



UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ciencias de la Tierra

Geología, hidrogeología e hidroquímica en los salares del altiplano, provincia de El Loa, Región de Antofagasta, Chile.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

Francisco Javier Muñoz Vargas

Profesor Guía: Carlos Ramírez Ramírez

Miembros de la Comisión:

Ximena Contardo

Jean Baptiste Gressier

Viña del Mar, Chile

2023

Resumen

El propósito del presente estudio consiste en comprender características físicas y químicas acerca de los salares de la provincia de Loa, específicamente el salar el Laco, Aguas Calientes Norte y Sur, Pujsa y la laguna Tuyajto. Para esto se desarrolló una exhaustiva recopilación de información bibliográfica acerca de la hidroquímica de aguas superficiales de los salares además de trabajo en terreno realizando levantamientos de información geológica y geofísica que luego fue utilizada para la formulación de mapas, caracterización hidroquímica de las aguas, modelos geoeléctricos y finalmente, la integración de los datos levantados para obtener un perfil de salares esquemáticos de los salares. Los resultados de estos análisis muestran que la hidroquímica de los salares analizados son sódicas-cloruradas con una variante bicarbonatada, además, tiene un enriquecimiento en Na y Ca derivado en menor parte por la interacción con las rocas y depósitos aledaños y como mayor agente de concentración el proceso de redisolución. Sobre la geofísica realizada en este trabajo se logró aplicar un método eléctrico pasivo con el fin comprobar su efectividad y comprender la configuración geométrica en profundidad de los salares. Por último, se realizó una interpretación de la litología volcánica predominante en el área de estudio, logrando una comprensión de los procesos efusivos, sus depósitos y cómo interactúan con los salares. Además de comprobar litologías, procesar datos hidroquímicos, obtener información en profundidad de los salares sin la necesidad de realizar un pozo se genera nueva información y se propone una metodología primaria de exploración para ubicación de pozos con fines de estimación de potencial de litio.

Abstract

The purpose of this study is to understand the physical and chemical characteristics of the salt flats in the province of Loa, specifically the Laco, Aguas Calientes Norte and Sur, Pujsa, and the Tuyajto lagoon. For this, an exhaustive collection of bibliographic information was developed on the hydrochemistry of surface waters in the salt flats, as well as fieldwork conducting surveys of geological and geophysical information, which was then used to formulate maps, hydrochemical characterization of waters, geo-electric models, and finally, the integration of the data collected to obtain a profile of schematic salt flats. The results of these analyses show that the hydrochemistry of the analyzed salt flats is sodium-chloride with a bicarbonate variant. Additionally, it has an enrichment in Na and Ca derived in part by interaction with the surrounding rocks and deposits and as a major concentration agent, the redissolution process. On the geophysics carried out in this work, a passive electric method was applied to verify its effectiveness and understand the geometric configuration in depth of the salt flats. Lastly, an interpretation of the predominant volcanic lithology in the study area was carried out, achieving an understanding of the effusive processes, their deposits, and how they interact with the salt flats. In addition to verifying lithologies, processing hydrochemical data, obtaining in-depth information on the salt flats without the need to drill a well, new information is generated, and a primary exploration methodology for locating wells for the estimation of lithium potential is proposed.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor Carlos Ramirez, por su inestimable ayuda y apoyo durante todo el proceso de elaboración de esta tesis. Su orientación, experiencia y paciencia han sido fundamentales para llevar a cabo este trabajo de investigación.

También quiero agradecer a los profesores y profesoras del departamento de ingeniería de la Universidad Andres Bello, quienes me han brindado una educación de calidad y han contribuido al desarrollo de mis habilidades y conocimientos. En particular, quiero agradecer a Jean Baptiste, Silvio Ferraris, Luis Ribba, Ximena Contardo y Francisco Herve, por su dedicación, entusiasmo y compromiso con mi formación académica.

Asimismo, deseo expresar mi gratitud a mis compañeros y compañeras de carrera, quienes han sido un gran apoyo durante estos años de estudio. Agradezco especialmente a Sebastián Alarcón, Sebastián Muñoz, Sebastián Gallardo, Camilo Acuña y Josué Miranda por su amistad, colaboración y motivación en momentos clave de este proyecto.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia y amigos por su constante apoyo, ánimo y paciencia durante esta etapa de mi vida. Sus palabras de aliento y motivación han sido un gran impulso para alcanzar mis objetivos y llevar a cabo esta investigación.

¡Gracias a todos y todas!

Tabla de Contenido

Resumen	2
Abstract	3
Agradecimientos	4
Tabla de Contenido	5
1. Introducción	12
1.1 Aspectos generales	12
1.2. Problema de investigación	13
1.3 Objetivos generales	14
1.4 Objetivos específicos	14
1.5 Hipótesis de trabajo	14
2. Área de Estudio y Antecedentes Generales	15
2.1 Ubicación y accesos	15
2.2 Clima	16
2.3 Flora y fauna	17
2.3.1 Flora	17
2.3.1.1 Pajonal:	18
2.3.1.2 Tolar:	18
2.3.1.3 Vega y Bofedal:	18
2.3.2 Fauna	19
2.4 Trabajos Anteriores	20
2.5. Marco Geológico	22
2.5.1 Geología regional	22
2.5.1.1 Cordillera de los andes	22
2.5.1.2 Unidades fisiográficas	23
2.5.1.3 Cordillera occidental	24
2.5.1.4 Puna de Atacama	24
2.5.1.5 Cuencas endorreicas	26
2.5.2 Geología local.	27
2.5.2.1 Caldera La Pacana. (Mioceno - Plioceno)	27
2.5.2.2 Ignimbrita Atana. (Plioceno)	28
2.5.2.3 Ignimbrita Cajón (Plioceno)	28
2.5.2.4 Domos Dacíticos (Plioceno)	28

2.5.2.5 Depósitos Aluviales (Cuaternario)	29
2.5.2.6 Estratovolcán Alitar (Cuaternario)	29
2.5.2.7 Conjunto de Estratovolcanes II Plv (Plioceno)	29
2.5.3 Geología del Sistema Salino	30
2.5.3.1 Qss	30
2.5.3.2 Qzv	30
2.5.3.3 La	30
2.5.3.4 QSL	30
2.5.4 Geología Estructural	30
2.5.5 Geomorfología	31
3. Marco teórico	32
3.1 Conceptos relevantes para este trabajo	32
3.1.1 Definición de Salar	32
3.1.2 Tipos de salares	33
3.1.3 Química de salmueras	34
3.1.4. Zonación mineral	37
3.2 El litio: Su situación en Chile y en el mundo.	38
3.2.1 Ocurrencia	38
3.2.2 Distribución de salares del norte de Chile	39
3.3 Método geoelectrico	40
3.3.1 Potencial Espontáneo	40
3.3.1.1 Origen del potencial espontáneo	40
3.3.1.1.1 Potencial de electro filtración	41
3.3.1.1.2 Potenciales minerales	41
3.3.1.1.3 Potenciales de difusión	41
3.3.1.1.4 Potenciales de sedimentación	42
3.3.1.1.5 Potenciales de adsorción	42
3.3.1.1.6 Potenciales termoeléctricos	42
3.3.1.2 Fundamento Teórico	42
3.3.1.3 Metodología de campo	44
3.3.1.3.1 Configuración del gradiente	44
3.3.1.3.2 Configuración de base fija (o campo total)	45
3.4 Hidroquímica	46
3.4.1 Diagramas hidrogeoquímicos	46
3.4.1.1 Diagrama de Stiff	46
3.4.1.2 Diagrama de Piper	46

4. Metodología de trabajo	47
4.1 Pre-Terreno	47
4.1.1 Recopilación de antecedentes	47
4.1.2 Caracterización geomorfológica	48
4.2 Terreno	48
4.2.1 Geología de superficie	48
4.2.2 Geología de subsuperficie	49
4.2.3 Geofísica	50
4.3 Post terreno	50
4.3.1 Caracterización hidrológica	50
4.3.2 Caracterización hidrogeológica	50
4.3.3 Análisis Espectral	50
4.3.4 Caracterización de salares	50
4.3.5 Modelación Geoelectrica	51
4.3.6 Análisis hidroquímico.	51
4.3.7 Descripción Litológica.	51
5. Resultados	51
5.1 Hidrografía de la zona de estudio	51
5.1.1 Delimitación de las cuencas hidrográficas	51
5.2 Geología de los salares y alrededores	54
5.2.1 Mapa geológico	54
5.2.2 Unidades descritas	54
5.2.2.1 Unidades volcánicas	54
5.2.2.2 Depósitos	56
5.2.2.3 Intrusivos subvolcanicos	57
5.2.2.4 Alteraciones	57
5.2.3 Caracterización de Sistemas Salinos	57
5.2.3.1 Salar Pujsa	57
5.2.3.1.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino	57
5.2.3.1.2 Descripción General	58
5.2.3.1.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino	58
5.2.3.1.4 Litología y zonación	59
5.2.3.2 Salar Aguas Calientes Norte	61
5.2.3.2.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino:	61
5.2.3.2.2 Descripción General:	61
5.2.3.2.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino	62

5.2.3.2.4 Litología y zonación:	62
5.2.3.3 Salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)	65
5.2.3.3.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino:	65
5.2.3.3.2 Descripción General:	65
5.2.3.3.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino:	66
5.2.3.3.4 Litología y zonación:	66
5.3.3.4 Salar El Laco	68
5.3.3.4.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino	68
5.3.3.4.2 Descripción General	69
5.3.3.4.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino	69
5.3.3.4.4 Litología y zonación	69
5.3 Elementos Mayores	72
5.4 Caracterización Geofísica	77
5.4.1 Potencial espontáneo	77
5.4.1.1. Salar Aguas calientes Norte	78
5.4.1.2 Salar Pujsa	79
5.4.1.3 Salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)	82
5.4.1.4 Laguna Tuyajto	83
5.4.1.5 Salar El Laco	85
6. Análisis y discusión	86
6.1 Hidroquímica	86
6.1.1 Análisis de las Aguas por salar	87
6.1.1.1 Salar Pujsa	87
6.1.1.2 Salar Aguas calientes Norte, Salar de Aguas Calientes Sur, Laguna Tuyajto y Salar el Laco.	89
6.1.1.2.1 Sódico-Cloruradas Sureste	90
6.1.1.2.2 Sódico-Cloruradas Noreste	90
6.2 Geofísica	91
6.2.1 Perfil geológico esquemático, Salar aguas calientes norte.	91
6.2.2 Perfil geológico esquemático, Salar Pujsa.	92
6.2.3 Perfil geológico esquemático, Salar Aguas Calientes Sur.	93
6.2.4 Perfil geológico esquemático, Laguna Tuyajto.	93
6.2.5 Perfil geológico esquemático, Salar El Laco.	94
6.3 Petrogénesis volcánica	94
6.4 Optimización en la cantidad y ubicación de sondajes exploratorios	96
7. Conclusiones	98

8. Bibliografía	100
9. Anexos	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ubicación zona de estudio.	16
Figura 2. Mapa zonas climáticas Koppen. Mapa de elaboración propia. Fuente de Datos: http://www.rulamahue.cl/mapoteca/presentaciones/chile_clima.html	17
Figura 3. Festuca Orthophylla, conocida localmente cómo paja brava.	18
Figura 4. Bofedal, reserva nacional Los Flamencos, presencia de Vicuñas.	19
Figura 5. Tagua en bofedal	20
Figura 6. Segmento de los Andes Centrales y del Oroclino boliviano, dentro de la extensión de la cadena Andina Sudamericana.	22
Figura 7. Perfil morfoestructural de la II Región de Chile, modificado de Moreno y Gibbons (2007).	23
Figura 8. Perfil esquemático de unidades fisiográficas entre los 23°-24°S, donde se identifica en un cuadro rojo la zona de estudio (modificado de Charrier, 1993).	24
Figura 9. Mapa topográfico de los Andes Centrales que muestra diferencias de relieve entre el Altiplano (Altiplano Basin), la Puna y la Depresión preandina (Atacama Basin) (Allmendinger, 1997).	26
Figura 10. mapa geológico.	27
Figura 11. Perfil esquemático geomorfológico de depósitos salinos del norte de Chile	32
Figura 12. Modelos que ilustran las diferencias entre salares maduros e inmaduros. Extraído y modificado de Houston et al., 2011.	34
Figura 13. 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	37
Figura 14. Esquema teórico de la zonación salina en los salares Richter-Bernburg 1972 y Vila, 1975.	38
Figura 15. Mapa de distribución de salares del norte de Chile-	39
Figura 16. Diagrama de Stiff	46
Figura 17. Diagrama de Piper	47
Figura 18. Mapa ubicación puntos de muestreo.	49
Figura 19. Red de drenaje, cuencas e isoyetas abarcadas en el área de estudio.	52

Figura 20. Modelos topográficos en planta.....	53
Figura 21. Mapa geológico 1:500.000 salares provincia del Loa. Elaboración propia.	54
Figura 22. Unidades volcánicas.	55
Figura 23. Unidades volcánicas	56
Figura 24. Depósitos	57
Figura 25. Ondulaciones producto del viento en la planicie del salar.	59
Figura 26. Diferenciación de unidades litológicas del salar.	59
Figura 27. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.	60
Figura 28. Mapa zonación en salar Pujsa. Elaboración propia.	61
Figura 29. Coluvios.....	62
Figura 30. Diferenciación de unidades litológicas del salar	63
Figura 31. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.	64
Figura 32. Mapa zonación en salar Aguas calientes norte. Elaboración propia	65
Figura 33. Diferenciación de unidades litológicas del salar.	66
Figura 34. Diferenciación de unidades en los alrededores del salar	66
Figura 35. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.	67
Figura 36. Mapa zonación en salar Pujsa. Elaboración propia.	68
Figura 37. Diferenciación de unidades litológicas alrededor del salar	69
Figura 38. A) Capa superficial de halita. B) Lagunas en zona de halita. C) Barro lacustre o arcillas presentes bajo lagunillas. D) Arcillas bajo costras de halita en zonas secas.....	70
Figura 39. Diferenciación de unidades litológicas del salar	70
Figura 40. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.	71
Figura 41. Mapa preliminar zonación en salar Pujsa. Elaboración propia.	72
Figura 42. Se pueden observar los mapas con las ubicaciones del muestreo para cada salar- ABCD	73

Figura 43. Diagramas de Piper para las muestras de lagunas, canales y vertientes para los cuatro salares.....	74
Figura 44. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar Aguas calientes norte.....	75
Figura 45. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar Pujsa	76
Figura 46. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar El Laco.....	76
Figura 47. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar Aguas Calientes Sur.	77
Figura 48. Fotografía ubicación medición salar Aguas Calientes Norte	78
Figura 49. Mapa Ubicación perfil A-A”, salar Aguas Calientes Norte.	78
Figura 50. Perfiles Geoeléctricos de potencial espontáneo 30 puntos medidos en mV.	79
Figura 51. Fotografía ubicación medición salar Pujsa.....	79
Figura 52. Mapa Ubicación perfiles B-B” y C-C”, salar Pujsa.	80
Figura 53. Resultado perfiles “potencial espontáneo” B-B”, salar Pujsa.	81
Figura 54. Resultado perfiles “potencial espontáneo” C-C”, salar Pujsa.	81
Figura 55. Fotografía ubicación medición salar Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar).82	
Figura 56. Mapa Ubicación perfiles D-D”, salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)	82
Figura 57. Resultado perfiles “potencial espontáneo” D-D”, salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar).	83
Figura 58. Fotografía ubicación medición Laguna Tuyajto.....	83
Figura 59. Mapa Ubicación perfiles E-E”, Laguna Tuyajto.	84
Figura 60. Resultado perfiles “potencial espontáneo” E-E”, Laguna Tuyajto.	84
Figura 61. Fotografía ubicación medición Salar El Laco	85
Figura 62. Mapa Ubicación perfiles F-F”, salar El Laco.	85
Figura 63. Resultado perfiles “potencial espontáneo” F-F”, salar El Laco.	86
Figura 64. Mapa de ubicación salares definidos.....	88
Figura 65. Diagramas de Stiff para las sódico-bicarbonatadas.....	88
Figura 66. Mapa de ubicaciones salares definidos.....	89
Figura 67. Sección geológica esquemática salar aguas calientes norte.	91
Figura 68. sección geológica esquemática salar Pujsa B-B”	92
Figura 69. Sección geológica esquemática salar Pujsa C-C”	92
Figura 70. Sección geológica esquemática salar Aguas calientes sur D-D”.....	93
Figura 71. Sección geológica esquemática Laguna Tuyajto E-E”.....	93
Figura 72. Sección geológica esquemática salar El Laco F-F”	94

Figura 73. Sitios de segregación de partículas en corrientes de densidad piroclástica (tomado de Branney y Kokelaar, 2002). El polígono indica asociación de facies vistas en terreno.94

Figura 74. Arquitectura longitudinal de litofacies de ignimbrita (tomado de Branney y Kokelaar, 2002).....95

Figura 75. Zonas recomendadas para perforaciones de exploración.95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes generales Salar Pujsa.....58

Tabla 2. Antecedentes generales Salar Aguas Calientes Norte.61

Tabla 3. Antecedentes generales Salar Aguas Calientes Sur.....65

Tabla 4. Antecedentes generales Salar El Laco.68

Tabla 5. Profundidades recomendadas pozos de exploración.96

1. Introducción

1.1 Aspectos generales

Los salares son depósitos salinos continentales localizados en cuencas endorreicas, generados por las 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. 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.

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.

Los salares Pujsa, El Laco y Aguas calientes norte y sur han 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 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.

1.2. Problema de investigación

El sector de río Zapaleri y Toconao específicamente los salares Pujsa, El Laco, Aguas Calientes norte y sur han sido objeto de estudios que integran la geología regional de la cuenca de cada salar, análisis hídricos e hidroquímicos, todos realizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). En esta investigación se entregará información complementaria y original de la zona, estudio de sensores remotos, que permite identificar los diferentes tipos de

costras salinas, su distribución, exploración geofísica del área y recopilación de evolución hidroquímica. El último mapeo geológico fue en 1985 por Ramírez y Gardeweg, 1985. Por lo que esta tesis se presenta como una gran oportunidad de actualizar, complementar la información del área, proponer una metodología primaria de exploración para ubicación de pozos con fines de estimación de potencial de litio, entender la hidroquímica de las aguas superficiales de los salares y demostrar hipótesis sobre procedencia de concentración de elementos en salares. Determinar si es posible caracterizar la morfología de un salar a través de una medición indirecta y por último dar una explicación a la distribución litológica del área de estudio.

1.3 Objetivos generales

Caracterización de los antecedentes geológicos e hidrogeológico del Sector Río Zapaleri y Toconao, Región de Antofagasta, describiendo su geología superficial y del mismo modo, evaluar y reconocer la hidroquímica del salares El Laco, Pujsa, Aguas calientes norte y sur.

1.4 Objetivos específicos

- Actualización del modelo litológico
- Caracterización de los salares en sus aspectos, geológicos, e hidroquímicos.
- Caracterizar parámetros hidrogeológicos relevantes
- Estudiar la hidroquímica de las salmueras superficiales de los salares mediante recopilación de estudios anteriores
- Recopilar y generar información del subsuelo en los salares de manera indirecta
- Integrar la información recolectada de manera de caracterizar la hidrogeología de los salares de la cuenca “Cuenca endorreica entre fronteras y Salar Atacama”
- Analizar el conjunto de antecedentes expuestos lo que permite establecer el estado actual del conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico generalizado de los sistemas altoandinos de este territorio.
- Proponer nuevas metodologías de levantamiento de información no invasivas para la estimación de potencial de litio.

1.5 Hipótesis de trabajo

El área de trabajo se caracteriza por la presencia de salares en la provincia de El Loa en la región de Antofagasta, estos salares se encuentran rodeados por rocas volcánicas afectadas por intemperismo las litologías y procesos de redisolución proveen de minerales a los salares los

cuales cuentan con zonificaciones minerales en superficie y zonaciones con respecto a la presencia de aguas subterráneas y litologías. De este modo sería esperable poder determinar altas concentraciones en Na y Ca, aguas superficiales sódico-cloruradas, la morfología de los salares en profundidad mediante métodos indirectos.

2. Área de Estudio y Antecedentes Generales

2.1 Ubicación y accesos

Los salares de Pujsa, Salar Aguas Calientes Norte, Salar Aguas Calientes Sur, Laguna Tuyajto y Salar El Laco, se ubican dentro de la Reserva Nacional Los Flamencos y pertenecen a la lista de humedales de importancia internacional RAMSAR.

Los salares se ubican en la cuenca “Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama” y corresponde a una cuenca endorreica ubicada en la II Región de Antofagasta, provincia de El Loa, comuna de San Pedro de Atacama (Figura 1).

Para acceder al salar desde Calama se debe ingresar a la ruta 24 hasta conectar con la ruta 27 hasta el paso Jama, límite con Argentina y la ruta 23 para ir a paso Sico.

Se requiere el acceso al salar con vehículo al menos 4x2 y circular por caminos establecidos que rodean el salar

Mapa de ubicación

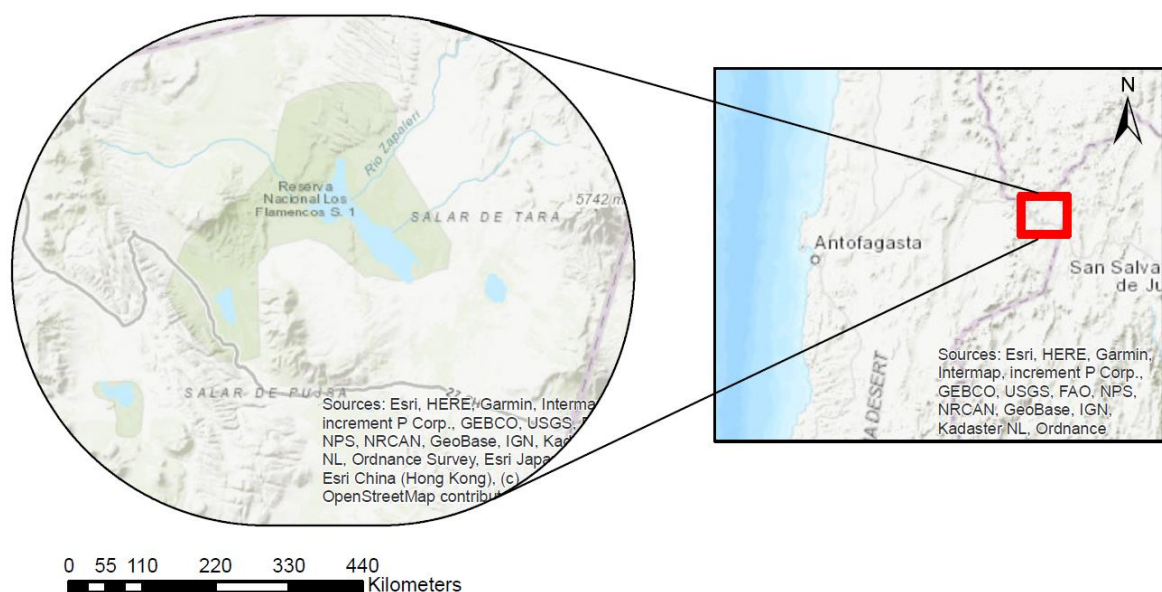


Figura 1. Mapa de Ubicación zona de estudio.

2.2 Clima

El clima predominante es el desértico, aun así, a escala local existen diferencias climáticas importantes.

En los sectores del Salar de Aguas Calientes norte- Salar Aguas Calientes Sur, Salar de Pujsa y El Laco, la temperatura media mensual varía entre los 0 y los 7 °C, mientras que la media máxima se encuentra entre los 3 y los 12 °C y la media mínima entre 3 y 5 °C. Sobre las precipitaciones se aproximan a 150 mm/año, la evaporación potencial: 1.500 mm/año (Figura 2).

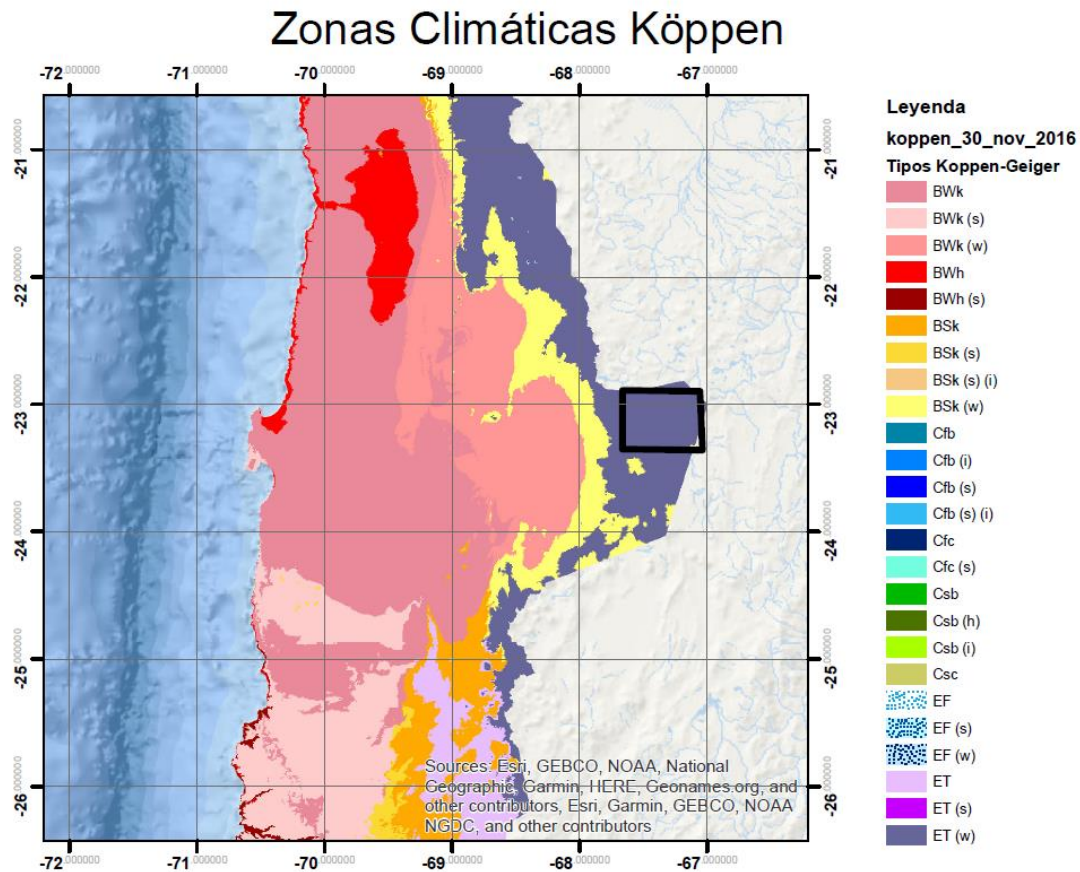


Figura 2. Mapa zonas climáticas Köppen. Mapa de elaboración propia. Fuente de Datos: http://www.rulamahue.cl/mapoteca/presentaciones/chile_clima.html

2.3 Flora y fauna

2.3.1 Flora

La vegetación de la Puna de Atacama se desarrolla sobre el margen oriental del Desierto de Atacama, y ha sido descrita como la provincia biogeográfica de la Puna, denominado Estepa Alto Andina, la cual se extiende a través de la Cordillera de los Andes entre los 15° - 28° S (Udvardy, 1975). Se caracteriza fundamentalmente por cuatro tipos biológicos: plantas pulvinadas o en cojín, gramíneas cespitosas, pastos duros o coirones y arbustos de follaje bajo o tolar.

La vegetación identificada en el área de estudio se encuentra representada por tres formaciones vegetacionales, las que corresponden a pajonal, tolar, vega y bofedal, las que poseen las características que se describen a continuación.

2.3.1.1 Pajonal:

Corresponde a extensas pampas arenosas dominadas por gramíneas llamadas comúnmente paja brava, no asociada a disponibilidad de agua en el suelo, sino más bien a precipitaciones estacionales (Villagrán et al., 1983). Es un excelente indicador de altura, ya que el pajonal aflora de manera absoluta sobre la cota de los 3.900 msnm. En términos generales la mayor parte de la vegetación del área de estudio corresponde a una formación pajonal de altura inferior a 50 cm y cobertura que varía de muy escaso (5 - 10%) a claro (25 - 50%), en el cual como dominantes destacan *Jarava frigida* (coirón), *Festuca Orthophylla* (paja brava) (Figura 3), *Deyeuxia eminens* (waylla) y *Juncus articus* (junquillo) (EIA Pampa Colorada, 2007).

2.3.1.2 Tolar:

En la zona de estudio, el tolar se corresponde con laderas, promontorios rocosos o zonas de escurrimiento superficial caracterizadas por la presencia de formas arbustivas bajas (Villagrán et al., 1983). En algunos sectores el pajonal se encuentra acompañado por especies arbustivas de altura inferior a un metro, destacando como dominantes *Mulinum crassifolium* (chukikaylla), *Adesmia* y *Parastrephia quadrangularis* (chacha-coba), entre otras (EIA Pampa Colorada, 2007).



Figura 3. *Festuca Orthophylla*, conocida localmente como paja brava.

2.3.1.3 Vega y Bofedal:

En las regiones I y II de nuestro país, la presencia de un suministro constante de agua condiciona la existencia de sistemas vegetacionales característicos conocidos como vegas y bofedales. Estos corresponden a formaciones caracterizadas por una condición hídrica

permanente, ya sea superficial o subterránea. Presentan una gran diversidad biológica respecto al entorno, con un mayor número de especies vegetales propias de estos sistemas. Los bofedales se producen cuando hay aguas corrientes con mayor concentración en oxígeno y menor concentración de sales, a diferencia de la mayor abundancia de aguas estancadas y salinas que desarrollan las vegas. La flora se encuentra representada por un total de 101 especies, pertenecientes a 23 familias y 44 géneros. Los géneros más frecuentes en pampas y laderas son *Stipa*, *Maihueiopsis* y *Adesmia*, y en bofedales (Figura 4), *Scirpus*, *Potamogeton*, *Puccinellia* y *Stipia* (EIA, 2007). De acuerdo con el listado del Libro Rojo de la Flora Terrestre, no se registran especies vegetales catalogadas en alguna categoría de conservación (Benoit, 1989).



Figura 4. Bofedal, reserva nacional Los Flamencos, presencia de Vicuñas.

2.3.2 Fauna

Estudios de la fauna de vertebrados dentro de la región, permiten reconocer algunas especies típicas que caracterizan al sector, como los artiodáctilos *Lama guanicoe* (Guanaco) y *Vicugna vicugna* (Vicuña) (Figura 4), y los roedores *Eligmodontia puerulus* (Laucha de la Puna), *Abrocoma cinerea* (Chinchilla) y *Lagidium viscacia* (Vizcacha), para la mastofauna.

La avifauna típica de la región incluye a especies de passeriformes de los géneros *Pterocnemius pennata* (Suri o Ñandú), *Geositta* (Minero), *Sicalis* (Jilguero) y *Phrygilus* (Cometocino), no obstante, lo más característico son las aves acuáticas de los salares y lagunas altoandinas *Phoenicoparus* y *Phoenicoparrus* (Flamencos Chileno, Flamencos Andinos y de James), *Fulica ardesiaca* (taguas) (Figura 5) y diversas especies de patos. Entre la herpetofauna se pueden

encontrar diferentes especies del género *Liolaemus* (lagartija), muchas de las cuales sólo se encuentran en esta región.

Se identifican 4 especies de mamíferos, 14 especies de aves, 2 especie de reptil y 16 especies de artrópodos (2 arácnidos, 1 escorpión y 13 insectos) (EIA Pampa Colorada, 2007). Del total de especies identificadas, se puede establecer que *Vicugna vicugna* (Vicuña) y *Lama guanicoe* (Guanaco), estarían dentro del listado de las especies en peligro de extinción. En el caso de *Lagidium viscacia* (Viscacha), *Larus serranus* (Gaviota Andina), *Chloephaga malanoptera* (Piuquén) y *Phoenicoparrus andinus* (ParinaGrande), estas se encuentran en categoría de —vulnerables‖ para la II Región (EIA Pampa Colorada, 2007).



Figura 5. Tagua en bofedal

2.4 Trabajos Anteriores

Comúnmente la información de los salares es de libre acceso, en memorias, informes de universidades o entidades gubernamentales, como la Dirección General de Aguas o el Servicio Nacional de Geología y Minería.

