557377	1,190163934
SO4=	12,29166667	42,08333333	178,75	36,25	350	10,375	52,70833333
Cl-	138,8732394	569,0140845	3718,309859	254,084507	5295,774648	132,9577465	707,0422535
NO3-	0,233870968	0,002806452	0,0065	0,000806452	0,018870968	0,280645161	0,151935484
Cl-+NO3-	139,1071104	569,016891	3718,316359	254,0853135	5295,793519	133,2383916	707,194189
<b>suma aniones</b>	153,7594328	612,551044	3897,066359	291,9648217	5645,793519	146,6789654	761,0926863
<b>cationes(meq/L)</b>	meq/L						
Na+ + K+	143,7851662	571,8158568	3640,664962	263,4526854	5156,521739	137,2634271	737,6470588
Na+	136,9565217	547,826087	3508,695652	253,0434783	4956,521739	132,173913	713,0434783
K+	6,828644501	23,98976982	131,9693095	10,40920716	200	5,089514066	24,60358056
Ca++	4,01	10,6	29,85	3,93	30,3	4,845	10,3
Mg++	6,644628099	31,32231405	160,3305785	13,30578512	335,5371901	6,123966942	36,94214876
NH4+	0	0	0	0	0	0	0
<b>suma cationes</b>	154,4397943	613,7381708	3830,84554	280,6884705	5522,358929	148,2323941	784,8892076
<b>Error (%)</b>	0,441507616	0,193612869	1,713808849	3,938282132	2,210474655	1,053488509	3,078499354
<b>Laboratorio</b>	-	-	-	-	-	-	-

## Muestras de Agua Troncoso (2016)

Tabla 34 Análisis químico de muestras de agua Troncoso *et al.* (2016)

Salar	Salar de Las Parinas					
Muestra	LPA-RT-001	LPA-RT-002	LPA-RT-003	LPA-RT-004	LPA-RT-005	LPA-RT-006
Fecha	11/04/2013	11/04/2013	11/04/2013	11/04/2013	11/04/2013	11/04/2013
Hora	-	-	-	-	-	-
Tipo de muestra	Laguna	Laguna	Laguna	Vertiente	Canal	Canal
Sistema de coordenadas	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S
Coordenada UTM Norte	7140397	7140391	7140401	7146746	7147315	7147308
Coordenada UTM Este	548693	548696	548703	550801	546662	546618
Cota (m.s.n.m)	3960	3960	3821	3958	3954	3957

### Parámetros fisicoquímicos de terreno

CE (mS/cm)	18,12	-	-	14,85	-	238
TEMP (°C)	18,3	-	-	11,4	-	5,8
pH	6,64	-	-	-	-	7,34

### Parámetros fisicoquímicos de laboratorio

CE (uS/cm)	18.910	13.960	14.990	14.710	243.000	246.000
pH	7,37	7,23	7,46	7,46	7,42	6,98

Aniones Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	211	209	217	86,9	580	651
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	498	341	368	480	12796	12522
Cl <sup>-</sup>	6058	4431	4786	4672	170111	167584
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						
suma aniones	6767	4981	5371	5238,9	183487	180757
Cationes Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Na <sup>+</sup>	4100	2600	3300	2900	100000	105000
K <sup>+</sup>	54	41	44	45	5200	6000
Ca <sup>++</sup>	105	100	113	130	725	625
Mg <sup>++</sup>	95	65	75	73	3200	3600
Li <sup>+</sup>	10	7	8	7	350	400
suma cationes	4354	2806	3532	3148	109125	115225

Tabla 35 Continuación tabla anterior, muestras de agua Troncoso *et al.* (2016)

Salar	Salar de Las Parinas				
Muestra	LPA-RT-007	LPA-RT-008	LPA-RT-009	LPA-RT-010	LPA-RT-011
Fecha	24/04/2014	24/04/2014	24/04/2014	24/04/2014	24/04/2014
Hora	-	-	-	-	-
Tipo de muestra	laguna	laguna	laguna	laguna	laguna
Sistema de coordenadas	WGS-84/19S	WGS-84/19S	WGS-84/19S	WGS-84/19S	WGS-84/19S
Coordenada UTM Norte	7140937	7142634	7143247	7144890	7147644
Coordenada UTM Este	547733	547032	547038	545926	545897
Cota (m.s.n.m)	3974	3972	3969	3965	3960

Parámetros fisicoquímicos de terreno

CE (mS/cm)	222	-	233	-	235
TEMP (°C)	7,6	-	15,4	-	16
pH	7,53	-	6,93	-	6,94

Parámetros fisicoquímicos de laboratorio

CE (uS/cm)	231.000	242.000	241.000	95.800	242.000
pH	7,93	7,77	7,32	9,03	7,27

Aniones Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	72,6	1018	2353	1387	2609
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	2530	13520	12180	14520	3190
Cl <sup>-</sup>	25100	157600	174800	177200	38900
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9,42				
suma aniones	27712,02	172138	189333	193107	44699
Cationes Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Na <sup>+</sup>	16400	87700	107200	109600	23800
K <sup>+</sup>	962	4590	5575	5420	1355
Ca <sup>++</sup>	206	547	664	627	20
Mg <sup>++</sup>	447	14310	205	247	575
Li <sup>+</sup>	274	291	315	72	370
suma cationes	18015	107147	113644	115894	25750

**Tabla 36 Tabla de elementos minoritarios de los estudios de Troncoso *et al.* (2016)**

Salar	Salar de Las Parinas										
Muestra	LPA-RT-001	LPA-RT-002	LPA-RT-003	LPA-RT-004	LPA-RT-005	LPA-RT-006	LPA-RT-007	LPA-RT-008	LPA-RT-009	LPA-RT-010	LPA-RT-011
Elementos Trazas	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Flúor (F)	2,8	2,97	2,87	3,11	3,25	3,56	2,68	1,04	1,41	0,99	0,41
Aluminio (Al)	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020
Antimonio (Sb)	<0,010	<0,010	0,023	0,023	<0,010	<0,010	0,03	0,033	0,031	0,02	0,025
Arsénico (Ar)	0,94	0,867	0,9	0,116	5,686	6,048	15,97	5,826	7,386	4,994	4,872
Bario (Ba)	0,024	0,0583	0,025	0,0375	0,2558	0,1224	0,2025	0,0176	0,0409	0,0197	0,0497
Berilio (Be)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,002	0,002	0,012	0,01	0,008	0,008	0,007
Boro (B)	14,48	5,911	<0,060	<0,060	423,7	447,6	490,1	481,2	569,4	84,36	494,3
Cadmio (Cd)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,008	0,012	0,005	0,005	0,009
Cobalto (Co)	<0,002	<0,002	0,002	0,002	0,004	0,005	0,016	0,014	0,024	0,009	0,011
Cobre (Cu)	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
Cromo (Cr)	0,1644	0,1312	0,1185	0,1129	2,268	2,485	0,8219	1,005	1,031	0,4186	1,022
Estaño (Sn)	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Fósforo (P)	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Hierro (Fe)	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	2,408	2,209	0,836	0,005	1,31	0,005	0,938
Manganeso (Mn)	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,293	0,33	0,042	0,019	2,127	0,027	1,271
Molibdeno (Mo)	0,014	0,013	0,013	0,005	0,411	0,469	0,115	0,01	0,162	<0,005	0,372
Plata (Ag)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Plomo (Pb)	0,016	0,025	0,021	0,04	0,039	0,042	0,006	0,006	0,017	0,006	0,017
Selenio (Se)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,024	0,025	0,02	0,028	0,022	0,009	0,026
Vanadio (V)	0,099	0,089	0,087	0,039	0,82	0,904	0,327	0,44	0,356	0,214	0,375
Zinc (Zn)	<0,010	<0,010	<0,010	0,326	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,022
Mercurio (Hg)	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	-	-	-	-	-

Tabla 37 Parámetros químicos y relaciones iónicas de muestras Troncoso *et al.* (2016)

Otros parámetros											
Muestra	LPA-RT-001	LPA-RT-002	LPA-RT-003	LPA-RT-004	LPA-RT-005	LPA-RT-006	LPA-RT-007	LPA-RT-008	LPA-RT-009	LPA-RT-010	LPA-RT-011
Alcalinidad total (mg/l)	653	517	589	623	14971	16367	834	1928	1137	3148	312
Hidrogeno (H <sup>+</sup> )	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Acidez	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dureza Total	653	517	589	623	14.971	16.367	60.225	2.497	2.578	2.412	2.597
Dureza carbonatosa	173	171	178	71	475	533	835	1928	1137	2412	311
Dureza no carbonatosa	480	346	411	551	14.496	15.834	59.390	567	1.441	0	2.286
TSD (mg/l)*	11.017	7.684	8.795	8.345	292.321	295.654	278.770	301.782	308.297	69.740	325.024
TSD evaporación 103°C (mg/l)*	11.634	8.114	9.288	8.812	308.691	312.211	294.382	318.681	325.562	73.645	343.225
Alcalinidad calculada (meq/l)**	13,22	6,41	15,17	0,82	224,37	125,91	468,63	282,02	292,92	33,5	257,07