Los principales trabajos utilizados en esta investigación, poniendo énfasis en aquellos relacionados a la hidroquímica de aguas, hidrología y geología de superficie. (García *et al.*, 1960) documentaron el primer reconocimiento geológico entre el salar de Incahuasi y el cerro Zapaleri y definieron tres secciones estratigráficas: una marina y continental paleozoica, otra continental terciaria, y lavas basálticas y andesíticas del Cuaternario. (Marinovic *et al.*, 1976) realizaron una caracterización de la alta cordillera de la región de Antofagasta dividiendo los volcanes en tres series, de acuerdo con el grado de erosión de los conos. (Dingman, 1967),

(Díaz *et al.*, 1972), (Dalannais, 1979) y (Mardones, 1986) estudian la hidrogeología de la Cuenca del salar de Atacama en forma temprana, todos incluyen mediciones hidroquímicas de elementos mayores, sin embargo, el primer estudio extensivo fue realizado por (Moraga *et al.*, 1974), que incluyeron más de 200 análisis químicos de aguas y salmueras del salar. (Bevacqua, 1992) sintetizó información geológica y estratigráfica, incluyendo perfiles de pozos de hasta 500 m de profundidad. (Alonso y Risacher, 1996) realizaron análisis hidroquímicos de elementos mayores y balance salino de distintos sectores del salar, basándose en las muestras de (Díaz y otros 1972), deduciendo que los aportes salinos antiguos debieron ser mucho mayores a los actuales. Risacher y otros (1999) realizaron un estudio de aguas en cuencas cerradas para las actuales regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. Éste trabajo contiene hidroquímica de elementos mayores y menores de las lagunas saladas, incluyendo el Salar de Aguas Calientes 2 y la Laguna Tuyajto. La empresa Minera Escondida Limitada (2007) presentó un estudio de impacto ambiental para un proyecto que consistía en la extracción de aguas subterráneas a partir de ciertas cuencas de la Puna de la región de Antofagasta. Dentro del estudio se recopilaron antecedentes geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos. Cervetto (2012) se centra en caracterizar el funcionamiento hidráulico de las cuencas endorreicas del Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, la Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tepas y Salar El Lago. Deduce la existencia de continuidad hidráulica y flujo de aguas subterráneas profundas entre las distintas cuencas mediante hidroquímica de elementos mayores e isótopos de oxígeno e hidrógeno. La DGA realizó un estudio titulado “Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de Recursos Hídricos del Salar de Atacama” (DGA, 2014) que se enfoca principalmente en estudiar la evaporación que se produce en el Salar de Atacama. Además de numerosas mediciones, se realizó una recopilación bibliográfica de datos hidroquímicos de elementos mayores de seis fuentes distintas allí citadas. Ortiz y otros (2014) se enfocan en determinar el origen de las aguas del ecosistema Soncor y en su manejo ambiental. Dentro de los análisis que realizan utilizan hidroquímica de elementos mayores e isótopos de oxígeno, hidrógeno, azufre y estroncio. Finalmente, diversos autores realizan descripciones detalladas de litología, definición de unidades, dataciones, reconocimiento de estructuras y estudios geoquímicos regionales, que se resumen y actualizan en las cartas geológicas; Hoja Toconao (Ramírez y Gardeweg, 1982), Hoja Río Zapaleri (Ramírez y Gardeweg, 1985). Estas cartas cubren la mayor parte del área de estudio a distintas escalas y son la base del marco geológico de este trabajo.

2.5. Marco Geológico

2.5.1 Geología regional

2.5.1.1 Cordillera de los andes

La Cordillera de los Andes es la cadena montañosa de Sudamérica que se extiende casi paralela a la costa del Pacífico, desde el cabo de Hornos hasta las proximidades de Panamá. Considerando que la Cordillera de Los Andes se extiende por casi 8.000 km a lo largo del margen occidental del continente sudamericano, es posible dividirla en los siguientes segmentos de norte a sur: Los Andes Septentrionales ($12^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$), **Andes Centrales ($5^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{S}$)** y Andes Patagónicos ($40^{\circ}\text{S} - 55^{\circ}\text{S}$) (Jordan et al., 1983). La zona de estudio se ubica en los Andes centrales (Figura 6).

Este segmento de cerca de 4.000 kilómetros de largo es también subdividido en tres partes: Andes Centrales del Norte ($5^{\circ} - 13^{\circ}\text{S}$, situados enteramente en Perú), el Oroclino boliviano ($13^{\circ} - 28^{\circ}\text{S}$, desde el sur peruano y boliviano hasta el norte chileno y noroeste argentino), y los Andes Centrales del Sur ($28^{\circ} - 40^{\circ}\text{S}$, en Chile central y en el centro de Argentina occidental). Este estudio se localiza en la parte central de los Andes Centrales, es decir, en la zona curvada denominada Oroclino boliviano.

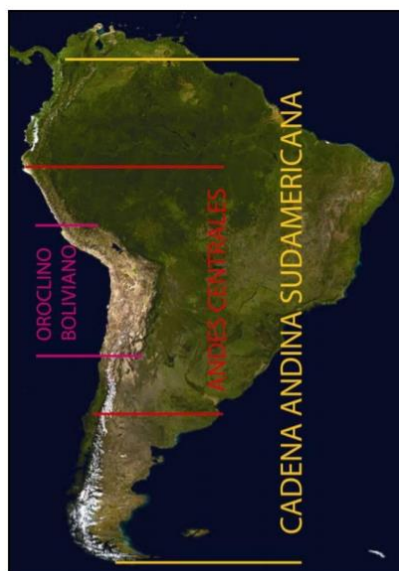


Figura 6. Segmento de los Andes Centrales y del Oroclino boliviano, dentro de la extensión de la cadena Andina Sudamericana.

Cercano al paralelo 18°S , y recorriendo la cordillera de norte a sur, el rumbo característico NW-SE de Los Andes varía, y cambia su orientación preferencial a N-S. Es aquí donde se inicia la sección de los Andes Centrales. Se caracteriza por tener una geometría arqueada, donde la simetría se articula alrededor de un eje que pasa, al este, por la villa de Santa Cruz en Bolivia,

y al oeste, sobre la caleta Loa. La cadena Andina central fue en gran parte desarrollada durante el ciclo orogénico Andino entre el Triásico y el Presente (Kley, 1999). El rasgo morfológico más importante que caracteriza a los Andes Centrales es la existencia de un plateau alto andino que al norte se denomina Altiplano y al sur se denomina Puna o Puna de Atacama, la que puede alcanzar alturas de hasta 4.200 m.s.n.m.

2.5.1.2 Unidades fisiográficas

Se destacan en la II Región de Antofagasta, numerosas unidades fisiográficas de disposición N-S. Una sección entre los 20° - 28° permite reconocer 6 provincias morfogenéticas en el territorio chileno, que de oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko, Depresión Pre-Andina, y Altiplano-Puna con el cordón volcánico en su borde occidental o Cordillera Occidental (Figura 7).

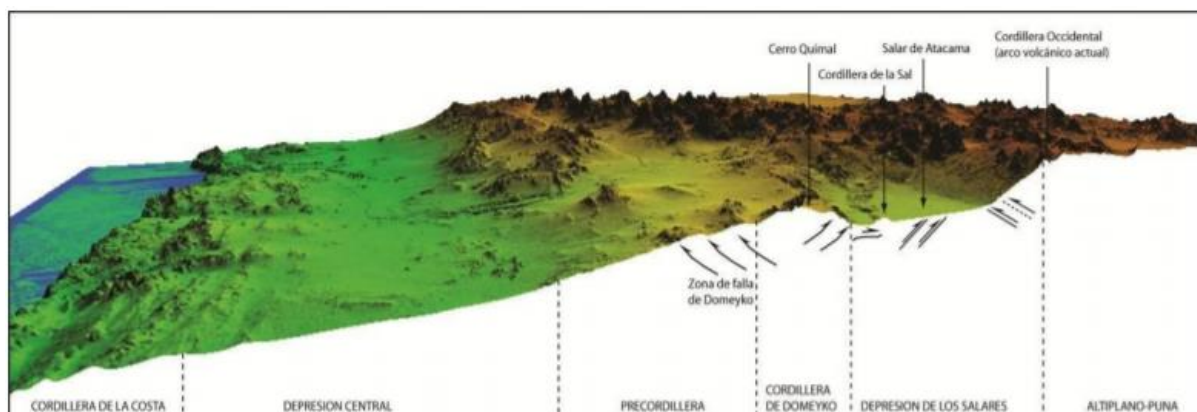


Figura 7. Perfil morfoestructural de la II Región de Chile, modificado de Moreno y Gibbons (2007).

Las cuencas de la II Región de Chile se ubican en la Puna de Atacama (Allmendinger et al., 1997). Estas se ubican en las cuencas intermontanas que se forman entre los altos topográficos de origen volcánico que componen la Cordillera Occidental en este sector (Figura 8). Los relieves volcánicos y sus respectivos depósitos delimitan cuencas endorreicas las cuales son de primer orden en importancia para la formación de depósitos evaporíticos en sus áreas topográficamente más bajas.

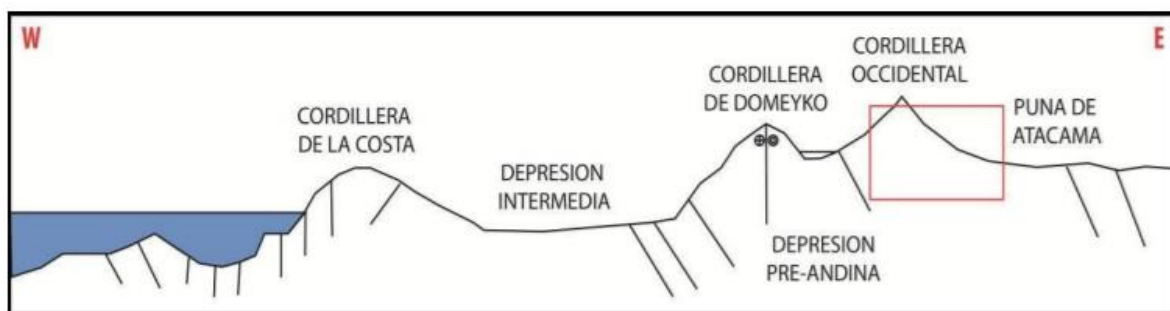


Figura 8. Perfil esquemático de unidades fisiográficas entre los 23°-24°S, donde se identifica en un cuadro rojo la zona de estudio (modificado de Charrier, 1993).

2.5.1.3 Cordillera occidental

El ciclo orogénico Andino abarca desde el Mesozoico al Presente y comprende una serie de arcos magmáticos que migran progresivamente hacia el este. 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 está constituida por un conjunto de edificios volcánicos que forman parte del Complejo Volcánico de los Andes Centrales (de Silva, 1989a). El arco magmático actual describe una acentuada delimitación de un frente de estratovolcanes. Este frente se extiende paralelo al margen oeste del continente sudamericano, a unos 200 – 250 km al este de la fosa Chile Perú (Isacks, 1988; Cahill y Isacks, 1992). Algunos ejemplares son Tata Sabaya y Parinacota (6.348 m), Tarapacá (5.850 m), Nevados de Payachata, San Pedro (6.145 m), Láscar (5.550 m), Socompa (6.051 m), Llullaillaco (6.739 m), Ollagüe (5.863 m), y el volcán más alto del mundo, Ojos del Salado (6.887 m).

2.5.1.4 Puna de Atacama

La característica fisiográfica de primer orden que se observa en los Andes Centrales es la presencia del plateau altiplánico, el segundo más alto del mundo, después del Tíbet, y el más alto de origen no colisional (Isacks, 1988). Corresponde a una meseta que presenta alturas de 3.700 a 4.200 m.s.n.m. Se extiende por unos 1.800 km en forma paralela al margen continental, y tiene un ancho que varía entre los 350 y 400 km. La meseta altoandina, se correlaciona espacial y temporalmente con el magmatismo de arco andino, pero su alzamiento se debe en primera instancia al engrosamiento cortical como respuesta al acortamiento horizontal de una litosfera de menor densidad y mayor temperatura. Sin embargo, dicho acortamiento en la superficie sólo justifica a un 70 – 80 % del engrosamiento cortical observado, sugiriendo que

la adición magmática y otros procesos, tales como el adelgazamiento de la litosfera, hidratación del manto superior, o un underplating tectónico, podrían contribuir significativamente al engrosamiento (Allmendinger et al., 1997).

Conviene mencionar que la meseta altoandina de los Andes Centrales se divide en dos secciones: una al norte de los 22°S que se denomina Altiplano y al sur se denomina Puna. Esta diferencia se establece debido a que ambos segmentos presentan diferencias en sus características morfológicas, estructurales, en las edades de alzamiento, entre otras (Figura 9). A continuación, se describen algunos de los rasgos morfológicos y geológicos que permiten diferenciar ambas unidades.

El alzamiento en la región del Altiplano comenzó hace unos 25 Ma, coincidiendo con un aumento en la tasa de convergencia y con la disminución del ángulo de subducción inferido; el alzamiento de la Puna comienza unos 5 – 10 Ma después (Allmendinger et al., 1997). Isacks (1988) propone un modelo de dos etapas para el desarrollo de la formación de la meseta. En una primera etapa, comienza el alzamiento, hace unos 25 Ma para el segmento del Altiplano, y hace unos 15 – 20 Ma para el segmento de la Puna. Esto ocurre durante un episodio de subducción de bajo ángulo o subducción plana (Coira et al., 1993; Kay et al., 1995), que como consecuencia adelgaza, calienta y ablanda a la litósfera que subyace el área por alzarse. Para la segunda etapa, que comienza hace unos 12 – 6 Ma, el acortamiento cesa en el Altiplano y migra hacia el este, mientras que para la Puna continúa hasta hace unos 1 – 2 Ma (Allmendinger et al., 1997). En comparación al Altiplano, la Puna tiene una elevación promedio mayor, y una topografía más rugosa; la corteza de la Puna es más delgada (42–66 km vs. 62–80 km para el Altiplano, Yuan et al., 2002); y el acortamiento horizontal a lo ancho de la Puna es también menor. Esto sugiere que la gran elevación de la Puna debe tener un soporte dinámico de un manto más buoyante y caliente, hechos que son consistentes con datos sísmicos (Whitmann et al., 1992), y es uno de los argumentos claves a favor de una delaminación de la litósfera, en el Cenozoico tardío, bajo la Puna (Kay y Kay, 1993; Kay et al., 1994a). Otra diferencia es que el Altiplano se limita al este por una ancha faja plegada y corrida de piel delgada, mientras que hacia el este de la Puna, encontramos una faja plegada y corrida de piel gruesa que forma el Sistema Santa Bárbara y las Sierras Pampeanas. Seggiaro y Hongn (1999) y Kley et al. (1999) enfatizan este contraste y su influencia en el estilo de deformación como también en la deformación del volcanismo cenozoico 18 tardío. Riller y Oncken (2003) también infieren una disminución progresiva de la edad del desarrollo del plateau hacia el sur, entre los 18°S a los

29°S, basado en las edades de la sedimentación que marcan el establecimiento de cuencas cerradas. Finalmente, existen diferencias en el ángulo de subducción de la placa de Nazca bajo las regiones altiplánicas del norte y sur, las cuales han sido bien establecidas, a través de datos sísmicos. Al norte de los 24°S, la placa de Nazca subduce con un ángulo entre los 25° y 30°, bajo el margen andino (Cahill y Isacks, 1992; Graeber y Asch, 1999; Gutscher et al., 2000) y el ángulo disminuye hacia el sur hasta alcanzar la región de flat-slab entre los 28° y los 33°S.

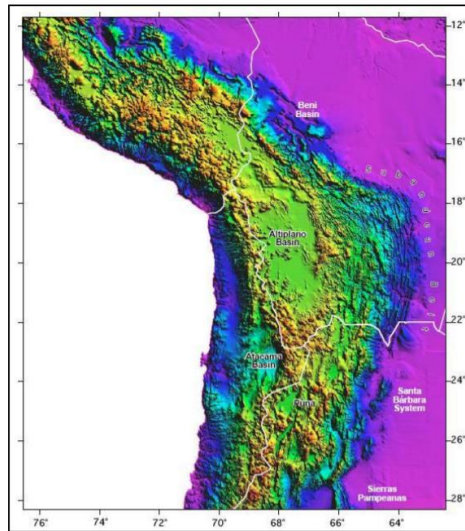


Figura 9. Mapa topográfico de los Andes Centrales que muestra diferencias de relieve entre el Altiplano (Altiplano Basin), la Puna y la Depresión preandina (Atacama Basin) (Allmendinger, 1997).

2.5.1.5 Cuencas endorreicas

Producto del régimen tectónico y volcánico que gobierna a los Andes Centrales, se generan las condiciones estructurales para que existan numerosas cuencas endorreicas con circulación restringida de sus aguas superficiales. El activo volcanismo producido por la efusión de lavas en el borde occidental de la unidad altiplánica, permite la formación de depresiones o pequeñas cuencas endorreicas, intra-montanas, situadas entre los aparatos volcánicos y a alturas cercanas a los 4.000 m.s.n.m. Estas son formadas bajo condiciones climáticas áridas con gruesas acumulaciones evaporíticas y salinas, evidenciados en los numerosos salares y lagos que se distribuyen en las depresiones de la Puna de Atacama. La mayoría corresponde a cuencas de carácter endorreico, lo que indica que la descarga se produce principalmente por evaporación, y en menor proporción, por evapotranspiración. El punto de descarga corresponde a lagos, salares o depresiones ubicadas en el punto topográfico más bajo de la superficie de la cuenca. Varias de estas cuencas presentan depósitos salinos denominados comúnmente salares. Los salares son un rasgo hidrográfico presente en gran parte de las cuencas endorreicas. Estos se forman producto de la acumulación de aguas en cuencas cerradas presentes en regiones áridas, donde la descarga por evaporación en el largo plazo es mayor que la recarga por precipitación.

Los salares están formados localmente por una fracción líquida correspondiente a salmueras, una fracción salina representada por la depositación de diferentes sales transportadas en solución a la cuenca, y una fracción sólida constituida por distintos niveles de arena, limo y arcilla. Predominan sales tales como cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, entre otros.

2.5.2 Geología local.

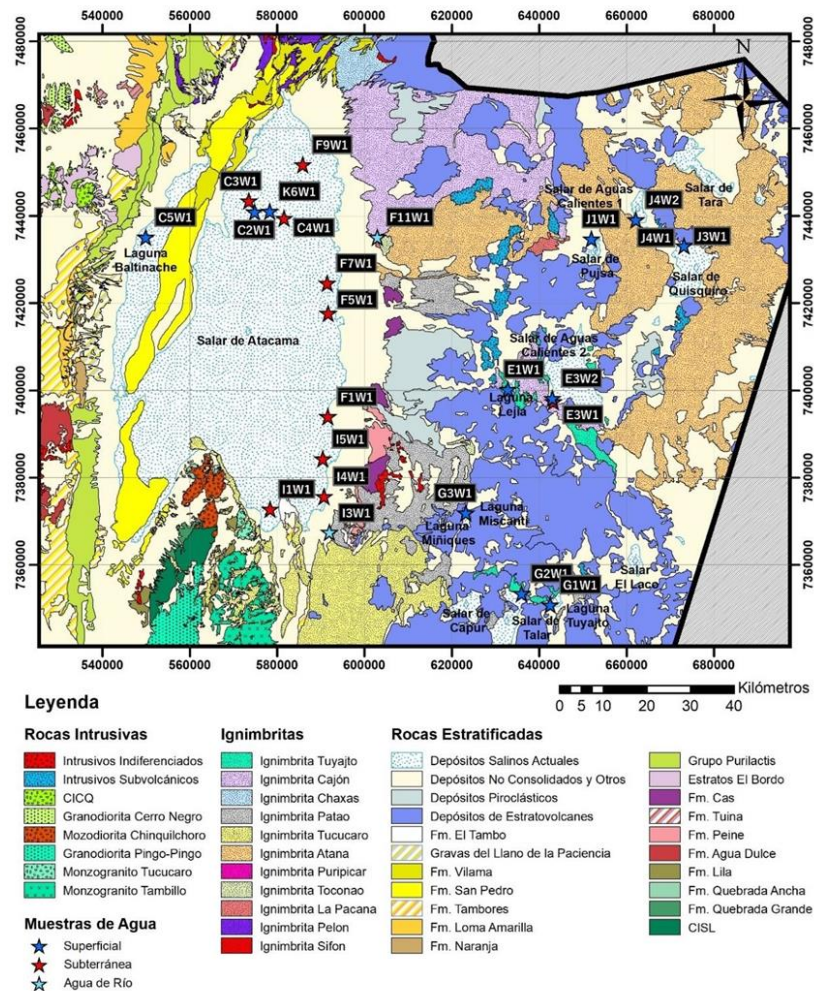


Figura 10. Mapa geológico elaborado por Cofré, 2018.

2.5.2.1 Caldera La Pacana. (Mioceno - Plioceno)

Esta caldera del tipo resurgente es el rasgo geológico más relevante en el entorno del salar y es una de las más grandes mejor expuestas en el mundo con un tamaño de 60 por 35 km. Conforman el complejo volcánico Altiplano-Puna (APVC), una de las más voluminosas concentraciones de ignimbritas neógenas sobre la tierra. El principal evento que generó la caldera ocurrió a las 4 Ma y produjo la Ignimbrita Atana. El estancamiento de esta ignimbrita dentro del área de colapso formó una secuencia de ignimbrita intracaldera mientras que un

pequeño volumen fue expulsado. La resurgencia post-erupción del magma de la ignimbrita condujo a la formación de un bloque alzado compuesto por las ignimbritas intracalderas denominados Cordón La Pacana. Se reconocen además Centros Volcánicos Andesíticos y Dacíticos y Dacitas y Rioltas post Caldera. Estos centros volcánicos afloran al noroeste del salar. Se interpreta que el salar está situado en el foso o depresión intracaldera, desarrollado entre el bloque alzado del domo resurgente (Cordón La Pacana) y el margen oeste de la Caldera La Pacana, lo cual explica que la cuenca esté dominada por rocas volcánicas y ignimbritas. (Lindsay, 2001)

2.5.2.2 Ignimbrita Atana. (Plioceno)

Descrita por Ramírez y Gardeweg (1982) y Lindsay et al. (2001) y corresponde a una toba dacítica de cristales que contiene una facies de intracaldera y una facies extracaldera y que se distribuye hacia el este, oeste y sur de la Caldera La Pacana. La facies intracaldera se compone de un domo resurgente denominado Cordón La Pacana constituido por tobas fuertemente soldadas y cortadas por un sistema de fallas subparalelas mientras que la facies extracaldera al oeste del salar contiene tobas poco a moderadamente soldadas. La facies intracaldera corresponde a tobas dacíticas de cristales fuertemente soldadas. La facies extracaldera se compone de tobas poco a moderadamente soldadas con cristales de plagioclasa cuarzo, biotita, hornblenda, sanidina y clinopiroxeno con minerales de accesorios magnetita, titanita, ilmenita, circón, apatito y alanita y pómez.

2.5.2.3 Ignimbrita Cajón (Plioceno)

Descrita por Ramírez y Gardeweg (1982) como un extenso depósito de rocas piroclásticas, asociadas a las erupciones explosivas tempranas del Complejo Volcánico Purico, y que aflora al noroeste de la cuenca del salar y ha sido obliterado por el emplazamiento del Volcán Toco. También conocida como la Ignimbrita Purico, este depósito cubre la Ignimbrita Atana. La litología descrita corresponde a una toba dacítica y andesítica de cristales, vidrio pómez con un grado de soldamiento débil.

2.5.2.4 Domos Dacíticos (Plioceno)

El volcanismo post-cadera asociado con la Caldera La Pacana se representa por la extrusión de domos dacíticos que afloran en los márgenes oeste, este y sur del bloque resurgente. Se interpreta como las porciones desgasificadas de las erupciones tardías del magma de Atana.

Los afloramientos principales son los cerros Bola con sus lavas y flujos piroclásticos y Purifican al sureste del salar.

La litología corresponde a dacitas ricas en cristales con asociaciones mineralógicas y características geoquímicas similares a la Ignimbrita Atana.

2.5.2.5 Depósitos Aluviales (Cuaternario)

Depósito no consolidado de origen aluvial, derivados de la erosión del domo resurgente y de las paredes de la Caldera La Pacana que afloran en torno al salar, principalmente en sus flancos norte y oeste. Bloques, gravas, arenas y limos. Gardeweg 2004

2.5.2.6 Estratovolcán Alitar (Cuaternario)

Descrita por Ramírez y Gardeweg (1982) como un estratovolcán de forma irregular que aflora en el sector NW de la cuenca del salar y que aloja un cráter parásito activo tipo maar en la base de su flanco SW. Se emplaza sobre la Ignimbrita Atana y presenta diversas manifestaciones fumarolas en dos zonas principales: 1) en el borde del mar y 2) en la Quebrada Quepiaco. Estas emisiones ocurren a través de chimeneas y se caracterizan por tener cristales de azufre. La Quebrada Quepiaco drena hacia el salar en donde hay un bofedal con seis piscinas con aguas termales y gases emitidos. En estas aguas termales, se reconoce enriquecimiento en boro, asociado a este volcán.

El volcán se compone de flujos de lavas andesíticos y dacitas con depósitos de azufre observados tanto en el interior del mar como en el borde extremo NW.

2.5.2.7 Conjunto de Estratovolcanes II Plv (Plioceno)

Conjunto de estratovolcanes erosionados por quebradas poco profundas con cráteres abiertos y flujos de lavas rara vez distinguibles. En el área del El Lago, la erosión ha descubierto el núcleo con alteración hidrotermal solfatárica. Las lavas cubren la Ignimbrita La Pacana y están cubiertas por la Ignimbrita Cajón y ocasionalmente por las Ignimbritas Tuyajto y Patao. Se distribuyen a lo largo de la Cordillera Andina y corresponden a los cerros Agua Amarga, Alítar y Hoyada Grande al noreste de Vega Quepiaco, Pili, Río Negro, Campo Negro, Quélar Norte, Las Tecas, El Hueso, parte del Complejo de El Lago y Cósor al sur de Ojos de Hécar y las coladas basales de los volcanes Lejá, Tuyajto y Miñiques.

Las lavas se componen de andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita y dacitas.

2.5.3 Geología del Sistema Salino

2.5.3.1 Qss

Costra salina de sulfatos con sedimentos y cenizas volcánicas. Ramírez, C.F.; Gardeweg, M. 1982

2.5.3.2 Qzv

Zona de vegas con lagunas pequeñas periféricas. Ramírez, C.F.; Gardeweg, M. 1982

2.5.3.3 La

Costras salinas sulfatada de thenardita en formas de "islas" de hasta 2m de alto sobre la superficie del agua de la laguna principal y azotada por el viento fuerte en otras zonas del salar. Una capa a profundidad contiene una cantidad importante de agua y oropimente, lo cual genera el color anaranjado. Troncoso, R.; Ercilla, O. 2016.

2.5.3.4 QSL

Costras salinas de sulfatos con sedimentos tipo limo. Ramírez, C.F.; Gardeweg, M. 1982

2.5.4 Geología Estructural

La estructura de la cordillera de los Andes en el área de estudio puede ser explicada a través de la caracterización de las principales unidades morfoestructurales.

La cordillera Domeyko constituye un cinturón estructural ubicado en el antearco, dominado por una serie de cordones de basamento Paleozoico elongados N-S. Estos cordones fueron alzados por fallas inversas que transmitieron la deformación a la cobertura Meso-Cenozoica en estructuras de escama gruesa y delgada (Amilibia et al, 2008). Se ha propuesto que el régimen compresivo E-W en el sector comenzó a los 90 Ma durante el inicio del Cretácico Superior como consecuencia de la inversión de las cuencas mesozoicas de trasarco (Mpodozis y otros, 2005; Amilibia y otros, 2008).

A lo largo del escarpe El Bordo existen variaciones de estilo estructural que van desde, un pliegue con núcleo de basamento en la parte norte, a una falla inversa de vergencia este en el sur, la cual coloca el basamento sobre las unidades cenozoicas (Arriagada y otros, 2006 en Henríquez, 2012). El borde occidental de la cordillera Domeyko es bastante menos evidente, en profundidad parece responder a fallas inversas de alto ángulo y vergencia oeste (Victor y otros, 2004). El relleno mesozoico de las cuencas aflora en sinclinales apretados y fallas de alto ángulo

a lo largo del escarpe El Bordo (Mpodozis y otros, 2005; Arriagada y otros, 2006). Gracias a una malla de líneas sísmicas se ha interpretado que el relieve de la cordillera de la Sal es el resultado de un flujo diapírico de rocas Oligocenas a Pleistocenas que habría comenzado durante finales del Mioceno inferior a Mioceno medio asociado a una falla inversa profunda (Muñoz y otros, 2002; Pananont y otros, 2004 en Henríquez, 2012).

La cordillera Occidental hospeda parte importante del arco volcánico desde el Mioceno medio al Reciente, alcanzando elevaciones cercanas a los 6.000 m. La cobertura volcánica reciente oculta gran parte de la geología previa, dificultando la caracterización geológica y estructural. A lo largo de su borde occidental se registra un acortamiento esencialmente E-W que afecta la cobertura ignimbrítica, con fallamiento bivergente activo al menos durante el Plioceno. Hacia el sur, en González y otros (2009) sugirieron que el fallamiento estuvo activo desde gran parte del Oligoceno y Mioceno hasta el Reciente.

Una forma de evidencia indirecta de estas estructuras son la serie de 26 cordones volcánicos alineados N-S a NE-SW que sugieren un fuerte control estructural en el emplazamiento del arco (González y otros, 2009 en Henríquez, 2012). El cordón de Lila, está afectado por una serie de fallas de orientación N-S y, en menor medida, por lineamientos NNW-SSE y NNE-SSW. Edades de trazas de fisión en apatitas indican que este basamento estuvo de 3 a 4 km de profundidad durante el Eoceno. El cordón de Lila cabalga al este sobre el relleno de la cuenca, y se hunde hacia el norte dentro del salar (Arriagada y otros, 2006 en Henríquez, 2012)

2.5.5 Geomorfología

La cordillera Occidental corresponde al frente del arco magmático actual que se extiende paralelo al margen oeste de Sudamérica a unos 200 a 250 km de la fosa de Chile-Perú, presentando alturas que llegan a los 6.800 m.s.n.m. (Isacks, 1988). Está constituida de rocas volcánicas cenozoicas y por una franja de estratovolcanes que sobre yace capas de ignimbritas más antiguas (Allmendinger y otros, 1997). Su relieve escarpado genera pequeñas cuencas cerradas intermontanas en el área de estudio que poseen lagunas, salares y lagunas saladas formadas contemporáneamente con las erupciones Miocenas-Holocenas del arco magmático presente (Rissmann y otros, 2015). Esta es la morfoestructura regional que se encuentra hacia el extremo oriental del área de estudio junto con la Puna (Figura 11).

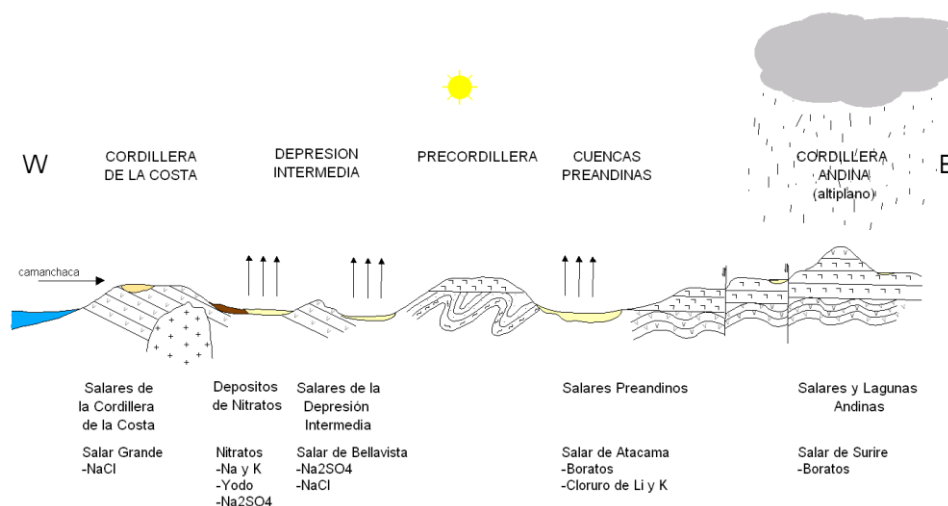


Figura 11. Perfil esquemático geomorfológico de depósitos salinos del norte de Chile

La Puna es parte del plateau altiplánico, el segundo plateau más alto a nivel mundial (Isacks, 1988), que corresponde a una meseta de alturas que oscilan entre los 3.700 a 4.200 m, y se extiende paralela al margen de Sudamérica con un ancho entre los 350 y 400 km. El plateau recibe el nombre de Altiplano bajo los 22° de latitud sur y de Puna sobre esta latitud, siendo esta distinción establecida en base a diferencias en sus características morfológicas, estructurales y edad de alzamiento. Las mayores alturas se registran en el sector de la Puna, además de tener una elevación promedio mayor y una topografía más rugosa. Esta es la morfoestructura regional que se encuentra hacia el extremo oriental del área de estudio junto con la cordillera Occidental, su extensión se limita prácticamente a una delgada franja en el límite territorial con Argentina.

3. Marco teórico

3.1 Conceptos relevantes para este trabajo

3.1.1 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, ocurre el proceso de depositación de múltiples minerales en solución del agua en la cuenca. Dichos minerales suelen ser, boratos, haluros, 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 bajos niveles pluviométricos los cuales son necesarios para la precipitación de sales.

3.1.2 Tipos de salares

Múltiples estudios han clasificado 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 m 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 de superficie y subsuelo, estos corresponden a salares maduros e inmaduros (Figura 12). 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 a 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 períodos 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 corresponden a periodos más secos en la formación del salar.

Los salares maduros se caracterizan por tener regímenes de baja humedad, tienden a ubicarse en las zonas más secas del Altiplano- Puna. Estos salares presentan una uniforme y gruesa secuencia de halita, depositada bajo condiciones subáreas a subacuáticas (Bobst *et al.*, 2001). No obstante, estos salares pueden presentar secuencias de arcillas a causa de inundaciones pasadas y abanicos aluviales o también secuencias de material volcánico como consecuencia de la denudación de los edificios volcánicos. Estas estratificaciones provocan permeabilidades variables, generando niveles permeables e impermeables los cuales se acuñan en los bordes del salar.

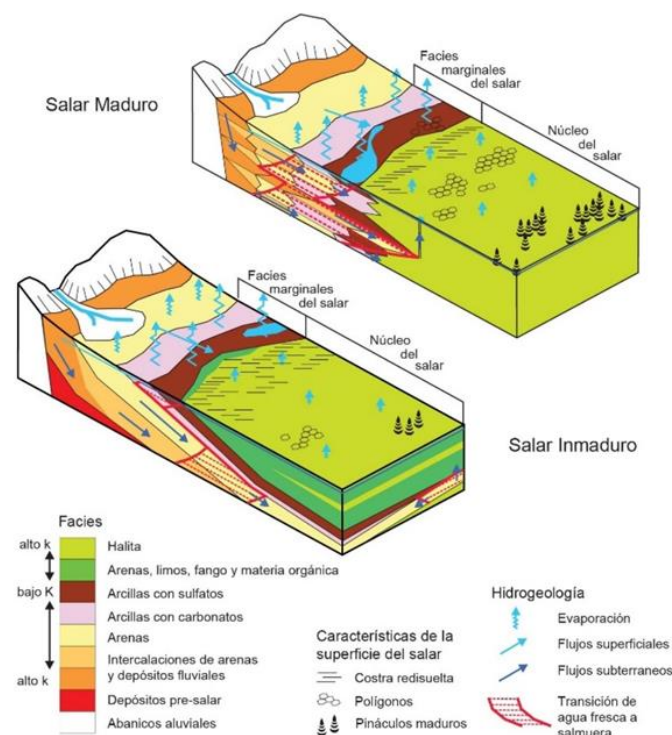


Figura 12. Modelos que ilustran las diferencias entre salares maduros e inmaduros. Extraído y modificado de Houston et al., 2011.

3.1.3 Química de salmueras

Los salares poseen una fase sólida y una líquida. La primera se conforma por una costra salina que corresponde a minerales evaporíticos, en donde predomina la halita, y detritos de origen

aluvial y/o coluvial. La fase líquida, corresponde a una salmuera, la cual se genera producto del exceso de evaporación por sobre la recarga del acuífero del salar. Este proceso provoca una gran concentración de sales disueltas, llegando a precipitar diversos tipos de minerales evaporíticos cuando el grado de saturación excede el límite. La química de las salmueras depende de múltiples factores que determinan su comportamiento, estos pueden ser tanto geológicos y/o 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 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 el agua se evapora, sus componentes disueltos se concentran y precipitan una secuencia de minerales según un orden acorde a las solubilidades crecientes, en consecuencia, primero precipitan los minerales con menor solubilidad y más hacia el centro precipitan los minerales con mayores solubilidades. Es por esto que los salares presentan zonaciones características, donde los primeros minerales en precipitar son los carbonatos, luego los sulfatos y finalmente los cloruros, los cuales tienen las mayores solubilidades (Figura 13). 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 el litio y el potasio, transformando al núcleo del salar en un gran potencial minero. 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 y vía cálcica. El factor que determina que vía evolutiva sigue la salmuera en evaporación es la composición inicial del afluente que ingresa a la cuenca, pequeñas diferencias en las concentraciones iniciales de los compuestos pueden generar salmueras muy diferentes unas de otras. Lo dicho anteriormente se debe a que la evaporación funciona como un mecanismo que

amplifica las diferencias iniciales de la composición de las salmueras (Risacher *et al.*, 1999). Estas cinco vías evolutivas generan tres tipos o familias de salmueras, las salmueras carbonatadas ($\text{Na} / \text{CO}_3 - \text{Cl}$), sulfatadas ($\text{Na} / \text{SO}_4 - \text{Cl}$) y las cálcicas ($\text{Na-Ca} / \text{Cl}$). 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), se ha llegado a la conclusión de que el tipo de salmuera más común en esta zona son: salmueras sulfatadas ($\text{Na} / \text{SO}_4 - \text{Cl}$) y cálcicas ($\text{Na-Ca} / \text{Cl}$) (Houston *et al.*, 2011).

Varios salares existentes en la zona del Altiplano-Puna presentan núcleos salinos ricos en elementos de gran importancia económica como 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 (Bolivia) y Hombre Muerto (Argentina). (Houston *et al.*, 2011).

La presencia de altas concentraciones de potasio, natrio y por sobre todo de litio en los salares del Altiplano-Puna aún se encuentra en debate, estudios postulan que el reciclado de salares antiguos y la redisolución de costras salinas puede contribuir a la concentración de dichos elementos de interés, esto basado en relaciones Na/Cl y Ca/SO_4 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) postulan que la meteorización de rocas volcánicas del cenozoico contribuye a las concentraciones altas de litio, sin embargo, esta hipótesis no explica la alta relación Li/Mg , la cual usualmente es mayor a 0,2, característica particular de los salares del Altiplano-Puna.

La actividad hidrotermal se ha postulado como un posible 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 captura magnesio, dejando al litio en solución (Orti y Alonso, 2000; Gibert *et al.*, 2009; Lowenstein y Risacher, 2009).

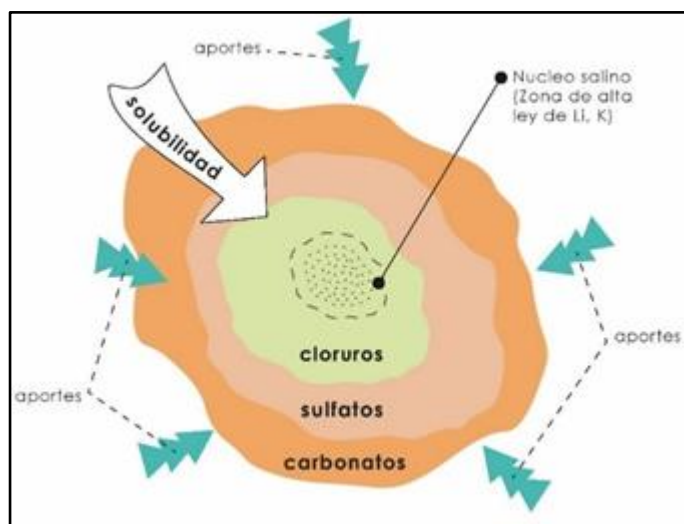


Figura 13. Ilustración creada según los estudios de Hardie y Eugster (1970) de la zonación típica de salares según las solubilidades de los minerales precipitados. Fuente: elaboración propia

3.1.4. Zonación mineral

Los salares pueden presentar una zona mineral definida. Su reconocimiento se realiza mediante la caracterización de los minerales evaporíticos, los que se denomina facies o “Evapofacies minerales” (Vinante y Alonso 2006), las cuales pueden distribuirse en el salar vertical y/o lateralmente (Vila, 1975) (Figura 14).

La distribución de minerales en los salares está principalmente ligada a la alta tasa de evaporación y la solubilidad de los minerales presentes en las salmueras como se describió anteriormente, sin embargo, la distribución y precipitación de las evaporitas está condicionada también por la permeabilidad, fracturas y diaclasas de la roca hospedante (Vega et al, 1997). . La circulación de aguas subterráneas en el interior de la cuenca condiciona la formación de un diseño concéntrico de salinidad creciente que da finalmente con un núcleo halítico en el centro de la cuenca conocido como “bull eye”.

La solubilidad de las diferentes salmueras depende de factores como la temperatura, presión y naturaleza del soluto y el solvente, en el salar solutos están representados por carbonatos, cloruros y sulfatos (Vila, 1975).

Dado lo anterior, es posible generar un modelo de facies evaporíticas o evapofacies a partir del grado o capacidad de solubilidad de los grupos minerales en relación con la distribución espacial dentro del salar. Este modelo de zonación mineral idealizado es concéntrico y está representado en una vista en planta por una zona periférica constituida por el grupo menos soluble de carbonatos, seguido del grupo de solubilidad intermedia sulfatos y una zona concéntrica atribuida a la zona de corteza halítica. Pese a las distintas condiciones tectónicas,

ambientales y geológicas este modelo idealizado concéntrico no siempre se cumple (Vila, 1975).

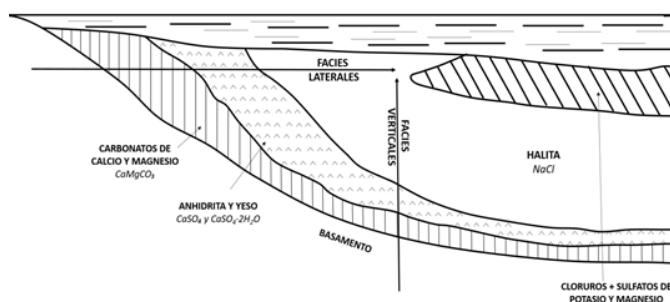


Figura 14. Esquema teórico de la zonación salina en los salares Richter-Bernburg 1972 y Vila, 1975.

3.2 El litio: Su situación en Chile y en el mundo.

El litio es un metal alcalino que, a la fecha, 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 convertido en un elemento clave en el desarrollo de nuevas tecnologías portables. 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 mercado de los vehículos eléctricos y la masificación de tecnologías portables.

3.2.1 Ocurrencia

El litio está presente en la corteza terrestre en una concentración aproximadamente de 0,006% (Yaksic 2008, Pimentel 1998, Moscoso 2003, Cochilco, 2009), donde 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 Amblygonita, Espodumena, Petalita y Lepidolita (Mineral Commodity Summaries 2017, USGS).

Los minerales de litio se encuentran en rocas pegmatitas y en rocas sedimentarias, disuelto en las salmueras de los 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, 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 (Ericksen and Salas; 1989 y Houston *et al.*, 2011), los cuales también son recursos económicamente interesantes. Los salares del Norte de Chile presentan un gran potencial para la minería, no obstante, la escasez de estudios detallados dificulta la explotación de estos recursos, siendo el Salar de Atacama el único que se encuentra en explotación por compuestos de litio, potasio y boro (Informe Comisión del Litio 2015).

3.2.2 Distribución de salares del norte de Chile

Los salares de principal interés por Litio son los salares Pre Andinos y Andinos, es su mayoría se concentran desde la región de Arica y Parinacota hasta la de atacama, este estudio se concentrará en los salares ubicados en la región de Antofagasta en la provincia del Loa (Figura 15).

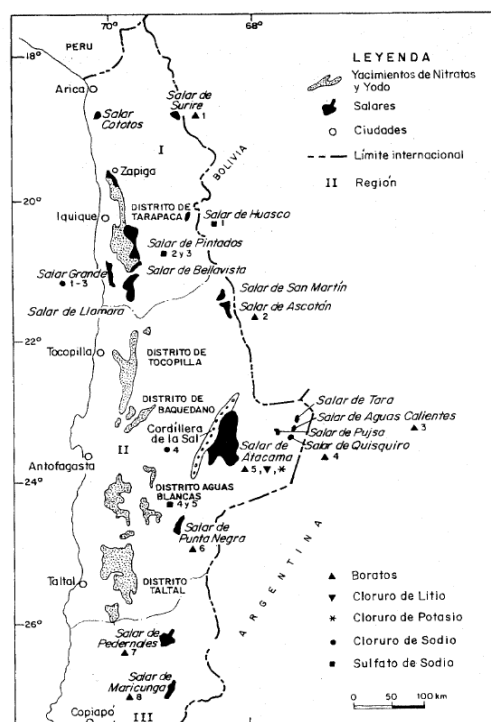


Figura 15. Mapa de distribución de salares del norte de Chile-

3.3 Método geoelectrico

En este trabajo se utilizó el método eléctrico con el fin de obtener una caracterización del subsuelo en diferentes zonas de los salares. Se utilizó el método de potencial espontáneo, en su modalidad de estación base con el fin de probar su efectividad en zonas de alta conductividad.

3.3.1 Potencial Espontáneo

El método de potencial espontáneo (PE) es uno de los más antiguos y simples en la prospección geofísica pasiva. La técnica fue generalizada en la década de los 80 y principios de los 90, y fue empleada por primera vez por Robert Fox, cuyo trabajo consistió en detectar depósitos subterráneos de sulfuro de cobre en el condado de Cornwall, Inglaterra en 1830. El principio del potencial espontáneo se basa en medir los potenciales naturales desarrollados en la tierra por reacciones electroquímicas entre minerales y fluidos subsuperficiales o por un proceso electrocinético donde se involucran fluidos iónicos. A lo largo de la historia, el método de potencial espontáneo se ha utilizado en diferentes áreas como la exploración minera (Sato y Mooney, 1960, Lögn y Bolviken, 1974, Corry, 1985), hidrogeología (Rao, 1953, Bogoslovsky y Ogilvy, 1974, Schiavone y Quarto, 1984), ingeniería y geofísica ambiental (Bogoslovsky y Ogilvy, 1977; Corwin, 1990), filtración de presas y terraplenes (Ogilvy et al., 1969, Bogoslovsky y Ogilvy, 1970, Butler, 1984;) y estudios geotérmicos (Corwin y Hoover, 1979). Además, en estudios relacionados con detección y monitorización de filtraciones o fugas de lixiviados en vertederos urbanos (Meju, 2000), seguimiento de los lixiviados ácidos en balsas mineras de lodos (Campbell y Fitterman, 2000) y filtraciones de embalse (Martínez et al. 2003). Dentro de todas estas múltiples aplicaciones las más utilizadas se encuentran en las áreas de la geotermia, ingeniería y ambiental; las cuales se enfocan a definir fuentes asociadas con el flujo térmico y aguas subterráneas. Simultáneamente a estas aplicaciones, el método PE se ha utilizado en el mapeo de flujos de filtraciones en estructuras de contención como presas, diques, suelos de embalse, etc., y en el mapeo de patrones de flujo en las proximidades de deslizamientos de tierra, sumideros, pozos, túneles y fallas.

3.3.1.1 Origen del potencial espontáneo

El potencial espontáneo se genera mediante diversos procesos electroquímicos, dichos mecanismos no se comprenden en su totalidad, ya que las diferentes fuentes que lo originan causan dificultades al momento de la interpretación; además de que no existe una forma de

separar una anomalía de PE en función de su origen electroquímico. Es por ello, que las medidas de interés están definidas por las fuentes de la anomalía y otras llamadas ruidos. Los mecanismos principales involucrados en el PE se describen a continuación:

3.3.1.1.1 Potencial de electro filtración

Los potenciales de electro filtración (también conocidos como potenciales electrocinéticas o de transmisión), surgen cuando un fluido pasa a través de un medio poroso, como arena, rocas fracturadas, basaltos, etc., esto genera que al existir una adsorción preferencial de cargas con la misma polaridad en la superficie de los granos se genere una capa fija, como respuesta a este fenómeno se produce otra capa móvil formada por el enriquecimiento del flujo intersticial. Estas dos capas que se forman se conocen como la doble capa eléctrica (Mainali, 2006).

3.3.1.1.2 Potenciales minerales

Los potenciales minerales son quizás la causa más común de fuertes anomalías de PE locales. Los potenciales minerales se manifiestan en todo tipo de cuerpos minerales conductores de la electricidad y son casi invariablemente negativos. El origen de los potenciales minerales no está descrito totalmente, sin embargo, se han desarrollado varias teorías para tratar de explicar dicho fenómeno, algunas atribuían el potencial de mineralización a la oxidación de partes del cuerpo mineral por encima del nivel freático. Más tarde, Sato y Mooney (1960) desarrollaron un modelo donde los electrones se pierden en la parte inferior del cuerpo del mineral y se ganan en la parte superior, debido a posibles reacciones químicas ocasionando que el mineral actúe como un conductor de electrones. Un problema con esta teoría es que no puede existir flujo de corriente en equilibrio químico. Esto solo puede ocurrir si no hay un flujo de corriente, por lo que no se registraría ninguna anomalía de PE. Con ello, se puede concluir que, los voltajes medidos en la interfaz dependen tanto de las reacciones químicas involucradas como de la distribución de resistividad subsuperficial.

3.3.1.1.3 Potenciales de difusión

El potencial de difusión se debe a las diferencias que existen entre la movilidad de los iones en las soluciones de diferente concentración. La migración de los iones en la dirección del gradiente de concentración constituye una corriente eléctrica, esta corriente de conducción crea una caída de potencial eléctrico que es la anomalía del potencial de difusión medida. Se ha llegado a determinar que las diferentes concentraciones que se encuentran en las aguas subterráneas pueden contribuir a los potenciales de fondo encontrados en la mayoría de las investigaciones de PE; sin embargo, su influencia puede ser muy difícil de determinar, debido

a que si la concentración de electrolitos en el suelo varía localmente, las anomalías del PE de fondo serán medidas en milivoltios o hasta decenas de milivoltios (Mainali, 2006). Dichas anomalías deberían desaparecer en ausencia de concentración en el suelo, ya que el flujo de iones crea un estado en equilibrio, pero en realidad parece que la diferencia de concentración ocurre todo el tiempo. El fenómeno no se comprende del todo, pero se sugiere que las diferencias de concentración se regeneren mediante reacciones redox que involucren oxígeno de la atmósfera.

3.3.1.1.4 Potenciales de sedimentación

Los potenciales de sedimentación son el resultado de los mecanismos generadores de los potenciales de transmisión, en este caso, las partículas sólidas se mueven con respecto a un líquido que está estacionario como un todo. Los potenciales de sedimentación podrían ocurrir cuando hay cuerpos de agua estancada con altas concentraciones de sedimentos suspendidos; sin embargo, las condiciones físicas requeridas para generar anomalías de PE significativas raramente existen en la naturaleza.

3.3.1.1.5 Potenciales de adsorción

Las anomalías de PE generadas por la adsorción de iones se producen por encima de los cuerpos de granito de cuarzo y pegmatita, sin embargo, el mecanismo electroquímico no es claro. Las anomalías de PE observadas en depósitos de arcilla probablemente pertenecen a esta categoría.

3.3.1.1.6 Potenciales termoelectrónicos

Generalmente estas anomalías se generan mediante un enlace electrocinético y termoelectrónico. En el lado electrocinético, los potenciales de transmisión se crean cuando las fuentes térmicas inducen la convección del agua subterránea. Mientras que el efecto termoelectrónico se cree que involucra las tasas de difusión diferencial de ambos iones en el agua subterránea y los electrones e iones en el suelo y la roca. La magnitud de este efecto de acoplamiento termoelectrónico se expresa generalmente como una relación entre el gradiente de potencial eléctrico resultante y la diferencia de temperatura. Esta relación se llama coeficiente de acoplamiento termoelectrónico.

3.3.1.2 Fundamento Teórico

Como se mencionó anteriormente, el PE es un método que se basa en medir los potenciales naturales desarrollados en la tierra por procesos electrocinéticos, es decir, cuando un fluido

pasa a través de un medio poroso, genera que las cargas positivas del líquido se han atraídas y acumuladas en la superficie sólida generando el fenómeno de la DCE. Cuando exista un gradiente de presión que fuerce al líquido a fluir respecto al sólido, el exceso de cargas positivas se arrastrara con el flujo creando una corriente eléctrica de convección (I_{conv}), la cual generará que las cargas móviles se disipen aguas arriba y se acumulen aguas abajo, creando una diferencia de potencial eléctrico. Esto dará como resultado un desequilibrio entre las cargas positivas que se encuentran aguas arriba (baja presión), y las cargas negativas, aguas abajo (alta presión), dicha separación de cargas genera un potencial de transmisión que llevará una corriente de conducción (I_{cond}) de regreso a través del fluido. Caso contrario ocurre cuando se presenta un estado en equilibrio para un medio capilar o poroso con una matriz no conductora, estas dos corrientes, (I_{conv})e(I_{cond}) se estabilizan entre sí. De acuerdo a la ecuación de Poisson, la capa difusa propuesta por Gouy-Chapman, y el perfil característico de velocidad parabólico del flujo, las corrientes de convección y de conducción se pueden expresar de la siguiente manera:

$$I_{conv} = -\pi\epsilon \frac{\zeta}{\eta} G\Delta P \quad (4)$$

$$I_{cond} = \pi\sigma_w \frac{\zeta}{\eta} G\Delta V \quad (5)$$

Donde

I_{conv} = corriente eléctrica de convección

I_{cond} = corriente de conducción

ΔV = diferencia de potencial de transmisión

ΔP = diferencia de presión que impulsa al flujo

σ_w = conductividad del fluido

ϵ = permitividad dieléctrica del fluido

ζ =potencial zeta

η = viscosidad

G = factor geométrico.

Con las ecuaciones 6 y 7 y algunos pasos algebraicos se obtiene:

$$\Delta V = -\frac{\varepsilon \zeta}{\eta \sigma_w} \Delta P \quad (6)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = -\frac{\varepsilon \zeta}{\eta \sigma_w} \quad (7)$$

La ecuación 7 es conocida como Helmholtz-Smoluchowski y la relación $\frac{\Delta V}{\Delta P}$ Se denomina el cociente de potencial de transmisión C.

3.3.1.3 Metodología de campo

El método de potencial espontáneo se ha empleado en estudios de aguas. En 1976 Corwin describió las anomalías subacuáticas de PE relacionadas a los depósitos de minerales conductivos situados en aguas someras. Por otro lado, Jasen en 1995 describió la correlación entre anomalías negativas registradas de PE bajo el agua y los posibles caminos de filtración (Rozycki, 2006). Hoy en día dichos trabajos se han desarrollado aún más y se han empleado en estudios geofísicos de presas, ya que una distribución anormal puede indicar una filtración anómala y la interpretación cuantitativa del campo eléctrico puede servir para estudiar el desarrollo de las filtraciones. Además, el PE es un método rápido, barato y útil en dicha inspección, debido a que la medida de la resistividad en una corriente continua es muy sensible con el contenido de agua. Considerando que los trabajos anteriores tuvieron éxito en sus años, hoy, con un dispositivo de adquisición adecuado se pueden registrar las mediciones de PE en una presa bajo el nivel de agua del embalse. Para registrar dichas medidas se emplean dispositivos de un solo electrodo o de dos electrodos con configuraciones diversas y con separaciones fijas, como un dispositivo de gradiente. Se recomienda que durante las medidas de PE se utilice un dispositivo fijo formado por un dipolo para monitorizar las corrientes telúricas o el ruido eléctrico industrial, ya que estos fenómenos se pueden confundir con anomalías de PE y este dispositivo permite eliminar dicha incertidumbre.:

3.3.1.3.1 Configuración del gradiente

En esta técnica solo se utilizan 2 electrodos y se basa en medir con un multímetro la diferencia de potencial entre los dos electrodos, conservando entre ambos una distancia constante. Para

desarrollar esta técnica, en primer lugar, se define quien es el electrodo A y B y se unen a la terminal positiva y negativa del multímetro respectivamente. Realizada la primera medida y sin cambiar la polaridad del dispositivo, así como la distancia electrónica, se procede a tomar el resto de las medidas a lo largo del perfil, de forma que el electrodo A ocupe siempre la posición que ocupaba el electrodo B en la anterior medida.

Ventajas

- Utilización de poco cable eléctrico, lo que minimiza su exposición a las mordeduras de animales y actos de vandalismo.
- Fácil manejo y acceso del dispositivo, para evitar accidentes.
- En caso de observar problemas con el cable eléctrico, es más fácil de encontrar el lugar donde se encuentra la falla.

Desventajas

- La mala calidad de los datos obtenidos; esto se debe a que en el proceso de adquisición se llevan asociados ciertos errores como polarización, deriva y efecto contacto-suelo.

3.3.1.3.2 Configuración de base fija (o campo total)

En este dispositivo, al igual que en el anterior se precisan dos electrodos, y se basa en colocar estaciones fijas de medida a lo largo del perfil que se haya definido previamente. Al momento de realizar las mediciones se desplazará a una de las estaciones y se colocará un electrodo (que será el B), y se mide el potencial con respecto al electrodo A, que estará situado siempre en una misma base, denominada base de referencia, la cual supondremos que tiene un potencial cero. La correcta ubicación de la base referencia será fundamental a la hora de obtener resultados óptimos, siendo las zonas más idóneas aquellas que presentan un valor del potencial muy estable en el tiempo.

3.3.1.3.3 Configuración multielectrónica

Esta configuración es similar a la de base fija, sin embargo, no se desplaza estación por estación conectando el electrodo B con el de referencia, si no que se dispone de un gran número de electrodos, los cuales ya están conectados a la base de referencia mediante un cable multiconductor. Mediante un sistema multicanal de adquisición de datos, se realiza de forma automática toda la secuencia de medidas, con el espaciado temporal que se requiera.

3.4 Hidroquímica

La hidrogeoquímica como rama de la hidrogeología, es la ciencia interdisciplinaria que se encarga del estudio de las propiedades químicas del agua subterránea y superficial en relación con la geología, analizando los iones disueltos en agua y los procesos de interacción agua-roca.

3.4.1 Diagramas hidrogeoquímicos

La compilación y presentación de los datos de composición y características químicas referentes del estudio del agua subterránea suelen realizarse mediante gráficos, los cuales permiten obtener una visualización de la forma más simple y lo más completa posible de los datos y procesos del agua subterránea, haciendo más digerible a su interpretación. Actualmente se cuenta con una variedad de diagramas que han sido desarrollados para tal fin: columnares, triangulares, circulares, poligonales, etc., donde cada uno de ellos posee cualidades específicas ante su representación. A continuación, se describen algunos de ellos:

3.4.1.1 Diagrama de Stiff

El diagrama de Stiff, representa mediante un polígono, la composición química del agua mediante la concentración en meq/L de sus cationes y aniones mayoritarios. Este tipo de gráfico es apropiado para situarlo sobre un mapa, en donde es posible visualizar la disposición espacial de las familias hidrogeoquímicas (Figura 16).

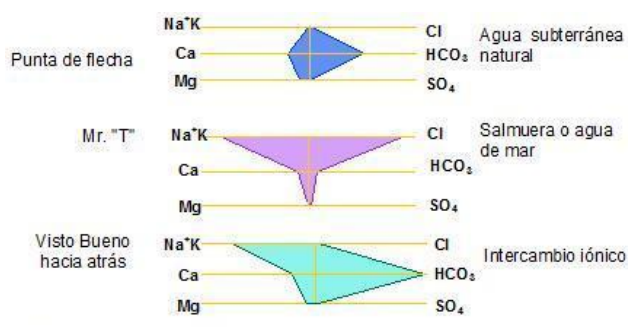


Figura 16. Diagrama de Stiff

3.4.1.2 Diagrama de Piper

Es una de las gráficas más utilizadas, En él se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Este gráfico permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas químicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio 1965). Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$. Los vértices del triángulo de aniones son SO_4^{2-} , Cl^{-} y HCO_3^{-} . Los datos de los diagramas triangulares se

proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (Figura 17).

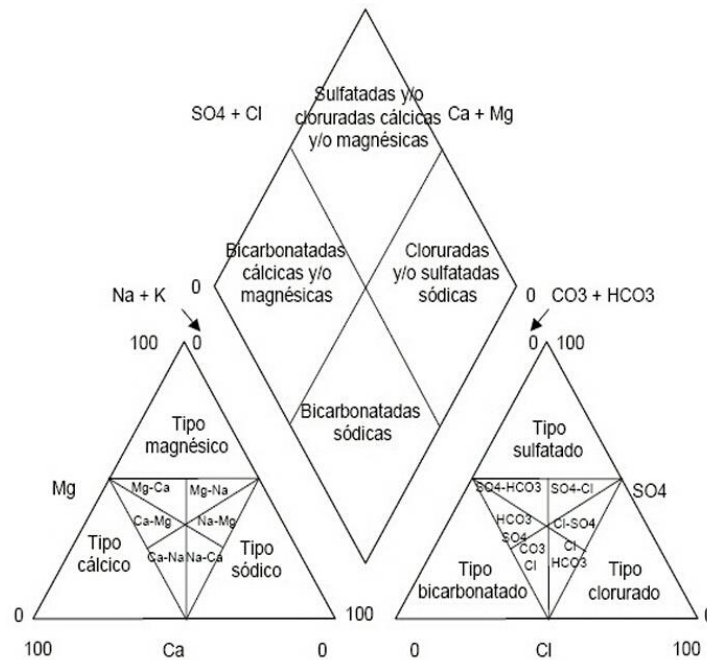


Figura 17. Diagrama de Piper

4. Metodología de trabajo

4.1 Pre-Terreno

4.1.1 Recopilación de antecedentes

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

La descripción de unidades para el Marco Geológico se sintetizó a partir de la información de las cartas geológicas; Hoja Toconao escala 1:250.000, Hoja Río Zapaleri escala 1:250.000, publicadas por el SERNAGEOMIN.

4.1.2 Caracterización geomorfológica

La caracterización geomorfológica permite identificar las unidades de relieve tanto a escala regional como a escala local, de manera de conocer los rasgos morfológicos propios y característicos de la conformación de la zona de estudio. La identificación de unidades geomorfológicas locales se realizó mediante el estudio e interpretación de imágenes satelitales Landsat ETM+ (NASA, 1999) desarrollando un mapa de pendientes, análisis de Google Earth con el fin de caracterizar geomorfológicas relevantes y modelo 3D en Surfer para observar de mejor manera la topografía de la zona.

4.2 Terreno

4.2.1 Geología de superficie

En base a la geología de superficie describe a las diferentes unidades de roca y depósitos sedimentarios que se identifican en el área de estudio. Se generó un mapa geológico basado en la digitalización y unión de la Hoja Toconao (Gardeweg y Ramírez, 1982) y la Hoja Río Zapaleri (Gardeweg y Ramírez, 1985), de la Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000. El mapa geológico se dibujó utilizando el programa ArcMap 10.5. El reconocimiento geológico de superficie se complementa con el estudio de imágenes satelitales Landsat ETM+ (NASA, 1999) y las provistas por Google Earth, lo que permitió identificar estructuras relevantes. Con el objetivo de obtener puntos de interés y realizar una campaña de terreno el mes de octubre del 2021 durante 3 días donde se llevará a cabo: Muestreo de costra salina: se llevará a cabo un plan de muestreo en zonas de interés definidas por la combinación de bandas en imágenes satelitales y a partir de firmas espectrales en regiones de interés (ROIs). Reconocimiento Geológico de unidades litológicas, estructuras y contactos previamente definidos en la etapa pre terreno a partir de un mapeo geológico preliminar (Figura 18).