Relaciones iónicas											
Muestra	LPA-RT-001	LPA-RT-002	LPA-RT-003	LPA-RT-004	LPA-RT-005	LPA-RT-006	LPA-RT-007	LPA-RT-008	LPA-RT-009	LPA-RT-010	LPA-RT-011
Na (meq/l) / Cl(meq/l)	1,04	0,91	1,06	0,96	0,91	0,97	0,86	0,95	0,95	0,94	1,06
Ca (mmol/l)/SO <sub>4</sub> (mmol/l)	0,51	0,7	0,74	0,65	0,14	0,12	0,1	0,13	0,1	0,02	0,09
Na (meq/l)/K (meq/l)	128,74	107,53	127,17	109,28	32,61	29,67	32,4	32,61	34,29	29,78	37,16
Alc/Ca (meq/l)	2,52	1,28	2,68	0,13	6,19	4,03	17,13	8,49	9,34	33,5	8,99
Alc/(Ca + Mg) (meq/l)	1	0,62	1,27	0,07	0,74	0,38	0,38	5,61	5,64	0,68	4,91
(Alc + SO <sub>4</sub> )/Ca (meq/l)	4,49	2,7	4,04	1,67	13,54	12,38	27,43	16,14	18,99	99,96	19,54
Vía evolutiva	Carbonatada	Sulfatada alcalina o directa	Carbonatada	sulfatada neutra	Sulfatada alcalina o directa	Sulfatada alcalina o directa	Sulfatada alcalina o directa	Carbonatada	Carbonatada	Sulfatada alcalina o directa	Carbonatada

\*TSD = sólidos disueltos totales

$$** \text{alc} = \{[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Li}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]\} - \{[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]\}$$

Tabla 38 Balance Químico de muestras Troncoso *et al.* (2016)

Salar	Salar de Las Parinas										
Muestra	LPA-RT-001	LPA-RT-002	LPA-RT-003	LPA-RT-004	LPA-RT-005	LPA-RT-006	LPA-RT-007	LPA-RT-008	LPA-RT-009	LPA-RT-010	LPA-RT-011
aniones (meq/L)	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,46	3,43	3,56	1,42	9,51	10,67	1,19	16,69	38,57	22,74	42,77
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	10,38	7,10	7,67	10,00	266,58	260,88	52,71	281,67	253,75	302,50	66,46
Cl <sup>-</sup>	170,65	124,82	134,82	131,61	4791,86	4720,68	707,04	4439,44	4923,94	4991,55	1095,77
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
Cl <sup>-</sup> +NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	170,65	124,82	134,82	131,61	4791,86	4720,68	707,19	4439,44	4923,94	4991,55	1095,77
suma aniones	184,48	135,35	146,04	143,03	5067,95	4992,22	761,09	4737,79	5216,27	5316,79	1205,00
cationes(meq/L)	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	179,64	114,09	144,60	127,24	4480,82	4718,67	737,65	3930,43	4803,45	4903,84	1069,44
Na <sup>+</sup>	178,26	113,04	143,48	126,09	4347,83	4565,22	713,04	3813,04	4660,87	4765,22	1034,78
K <sup>+</sup>	1,38	1,05	1,13	1,15	132,99	153,45	24,60	117,39	142,58	138,62	34,65
Ca <sup>++</sup>	5,25	5,00	5,65	6,50	36,25	31,25	10,30	27,35	33,20	31,35	1,00
Mg <sup>++</sup>	7,85	5,37	6,20	6,03	264,46	297,52	36,94	1182,64	16,94	20,41	47,52
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
suma cationes	192,74	124,46	156,45	139,77	4781,53	5047,44	784,89	5140,43	4853,59	4955,60	1117,96
Error (%)	4,38	-8,38	6,88	-2,31	-5,82	1,10	3,08	8,15	-7,20	-7,03	-7,49
Laboratorio	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN	SERNAGEOMIN

## Muestras de Agua tomadas enero 2018

Tabla 39 Análisis químico de muestras de agua terreno enero 2018

Salar	Salar de Las Parinas					
Muestra	ULP-01	ULP-02	ULP-03	ULP-04	ULP-05	ULP-06
Fecha	10-ene-18	10-ene-18	10-ene-18	10-ene-18	10-ene-18	10-ene-18
Hora	12:13	14:00	14:45	15:10	13:54	14:20
Tipo de muestra	Laguna difusa	Manantial	Manantial	Manantial	Laguna	Laguna
Sistema de coordenadas	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S
Coordenada UTM Norte	7141281	7139679	7140479	7140613	7141334	7141115
Coordenada UTM Este	549536	548217	549069	549412	548744	548959
Cota (m.s.n.m)	3965	3971	3968	3966	3961	3962

### Parámetros fisicoquímicos de terreno

CE (mS/cm)	66,12	7,49	17,29	12,7	162,2	147,8
TEMP (°C)	16,8	13	18,1	22,1	22	21,2
pH	9,32	7,5	6,6	6,53	8,33	8,57

### Parámetros fisicoquímicos de laboratorio

CE (uS/cm)	77200	6350	9130	7570	150300	142900
pH	8,92	6,85	8,07	6,86	8,42	8,48

Aniones Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	240	235	268	269	517	374
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	1905	152	174	133	4485	4393
Cl <sup>-</sup>	30225	2414	2697	2138	69275	64059
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	560
suma aniones	<b>32370</b>	<b>2801</b>	<b>3139</b>	<b>2540</b>	<b>74277</b>	<b>69386</b>
Cationes Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Na <sup>+</sup>	21100	1250	1800	1490	44750	41750
K <sup>+</sup>	890	65	88	77	2320	2180
Ca <sup>++</sup>	265	438	53	47	411	622
Mg <sup>++</sup>	342	35	47	40	1230	995
Li <sup>+</sup>	57	4	5,1	4,6	100	100
suma cationes	<b>22597</b>	<b>1788</b>	<b>1988</b>	<b>1654</b>	<b>48711</b>	<b>45547</b>

Tabla 40 Continuación tabla anterior, análisis químico de muestras de agua terreno enero 2018

Salar	Salar de Las Parinas					
Muestra	ULP-07	ULP-08	ULP-09	ULP-10	ULP-11	ULP-12
Fecha	10-ene-18	11-ene-18	11-ene-18	11-ene-18	11-ene-18	11-ene-18
Hora	14:48	12:20	13:15	14:20	14:30	16:00
Tipo de muestra	Manantial	Laguna difusa	Laguna difusa	Laguna	Laguna	Laguna
Sistema de coordenadas	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S	WGS-84/ 19S
Coordenada UTM Norte	7140993	7146332	7147100	7147185	7147096	7148524
Coordenada UTM Este	549209	551441	549148	546764	546823	547463
Cota (m.s.n.m)	3963	3967	3959	3960	3955	3961

**Parámetros fisicoquímicos de terreno**

CE (mS/cm)	20,56	119,9	240,6	242,7	238,1	207,1
TEMP (°C)	21	23,1	20,1	18,2	17,1	21,2
pH	9,09	7,68	7,25	7,03	6,85	6,65

**Parámetros fisicoquímicos de laboratorio**

CE (uS/cm)	18740	117300	236000	237000	232000	207000
pH	9,01	8,1	7,43	7,05	7,02	6,74

Aniones Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
HCO3-	234	371	1465	626	912	3987
SO4=	399	2763	11576	11893	17681	30177
Cl-	5408	47927	181942	182111	182512	191700
NO3-	815	0	0	0	0	0
<b>suma aniones</b>	<b>6856</b>	<b>51061</b>	<b>194983</b>	<b>194630</b>	<b>201105</b>	<b>225864</b>
Cationes Mayores	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Na+	4075	32750	108500	116500	119000	77300
K+	209	1330	7400	7600	9500	56750
Ca++	59	535	475	485	445	339
Mg++	85	725	5345	5270	6825	20225
Li+	10	100	530	530	680	1950
<b>suma cationes</b>	<b>4428</b>	<b>35340</b>	<b>121720</b>	<b>129855</b>	<b>135770</b>	<b>154614</b>

Tabla 41 Resultados de elementos minoritarios del Salar de las Parinas, enero 2018

Salar	Salar de Las Parinas												
	Muestra	ULP-01	ULP-02	ULP-03	ULP-04	ULP-05	ULP-06	ULP-07	ULP-08	ULP-09	ULP-10	ULP-11	ULP-12
Elementos Trazas	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Aluminio (Al)	0,940	1,100	0,730	0,410	1,400	0,250	0,550	0,710	1,200	0,620	1,200	0,730	
Antimonio (Sb)	0,015	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,012	<0,010	<0,010	0,027	0,045	0,020	0,020	
Arsénico (Ar)	5,300	0,790	0,570	0,320	6,800	11,000	0,790	2,200	3,700	8,100	11,000	19,000	
Bario (Ba)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,086	0,007	<0,005	0,024	0,120	0,037	0,110	0,061	
Berilio (Be)	0,007	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,004	<0,002	<0,002	0,004	
Boro (B)	81,000	2,010	<0,060	<0,060	202,000	138,000	0,240	93,000	601,000	544,000	797,000	2068,000	
Cadmio (Cd)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	
Cobalto (Co)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,002	<0,002	
Cobre (Cu)	0,030	<0,010	<0,010	<0,010	0,150	0,240	<0,010	0,157	1,900	2,300	2,400	2,200	
Cromo (Cr)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
Estaño (Sn)	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	
Fósforo (P)	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	1,300	
Hierro (Fe)	<0,010	0,420	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,024	<0,010	<0,010	<0,010	
Manganeso (Mn)	<0,003	0,032	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	2,300	1,200	1,100	1,500	
Molibdeno (Mo)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,060	<0,005	<0,005	0,200	0,520	0,740	2,000	
Plata (Ag)	<0,002	<0,002	0,003	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	0,003	0,007	0,004	<0,002	0,004	
Plomo (Pb)	<0,002	0,027	<0,002	0,110	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,008	0,008	<0,002	<0,002	
Selenio (Se)	1,500	0,360	<0,005	<0,005	0,110	0,960	<0,005	1,100	0,097	0,051	0,170	<0,005	
Vanadio (V)	0,037	0,036	0,058	0,040	0,130	0,200	0,035	0,020	0,042	0,085	0,140	0,160	
Zinc (Zn)	0,460	0,690	0,430	0,440	0,400	0,430	0,440	0,430	0,910	0,460	0,490	0,540	
Mercurio (Hg)	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	230,000	<0,0003	<0,0003	