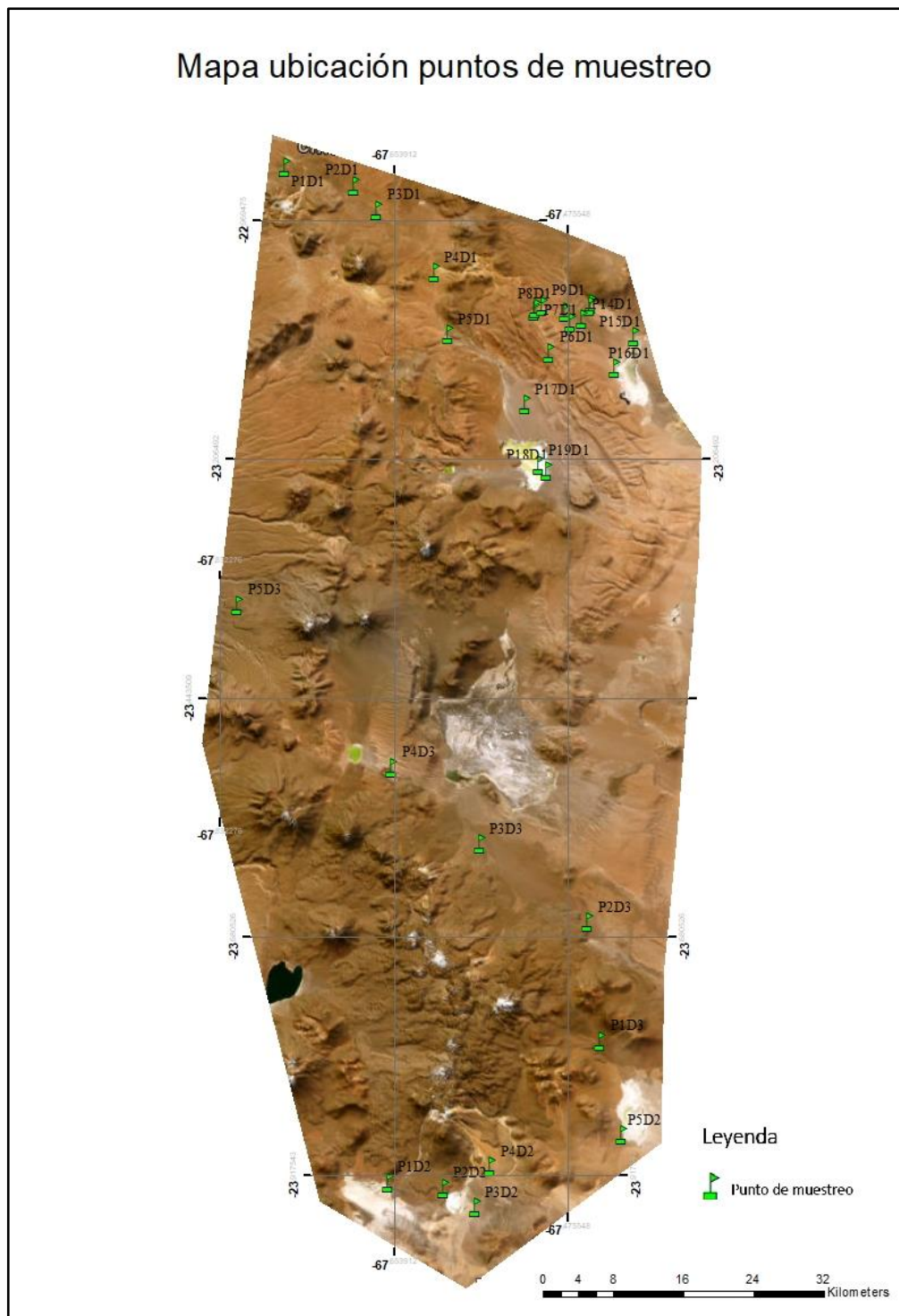


Figura 18. Mapa ubicación puntos de muestreo.

4.2.2 Geología de subsuperficie

Se efectuó un catastro de los pozos profundos construidos en las cuencas, y luego se analizó la información litoestratigráfica obtenida a partir de campañas de perforación pasadas. Se efectuó además una recopilación de los antecedentes geofísicos en la zona de estudio generalmente interpretados a partir de perfiles de resistividad eléctrica, que, complementados a los perfiles

geológicos contruidos, permitió definir la composición y geometría de las unidades geológicas de subsuperficie. El análisis de la geología de subsuperficie se realizó mediante la integración de datos en perfiles geológicos que fueron dibujados utilizando el software Adobe Illustrator CS2.

4.2.3 Geofísica

Se desarrollaron 6 perfiles de potencial espontáneo de 15, 20 y 30 metros con el equipo PQWT-TC150, el cual tiene una capacidad de 150 metros de profundidad. Con esto obtener un perfil de PE y contrastar los resultados con la estratigrafía del área, conocer la conductividad de la zona y los niveles saturados de agua.

4.3 Post terreno

4.3.1 Caracterización hidrológica

4.3.2 Caracterización hidrogeológica

Se caracterizó la hidrogeología definiendo las cuencas y redes de drenaje. Los procedimientos fueron realizados utilizando el software Arcgis 10.8.

4.3.3 Análisis Espectral

Consiste en corregir y procesar las imágenes satelitales para posterior aplicación de la combinación de bandas, cuyo resultado permitirá definir la posible distribución de la mineralogía en el salar. Para este estudio se basa en la metodología que presenta Flahaut et al., 2016. Desarrollando una composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI con el fin de Diferenciar unidades litológicas del salar y mineralógica dentro del salar.

4.3.4 Caracterización de salares

Confeccionar un mapa de zonación mineral a partir del procesamiento de las imágenes espectrales, vuelo de drones, muestreo en terreno, más cartas geológicas antiguas y análisis de tono y texturas. A partir de texturas, colores y lineamientos visibles en Google Earth y data geológica recopilada se realizarán mapas geológicos 1:500.000 y de zonación de salares 1:50.000 y 1:100.000.

4.3.5 Modelación Geoelectrica

Los datos obtenidos en terreno ubicados en distintos sectores de los salares analizados se modelaron con el software Res2Dinv aplicando el método de inversión “constrained-smoothness” el perfil obtenido se contrastó con los columnas y descripciones estratigráficas contrastando valores de resistividad obtenidos con valores de bibliografía asociables a las litologías descritas en terreno.

4.3.6 Análisis hidroquímico.

Con los datos obtenidos del trabajo de Troncoso, 2013, se desarrolló un mapa con los puntos de muestreo, además de análisis estadístico y gráficos de los datos obtenidos, para la hidroquímica se mediante la recopilación de bibliografía se graficará la evolución de las salmueras.

4.3.7 Descripción Litológica.

Para la caracterización litológica de la zona, tras los días de toma de muestras se procedió a describir macroscópicamente en el laboratorio de petrología UNAB VM, utilizando la lupa binocular.

5. Resultados

5.1 Hidrografía de la zona de estudio

5.1.1 Delimitación de las cuencas hidrográficas

Para la delimitación de las cuencas en el área de estudio se utilizaron los softwares ArcGIS, con su módulo Hydrology. 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 las cuencas de la zona de estudio son endorreicas, es decir, su drenaje confluye dentro de ella. Para obtener la red de drenajes se obtuvo una imagen de elevación digital de la USGS y las isoyetas y cuencas se obtuvieron a partir de datos DGA. Estas tres variables se agruparon en la Figura 19.

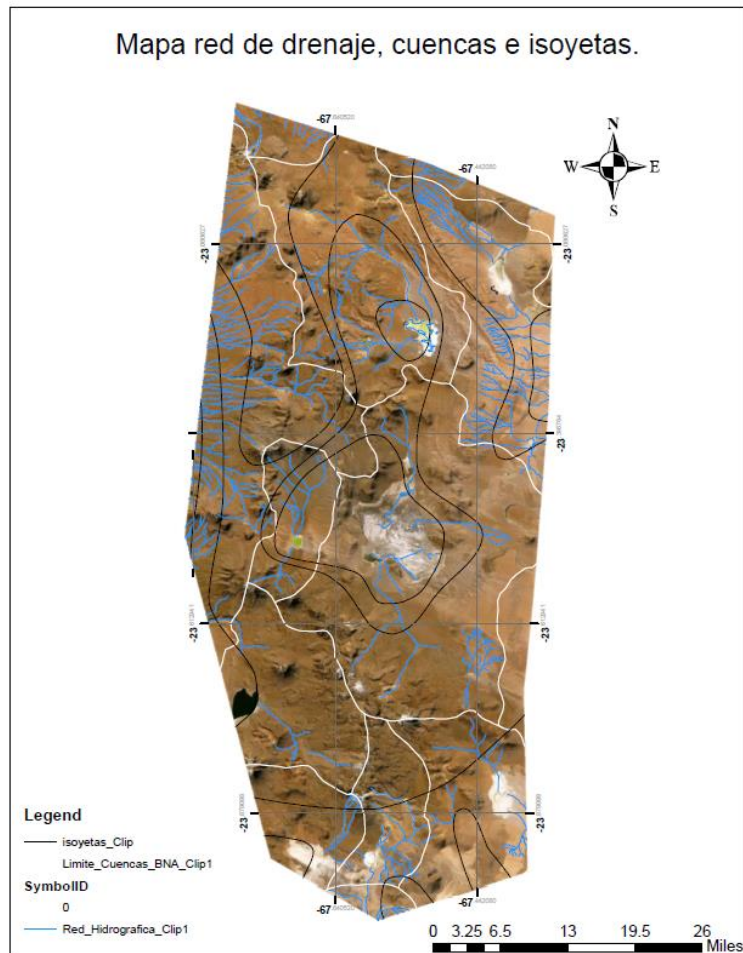


Figura 19. Red de drenaje, cuencas e isoyetas abarcadas en el área de estudio.

Los drenajes de las cuencas del área de estudio confluyen dentro de sí mismas, en la zona más baja donde se ubican los salares. Con el fin de poder visualizar la geografía de la zona y comprobar la ubicación de la zona como una bajo en la topografía se realiza una vista en planta (Figura 20). En esta zona la construcción de redes de drenaje se vuelve complicada, ya que los softwares modelan redes sobre los salares generando bastante erróneas por tratarse de una superficie plana.

Con el módulo de Arhydro del software ArcGIS es posible 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.

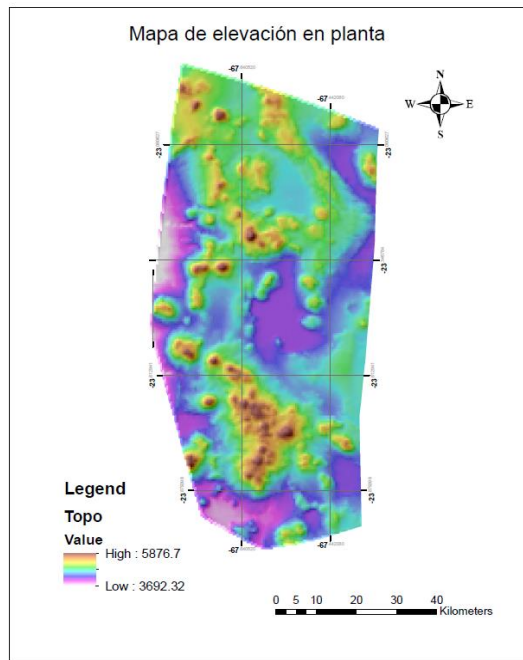


Figura 20. Modelos topográficos en planta.

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 fueron x cuencas.

5.2 Geología de los salares y alrededores

5.2.1 Mapa geológico

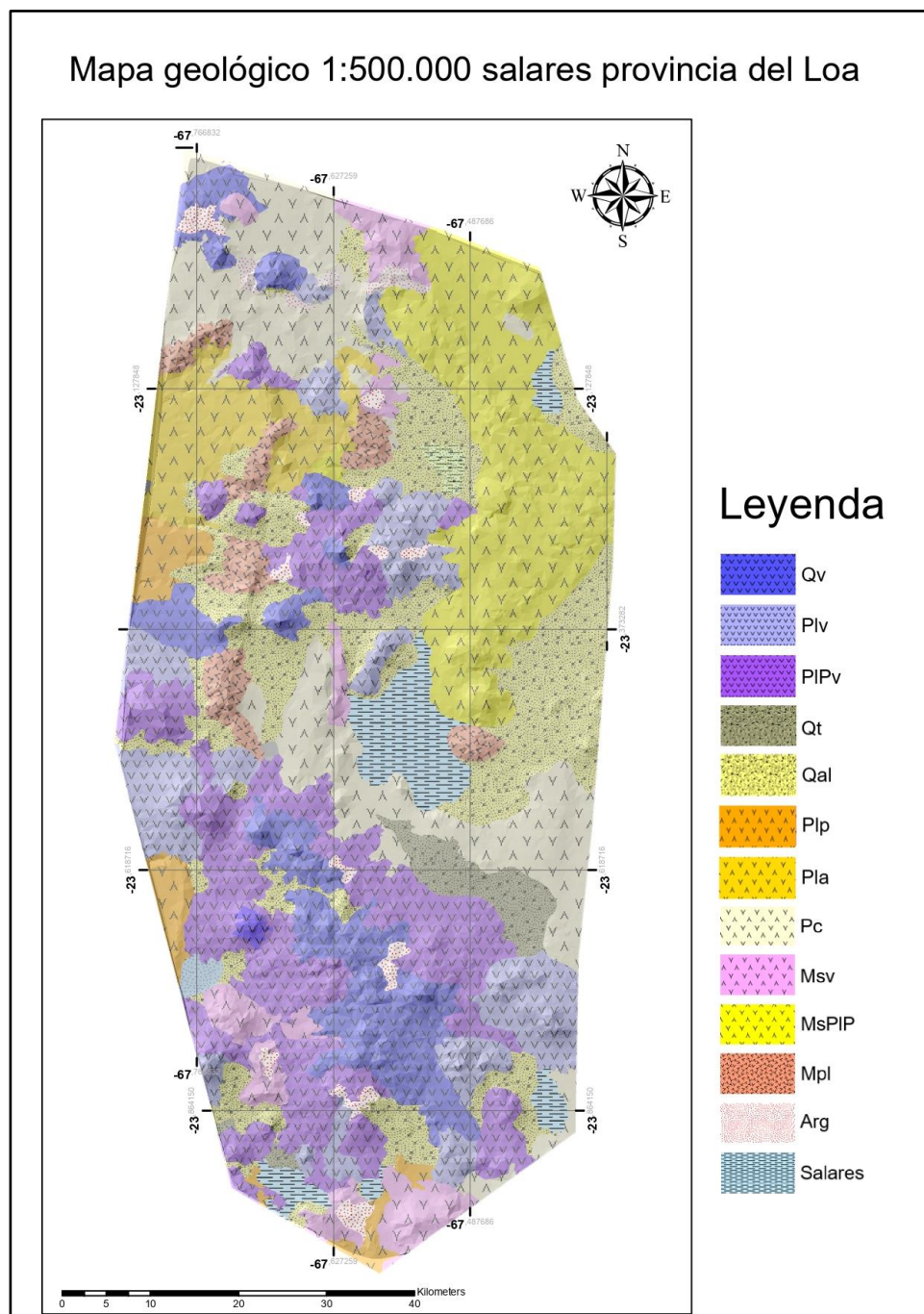


Figura 21. Mapa geológico 1:500.000 salares provincia del Loa. Elaboración propia.

5.2.2 Unidades descritas

5.2.2.1 Unidades volcánicas

Las unidades volcánicas se encuentran presentes en la totalidad del área de estudio las principales unidades descritas como lavas son Qv 491,14 km² (muestra) abarcando un área de

787.88 km² y PlPv (Muestra) abarcando un área de 427.78km² corresponden a secuencias volcánicas estratificadas de composición andesítica y, subordinadamente dacítica y basáltica poco erosionadas generalmente con orientación NS y manteo de 10° a 45° (Figura 22).



Figura 22. Unidades volcánicas.

A su vez cubriendo las lavas se presentan rocas de textura piroclástica litificación a semiconsolidadas estas son Plp descrita como una brecha piroclástica que contiene clastos de pómez orientados a bloques polimícticos de vidrio volcánico entre otros líticos, con un área de 124,75 km², Pla descrita como Toba lapilli con clastos polimícticos orientados, abarcando un área de 234 km², Pc: Toba de lapilli, abarcando un área de 642 km², Msv: Toba lítica, abarcando 235,15 km² y MsPIP Toba de ceniza abarcando un 684,76 km² siendo esta última la más lejana a los centros volcánicos. En segmentos del área de estudio se encuentran erosionadas por el viento, además, con fracturamiento hexagonal y orientación de clastos (Figura 23).

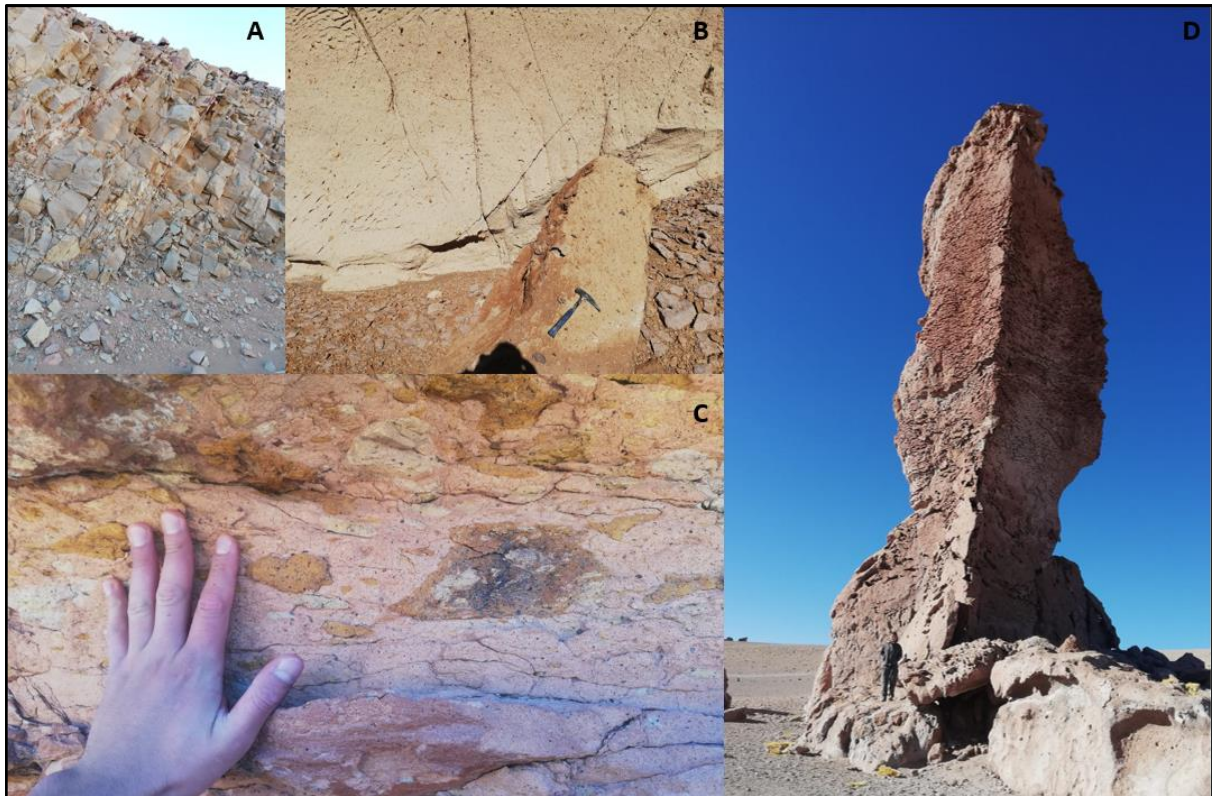


Figura 23. Unidades volcánicas

5.2.2.2 Depósitos

Los depósitos descritos en el área de estudio son Qt descrita como depósitos coluviales, gravas, ripios y arenas polimícticos no consolidados asociados a sistemas movimientos de masa en laderas abarcando un área de 104.91 km² y Qal descrita como depósitos aluviales, gravas ripios, arenas y limos polimícticos no consolidados asociados a sistemas de drenaje ocasional o cauces inactivos abarcando un área de 827,84 km². Los depósitos presentan mala selección, clastos de tamaño bloque en las partes basales con gradación inversa hacia la superficie, y estructuras de laminación y estratificación paralela y cruzada en aquellos depósitos que se encuentran semi consolidados (Figura 24).



Figura 24. Depósitos

5.2.2.3 Intrusivos subvolcanicos

Los intrusivos subvolcanicos de la zona nombrados Mpl, descritos como pórfidos dacíticos, riolíticos y andesíticos abarcan un área de 163,3 km². Se sitúa en los bordes de los conos volcánicos.

5.2.2.4 Alteraciones

La alteración más frecuente en la zona es nombrada Arg descrita como una zona de alteración argílica avanzada, presencia de caolinitas. Gran parte de los minerales de las rocas fueron transformados en dickita, caolinita, diásporo, alunita y cuarzo. También se puede encontrar jarosita y pirita. Se aprecian masas de sílice oquerosa residual. Estas se encuentran en las cimas de los conos volcánicos.

5.2.3 Caracterización de Sistemas Salinos

5.2.3.1 Salar Pujsa

5.2.3.1.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino

Antecedentes Generales del Sistema Salino:	
Región:	Antofagasta
Provincia:	El Loa
Comuna:	San Pedro de Atacama
UTM 19S HUSO Este:	652.568
UTM 19S HUSO Norte:	7.432.936
Altura:	4.500 m.s.n.m

Tabla 1. Antecedentes generales Salar Pujsa

5.2.3.1.2 Descripción General

Salar andino tipo playa con una gran laguna central que contiene islas antiguas de hielo 2 m de alto, lo cual, al derretirse, estas islas proveen aguas diluidas a las lagunas. En el margen oriental del salar, afloran costras salinas sulfatadas de thenardita y de ulexita mientras que, en el margen occidental, la costra salina es sulfatada con sedimentos limo-arcillosos. Se observan paleocostas en la parte oriental del salar, a unos 400 m del margen actual, indicando una extensión mayor a lo actual.

5.2.3.1.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino

Forma de medialuna con sus puntas en dirección hacia el oeste. Posee superficie del Sistema Salino: 18 km², la superficie de la Cuenca es de 634 km², la superficie de las Lagunas: 1-10 km², la zona presenta Precipitaciones aproximadas en 150 mm/año y una evaporación Potencial de 1.500 mm/año (Figura 25).



Figura 25. Ondulaciones producto del viento en la planicie del salar.

5.2.3.1.4 Litología y zonación

El salar de Pujsa colinda con rocas volcánicas del mioceno holoceno y sedimentos coluviales y aluviales. Dentro del salar se describen 3 zonas, sedimentos salinos y sales no diferenciadas, zona de sulfatos y zona húmeda (Figura 26).

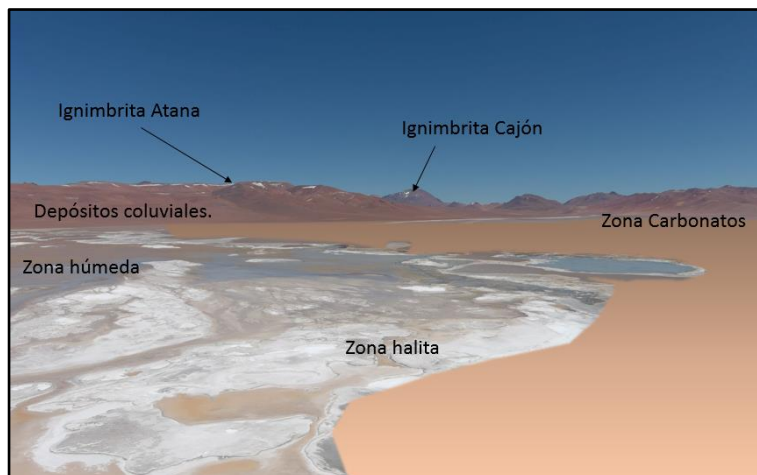


Figura 26. Diferenciación de unidades litológicas del salar.

En la Figura 22 se observan distintas zonas minerales dentro del salar pueden ser identificadas según la metodología que presenta Flahaut et al., 2016. Con el fin de poder caracterizar cada parte del salar se aplica la combinación 567.

Las tonalidades blancas corresponden a zonas o corteza rica en sulfatos, principalmente en la periferia este del salar. Las tonalidades fuertes pardo rojizas, corresponden a suelo húmedo las tonalidades grises en el centro del salar es posible identificar un núcleo Halita por ultimo las Tonalidades amarillo corresponde a carbonatos y arcillas (Figura 27).

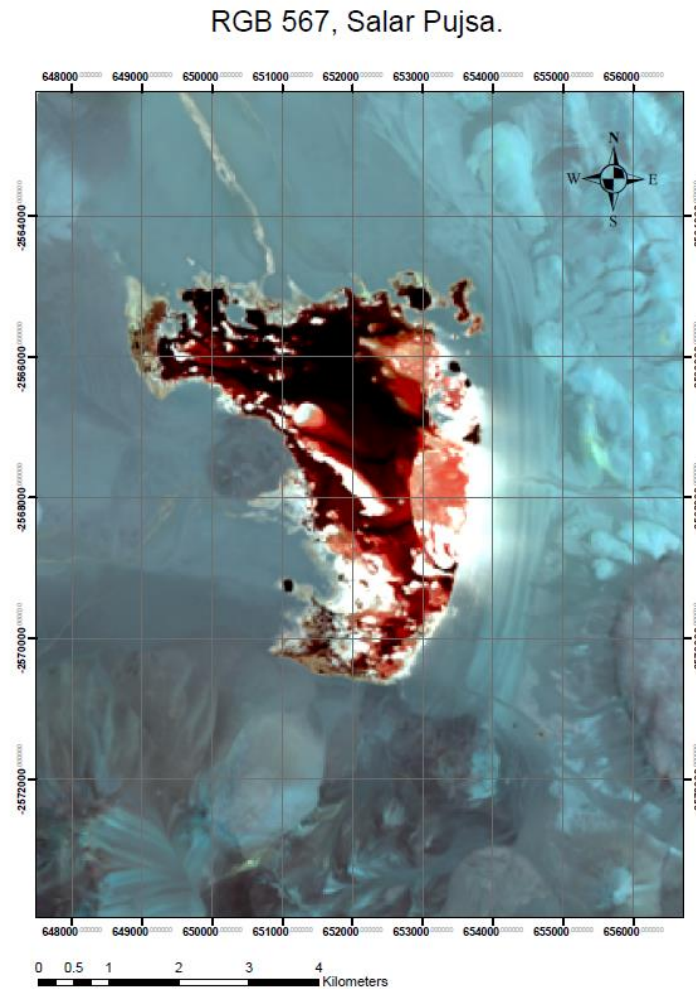


Figura 27. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.

En la figura 28 se muestra un mapa de zonaciones basados en la imagen entregada por Google Earth y la combinación de bandas anteriores más la zonación descrita en terreno, este mapa se realizó en base a litologías, vuelo de drones, colores y texturas distinguibles las cuales se caracterizaron en terreno.

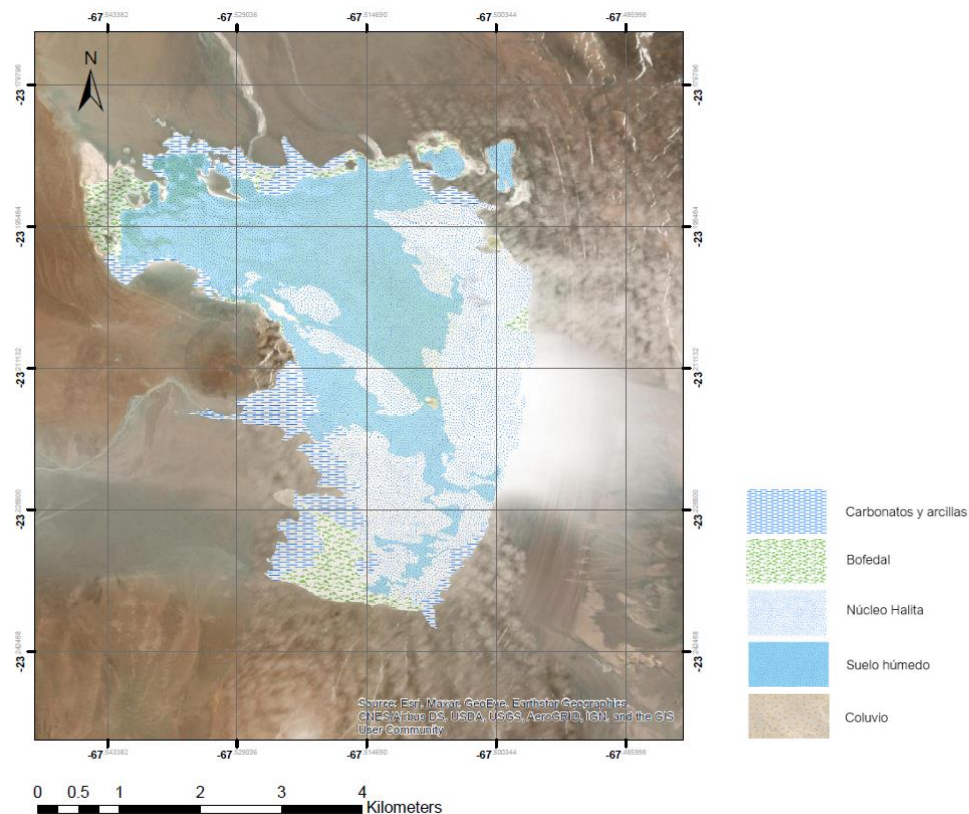


Figura 28. Mapa zonación en salar Pujsa. Elaboración propia.

5.2.3.2 Salar Aguas Calientes Norte

5.2.3.2.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino:

Antecedentes Generales del Sistema Salino:	
Región:	Antofagasta
Provincia:	El Loa
Comuna:	San Pedro de Atacama
UTM 19S HUSO Este:	662.829
UTM 19S HUSO Norte:	7.441.834
Altura:	4.280 m.s.n.m

Tabla 2. Antecedentes generales Aguas Calientes Norte

5.2.3.2.2 Descripción General:

Salar andino tipo playa con una costra salina de sulfatos mezclados con sedimentos detríticos de limos-arcillosos saturados en agua. Cuenta con un nivel freático entre los 40 a 50 cm de profundidad y con otra capa salina con núcleos de ulexita en formas de bolas de algodón. Se

observa también una fina costra salina de ulexita sobre una capa arcillosa-arenosa tipo eólica. Se diferencia una laguna principal verdosa con eje aproximado NS hacia el este, con orificios que posiblemente corresponden a calicatas, y varias lagunas de tamaño menor con costras planas en sus orillas, indicando decrecimiento estacional. En los alrededores del salar existen paleocostas y restos de costras (P15D1), indicando un cuerpo original de tamaño mayor a lo actual. Su límite es el cordón Quilapana y los Cerros de la Pacana marca su límite oeste. Se encuentra en la misma cuenca endorreica que el Salar de Loyoques ó Quisquiro.

5.2.3.2.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino

El salar de Aguas Calientes Norte tiene una forma ovalada con dimensiones de 5,5 km en su eje mayor de dirección NW-SE y de 2,1 km en su eje menor. La superficie del Sistema Salino es de aproximadamente 15 km², la cuenca tiene una superficie de 281 km², la superficie de las Lagunas es de 2 - 3 km². Sobre sus condiciones climáticas aproximadamente precipitan 150 mm/año y presenta una evaporación potencial de 1.500 mm/año.

5.2.3.2.4 Litología y zonación:

El salar de Aguas Calientes Norte colinda con rocas volcánicas del mioceno holoceno, rocas intrusivas subvolcanicos del Mioceno - Plioceno pórfidos dacíticos, riolíticos, andesíticos y monzoníticos (P17D1, P12D1, P16D1) además de sedimentos coluviales y aluviales (Figura 29). Dentro del salar se describen 3 zonas, sedimentos salinos y sales no diferenciadas, zona de sulfatos y zona húmeda (Figura 30).



Figura 29. Coluvios

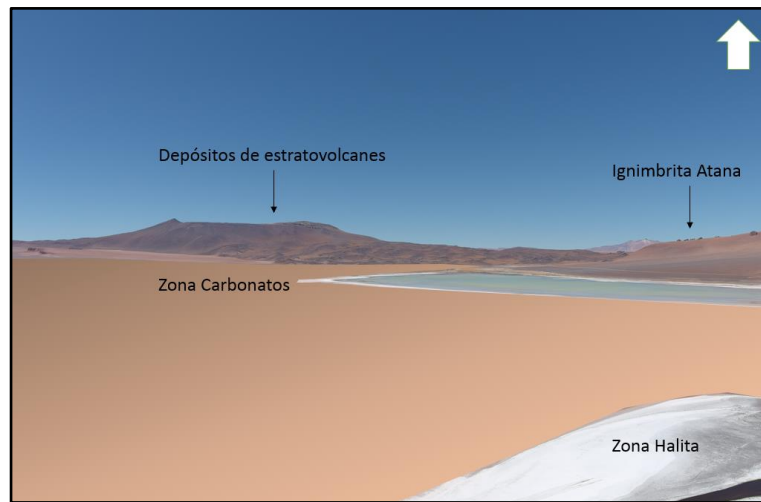


Figura 30. Diferenciación de unidades litológicas del salar

En la Figura 31 se observan distintas zonas minerales dentro del salar pueden ser identificadas según la metodología que presenta Flahaut et al., 2016. Con el fin de poder caracterizar cada parte del salar se aplica la combinación 567. Las tonalidades blancas corresponden a zonas o corteza rica en sulfatos, principalmente en la periferia este del salar. Las tonalidades fuertes pardo rojizas, corresponden a suelo húmedo las tonalidades grises en el centro del salar es posible identificar un núcleo Halita por ultimo las Tonalidades amarillo corresponde a carbonatos y arcillas.

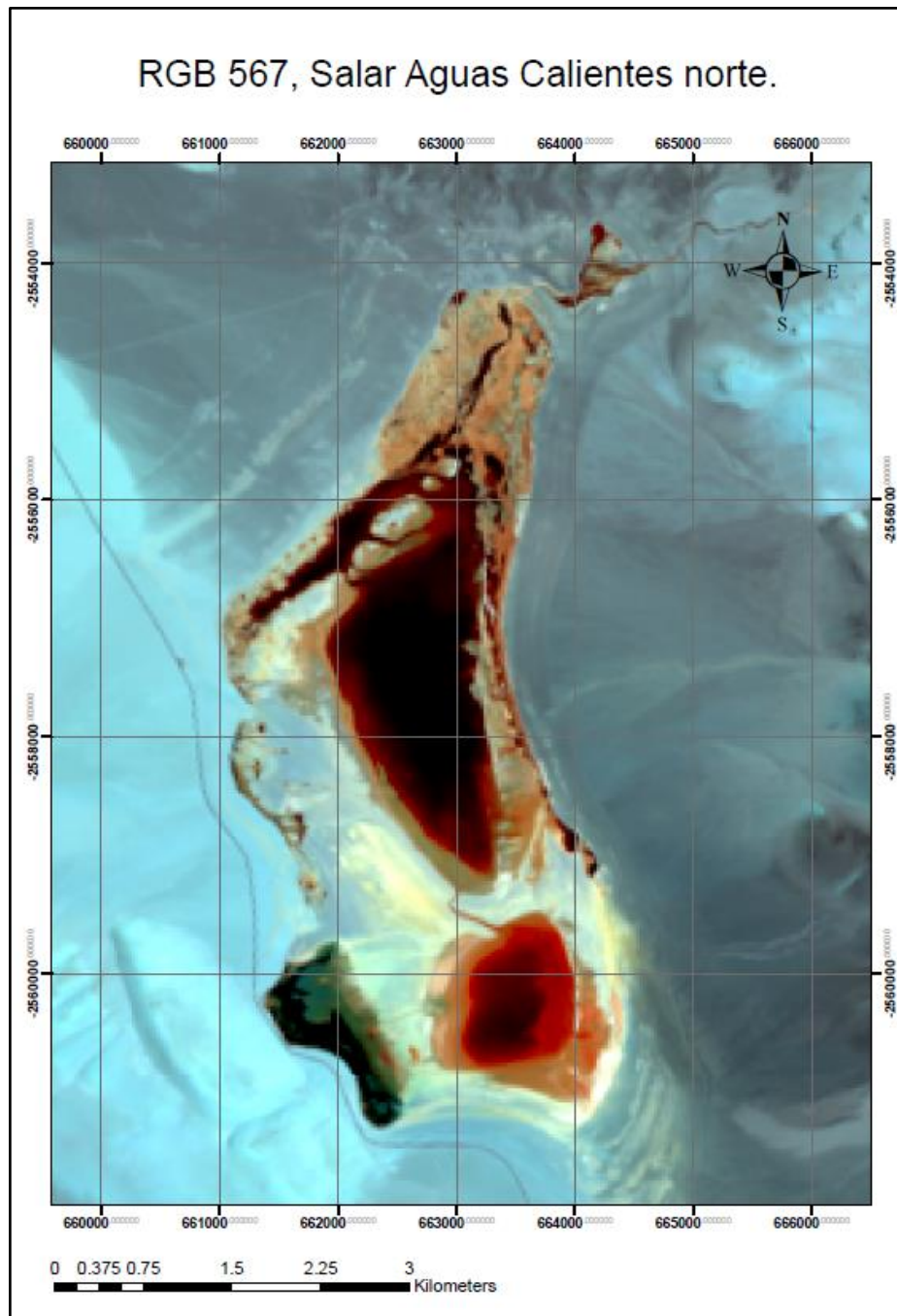


Figura 31. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.

En la figura 32 se muestra un mapa de zonaciones preliminares basados en la imagen entregada por Google earth y la combinación de bandas anteriores más la zonación descrita en terreno, este mapa se realizó en base a litologías, vuelo de drones, colores y texturas distinguibles las cuales se caracterizaron en terreno.

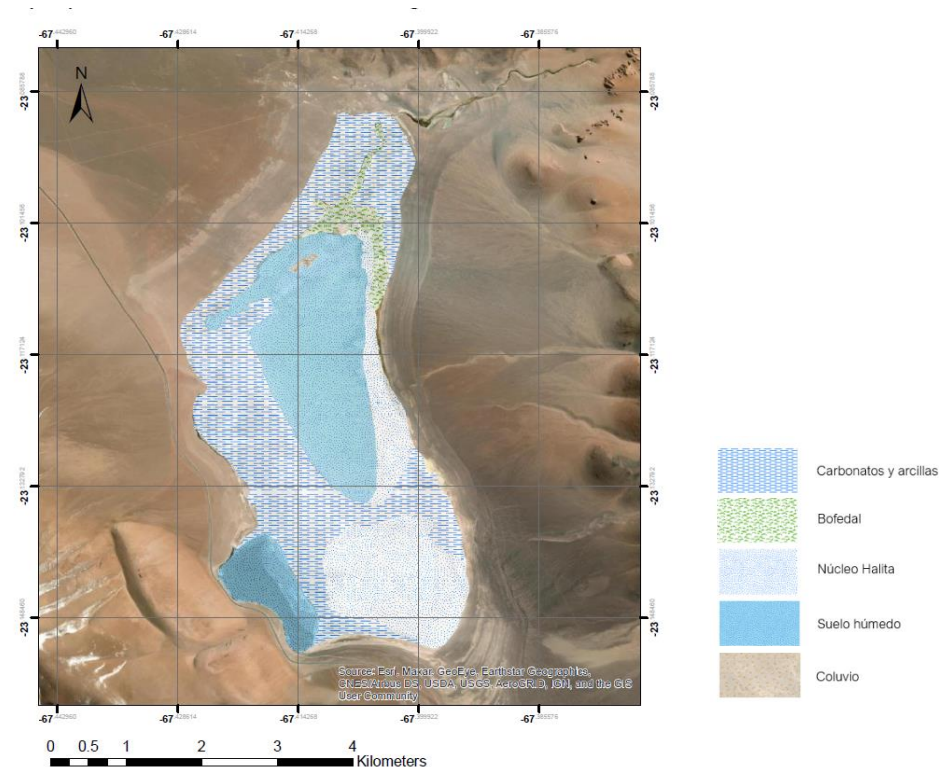


Figura 32. Mapa zonación en salar Aguas calientes norte. Elaboración propia

5.2.3.3 Salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)

5.2.3.3.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino:

Antecedentes Generales del Sistema Salino:	
Región:	Antofagasta
Provincia:	El Loa
Comuna:	San Pedro de Atacama
UTM 19S HUSO Este:	634.439
UTM 19S HUSO Norte:	7.347.430
Altura:	3.950 m.s.n.m

Tabla 3. Antecedentes generales Salar de Aguas Calientes Sur

5.2.3.3.2 Descripción General:

Salar andino tipo playa con lagunas someras de extensión variable y con una costra salina sulfatada, en algunos partes mezclado con sedimentos finos. La parte norte del salar es conocida como Aguas Calientes mientras que la parte sur es denominada Talar, separadas ambas zonas por edificios volcánicos (Cerro Caichinque hacia el oeste y Cerro Medano al este).

5.2.3.3.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino:

Posee una morfología irregular, la superficie del Sistema Salino es de 46 km², Superficie de la Cuenca: 476 km² Superficie de las Lagunas: 2-3 km² Precipitación: 150 mm/año Evaporación Potencial: 1.500 mm/año.

5.2.3.3.4 Litología y zonación:

El salar de Aguas Calientes 1 colinda con rocas volcánicas del mioceno holoceno, sedimentos coluviales y aluviales. Dentro del salar se describen 4 zonas, sedimentos salinos y sales no diferenciadas, zona de sulfatos, zona de bofedal y zona húmeda (Figura 33 y 34).

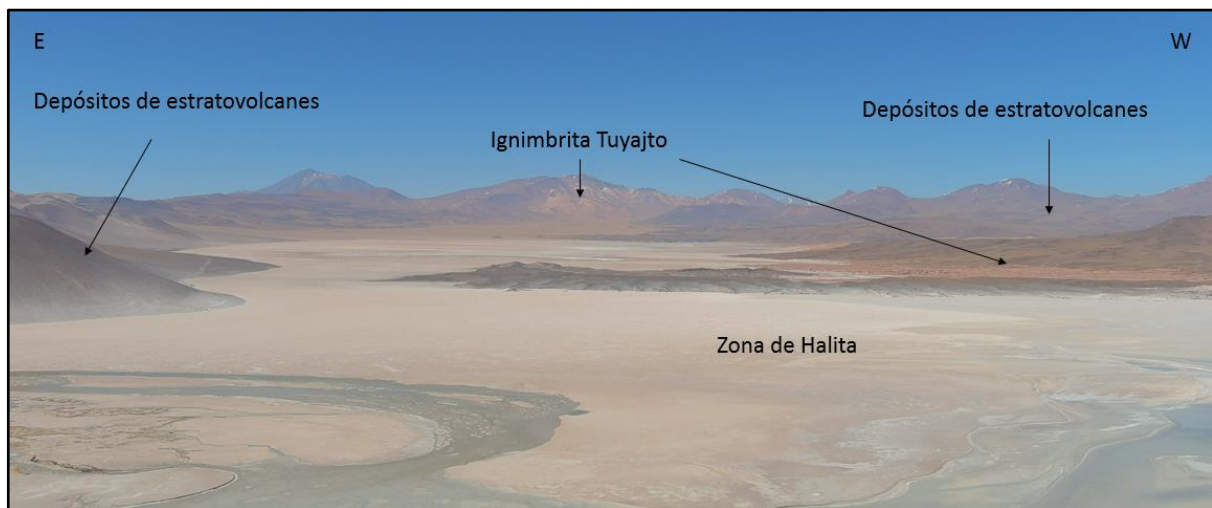


Figura 33. Diferenciación de unidades litológicas del salar.

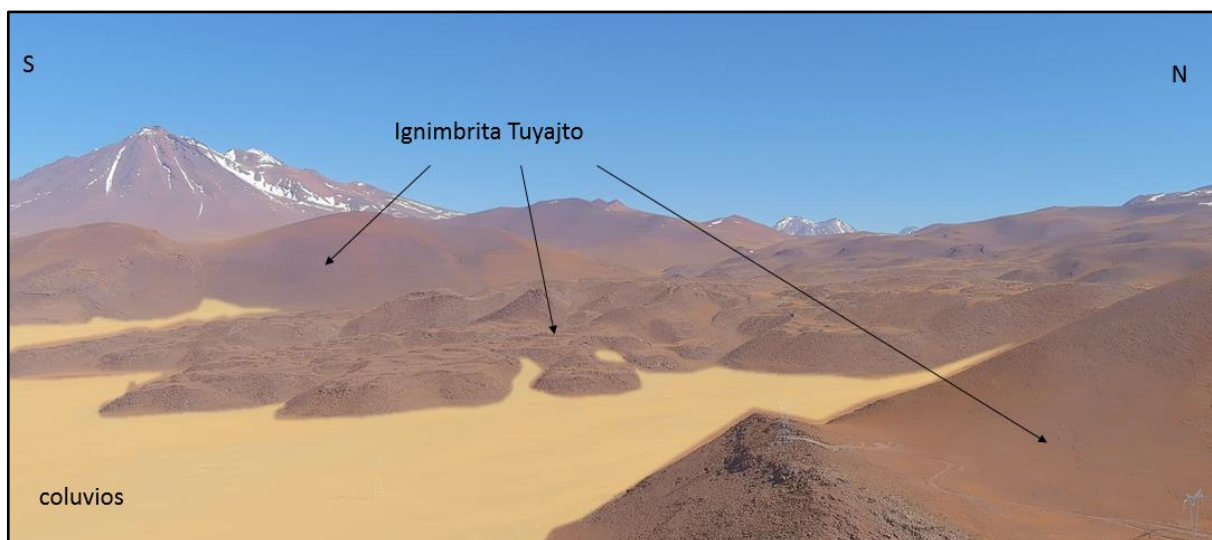


Figura 34. Diferenciación de unidades en los alrededores del salar

Las tonalidades blancas corresponden a zonas o corteza rica en sulfatos, principalmente en la periferia este del salar. Las tonalidades fuertes pardo rojizas, corresponden a suelo húmedo las

tonalidades grises en el centro del salar es posible identificar un núcleo Halita por ultimo las Tonalidades amarillo corresponde a carbonatos y arcillas (Figura 35).

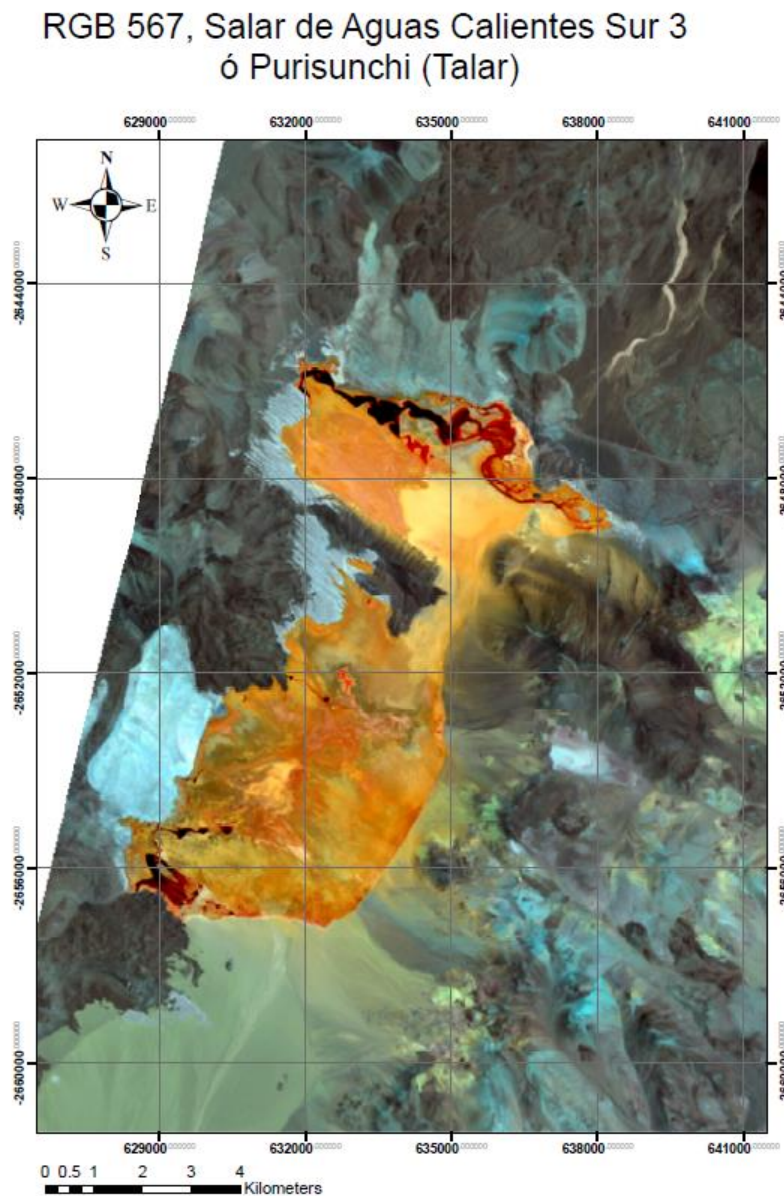


Figura 35. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.

En la figura 36 se muestra el mapa de zonaciones preliminares basados en la imagen entregada por Google Earth y la combinación de bandas anteriores más la zonación descrita en terreno, este mapa se realizó en base a litologías, vuelo de drones, colores y texturas distinguibles las cuales se caracterizaron en terreno.

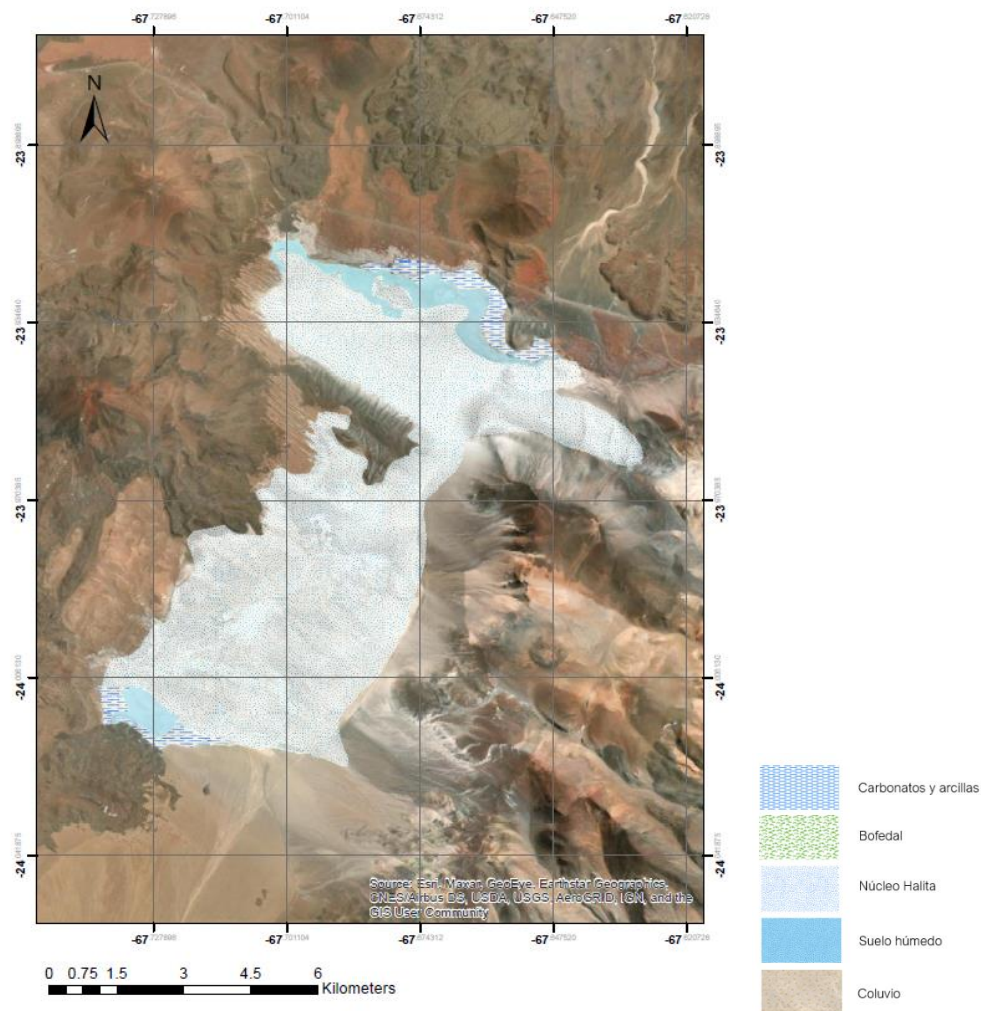


Figura 36. Mapa zonación en salar Pujsa. Elaboración propia.

5.3.3.4 Salar El Laco

5.3.3.4.1 Antecedentes Generales del Sistema Salino

Antecedentes Generales del Sistema Salino:	
Región:	Antofagasta
Provincia:	El Loa
Comuna:	San Pedro de Atacama
UTM 19S HUSO Este:	662.261
UTM 19S HUSO Norte:	7.360.365
Altura:	4.250 m.s.n.m

Tabla 4. Antecedentes generales Salar El Laco

5.3.3.4.2 Descripción General

Salar andino tipo playa constituido por una laguna central somera y por costras salinas de sulfatos y cloruros. Las costras salinas sulfatadas rodean la laguna mientras que, en la parte central y norte del salar, se observan más costras salinas de cloruros y sulfatos. La cuenca contiene ignimbritas al sur y este y tobas y brechas andesíticas al norte y al este, junto con tobas dacíticas y riolíticas (Figura 37).

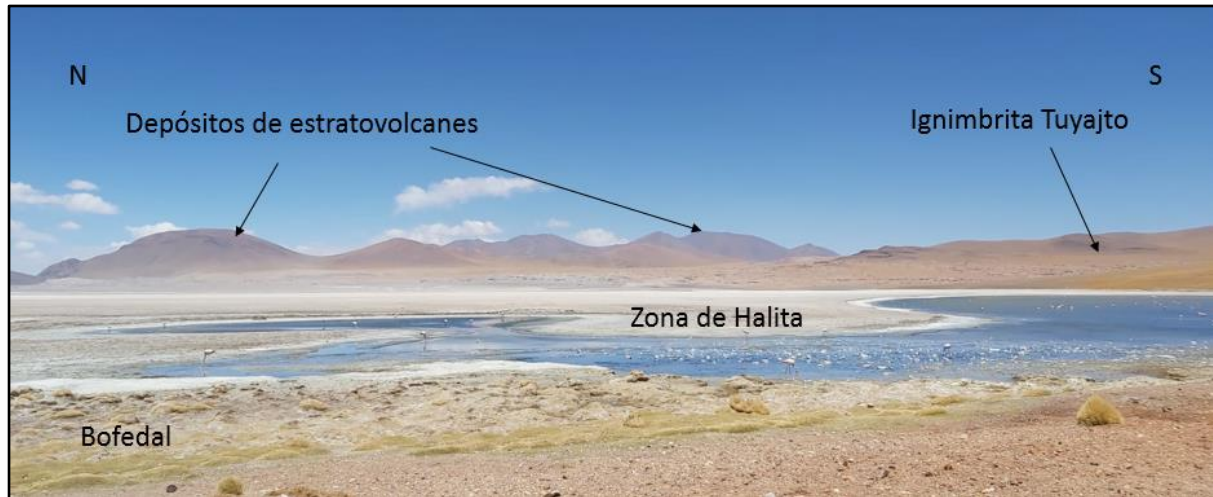


Figura 37. Diferenciación de unidades litológicas alrededor del salar

5.3.3.4.3 Datos Morfológicos y Climáticos del Sistema Salino

Contiene una morfología ovalada con su eje mayor de 6,8 km en dirección NS y su eje menor de aproximadamente 2,5 km en dirección EW. La superficie del Sistema Salino: 16,2 km², Superficie de la Cuenca: 306 km², Superficie de las Lagunas: 2,2 km², Precipitación: 200 mm/año, Evaporación Potencial: 1.500 mm/año

5.3.3.4.4 Litología y zonación

Conjunto de estratovolcanes, domos y secuencias de lavas estratificadas que afloran al oeste, noreste y al sur del salar. Cubren la Formación Siglia y son cubiertas en discordancia erosiva por los depósitos de ignimbritas. Presenta grados de erosión intensas, en donde los edificios volcánicos se encuentran disectados por quebradas profundas. Se expone un núcleo con alteración solfatárica. Las lavas en la loma Siglia están truncadas por las estructuras regionales. Las lavas se componen de andesitas de piroxeno, andesitas afaníticas, basaltos de olivino y dacitas. Sobre las lavas en los bajos topográfico se encuentran los depósitos evaporíticos con presencia de zonas húmedas en vista aérea se pueden distinguir las zonaciones (Figura 38 y 39)



Figura 38. A) Capa superficial de halita. B) Lagunas en zona de halita. C) Barro lacustre o arcillas presentes bajo lagunillas. D) Arcillas bajo costras de halita en zonas secas.



Figura 39. Diferenciación de unidades litológicas del salar

Las tonalidades blancas corresponden a zonas o corteza rica en sulfatos, principalmente en la periferia este del salar. Las tonalidades fuertes pardo rojizas, corresponden a suelo húmedo las tonalidades grises en el centro del salar es posible identificar un núcleo Halita por ultimo las Tonalidades amarillo corresponde a carbonatos y arcillas (Figura 40).

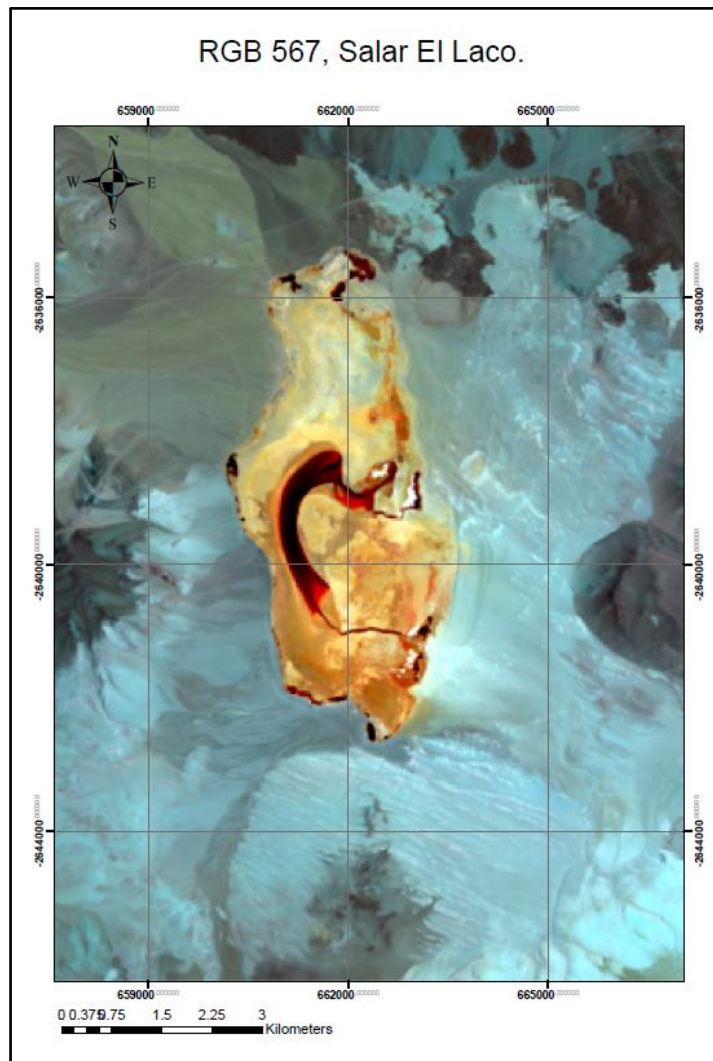


Figura 40. Composición de color de Landsat 8 sensor OLI con reflectancia de bandas 5, 6, 7 en RGB, LANDSAT 8. OLI/TIRS. LANDAT 8 OLI. Diferenciación mineralógica dentro del salar. Elaboración propia.

En la figura 41 se muestra un mapa de zonaciones preliminares basados en la imagen entregada por Google Earth y la combinación de bandas anteriores más la zonación descrita en la hoja Río Zapaleri, este mapa preliminar se realizó en base a colores y texturas distinguibles las cuales se caracterizaron en terreno.

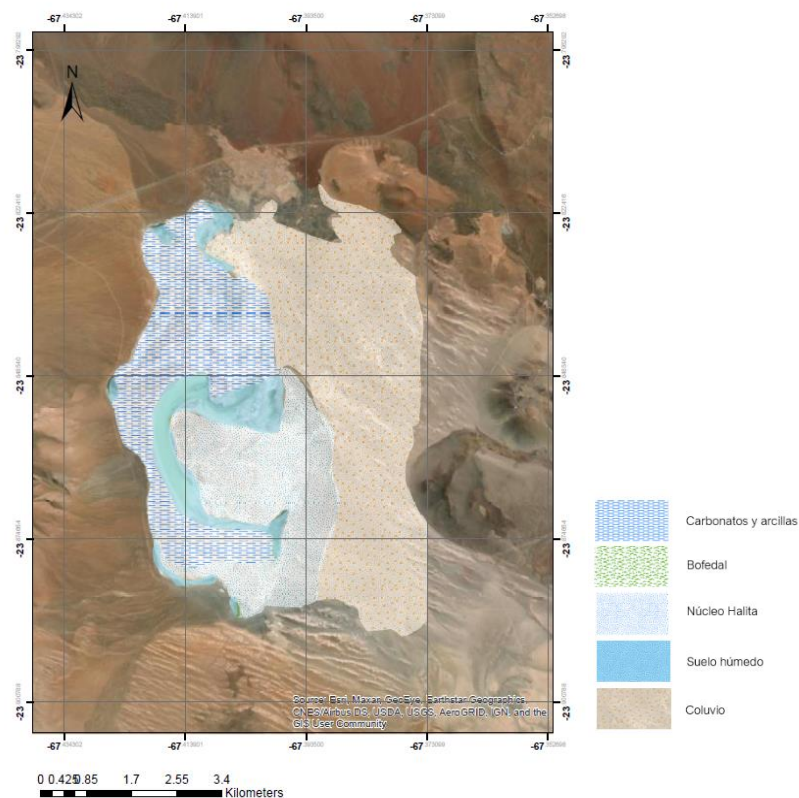


Figura 41. Mapa preliminar zonación en salar Pujsa. Elaboración propia.

5.3 Elementos Mayores

Los datos hidrogeoquímicos de elementos mayores de 31 muestras recolectadas en el Troncoso 2013, se graficaron y analizaron mediante la generación de diagramas de Piper y Stiff utilizando el software Grapher.

En las figuras 42, se pueden observar los lugares donde se realizaron los muestreos en cada uno de los salares, cada marca en los mapas contiene una figura, color y número. Cómo cuadrados en color rojo son las muestras en vertientes el número se relaciona con el diagrama de Stiff generado para cada muestra, en forma circular y color celeste se grafican las muestras en lagunas y el número en ellas hace relación con su respectivo diagrama de Stiff por su parte el color verde en forma de triángulo gráfica las muestras tomadas en canales y su número corresponde a su diagrama de Stiff.

Diagrama de Stiff, Salar Aguas Calientes Norte.

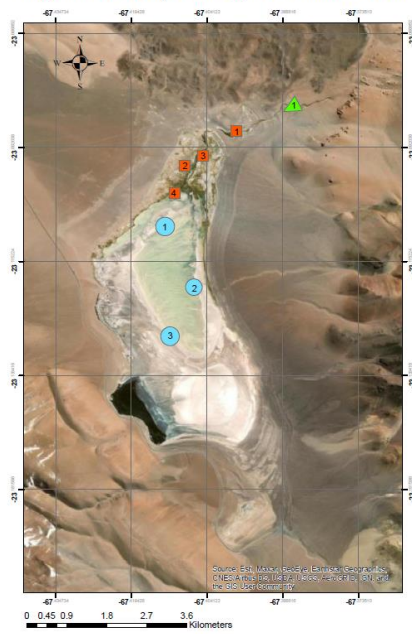


Diagrama de Stiff, Salar Pujsa.

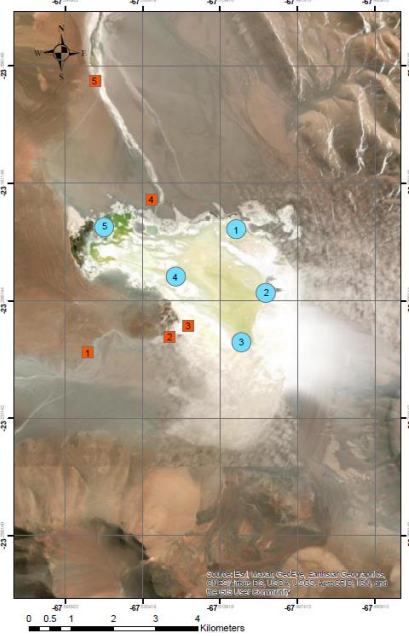


Diagrama de Stiff, El Laco.