Tabla 42 Parámetros químicos y relaciones iónicas de muestras del presente estudio

Otros parámetros

Muestra	ULP-01	ULP-02	ULP-03	ULP-04	ULP-05	ULP-06	ULP-07	ULP-08	ULP-09	ULP-10	ULP-11	ULP-12
Alcalinidad total (mg/l)	597	193	220	221	1094	876	331	304	1201	513	748	3268
Dureza Total	2070	1235	323	284	6.083	5.643	497	4.317	23.170	22.887	29.183	84034
Dureza carbonatosa	597	193	220	221	1094	876	331	304	1201	513	748	3268
Dureza no carbonatosa	1473	1043	103	63	4.989	4.767	166	4013	21.970	22374	28.435	80766
TSD (mg/l) *	55.147	4.473	4.995	4.036	123.236	115.190	11.261	86.315	316.491	324.698	337.094	380402
TSD evaporación 103°C (mg/l) *	58.235	4.724	5.275	4.290	130.137	121.641	11.892	91.148	334.214	342.881	355.971	401705

Relaciones iónicas

Muestra	ULP-01	ULP-02	ULP-03	ULP-04	ULP-05	ULP-06	ULP-07	ULP-08	ULP-09	ULP-10	ULP-11	ULP-12
Na (meq/l) / Cl(meq/l)	1,08	0,80	1,03	1,08	1,00	1,01	1,16	1,05	0,92	0,99	1,01	0,62
Ca (mmol/l)/SO4 (mmol/l)	0,33	6,92	0,73	0,85	0,22	0,34	0,35	0,46	0,10	0,10	0,06	0,03
Na (meq/l)/K (meq/l)	40,30	32,69	34,77	32,90	32,79	32,56	33,15	41,86	24,93	26,06	21,29	2,32
Alc/Ca (meq/l)	7,39	0,46	3,06	4,26	4,61	2,78	4,17	5,61	3,19	16,99	26,29	43,70
Alc/(Ca + Mg) (meq/l)	2,36	0,41	1,24	1,77	0,77	0,76	1,23	1,73	0,16	0,90	1,00	0,44
(Alc + SO4)/Ca (meq/l)	10,39	0,61	4,42	5,44	9,15	5,72	6,98	7,76	13,35	27,20	42,85	80,79
Vía evolutiva	Carbonatada	Cálcica	Carbonatada	Carbonatada	Sulfatada alcalina o directa	Sulfatada alcalina o directa	Carbonatada	Carbonatada	Sulfatada alcalina o directa			

\*TSD = sólidos disueltos totales

$$* \text{alc} = \{[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Li}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]\} - \{[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]\}$$

Tabla 43 Balance ionico de las muestras salinas del presente estudio

Muestra	ULP-01	ULP-02	ULP-03	ULP-04	ULP-05	ULP-06	ULP-07	ULP-08	ULP-09	ULP-10	ULP-11	ULP-12
<b>Aniones (meq/L)</b>	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
<b>HCO3-</b>	3,93	3,85	4,39	4,41	8,48	6,13	3,84	6,08	24,02	10,26	14,95	65,36
<b>SO4=</b>	39,69	3,17	3,63	2,77	93,44	91,52	8,31	57,56	241,17	247,77	368,35	628,69
<b>Cl-</b>	851,41	68,00	75,97	60,23	1951,41	1804,48	152,34	1350,06	5125,13	5129,89	5141,18	5400,00
<b>NO3-</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,03	13,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Cl-+NO3-</b>	851,41	68,00	75,97	60,23	1951,41	1813,51	165,48	1350,06	5125,13	5129,89	5141,18	5400,00
<b>suma aniones</b>	895,03	75,02	83,99	67,41	2053,32	1911,16	177,63	1413,70	5390,31	5387,92	5524,49	6094,05
<b>Cationes (meq/L)</b>	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L
<b>Na+ + K+</b>	940,15	56,01	80,51	66,75	2004,99	1870,97	182,52	1457,93	4906,65	5259,59	5416,88	4812,28
<b>Na+</b>	917,39	54,35	78,26	64,78	1945,65	1815,22	177,17	1423,91	4717,39	5065,22	5173,91	3360,87
<b>K+</b>	22,76	1,66	2,25	1,97	59,34	55,75	5,35	34,02	189,26	194,37	242,97	1451,41
<b>Ca++</b>	13,25	21,90	2,65	2,35	20,55	31,10	2,95	26,75	23,75	24,25	22,25	16,95
<b>Mg++</b>	28,26	2,89	3,88	3,31	101,65	82,23	7,02	59,92	441,74	435,54	564,05	1671,49
<b>NH4+</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>suma cationes</b>	981,67	80,80	87,05	72,41	2127,19	1984,30	192,49	1544,60	5372,14	5719,38	6003,18	6500,71

<b>Error (%)</b>	9,23	7,42	3,57	7,15	3,53	3,76	8,03	8,85	0,34	5,97	8,31	6,46
<b>Laboratorio</b>	SERNAGEOMIN											

**Tabla 44 Resultado de análisis isotópicos de muestras salinas obtenidas en terreno del presente estudio**

Muestras	Fecha	Hora	UTM Norte	UTM Oeste	Altura (m.s.n.m)	Tipo de muestras	Deuterio (H) % VSMOW	error	Oxigeno18 %VSMOW	error	Azufre34 %V-CDT	error	SO4 (mg/L)
ULP-01	10/01/2018	12:13	549536	7141281	3965	Laguna difusa	13,2	1,3	8,8	0,08	5,72	0,18	1905
ULP-02	10/01/2018	14:00	548217	7139679	3971	Manantial	-77,2	0,5	-9,83	0,15	6,92	0,45	152
ULP-03	10/01/2018	14:45	549069	7140479	3968	Manantial	-79	0,3	-10,25	0,11	5,97	0,1	174
ULP-04	10/01/2018	15:10	549412	7140613	3966	Manantial	-79,8	1,2	-9,59	0,06	5,62	0,23	133
ULP-05	10/01/2018	13:54	548744	7141334	3961	Laguna	4,8	0,3	6,06	0,01	6,37	0,42	4485
ULP-06	10/01/2018	14:20	548959	7141115	3962	Laguna	-10,9	0,6	3,97	0,08	6,34	0,23	4393
ULP-07	10/01/2018	14:48	549209	7140993	3963	Manantial	-62,1	0,7	-6,75	0	6,23	0,14	399
ULP-08	11/01/2018	12:20	551441	7146332	3967	Laguna difusa	-32,5	0,5	-0,38	0,04			2763
ULP-09	11/01/2018	13:15	549148	7147100	3959	Laguna difusa	21	1,4	7,98	0,11			11576
ULP-10	11/01/2018	14:20	546764	7147185	3960	Laguna	7,6	0,6	2,59	0,04			11893
ULP-11	11/01/2018	14:30	546823	7147096	3955	Laguna	23,8	1,6	5,96	0,12			17681
ULP-12	11/01/2018	16:00	547463	7148524	3961	Laguna	33,8	2,3	10,27	0,15			30177