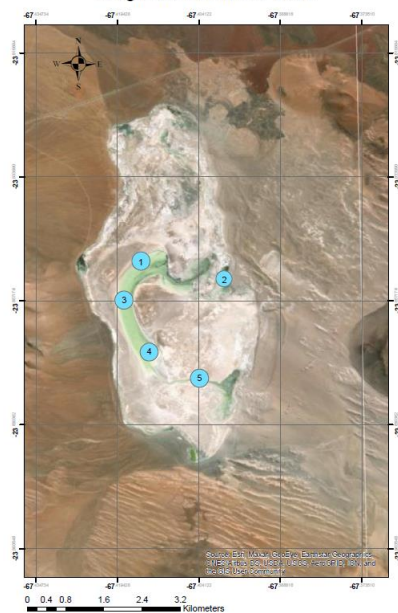


Diagrama de Stiff, Salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)

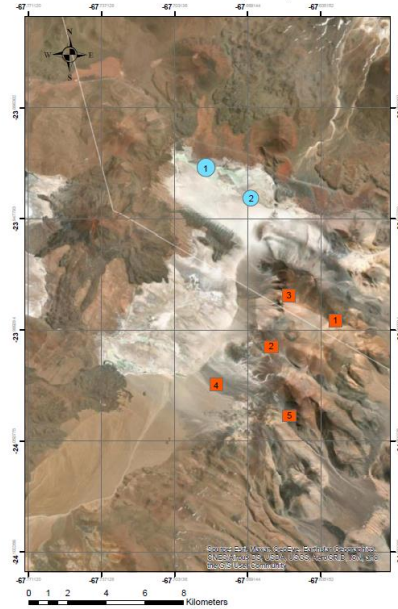


Figura 42. Se pueden observar los mapas con las ubicaciones del muestreo para cada salar-ABCD

Dentro de las muestras de composición sódica-clorurada las muestras superficiales del salar Pujsa y Aguas calientes norte, en el campo de las aguas cálcicas-sulfatadas se encuentra parte de Pujsa, parte de Aguas Calientes Norte y en su mayoría Aguas Calientes Sur, dentro del rango de aguas calcio y sodio bicarbonatadas se encuentra El Laco. La variabilidad entre cada salar, lo más probable es que se deba a relación en la composición de las rocas de cada lugar. Por otro lado, tanto las muestras obtenidas en el salar de Aguas Calientes norte y Pujsa presentan una composición cercana a, o dentro del campo de las aguas cálcico-sulfatadas, lo

que estaría relacionado a una relativa mayor concentración de Ca y menor de Na en ese salar, situación que puede observarse en los diagramas de Stiff de cada muestra (Figura 43).

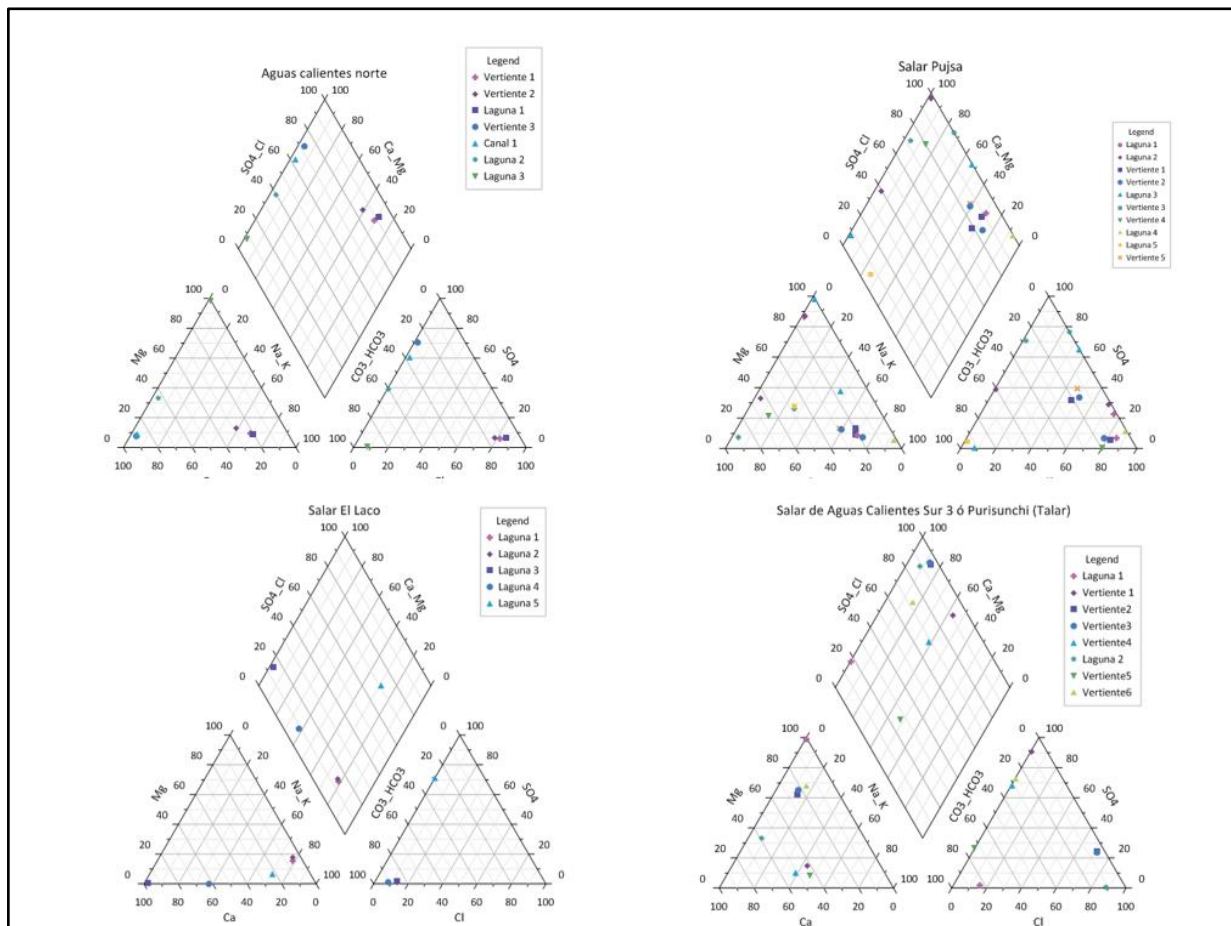


Figura 43. Diagramas de Piper para las muestras de lagunas, canales y vertientes para los cuatro salares.

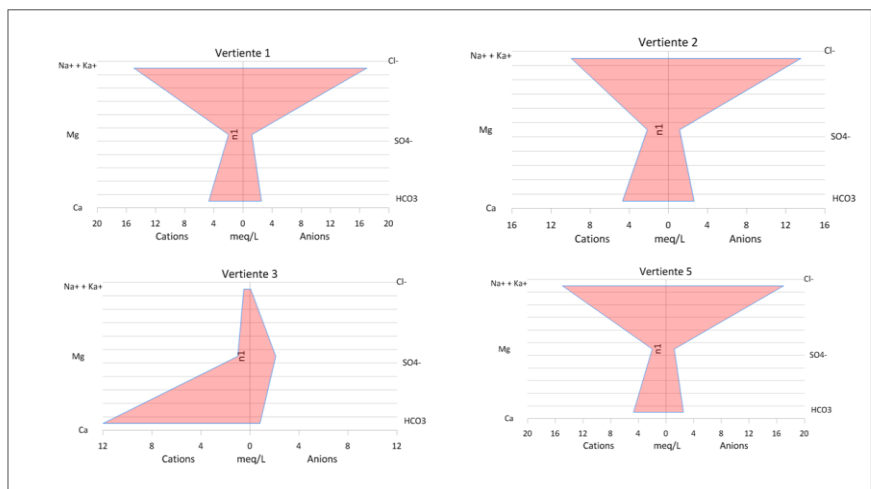
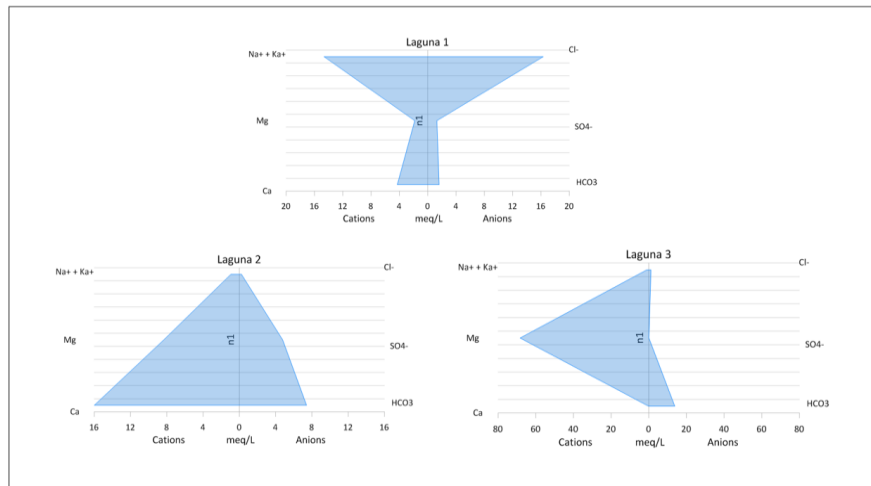
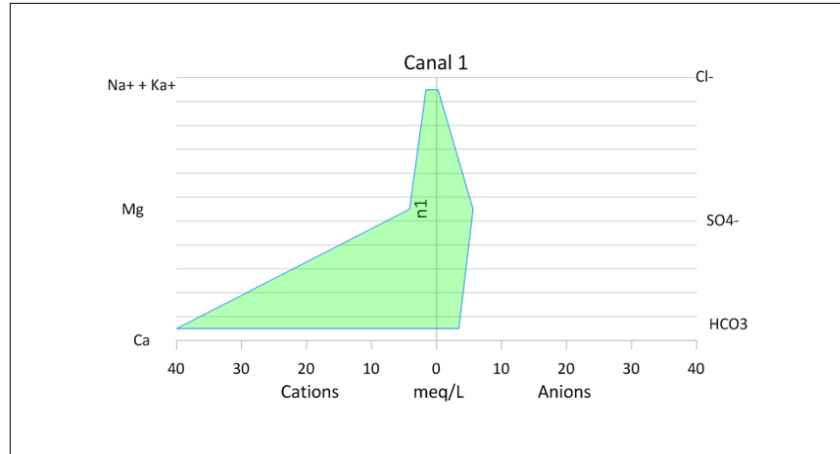


Figura 44. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar Aguas calientes norte

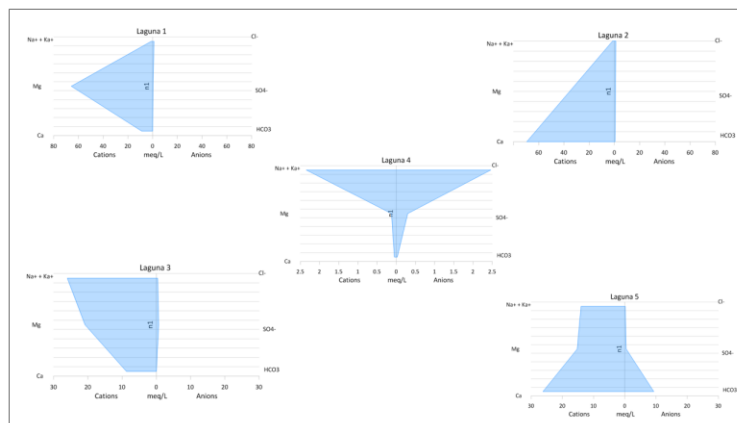


Figura 45. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar Puja

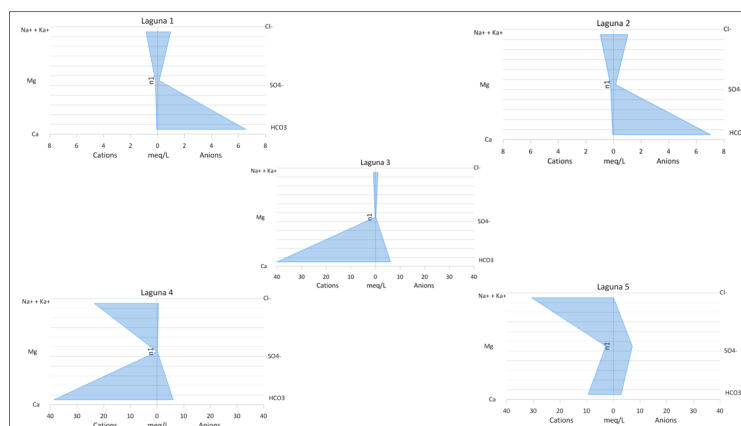
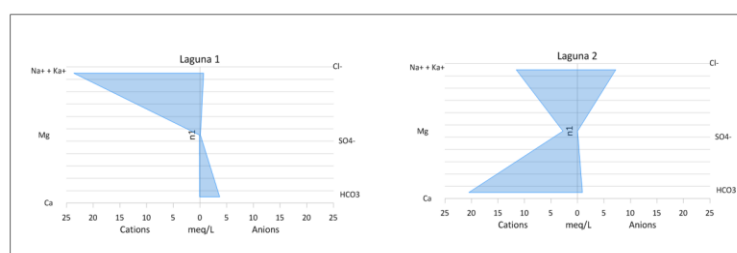


Figura 46. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar El Laco



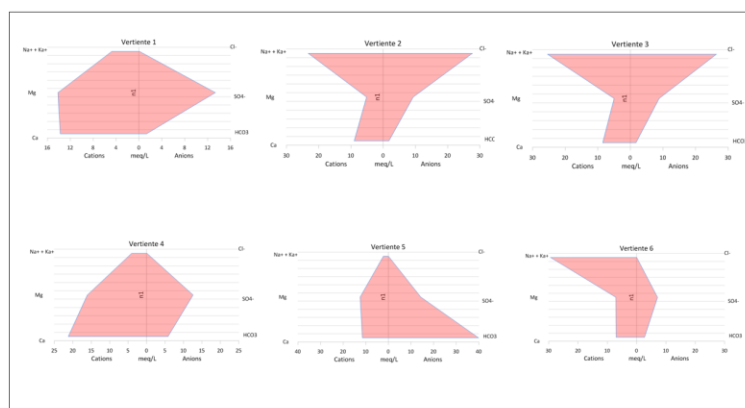


Figura 47. Diagramas de Stiff para las muestras en el salar Aguas Calientes Sur.

Como puede apreciarse en sus diagramas de Stiff (Figura 44, 45, 46 y 47), los gráficos en lagunas y vertientes tienen diferencias, las lagunas presentan una mayor concentración de bicarbonato y una drástica menor concentración de Na, K y Cl respecto a la gran mayoría de las muestras, con valores inferiores a 15 meq/l de Cl y 30 meq/l de Na y K, lo que representa porcentajes inferiores al 50% de estos elementos. Las muestras de vertientes de en cada salar se observan una saturadas de Na y Cl en desmedro de las concentraciones de Ca, Mg, bicarbonato y sulfato, lo cual es característico para este grupo.

5.4 Caracterización Geofísica

5.4.1 Potencial espontáneo

Los perfiles realizados se extienden en los bordes de los salares Pujsa, Aguas Calientes Sur, Aguas Calientes Norte y El Laco. Siempre es recomendable al realizar un análisis geofísico se cual sea conocer con anterioridad algunos parámetros como niveles piezométricos y litologías en superficies superficiales y subterráneas. En la zona de Pujsa, Aguas Calientes Norte y Sur no se logró acceder a pozos, solamente en el salar El Laco se pudieron apreciar varios pozos, de los cuales uno estaba abierto por lo que se pudo medir la profundidad del primer acuífero, estando a 5 metros. Para esta parte de la investigación se realizó un reconocimiento por los salares para ubicar las líneas eléctricas de medición de forma estratégicamente y poco invasiva con los ecosistemas, con mediciones de 15, 20 y 30 puntos. Todas estas mediciones se realizaron en los bordes de los salares menos en Pujsa donde se realizó perpendicular a la vertiente principal y en el centro de la zona de Halita.

Para visualizar los resultados se entregan por salar estudiado mostrando la ubicación de los perfiles y el mapa de contornos obtenido tras el procedimiento de inversión de datos.

5.4.1.1. Salar Aguas calientes Norte

Se realizó un perfil geoelectrico al borde del salar (Figura 48) con contacto MsPlp con una orientación NE-SW con una distancia de 1 metro por punto medido y con una cantidad de puntos medidos de 30 para A-A'' (Figura 49). Para cada perfil se marcó su inicio y final con un hito. Tras finalizar la toma de datos se procede a tomar los puntos GPS de inicio y final de los perfiles y tomar una imagen aérea con drones.



Figura 48. Fotografía ubicación medición salar Aguas Calientes Norte

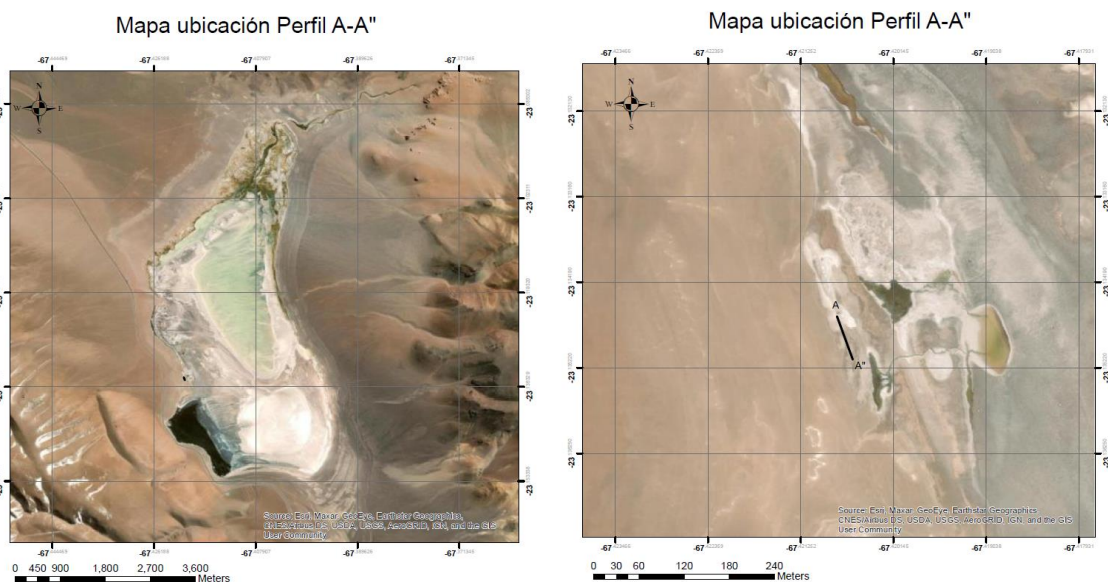


Figura 49. Mapa Ubicación perfil A-A'', salar Aguas Calientes Norte.

En la Figura 50 se puede apreciar valores de potencial espontáneo en mV tomados en profundidad por 30 puntos, tras esto se realizó la corrección de datos y la interpolación los valores resultantes varían desde el 0.18 mV hasta los 0.4 mV, siendo los valores menores (0.18 a 0.28 mV) distinguibles en colores amarillo claros a oscuros asociables a zonas con alta

permeabilidad y suelos saturados en aguas salobres, en colores anaranjados a rojos se mantienen valores bajos de potencial espontáneo (0.29 a 0.4mV), demostrando un contraste importante asociable a zonas donde la saturación de aguas es menor. Este contraste se aprecia desde el punto 10 al 17 de medición demostrando la variación lateral a escala métrica que contienen los salares en su etapa juvenil o sobre hidratada. La zona de anomalía en color azulado se determina no considerar al realizar interpretaciones por ser posibles errores de medición.

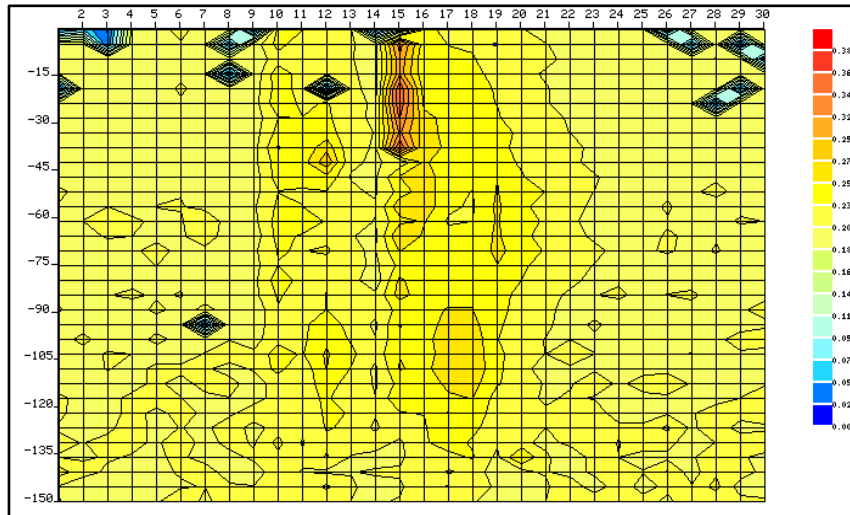


Figura 50. Perfiles Geoelectricos de potencial espontáneo 30 puntos medidos en mV.

5.4.1.2 Salar Pujsa

Se realizaron 2 perfiles geoelectricos con una orientación E-W con una distancia de 1 metro por punto medidos y con una cantidad de puntos medidos de 30 para B-B'' y 30 para C-C''. Para cada perfil se marcó su inicio y final con un hito. Tras finalizar la toma de datos se procede a tomar los puntos GPS de inicio y final de los perfiles y tomar una imagen aérea con drones. (Figura 51)



Figura 51. Fotografía ubicación medición salar Pujsa

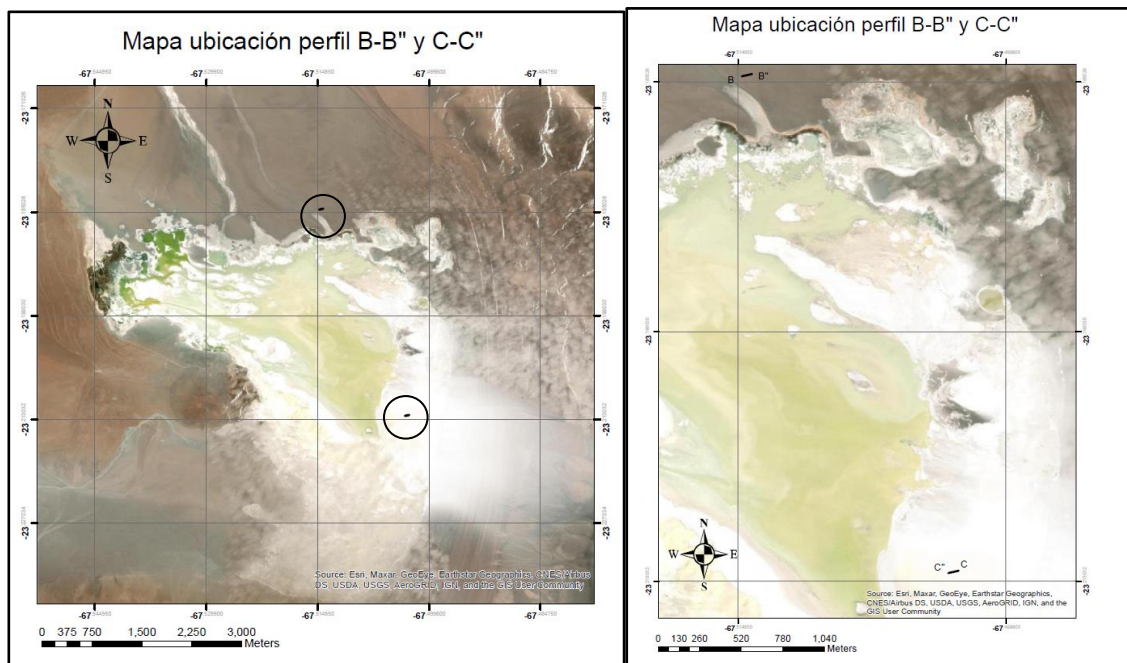


Figura 52. Mapa Ubicación perfiles B-B'' y C-C'', salar Pujasa.

En la Figura x1 del perfil B-B'' se ubica en el contacto con Qal con el salar Pujasa (Figura 52) se pueden apreciar valores de potencial espontáneo que varían desde el 0.08 mV hasta los 0.16 mV, en este perfil se pueden distinguir tres contrastes importantes en profundidad siendo los valores menores (0.8 a 0.12 mV) distinguibles en colores verdes y amarillos claros asociables a zonas con alta permeabilidad y suelos saturados en aguas salobres, en colores amarillos oscuros se mantienen valores bajos de potencial espontáneo (0.13 a 0.16mV), demostrando el contraste en este perfil se aprecia en profundidad considerando 15 a 20 metros de su donde la saturación de aguas es menor asociables a Qal. Bajo los 15 metros hasta aproximadamente los 90 metros se determinan zonas hidratadas concretas. Bajo este nivel se aprecia el posible basamento.

La zona de anomalía en color azulado se determina no considerar al realizar interpretaciones por ser posibles errores de medición. (Figura 53)

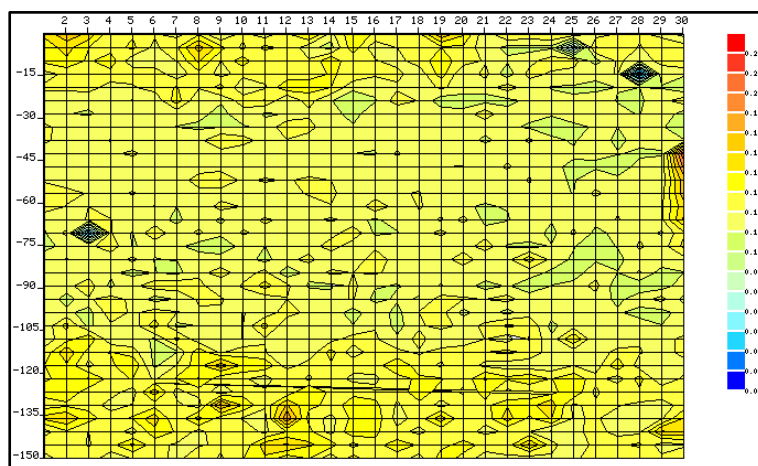


Figura 53. Resultado perfiles “potencial espontáneo” B-B”, salar Pujsa.

En la Figura x2 del perfil C-C” se ubica en el centro del salar Pujsa (Figura 52) se pueden apreciar valores de potencial espontáneo que varían desde el 0.05 mV hasta los 0.31 mV, en este perfil se pueden distinguir tres contrastes importantes en profundidad, siendo los valores menores (0.05 a 0.15 mV) distinguibles en colores azules claros a celestes asociables a zonas de lagunas con profundidades menores o iguales a 5 metros, en colores verdes claros se mantienen valores bajos de potencial espontáneo (0.13 a 0.18mV) asociables a zonas de salmueras subterráneas observables en secciones desde los 15 a 45 metros y 80 a 95 metros. Desde los 30 a 75 metros y 95 a 150 metros se distinguen valores desde 0.18 a 0.31 mV siendo posibles las asociaciones con barros lacustres para la sección de 30 a 75 metros o basamento para la sección de 95 a 150 metros. La zona de anomalía en color azulado se determina no considerar al realizar interpretaciones por ser posibles errores de medición. (Figura 54)

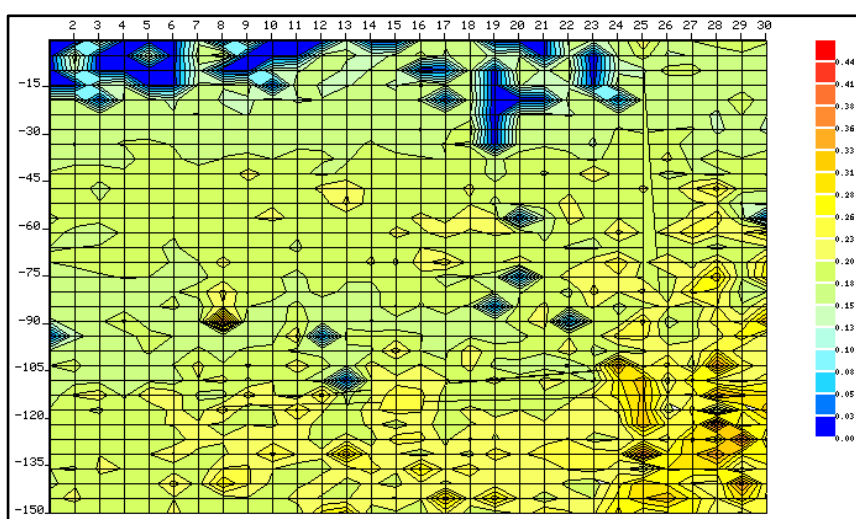


Figura 54. Resultado perfiles “potencial espontáneo” C-C”, salar Pujsa.

5.4.1.3 Salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)

Se realizó 1 perfil geoelectrico ubicado en el contacto del salar con la ignimbrita Tuyajto (Figura 55) con una orientación NW-SE con una distancia de 1 metro por punto medido y con una cantidad de puntos medidos de 15 para D-D'' (Figura 56). Para cada perfil se marcó su inicio y final con un hito. Tras finalizar la toma de datos se procede a tomar los puntos GPS de inicio y final de los perfiles y tomar una imagen aérea con drones.



Figura 55. Fotografía ubicación medición salar Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)

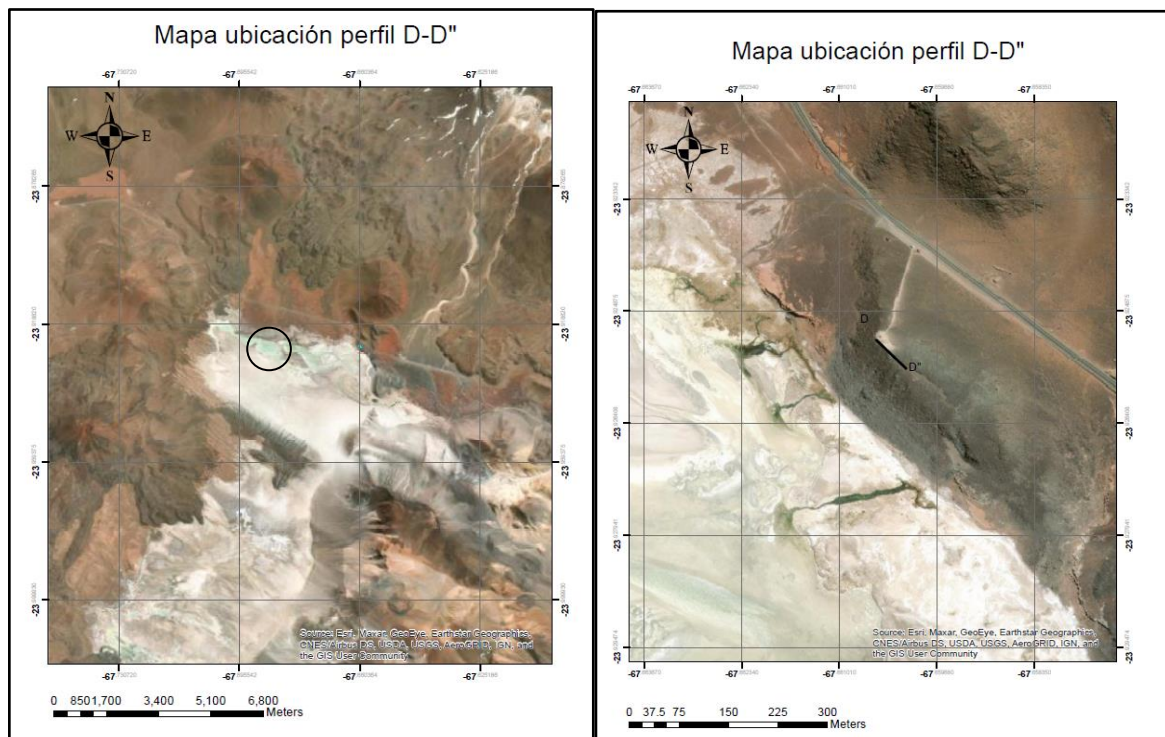


Figura 56. Mapa Ubicación perfiles D-D'', salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar)

En la Figura x1 del perfil D-D'' se ubica sobre el contacto de la ignimbrita Tuyajto con el salar Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar) se pueden apreciar valores de potencial espontáneo que varían desde el 0.02 mV hasta los 0.29 mV, en este perfil se pueden distinguir tres contrastes importantes en profundidad siendo los valores menores (0.8 a 0.19 mV) distinguibles en colores azules a amarillos claros asociables a zonas con alta permeabilidad por zonas de posibles zonas de falla o concentración de discontinuidades, en colores amarillos oscuros se

mantienen valores bajos de potencial espontáneo (0.20 a 0.23 mV), el cual se aprecia en profundidad considerando 15 a 105 metros de su donde la saturación de aguas es nula asociables a depósitos de estratovolcanes. Bajo este nivel se aprecia el posible basamento en colores anaranjados claros a oscuros con valores desde 0.23 a 0.29 mV. (Figura 57)

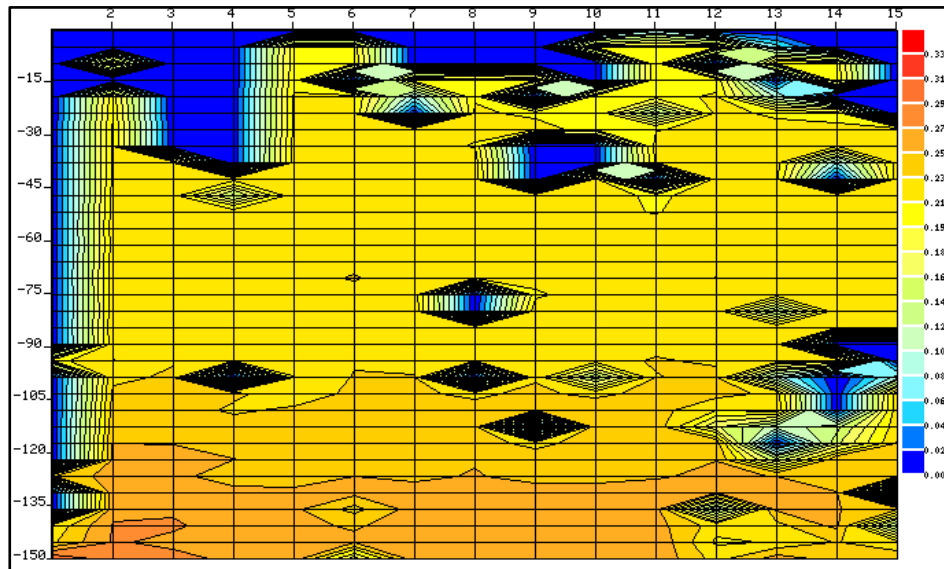


Figura 57. Resultado perfiles “potencial espontáneo” D-D”, salar de Aguas Calientes Sur 3 ó Purisunchi (Talar).