## Anexo C-2. Diagramas Stiff

### Diagramas Stiff de muestras de agua Risacher 1999

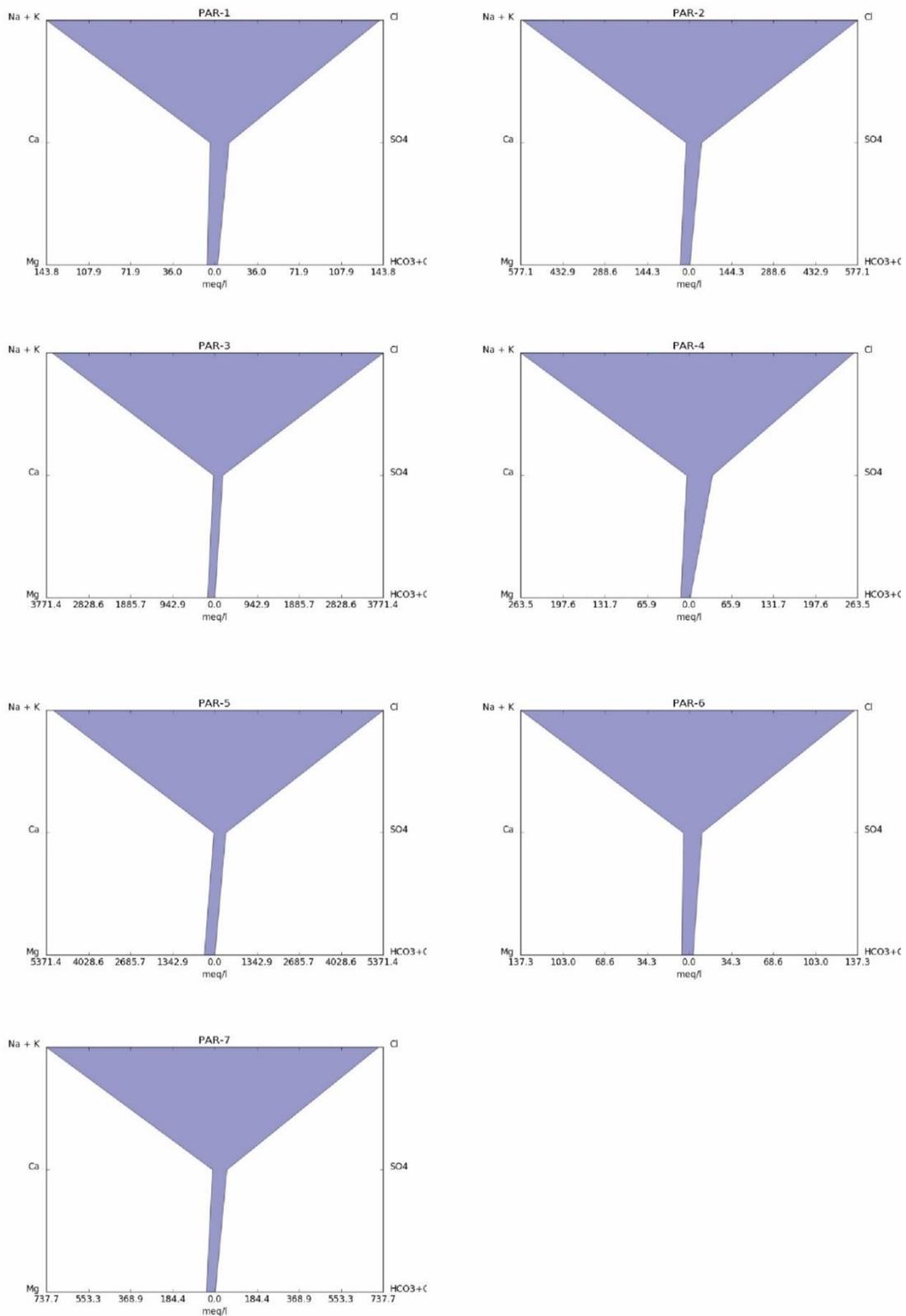


Figura 68 Diagramas Stiff de muestras de agua PAR-1 a 7, Risacher 1999.

## Diagramas Stiff de muestras de agua Troncoso 2016

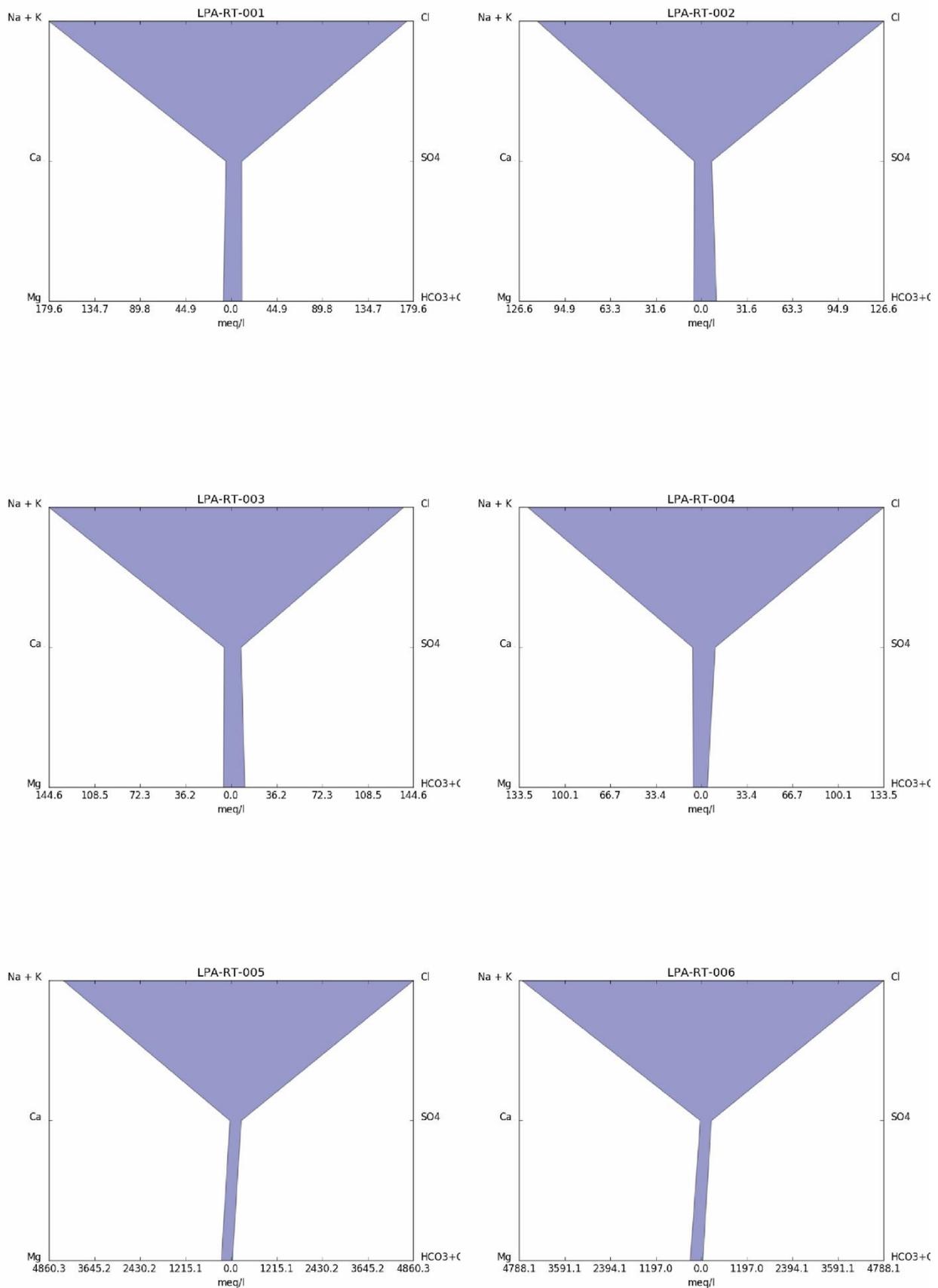


Figura 69 Diagramas Stiff muestras de agua LPA-RT-001 a 006, Troncoso 2016

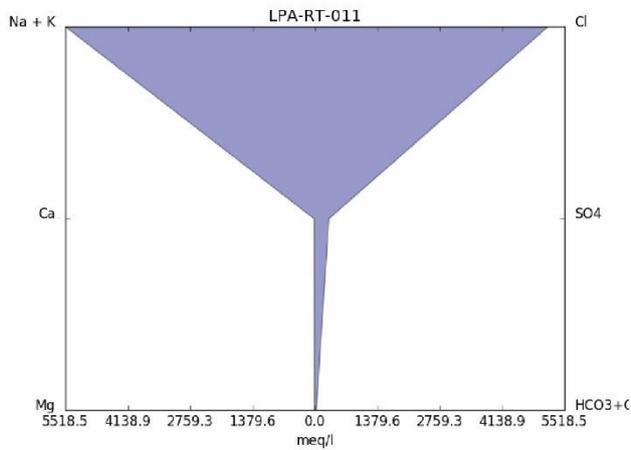
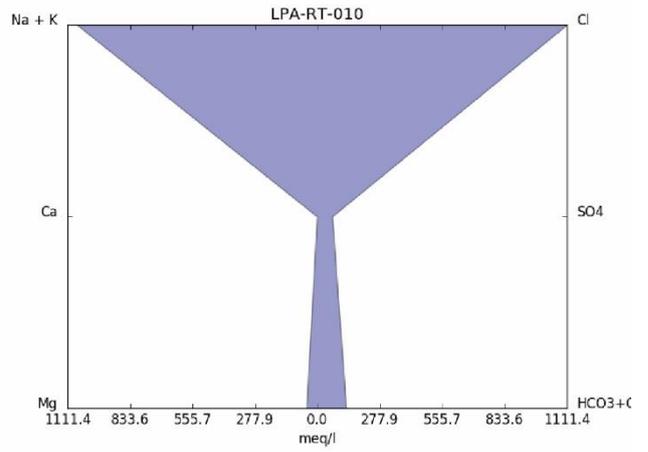
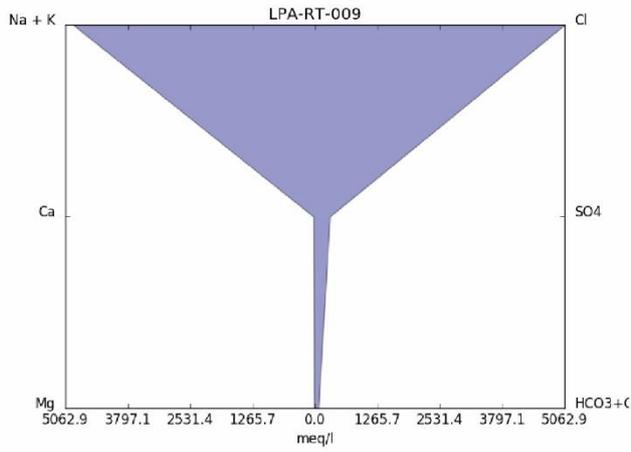
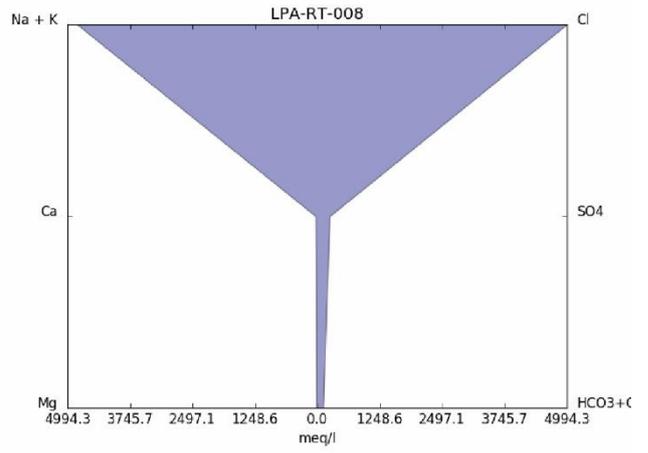
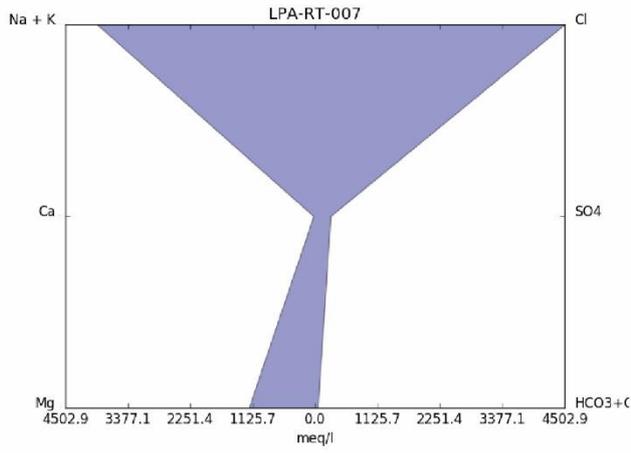