5.4.1.4 Laguna Tuyajto

Se realizó 1 perfil geoelectrico ubicado en el contacto entre PlPv y la costra salina de la laguna Tuyajto (Figura 58) con una orientación NW-SE con una distancia de 1 metro por punto medido y con una cantidad de puntos medidos de 20 para E-E” (Figura 59). Para cada perfil se marcó su inicio y final con un hito. Tras finalizar la toma de datos se procede a tomar los puntos GPS de inicio y final de los perfiles y tomar una imagen aérea con drones



Figura 58. Fotografía ubicación medición Laguna Tuyajto.

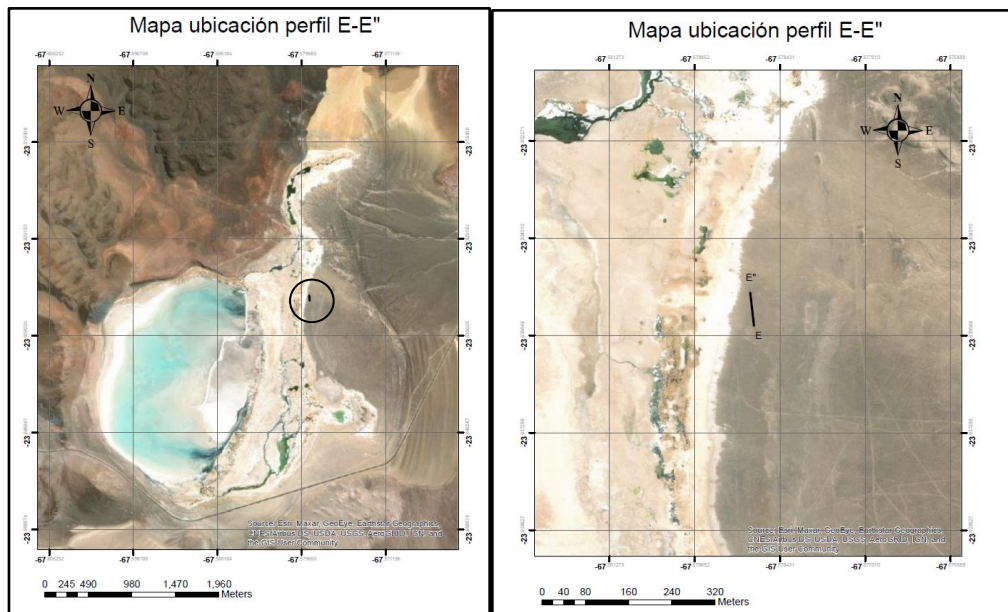


Figura 59. Mapa Ubicación perfiles E-E'', Laguna Tuyajto.

En la Figura 59 del perfil E-E'' se ubica sobre el contacto de PIPv con la laguna Tuyajto con él se pueden apreciar valores de potencial espontáneo que varían desde el 0.02 mV hasta los 0.29 mV, en este perfil se pueden distinguir tres contrastes importantes en profundidad siendo los valores menores (0.8 a 0.23 mV) distinguibles en colores azules a amarillos claros asociables a zonas con alta permeabilidad por zonas de posibles zonas de falla o concentración de discontinuidades con alta probabilidad de contener aguas salobres, bajo este nivel se aprecia el posible basamento en colores anaranjados claros a oscuros con valores desde 0.23 a 0.29 mV. (Figura 60)

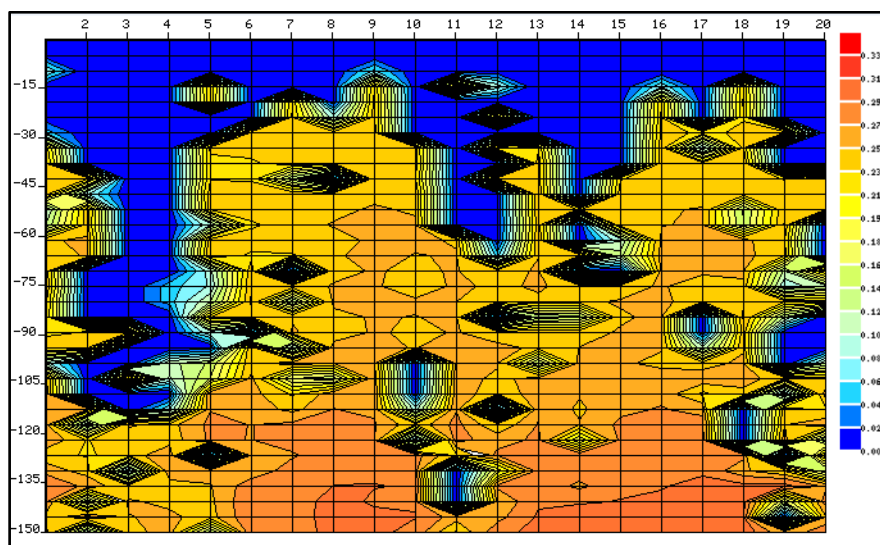


Figura 60. Resultado perfiles "potencial espontáneo" E-E'', Laguna Tuyajto.

5.4.1.5 Salar El Laco

Se realizó 1 perfil geoelectrico en el borde externo del salar (Figura 61) con una orientación N-S con una distancia de 1 metro por punto medido y con una cantidad de puntos medidos de 20 para F-F'' (Figura 62). Para cada perfil se marcó su inicio y final con un hito. Tras finalizar la toma de datos se procede a tomar los puntos GPS de inicio y final de los perfiles y tomar una imagen aérea con drones



Figura 61. Fotografía ubicación medición Salar El Laco

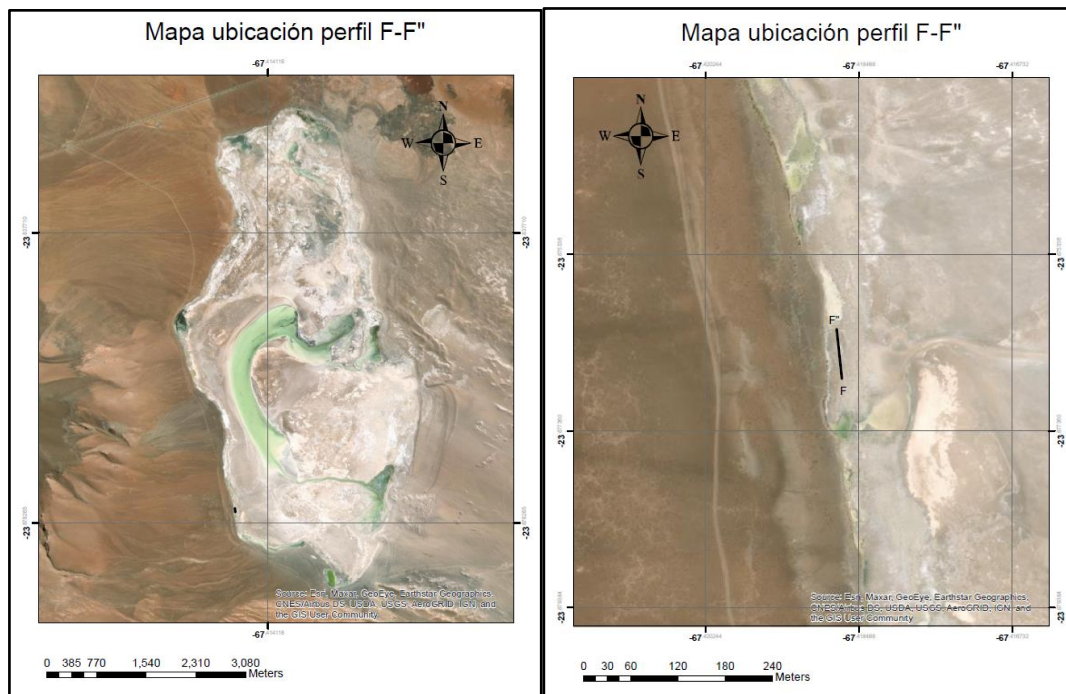


Figura 62. Mapa Ubicación perfiles F-F'', salar El Laco.

En la la Figura x1 del perfil F-F'' se ubica sobre el salar El Laco se pueden apreciar valores de potencial espontáneo que varían desde el 0.02 mV hasta los 0.42 mV, en este perfil se pueden distinguir tres contrastes importantes en profundidad siendo los valores menores (0.02 a 0.28 mV) distinguibles en colores azules a verdes claros asociables a zonas con alta permeabilidad y concentración de aguas salobres, en colores amarillos oscuros se mantienen valores bajos de

potencial espontáneo (0.29 a 0.38 mV), el cual se aprecia en zonas de concretas asociables a barros lacustres. Bajo este nivel se aprecia el posible basamento en colores anaranjados claros a oscuros con valores desde 0.39 a 0.42 mV. (Figura 63)

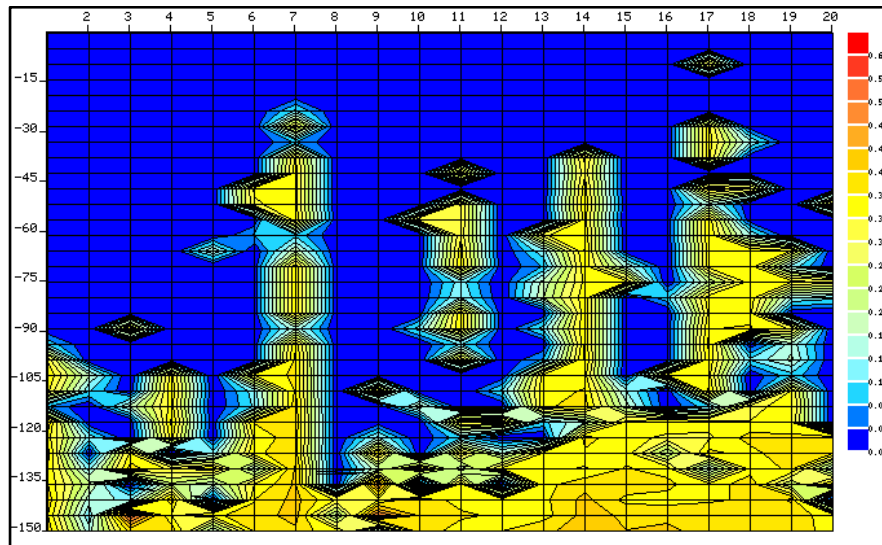


Figura 63. Resultado perfiles “potencial espontáneo” F-F”, salar El Laco.

6. Análisis y discusión

6.1 Hidroquímica

La hidrogeoquímica de las aguas que se encuentran en cuencas cerradas del altiplano chileno, se caracteriza por un aumento paulatino de la concentración de sales disueltas, a medida que los flujos de aguas superficiales y subterráneos descienden desde las zonas de recarga hacia las zonas más deprimidas (Cervetto, 2012). Los flujos de agua que ingresan interactúan con la geoquímica de las rocas y depósitos minerales y, debido a las condiciones de aridez, en los puntos más bajos de las cuencas, son sometidos a evaporación que deriva en la formación de grandes salares en sus depocentros.

Realizar una clasificación de las aguas según sus elementos mayores permite establecer diferentes tipos de relaciones entre muestras de agua superficial y la geología de la zona. Como se indicó en el capítulo de resultados, todas las muestras corresponden a aguas de composición sodico-clorurada.

Se propone que se debe a que las muestras presentan diversos grados de redisolución de halita desde salmueras residuales, evaporitas exteriores y diferencias en el volumen de halita arrastrada y depositada por el viento, situación que es visible en los diagramas de Stiff (figura

65), donde se observa un predominio de Na y Cl sobre otros elementos en la mayoría de las muestras.

En situaciones normales se acepta por consenso que las aguas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, después predomina el sulfato y finalmente las aguas más salinas son cloruradas (Custodio y Lamas, 1996). Homólogamente en la composición catiónica la secuencia sería, de menor a mayor tiempo de permanencia en el subsuelo: Ca, Mg y Na. Esta secuencia está controlada por dos factores principales: la solubilidad y abundancia en el subsuelo de las distintas sales (Custodio y Lamas, 1996). En la zona de estudio no es posible utilizar esta secuencia debido a que en las cuencas de los diversos salares existe una alta salinidad inicial, que desde un comienzo de la evolución saturaría las aguas de Na y Cl (Custodio y Lamas, 1996; Alonso y Risacher, 1996). Esta alta salinidad inicial se puede deber a la disolución de salmueras residuales aledañas a los salares o redisolución de evaporitas antiguas en las rocas sedimentarias preexistentes (Custodio y Lamas, 1996). Además, existen otras fuentes de Na y Cl, como la alteración y meteorización de minerales de las rocas volcánicas que rodean las cuencas.

6.1.1 Análisis de las Aguas por salar

No obstante, las elevadas concentraciones de Na y Cl para todas las muestras, dentro del muestreo existe una composición distinguible la cual está dentro de las aguas sódicas-cloruradas.

6.1.1.1 Salar Pujsa

El grupo identificado corresponde a muestras dentro del campo de las aguas sódicas cloruradas que se encuentran composicionalmente más cerca del campo de las aguas sódicas bicarbonatadas, las cuales se distribuyen espacialmente como muestra la Figura 64.

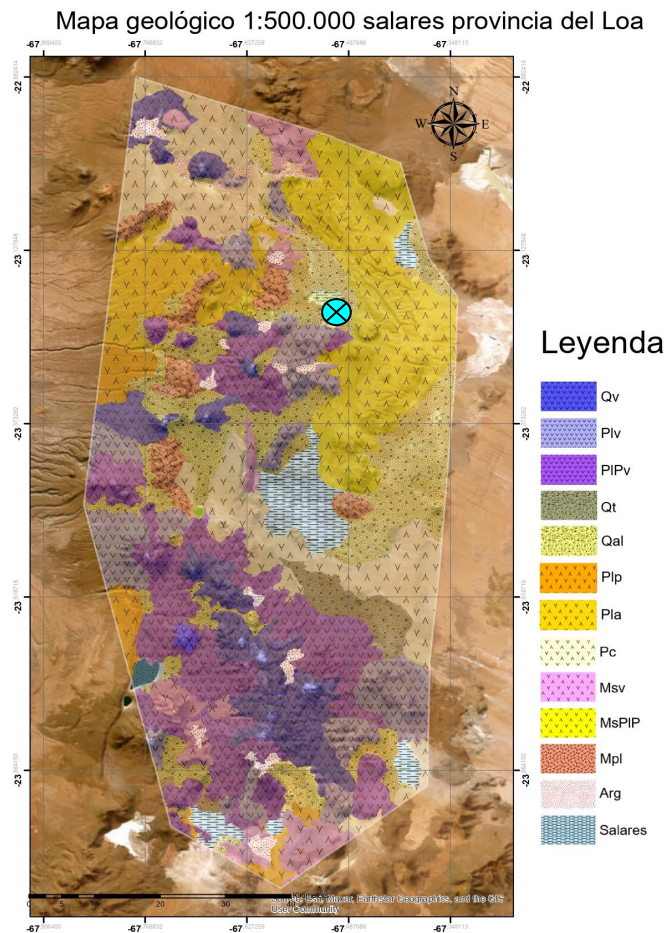


Figura 64. Mapa de ubicación salares definidos.

En cuanto a su ubicación, estas muestras son superficiales. Su característica principal es presentar una mayor cantidad de bicarbonato, como se observa en la Figura 65.

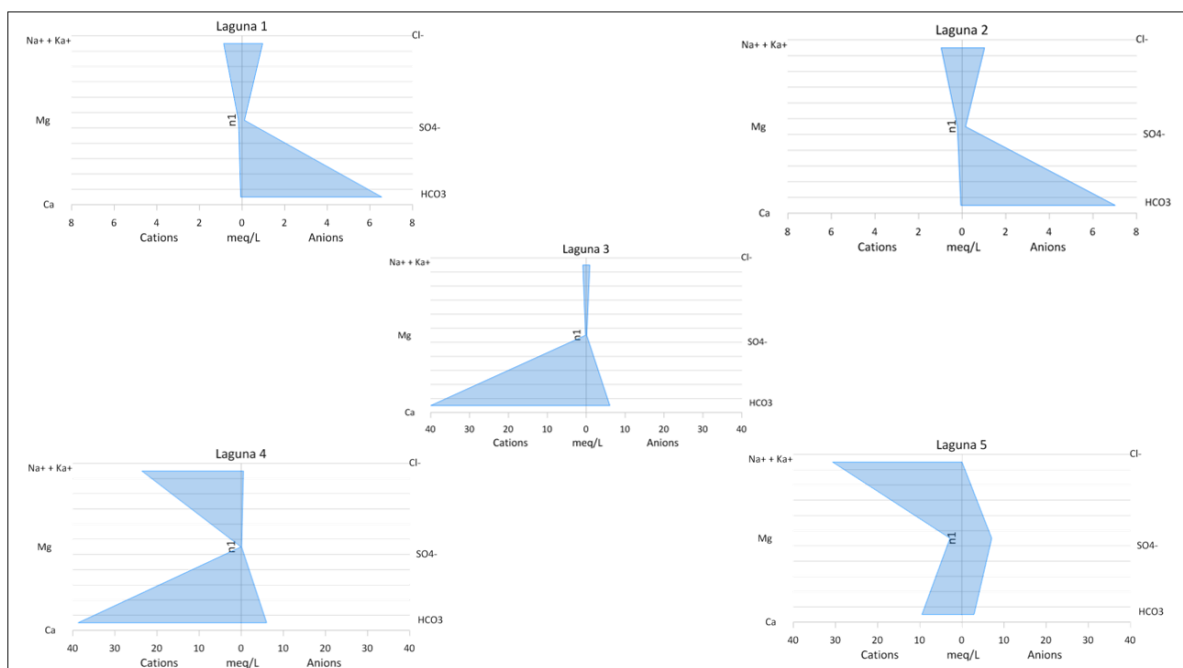


Figura 65. Diagramas de Stiff para las sódico-bicarbonatadas.

La muestra del salar Pujsa recibe aportes de aguas que han circulado por depósitos de estratovolcanes, las ignimbritas Atana y La Pacana, y en menor medida la Ignimbrita Cajón. De forma análoga al análisis del subgrupo anterior, se puede especular en primera instancia que la mayor cantidad de bicarbonato provenga indistintamente de las ignimbritas en general.

6.1.1.2 Salar Aguas calientes Norte, Salar de Aguas Calientes Sur, Laguna Tuyajto y Salar el Laco.

Este grupo identificado, corresponde a las aguas que se encuentran composicionalmente dentro del campo de las aguas sódico-cloruradas, sin estar ostensiblemente más cercano a otros campos del diagrama de Piper. Se distribuyen espacialmente como se muestra en la Figura 66. En cuanto a su ubicación, fueron obtenidas en aguas superficiales.

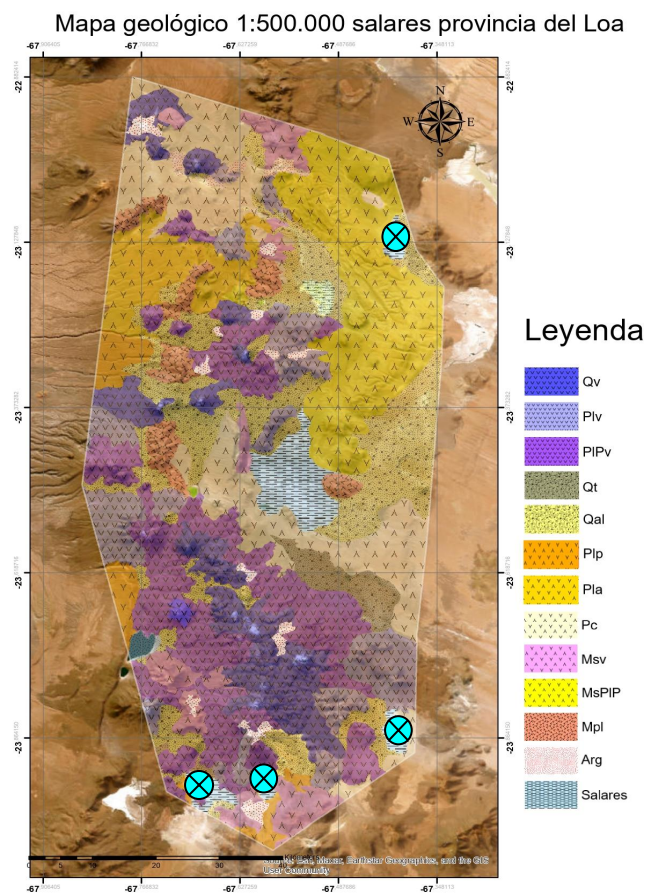


Figura 66. Mapa de ubicaciones salares definidos.

Para abordar su análisis se han definido DOS divisiones de acuerdo con la cercanía de las muestras; La primera división está definida para las muestras hacia el sureste del área de estudio, específicamente las muestras superficiales de la laguna Tuyajto, del salar de aguas

calientes sur y el Laco. Finalmente, la segunda división está ubicada en el salar de Aguas Calientes norte

6.1.1.2.1 Sódico-Cloruradas Sureste

Las muestras sódico-cloruradas ubicadas en la división sureste serán analizadas por separado debido a las características particulares de cada cuenca. En el caso de la muestra superficial obtenida en la laguna Tuyajto, Aguas calientes sur y el Laco, se observan concentraciones máximas sobre los 4.400 meq/l, podría sugerir una fuente de Na y Cl similar, es decir, la redisolución de evaporitas antiguas o que aumentan sus concentraciones producto del efecto de la evaporación para llegar a tales concentraciones. Las unidades que rodean la muestra son principalmente volcánicas, donde los depósitos de estratovolcanes son dominantes, aunque también se encuentran afloramientos de ignimbritas. Nuevamente es poco probable que tales formaciones puedan aportar a las aguas altas cantidades de Na y Cl, aunque sí pueden ser el origen de los ligeros incrementos de sulfato que se observan en las muestras de la división. Como se ha postulado en otros trabajos (Risacher y otros, 1999; Cervetto, 2012), un posible origen del Na y Cl puede estar en la redisolución de evaporitas ubicadas en los depósitos lacustres antiguos que se encuentran al este de la laguna.

6.1.1.2.2 Sódico-Cloruradas Noreste

hacia el Noreste Las concentraciones máximas observadas en los diagramas de Stiff están en un rango entre los 330 y 900 meq/l, donde las muestras superficiales obtenida en el salar de Aguas Calientes norte y Pujsa tiene la mayor concentración, lo cual representa muestras de concentraciones intermedias a altas. Las muestras están rodeadas principalmente de afloramientos de rocas volcánicas, específicamente numerosos depósitos de estratovolcanes, las Ignimbritas y depósitos lacustres antiguos. Ninguna de estas unidades presenta niveles de evaporitas o minerales excepcionalmente enriquecidos en Na o Cl, por lo que el origen de las mayores concentraciones de estos elementos es probable que se deba a la alteración y meteorización de rocas volcánicas de alguna de las unidades ya nombradas, en especial la Ignimbrita Atana y en menor medida al efecto concentrador de la evaporación. . Las muestras de esta división muestran ligeros incrementos en la concentración de Ca (siempre opacados por las altas concentraciones de Na y Cl) que podrían provenir de aguas que han estado en contacto con la Ignimbrita Atana, que según los análisis químicos realizados en la carta geológica Hoja

Río Zapaleri (Ramírez y Gardeweg, 1985), contiene relativamente altos porcentajes de Ca, por lo que es una buena candidata a ser el origen de esos incrementos.

6.2 Geofísica

Considerando los resultados obtenidos con el estudio de potencial espontáneo, se adjuntó a estos resultados toda la información anteriormente descrita geología e hidroquímica para tener más información y lograr una interpretación integral. Lo anterior con el fin de delimitar la zona geológicas características presentes en un sistema salar, se correlacionan los resultados obtenidos con SP y geología local.

Los valores obtenidos en toda el área de estudio varían desde 0.02 a 0.5 mV y están asociados a suelos arcillosos hidratados, suelos arcillosos, posible concreciones o geodas y posibles sistemas de fallas que aumentan la permeabilidad de las rocas volcánicas en ciertos puntos.

La ubicación de las prospecciones, busco definir la profundidades y ubicación de las zonas hidratadas y basamento. Los resultados de esta sección se cruzaron con perfiles obtenidos en trabajos de sondaje en el salar del Rincón (Toledo, 2007), Los cuales se pasarán a describir.

6.2.1 Perfil geológico esquemático, Salar aguas calientes norte.

Además de la geología descrita en el entorno de cada salar se determina para el Salar Aguas calientes norte un perfil esquemático (Figura 68) en esta sección puede observar tres segmentos de costra salina con una profundidad sobre estimada de 20 metros, 100 metro de sedimento lacustre una sección hidratada y otra sección de sedimento lacustre no hidratada en la zona central por último un basamento inferido como rocas volcánicas.

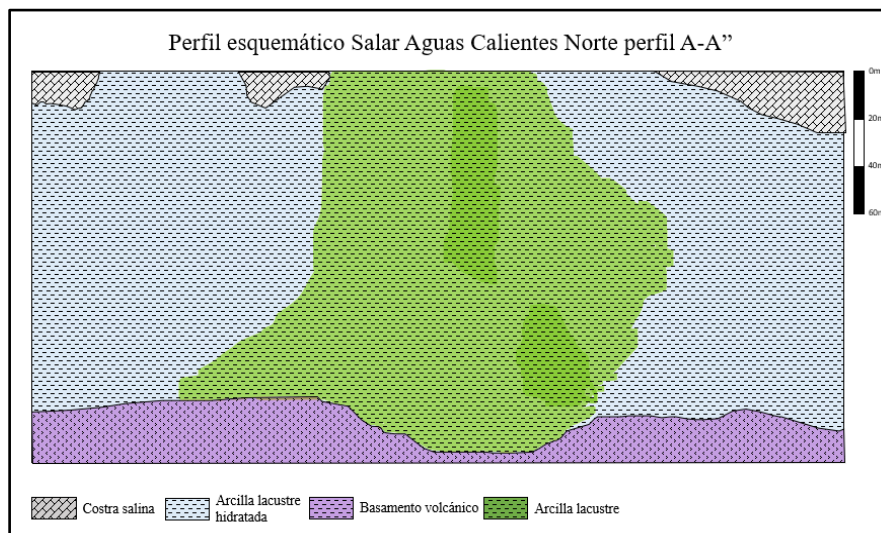


Figura 67. Sección geológica esquemática salar aguas calientes norte.

6.2.2 Perfil geológico esquemático, Salar Pujsa.

Se determinan para el Salar Pujsa dos perfiles esquemáticos (Figura 69), en la sección del perfil B-B'' puede observar dos segmentos de costra salina con una profundidad sobre estimada de 20 metros, 80 metros de sedimento lacustre una sección hidratada y posibles geodas aisladas entre el sedimento lacustre y el basamento volcánico a una profundidad de 110 metros (Figura x).

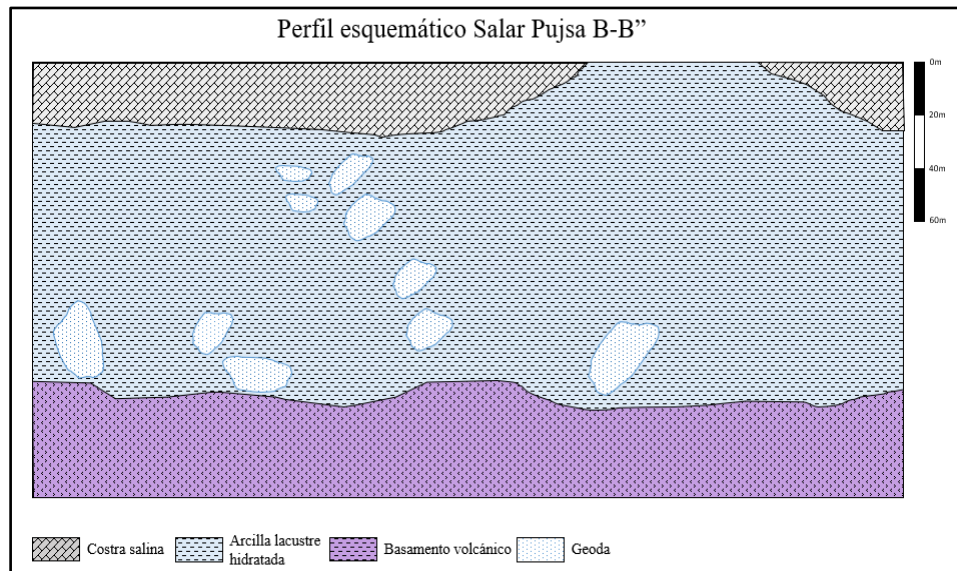


Figura 68. sección geológica esquemática salar Pujsa B-B''

Se determinan para el Salar Pujsa dos perfiles esquemáticos (Figura 70), en la sección del perfil C-C'' puede observar un segmento de costra salina con una profundidad sobre estimada de 20 metros, 60 metros de sedimento lacustre una sección hidratada y otra sección de sedimento lacustre no hidratada en la parte media desde los 60 a los 80 metros de profundidad, posibles geodas aisladas entre el sedimento lacustre no hidratada y el basamento volcánico a una profundidad de 110 metros.