Figura 70 Diagramas Stiff de muestras de agua LPA-RT-007 a 011, Troncoso 2016.

## Diagramas Stiff de muestras de agua terreno CORFO 2018

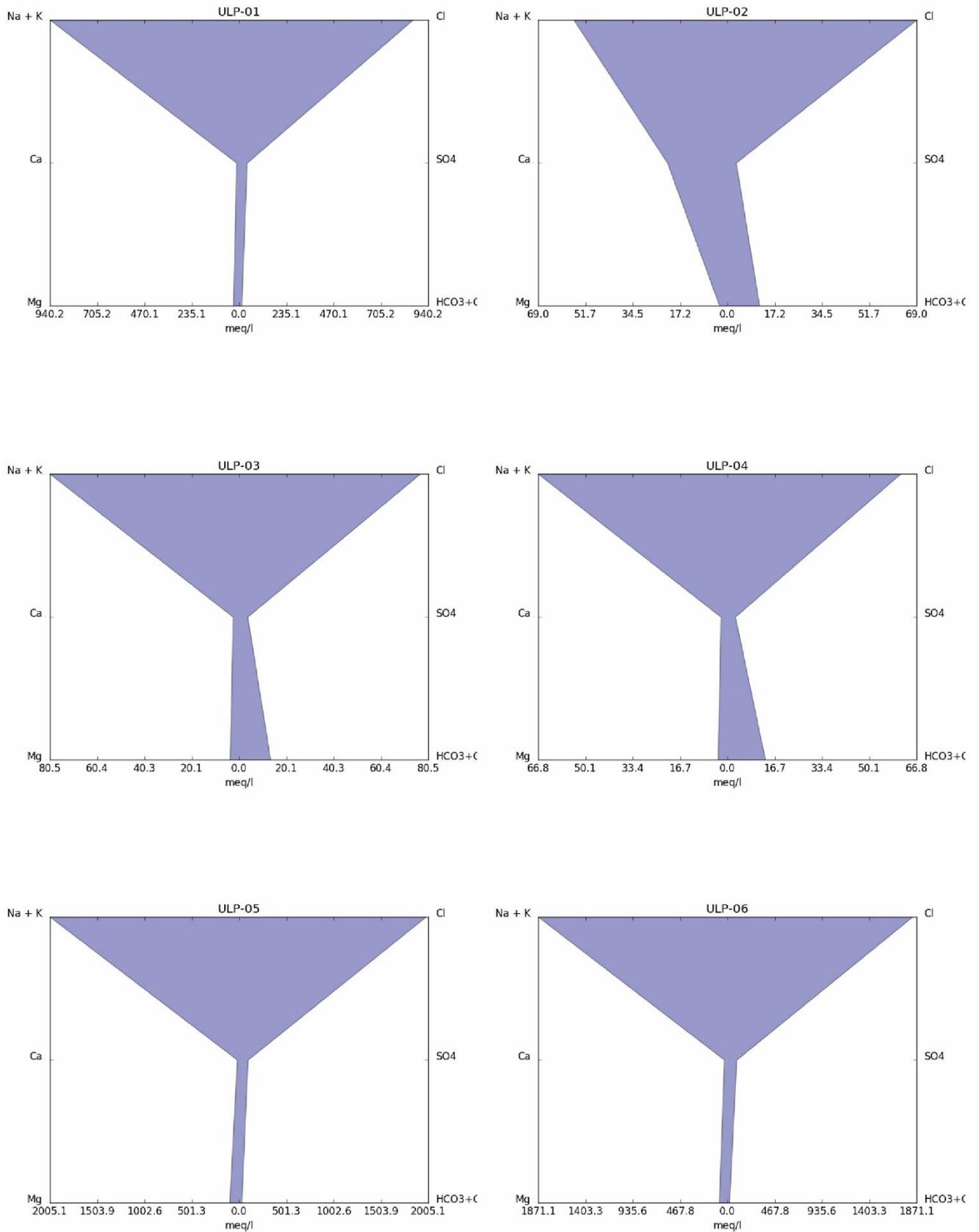


Figura 71 Diagramas Stiff de muestras salinas del Salar de Las Parinas, ULP-01 a ULP-06, enero 2018. Fuente: elaboración propia

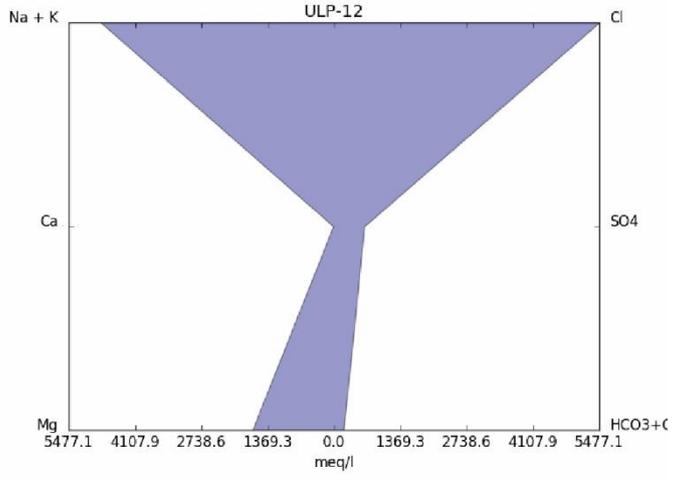
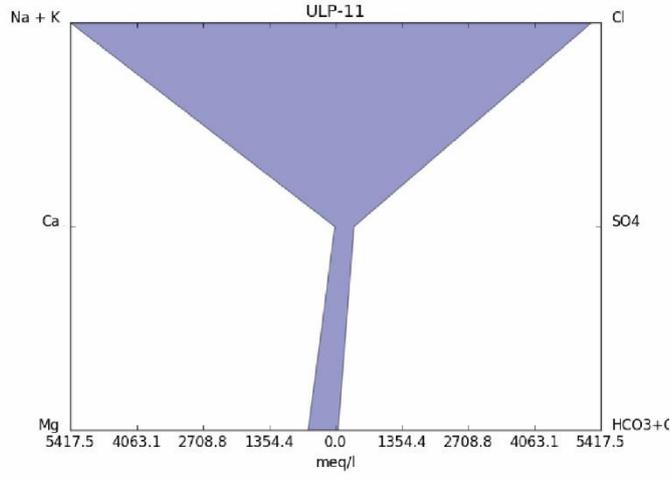
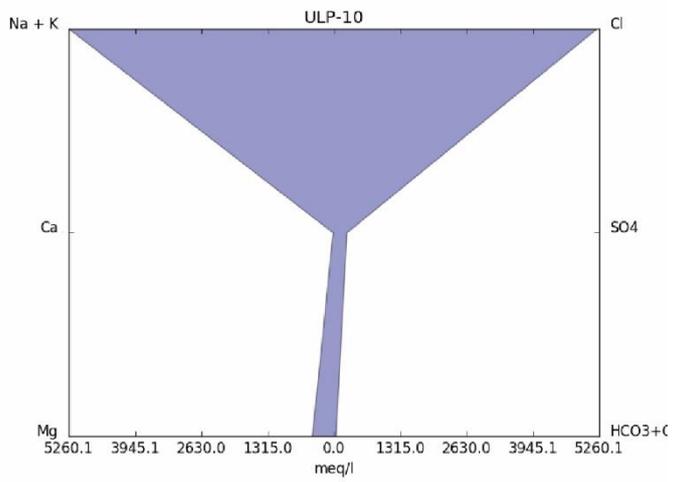
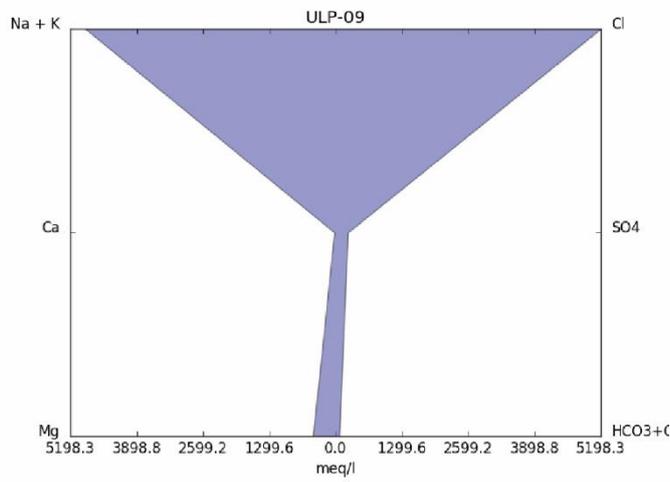
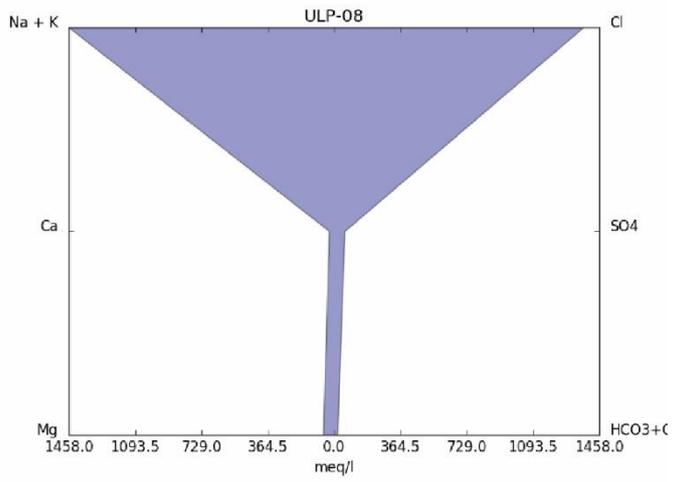
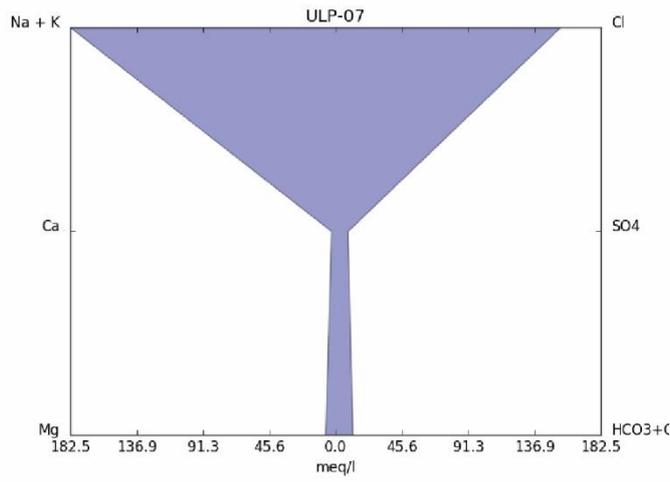
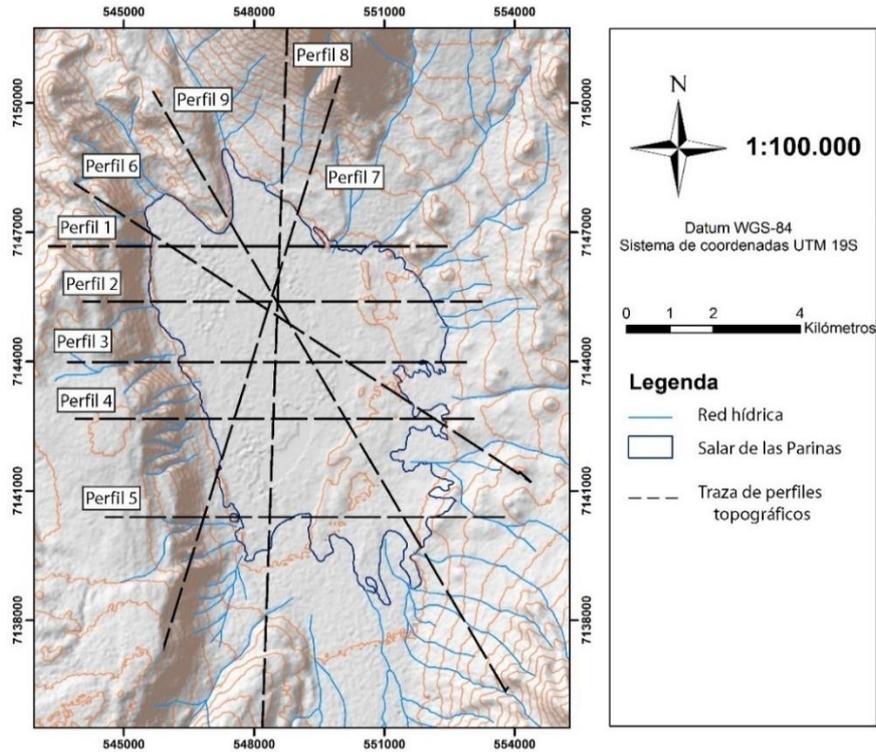


Figura 72. Diagramas Stiff de muestras salinas del Salar de Las Parinas, ULP-06 a ULP-12, enero 2018. Fuente: elaboración propia

## Anexo D Estimación de Potencial de litio

### Anexo D-1. Estimación de volumen del Salar de Las Parinas

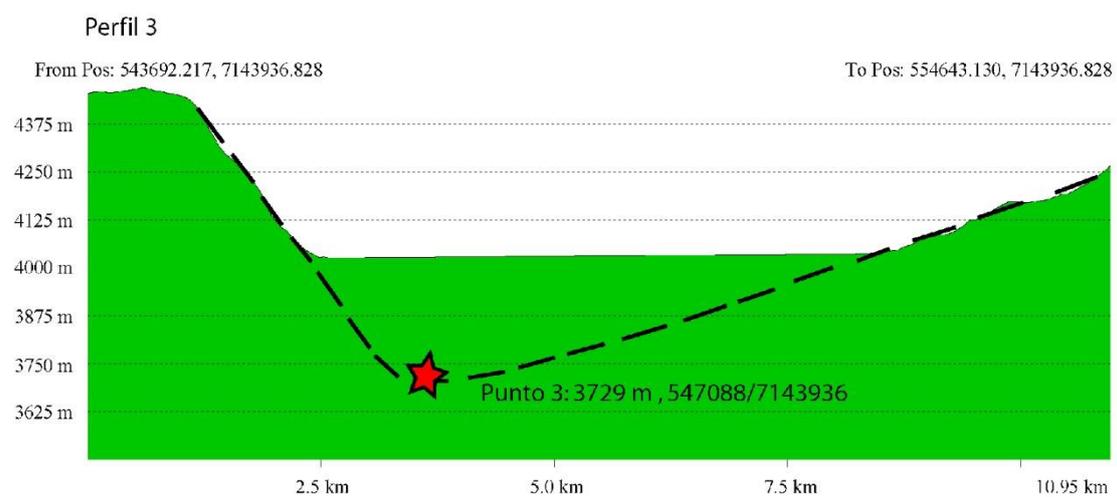
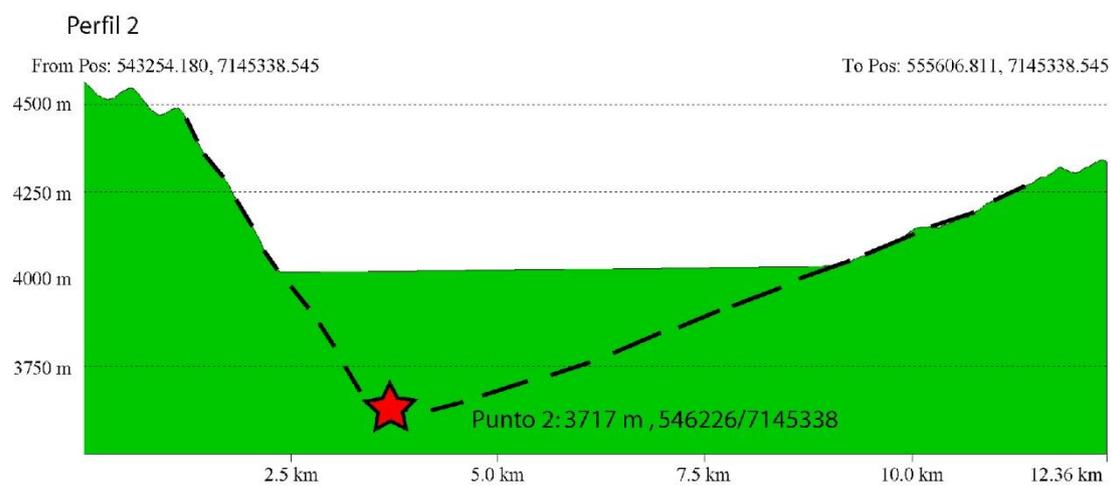
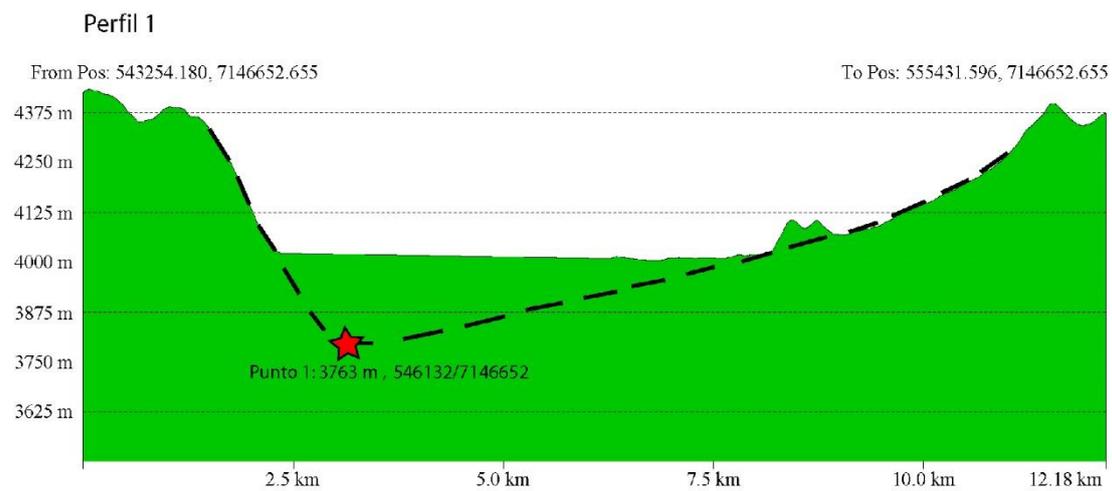
**Mapa de perfiles y puntos obtenidos de prolongación de laderas adyacentes al salar de las Parinas**



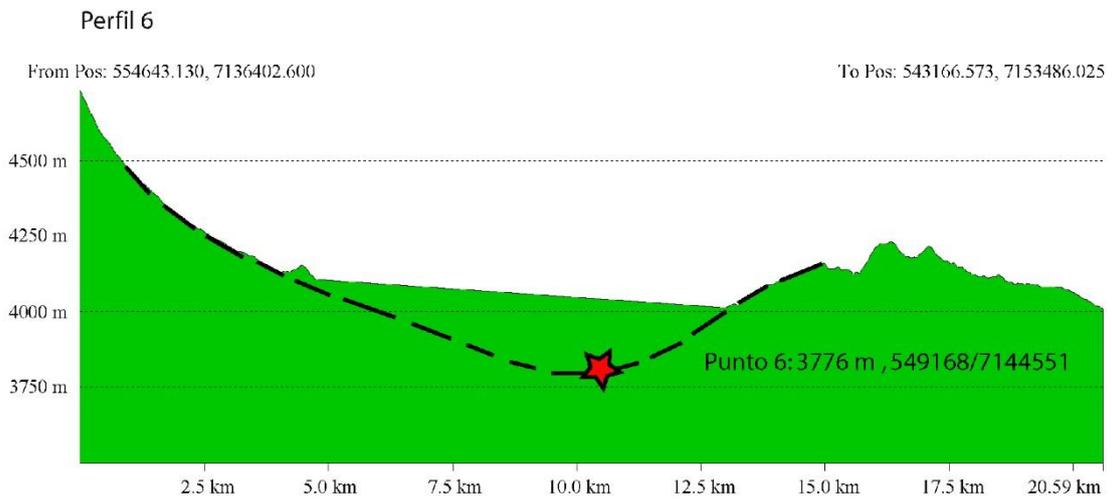
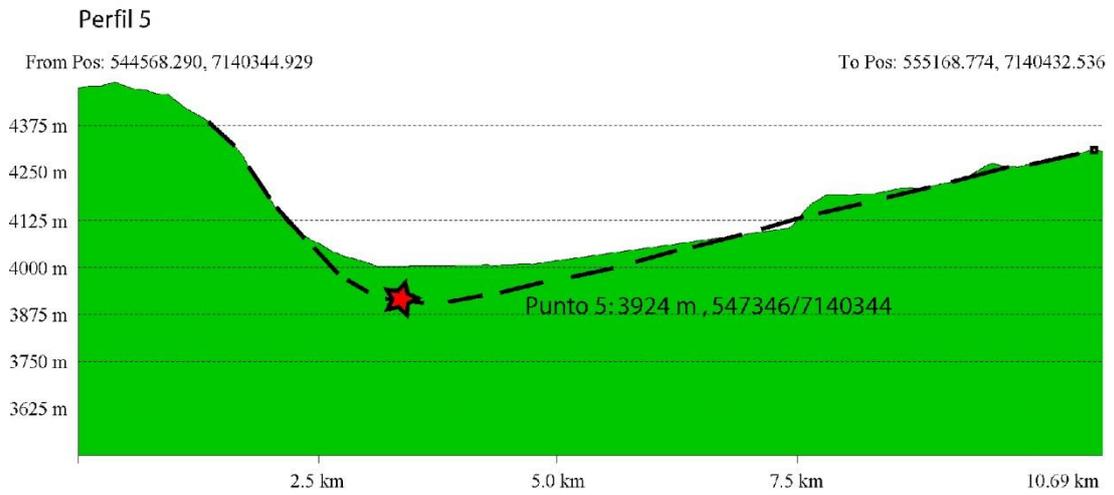
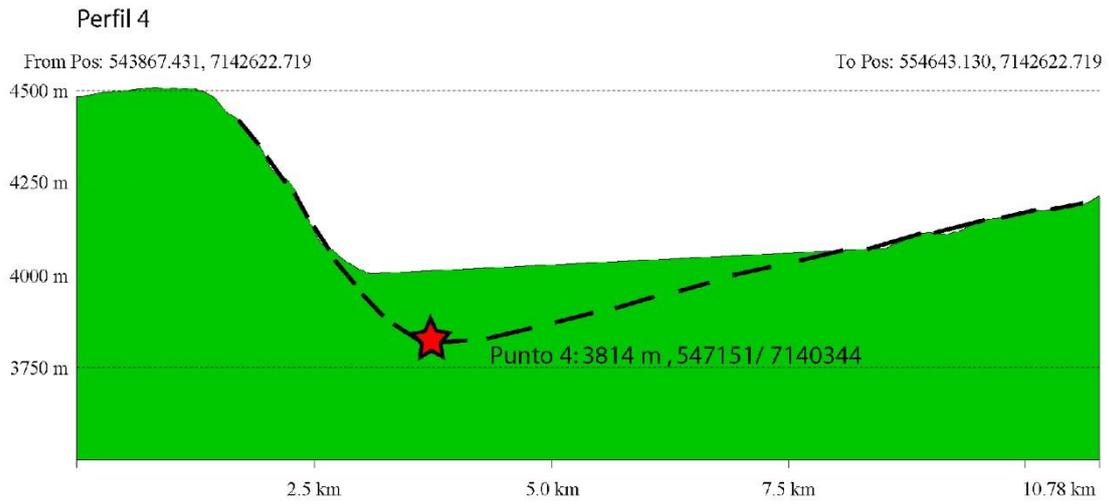
**Figura 73 Mapa de perfiles topográficos realizados en software ArcGIS, en la cuenca del Salar de las Parinas. Fuente: elaboración propia**

**Tabla 45 Resumen de resultados de puntos de profundidad estimados del Salar de Las Parinas**

N° Perfil	Coordenada comienzo perfil	Coordenada termino perfil	Distancia (km)	Posición intersección de laderas proyectadas	Nivel estimado (m.s.n.m)	Potencia (mts)
1	543254 / 7146652	555431 / 7146652	12,18	546132 / 7146652	3763	224
2	543254 / 7145338	555606 / 7145338	12,36	546226 / 7145338	3717	270
3	543692 / 7143936	554643 / 7143936	10,95	547088 / 7143936	3729	258
4	543876 / 7142622	554643 / 7142622	10,78	547151 / 7140344	3814	173
5	544568 / 7140344	555168 / 7140432	10,69	547346 / 7140344	3924	63
6	554643 / 7136402	543166 / 7153486	20,59	549168 / 7144551	3776	211
7	544993 / 7137384	553296 / 7149520	14,71	547798 / 7141816	3774	213
8	546913 / 7135103	549008 / 7152349	17,85	548545 / 7143775	3723	264
9	545175 / 7141399	550011 / 7151801	13,22	547509 / 7146858	3784	203

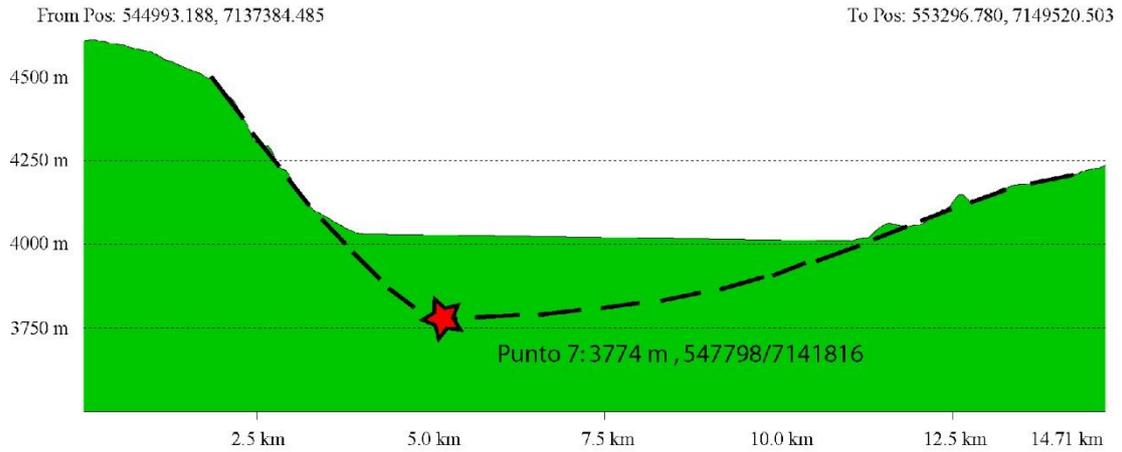


**Figura 74 Perfiles 1-3 con proyección de laderas adyacentes en Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia**

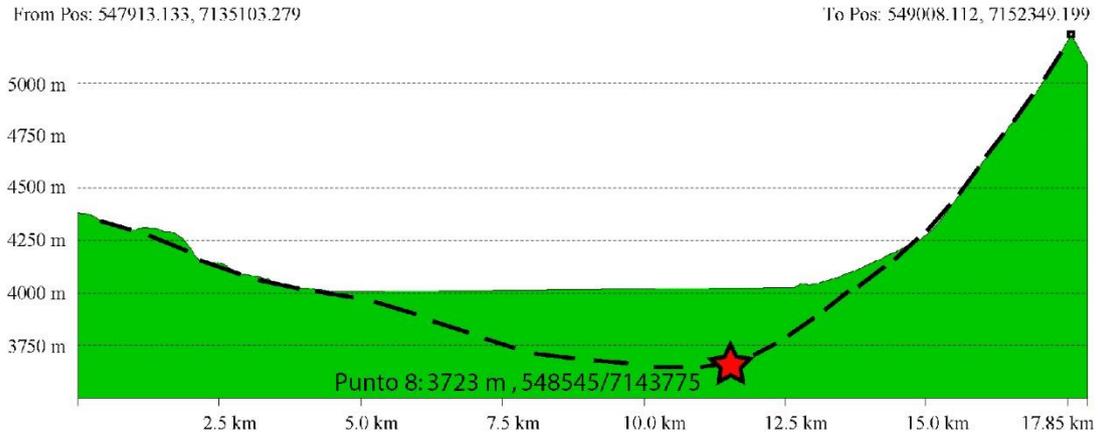


**Figura 75 Perfiles 4-6 con proyección de laderas adyacentes en Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia**

Perfil 7



Perfil 8



Perfil 9

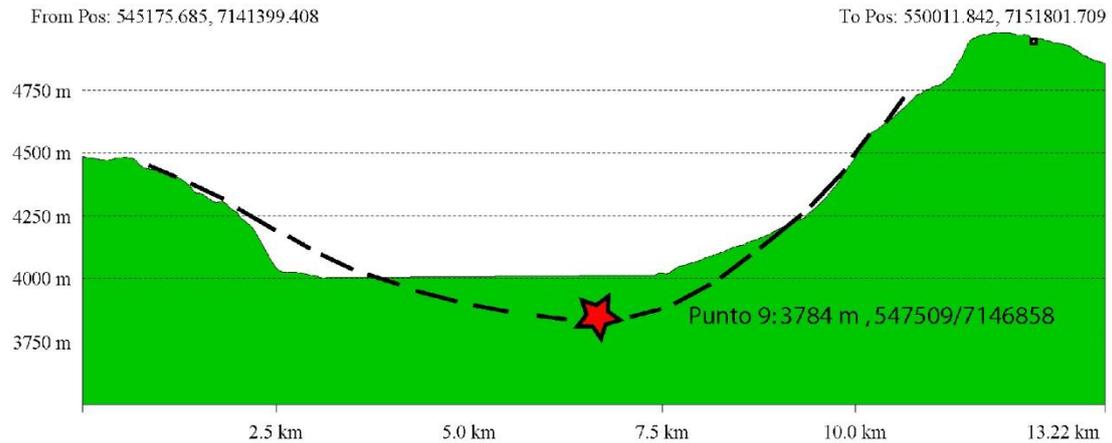


Figura 76 Perfiles 7-9 con proyección de laderas adyacentes en Salar de Las Parinas. Fuente: elaboración propia

## Anexo D-2. Estimación de Potencial de litio el Salar de las Parinas

Tabla 46 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con datos obtenidos del proyecto del Salar de Maricunga.

	Volumen de unidades estratigráficas (m <sup>3</sup> )	Zona de Concentración de Litio				S <sub>Y</sub> * C*b	Total Litio (toneladas)
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo		
1er caso 40/60	sal	476413206	672475225	671413953	1089920923	35927,33301	85804,9416
	arcilla	191961773	316743878	277057753	314892837	5221,056465	
	arena	141464455	291841104	201965724	200397241	21059,53013	
	grava	55125600,8	225061627	108321948	87923793,3	23597,02201	
2do caso 50/50	sal	559153649	803642206	790266055	1234522815	42253,47549	80615,6954
	arcilla	162979843	286686830	235779803	248141944	4496,933695	
	arena	104646090	234210652	149585709	146104448	15997,17308	
	grava	38185452,7	181582145	83127811,3	64365587,8	17868,11314	
3er caso 60/40	sal	668374979	989219103	948471706	1404813760	50720,32633	77774,042
	arcilla	101253299	199242809	144546082	144613360	2875,066595	
	arena	70953440,6	177244662	105326875	99579736,1	11332,23006	
	grava	24383316	140415260	60414714,6	44127938,1	12846,41899	

Tabla 47 Calculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con valor promedio de S<sub>Y</sub> obtenidos del proyecto del Salar de Maricunga.

Volumen de unidades estratigráficas	Zona de Concentración de Litio				S <sub>Y</sub> (0,059) * C*b	Total Litio (toneladas)
	Muy alto	Alto	Medio	Bajo		
sal	476413206	672475225	671413953	1089920923	643053344,4	119771,102
arcilla	191961773	316743878	277057753	314892837	185786773,9	
arena	141464455	291841104	201965724	200397241	118234372,4	
grava	55125600,8	225061627	108321948	87923793,3	51875038,07	

**Tabla 48 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con valor promedio de  $S_Y$  obtenidos del proyecto del Salar Olaroz.**

Volumen de unidades estratigráficas	Zona de Concentración de Litio				$S_Y (0,1) * C^*b$	Total Litio (toneladas)
	Muy alto	Alto	Medio	Bajo		
sal	476413206	672475225	671413953	1089920923	1,05669E+11	201295,97
arcilla	191961773	316743878	277057753	314892837	43508803878	
arena	141464455	291841104	201965724	200397241	33966984078	
grava	55125600,8	225061627	108321948	87923793,3	18151555389	

**Tabla 49 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con datos obtenidos de estudios de Health (1983)**

	Volumen de unidades estratigráficas (m <sup>3</sup> )	Zona de Concentración de Litio				$S_Y * C^*b$	Total Litio (toneladas)
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo		
1er caso 40/60	sal	476413206	672475225	671413953	1089920923	35927,33301	99497,2395
	arcilla	191961773	316743878	277057753	314892837	8701,760776	
	arena	141464455	291841104	201965724	200397241	20380,19045	
	grava	55125600,8	225061627	108321948	87923793,3	34487,95524	
2do caso 50/50	sal	559153649	803642206	790266055	1234522815	42253,47549	91344,4348
	arcilla	162979843	286686830	235779803	248141944	7494,889492	
	arena	104646090	234210652	149585709	146104448	15481,13524	
	grava	38185452,7	181582145	83127811,3	64365587,8	26114,93459	
3er caso 60/40	sal	668374979	989219103	948471706	1404813760	50720,32633	85254,3137
	arcilla	101253299	199242809	144546082	144613360	4791,777658	
	arena	70953440,6	177244662	105326875	99579736,1	10966,67425	
	grava	24383316	140415260	60414714,6	44127938,1	18775,53545	

**Tabla 50 Cálculo de tonelaje de litio estimado para el Salar de Las Parinas con datos obtenidos de estudios de Morris and Johnson (1967)**

	Volumen de unidades estratigráficas (m <sup>3</sup> )	Zona de Concentración de Litio				S <sub>Y</sub> * C*b	Total Litio (toneladas)
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo		
1er caso 40/60	sal	476413206	672475225	671413953	1089920923	35927,33301	176927,015
	arcilla	191961773	316743878	277057753	314892837	26105,28233	
	arena	141464455	291841104	201965724	200397241	71330,66656	
	grava	55125600,8	225061627	108321948	87923793,3	43563,73293	
2do caso 50/50	sal	559153649	803642206	790266055	1234522815	42253,47549	151909,403
	arcilla	162979843	286686830	235779803	248141944	22484,66848	
	arena	104646090	234210652	149585709	146104448	54183,97332	
	grava	38185452,7	181582145	83127811,3	64365587,8	32987,2858	
3er caso 60/40	sal	668374979	989219103	948471706	1404813760	50720,32633	127195,485
	arcilla	101253299	199242809	144546082	144613360	14375,33297	
	arena	70953440,6	177244662	105326875	99579736,1	38383,35987	
	grava	24383316	140415260	60414714,6	44127938,1	23716,46583	