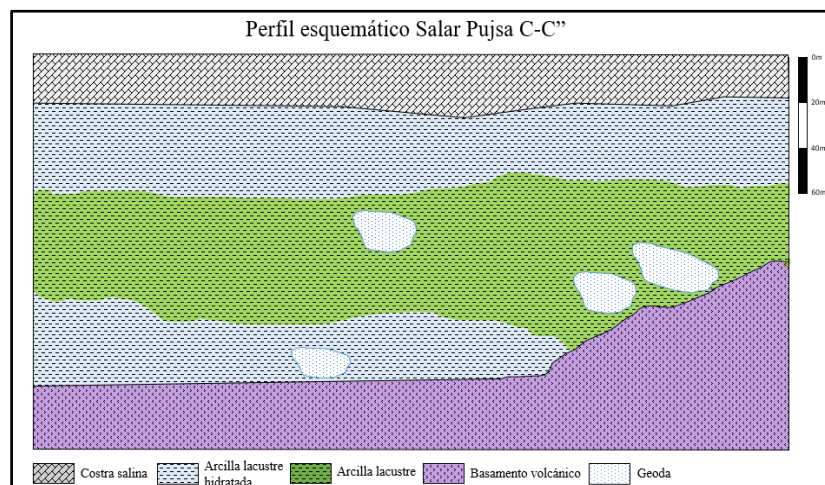


Figura 69. Sección geológica esquemática salar Pujsa C-C''

6.2.3 Perfil geológico esquemático, Salar Aguas Calientes Sur.

Se determina para el Salar Aguas Calientes Sur un perfil esquemático (Figura 71), en la sección del perfil D-D'' ubicado sobre PIPv a más de 15 metros del nivel del salar, un nivel permeable de depósitos de material volcánico con una profundidad sobre estimada de 110 metros, en segmentos se interpretan zonas de fallas inferidas y como el basamento volcánico a una profundidad sobre 110 metros

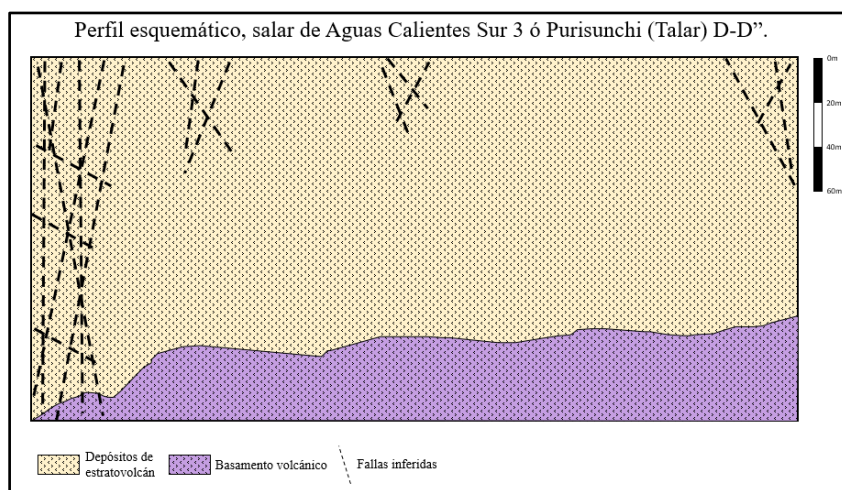


Figura 70. Sección geológica esquemática salar Aguas calientes sur D-D''

6.2.4 Perfil geológico esquemático, Laguna Tuyajto.

Se determina para el Laguna Tuyajto un perfil esquemático (Figura 72), en la sección del perfil E-E'' puede observar un segmento de costra salina con una profundidad sobre estimada de 5 metros, 70 metros de sedimento lacustre con secciones hidratadas y no hidratadas y el basamento volcánico a una profundidad desde los 70 metros.

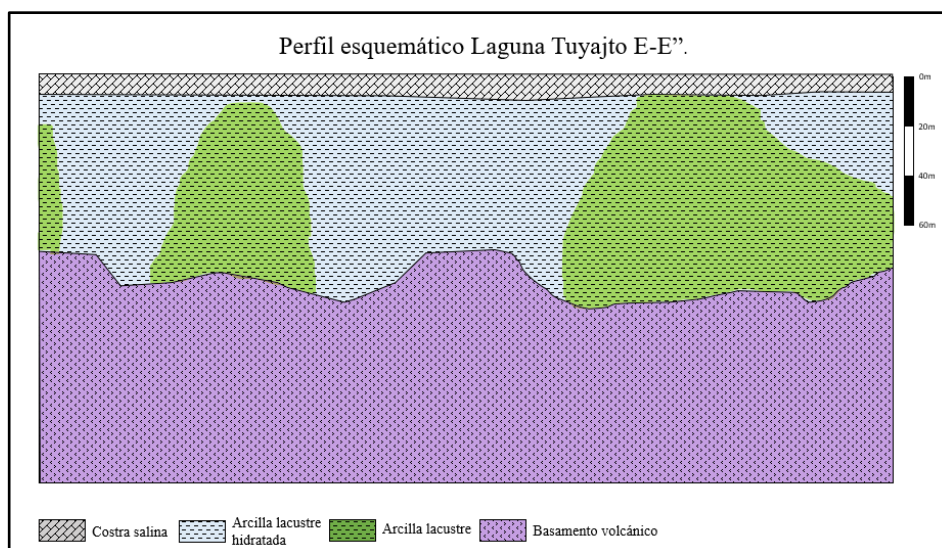


Figura 71. Sección geológica esquemática Laguna Tuyajto E-E''

6.2.5 Perfil geológico esquemático, Salar El Lago.

Se determina para el Salar El Lago un perfil esquemático (Figura 73), en la sección del perfil F-F'', no se observan segmentos de costra salina, se aprecian 130 metros de sedimento lacustre una sección hidratada y el basamento volcánico a una profundidad desde los 120 metros.

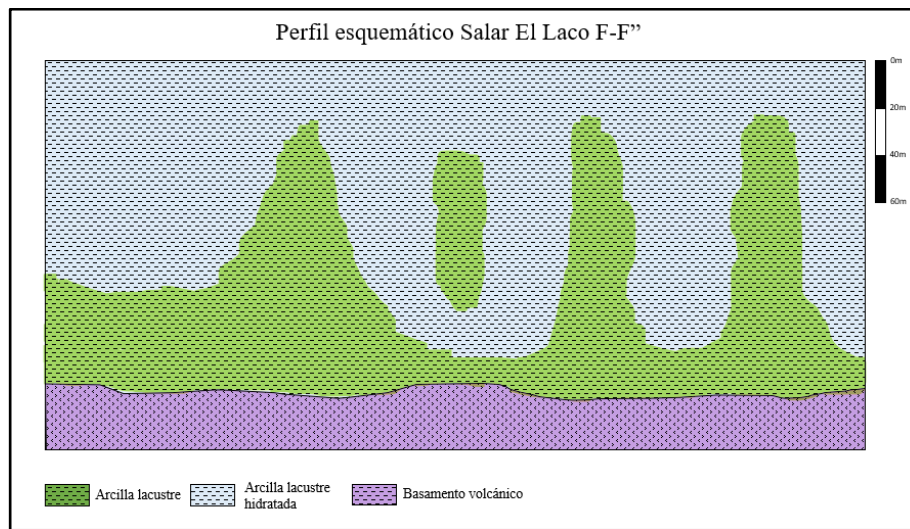


Figura 72. Sección geológica esquemática salar El Lago F-F''

6.3 Petrogénesis volcánica

Se reconocen 3 litofacies en las Formaciones volcanoclásticas: Toba masiva de lapilli (Pla), Brecha lítica masiva (Plp) y toba lítica con estratificación difusa (Pc) (Branney y Kokelaar, 2002). La distribución en las unidades, de oeste a este se identifica Plp, Pla, facies características de corrientes de densidad piroclástica en ignimbritas. Sobre este contexto, se definen variaciones horizontales y verticales de facies en ignimbritas, (Figura 74) y se identifican los siguientes sectores:

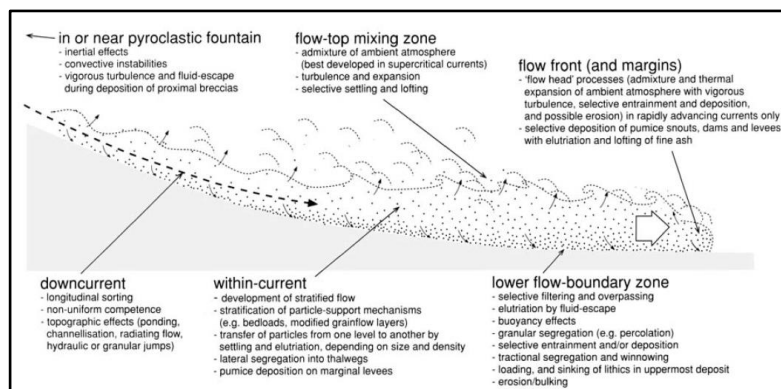


Figura 73. Sitios de segregación de partículas en corrientes de densidad piroclástica (tomado de Branney y Kokelaar, 2002). El polígono indica asociación de facies vistas en terreno.

Fuente piroclástica cercana (Near pyroclastic fountain): Es el más cercano en una variación de facies lateral en un flujo de densidad piroclástica, y se caracteriza por generar estructuras de escape de fluidos y depositación de brechas proximales. El análisis de datos confirma la existencia de brechas piroclásticas en Plp, junto con brechas con estructuras de elutriación en forma de pipas. Los clastos de la brecha indican procesos de colapso en el conducto eruptivo y evidencian la cercanía al mismo.

Corriente descendente (Down Current): Este sector se caracteriza por tener una gradación longitudinal y se da la transición de facies Plp a Pla (Branney y Kokelaar, 2002). En este caso, la litofacies de toba lítica masiva se observa sobre las lavas andesíticas de Plv y Qv.

Dentro de la corriente (Within-current): En este lugar se evidencia el límite del flujo turbulento debido a la estratificación de las tobas. Se observa el cambio entre la facies Pla y la facies de estratificación difusa de toba lítica (Pc)

A partir de esto, se puede establecer una asociación de facies vertical enfocada en la variación de cantidad de flujo piroclástico graficado, en la Figura 75:

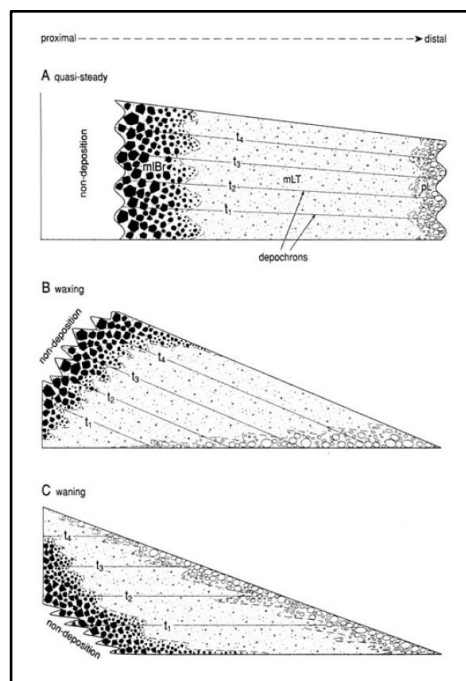


Figura 74. Arquitectura longitudinal de litofacies de ignimbrita (tomado de Branney y Kokelaar, 2002).

En el caso B, se observa una variación lateral de facies, y también vertical, por un aumento de flujo piroclástico, donde se tienen Pc con líticos pumíceos en la base, Pc en el centro y Plp en el techo. En el caso C, se tiene una sucesión inversa que evidencia una disminución del flujo

desde la base al techo. Esta arquitectura se observa claramente con un aumento de flujo desde el oeste de la zona, comenzando con Pc con clastos pumíceos en la base, seguido de Pc masiva, y llegando al techo de la sucesión con brechas piroclásticas, para luego seguir con tobas líticas masivas al extremo este de la misma formación, evidenciando la disminución del flujo. Por otro lado, las secuencias se asocian a un sector medio de un flujo de densidad piroclástica, y a secuencias proximales a media del mismo proceso. Estas observaciones, en conjunto con la presencia de un domo al noroeste del polígono, permiten vincular ambas formaciones a un modelo petrogenético ignimbrítico, pero en pulsos eruptivos distintos, debido a la brecha temporal que los separa.

6.4 Optimización en la cantidad y ubicación de sondajes exploratorios

La optimización en la cantidad y ubicación de sondajes exploratorios es un aspecto crítico en la exploración geológica y la evaluación de recursos minerales. En este sentido, la combinación de técnicas de exploración geofísica, teledetección, hidroquímica y mapeo de superficie puede ser una herramienta valiosa para lograr una exploración más eficiente y efectiva. La exploración geofísica es una técnica no invasiva que permite obtener información sobre las características geológicas del subsuelo. La aplicación de técnicas geofísicas como el potencial espontáneo puede ayudar a identificar estructuras geológicas y zonas saturadas en agua, en este trabajo con el objetivo de optimizar el proceso exploratorio en base a este método se definen las profundidades de los sondajes en base a los resultados de la geofísica.

Salar	Profundidad mínima (metros)	Profundidad ideal (metros)
Aguas Calientes Norte	40	+150
Pujsa 1	45	+120
Pujsa 2	50	+140
Aguas Calientes Sur	-	-
Laguna Tuyajto	40	+80
El Laco	55	+140

Tabla 5. Profundidades recomendadas pozos de exploración.

La teledetección es una técnica que utiliza imágenes satelitales para obtener información sobre la superficie. La interpretación de las imágenes ayudó a identificar características geológicas que pueden indicar la zonación mineral presente en los salares analizados. La hidroquímica es una técnica que permite analizar la composición química de las aguas superficiales. El mapeo de superficie es una técnica que permite la caracterización geológica detallada de la superficie

terrestre. El análisis de la información obtenida a través de técnicas de mapeo de superficie, como la fotogeología y la cartografía geológica, puede ayudar a identificar estructuras geológicas y zonas de alteración mineral. A partir de estas metodologías combinadas exploración geofísica, teledetección y mapeo de superficie se proponen zonas de exploración para lograr una exploración más eficiente y efectiva en la optimización de la cantidad y ubicación de sondajes exploratorios. La aplicación de estas técnicas puede ayudar a reducir los costos de exploración y aumentar la eficiencia de la evaluación de recursos minerales.

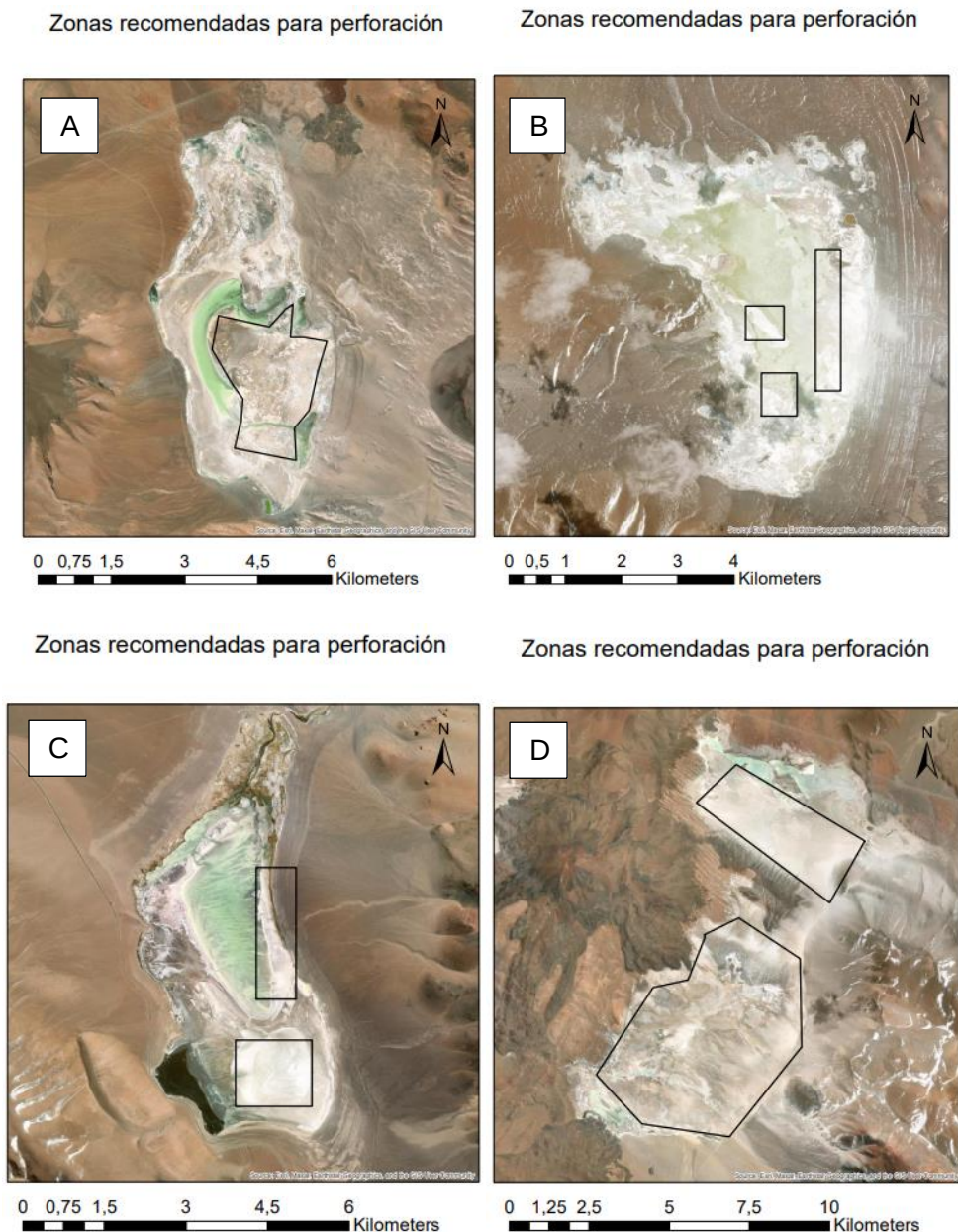


Figura 75. Zonas recomendadas para perforaciones de exploración. A) Aguas Calientes, B) El Laco, C) El Laco, D) Aguas Calientes Sur.

Leyenda
Área de interés A, C) El

7.Conclusiones

Sobre la geología del sector, el núcleo del salar es fácilmente identificable por su textura y color, compuesto principalmente por halita y siendo bastante homogéneo, en el caso de las facies marginales, el núcleo deja de ser concéntricos, donde la facie marginal experimentaría una mayor disolución. Se reconoce una costra salina de poca extensión compuesta por montículos de yeso en los bordes de los salares, que por su textura y posición corresponde a depósitos lacustres de antiguas salmueras similares.

En el área de estudio numerosos son los depósitos ignimbríticos, que presenta un mayor volumen, teniendo un grado de soldamiento variable. Estas unidades constituyen los contactos laterales del salar además de su basamento, sobre esta unidad que se depositan abanicos aluviales y coluviales, y avalanchas volcánicas sobre las rocas generando condiciones permeables en el entorno de los salares analizados.

En el área de estudio existen dos tipos de aguas según la clasificación mediante diagramas de Piper; sódico-cloruradas y sódico-carbonatadas.

Los tipos y subtipos de agua se distribuyen indistintamente entre la cuenca del salar de las cuencas de las lagunas de la cordillera Occidental, existiendo el subtipo sódico-bicarbonatadas en el Salar Pujsa.

La distribución de parámetros y características geoquímicas han de ser analizadas cuenca por cuenca ya que los salares tienen contacto con una geología con diferencia entre sí.

La alta salinidad se puede deber a la disolución de salmueras residuales aledañas a los salares o redisolución de evaporitas antiguas en las rocas sedimentarias preexistentes.

Sobre la geofísica aplicada en los salares se logró delimitar con buena aproximación las zonas de características de un salar usando el método de potencial espontáneo. Sin embargo, para que la interpretación de los datos de SP tuvieran sustento, se correlacionaron con los datos de la geología del sector. El potencial espontáneo brindó información acerca de la permeabilidad del suelo en conjunto con la geología del lugar mostró las zonas de fractura, basamento, zonas hidratadas y no hidratadas.

La implementación de método eléctrico ha tenido la limitante de ser usado en salares o sistemas salinos por los posibles errores asociada a la polarización de electrodos derivados de los altos valores de conductividad en costras salinas, aun así, este problema es más común en métodos eléctricos activos al ser el potencial espontáneo un método pasivo, usar electrodos no polarizables y tomar medidas a la costra salina se disminuyen los factores de error en salares.

En este trabajo se ha logrado realizar una interpretación de datos geofísicos cercana a los perfiles geológicos de salares obtenidos mediante trabajo de sondajes en salares cercanos al área de estudio, logrando identificar zonas hidratadas y su proyección en profundidad lo cual permitiría focalizar perforaciones de pozos productivos para la extracción de litio a su vez se ha logrado identificar el basamento y con esto conocer la profundidad del salar lo cual es un dato básico para los cálculos de estimación de potencial de litio, por tanto el método aplicado podría ser utilizado en exploración debido a su bajo costo de instrumentación y la no afectación al medio ambiente. Su limitante se asocia al no poder obtener muestreo de aguas subterráneas siguen faltando datos de concentración de elementos para el cálculo de potencial de litio, pero si existe una utilidad clara para ubicar zonas óptimas para la perforación exploratoria de baja profundidad ya conociendo la profundidad del acuífero.

Otras ventajas del método son la rápida obtención de datos en terrenos planos o con mínima pendiente, se utiliza como método complementario en varios estudios y las correcciones son sencillas de realizar.

Sobre la geología del sector el núcleo del salar es fácilmente identificable por su textura y color, compuesto principalmente por halita y siendo bastante homogéneo, en el caso de las facies marginales, el núcleo deja de ser concéntricos, donde la facie marginal experimentaría una mayor disolución. Se reconoce una costra salina de poca extensión compuesta por montículos de yeso en los bordes de los salares, que por su textura y posición corresponde a depósitos lacustres de antiguas salmueras similares.

En el área de estudio numerosos son los depósitos ignimbríticos, que presenta un mayor volumen, teniendo un grado de soldamiento variable. Estas unidades constituyen los contactos laterales del salar además de su basamento, sobre esta unidad que se depositan abanicos aluviales y coluviales, y avalanchas volcánicas sobre las rocas generando condiciones permeables en el entorno de los salares analizados.

Después de realizar los análisis de geofísica, teledetección, hidroquímica y mapeo de superficie, se han determinado los puntos de perforación y sus profundidades recomendadas para la exploración geológica y la evaluación de recursos minerales. La integración de los datos obtenidos a través de estas técnicas permitió una mayor comprensión de las características geológicas del área de estudio. Los datos de geofísica, por ejemplo, permitieron identificar características geológicas subterráneas que podrían ser de interés. La teledetección, por otro lado, permitió la identificación alteraciones minerales que pudieran estar relacionadas con la presencia de depósitos minerales. Los datos hidroquímicos y de mapeo de superficie también

proporcionaron información valiosa para la identificación de zonas de alteración mineral y para la caracterización detallada de la geología de la superficie. La aplicación de estas técnicas permitió una mayor comprensión de las características geológicas del área de estudio y una exploración más eficiente y efectiva.

8. Bibliografía

Aguilera, F. 2008. Origen y Naturaleza de los Fluidos en los Sistemas Volcánicos, Geotermiales y Termales de Baja Entalpía de la Zona Volcánica Central [ZVC] entre los 17°43`S y 25°10`S. Publicado en: Concurso Bicentenario: Tesis Doctorales 2008. 2010: pp.161-468

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*, 25, 139 – 174.

Alonso, R. (2006). Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina. *INSUGEO, Serie de Correlación Geológica*, p.155-170.

ALONSO, H. & RISACHER, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Andean Geology*. Vol. 23 (2): 113-122. Santiago.

ARRIAGADA, C.; COBBOLD, P. & ROPERCH, P. 2006. Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in central Andes since the mid-Cretaceous. *Tectonics*. Vol 25: 1- 19.

AMILIBIA, A.; SABAT, F.; MCCLAY, K.; MUÑOZ, J.; ROCA, E. & CHONG, G. 2008. The role of inherited tectono-sedimentary architecture in the development of the central Andean mountain belt: Insights from the Cordillera de Domeyko. *Journal of Structural Geology*. Vol. 30 (12): 1520-1539

Branney, M. J., Kokelaar, P., & Kokelaar, B. P. (2002). Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society of London*.

Barrenechea, M. (2004). Aspectos físicoquímicos de la calidad del agua. Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. .

BEVACQUA, P. 1992. Geomorfología del Salar de Atacama y Estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 284 pp. Antofagasta.

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, Paleoecology. v. 173, p. 21-42.

CERVETTO, M. 2012. Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de las cuencas: Salar de Aguas calientes 2, Puntas negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Texas y Salar el Laco, II región de Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de

Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 207 pp. Santiago.

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En: Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds), *The Geology of Chile*. Geological Society of London, 2007, pp.21-114.

Coira, B., Davidson, C., Mpodozis, C., Ramos, V., 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth-Science Reviews*, Special Issue, 18, 303–332.

Coira, B., Kay, S., Viramonte, J., 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna - A model for changing subduction geometry. *International Geological Review*, 35, 677–720.

Coira, B., Caffè, P.J., Kay, S.M., Díaz, A., Ramírez, A., 1996. The Vilama volcanic complex—an upper Cenozoic caldera system in the Puna, Jujuy. *Actas del Congreso Geológico Argentino*, 13, 3, 603–620.

Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). 1978. Posibilidades de Litio y Potasio en Depósitos Salinos de la II Región-Chile: Reconocimiento Geológico Preliminar de Salares Andinos y Preandinos. Gobierno Regional II Región y Corporación de Fomento de la Producción (CORFO): 319p.

Cochilco. (2009). Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos: Litio. Santiago. Cochilco.

CONSEJO REGIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (COREMA). 2007. Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto “Suministro de Agua Pampa Colorada” de Minera Escondida Limitada. Informe. Corema (Inédito): 199 pp. Antofagasta.

Chapman, J., Rothery, D., Francis, P., & Pontual, A. (1989). Remote sensing of evaporite mineral zonation in salt flats (salars). *International Journal of Remote Sensing*, p. 245-255.

Chong, G. (1984). Die Salare Nordchile-Geologie, Struktur und Geochemie. *Geotektonische Forschungen*, Vol.67, p-146.

DALANNAIS, L. 1979. Hidrogeología del borde oriental del salar de Atacama. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 156 pp. Antofagasta.

DÍAZ, G.; BONILLA, R. & PERALTA, F. 1972. Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del salar de Atacama. Informe. CORFO, Dpto. de Recursos Hidráulicos: 162 pp. Santiago.

DINGMAN, R. 1967. Geology and ground-water resources of the northern part of the salar de Atacama, Antofagasta Province, Chile. *U.S. Geological Survey Bulletin*. N° 1219: 49 p.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA), DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN, GOBIERNO DE CHILE. 2014. Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe. DGA: 313 pp. Santiago.

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.

GARCÍA, F.; TORRICO, D. & VALDIVIA, H. 1960. Reconocimiento geológico en la Alta Cordillera de la provincia de Antofagasta entre el Salar de Incaguasi y Cerro Zapaleri. Informe. Empresa Nacional del Petróleo: 22pp. Iquique.

Gardeweg, M.; Lindsay, J., 2004. Lascar Volcano, La Pacana Caldera and El Tatio Geothermal Field: Field Trip Guide-A2. IAVCEI, General Assembly, Pucón, Chile, November 14-19, 2004: 32 p.

Gibert, R., Taberner, C., Sáez, A., Giralt, S., Alonso, R., Edwards, R., & Pueyo, J. (2009). Igneous origin of CO₂ in ancient and recent hot spring waters and travertines from the northern Argentinean Andes. *Journal of Sedimentary Research*, v. 79, p. 554–567.

GONZÁLEZ, G.; CEMBRANO, J.; ARON, F.; VELOSO, E. & SHYU, J. 2009. Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile (23S–24S). *Tectonics*. Vol 28 (6): 57-68.

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.

Harrison, R. M. (2003). El medio ambiente. Introducción a la química medioambiental y a la contaminación. España: Acribia.

HENRIQUEZ, S. 2012. Estructura del salar de Atacama: Implicancias en la estructura cortical de los Andes Centrales. Memoria para optar al Título de Magister en Ciencias mención Geología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología (Inédito): 220 pp. Santiago.

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 Standards. *Economic Geology*, v. 106, pp. 1225-1239.

ISACKS, B. L. 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 93 (B4): 3211-3231.

Jiménez Cisneros, B. E. (2001). La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. México: Limusa.

Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ramos V., Ando C., 1983. Andean tectonics related to geometry of the subducted Nazca plate. *Geological Society American Bulletin*, 94, 341-361.

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.

Kendall, A. C. (1992). Evaporites. In *Facies Models, Response to sea level changes*. Canadá: Walker R.G. & James N.P. eds. Geological Association of Canadá.

Kley, J., 1999. Geologic and geometric constraints on a kinematic model of the Bolivian orocline. *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 221-235.

LOKE, M.H. 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys [en línea] <https://pangea.stanford.edu/> [consulta: septiembre 2012]

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.

Lloyd, J., & Heathcote, J. (1985). *Chemistry of groundwater*. New York : Oxford University Press.

MARDONES, L. 1986. Características geológicas e hidrogeológicas del salar de Atacama. El litio, un nuevo recurso para Chile. L. Editorial Universitaria: 181 - 216. Santiago.

MARINOVIC, N.; DÍAZ, F.; RAMÍREZ, C. & TRAVISANI, V. 1976. Prospección y Evaluación de Elementos Polimetálicos en la Alta Cordillera de la II Región, Etapa I, Reconocimiento Geológico Escala 1 : 250.000. Informe. Instituto de Investigaciones Geológicas: 150 pp.

Metcalf y Eddy, I. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. (3ra. ed., Vol. 1). México: Mc Graw Hill.

MORAGA, A.; CHONG, G.; FORTT, M. & HENRIQUEZ, H. 1974. Estudio geológico del Salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas. N° 29: 154 pp. Santiago.

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

MPODOZIS, C.; ARRIAGADA, C.; BASSO, M.; ROPERCH, P.; COBBOLD, P. & REICH, M. 2005. Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics*. Vol. 399 (1): 125-154.

MUÑOZ, N.; CHARRIER, R. & JORDAN, T. 2002. Interactions between basement and cover during the evolution of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Revista geológica de Chile*. Vol. 29 (1): 55-80. Santiago.

ORELLANA, E. 1982. Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. 2da ed. Madrid, Thomson Paraninfo. Vol.1.

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.

ORTIZ, C.; ARAVENA, R.; BRIONES, E.; SUÁREZ, F.; TORE, C. & MUÑOZ, J. 2014. Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 59 (2): 336-350.

Pimentel, S. (1998). Monografía: El Litio. Serie Monografías de Recursos Mineros no Metálicos. Comisión Chilena del Cobre. Santiago.

PANANONT, P.; MPODOZIS, C.; BLANCO, N.; JORDAN, T. & BROWN, L. 2004. Cenozoic evolution of the northwestern Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Tectonics*. Vol. 23 (6).

RAMÍREZ, C. & GARDEWEG, M. 1982. Hoja Toconao, Región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile N° 54, escala 1: 250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile: 117 pp.

GARDEWEG RAMÍREZ, C. & M. 1985. Hoja Zapaleri, II Región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile N°66, escala 1: 250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile: 89 pp.

RISACHER, F.; ALONSO, H. & SALAZAR, C. 1999. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones, Chile. Ministerio de Obras Públicas Dirección General de Aguas,

Universidad Católica del Norte, Institut de Recherche pour le Développement, Convenio de Cooperación DGA-UCNIRD. Vol. 1 (4): 89 pp., Santiago.

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.

RISSMANN, C.; LEYBOURNE, M.; BENN, C. & CHRISTENSON, B. 2015. The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. *Chemical Geology*. Vol. 396: 164-181.

Romero Rojas, J. A. (1996). *Acuíquímica*. Santafé Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería

TELFORD, W.M. GELDART, L.P. SHERIFF, R.E. 1990. Induced Polarization. En: *Applied Geophysics*. 2ª ed. United Kingdom, Cambridge University Press. pp. 578- 609.

Toledo, A., 2007. Evapofacies halítica en el Salar del Rincón, departamento Universidad Nacional de Salta, CIUNSa, Los Andes, Salta.

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, Informe Registrado IR-16-65: 427 p., 2 volúmenes.

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).

US Geological Survey, 2017, Resúmenes de productos minerales 2017: US Geological Survey, 202 p

Sawyer, C., McCarty, P., & Parkin, G. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental* (4a. ed.). Colombia: Mc Graw Hill

SUMNER, J.S. 1972. A comparison of electrode arrays in IP surveying. En: *AIME Annual Meeting*, 20-24 de febrero, 1972. San Francisco, California. pp. s.p

Stoertz, G., & Ericksen, G. (1974). *Geology of salars in northern Chile*. U.S Geological Surbey Professional Paper, 811. 65pp.

VAN BLARICOM, R. 1986. Electrical. En: *Practical Geophysics for the Exploration Geologist*. Northwest Mining Association. pp.39-135.

Vega, M., Pueyo, J., & Chong, G. (1997). Asociaciones Minerales y Evolución Paragenética de los Yacimientos de Nitratos y yodo de la Zona de Zapiga-Dolores (I Región de Tarapacá). VII Congreso Geológico Chileno, p. 1565-1569.

VICTOR, P.; ONCKEN, O. & GLODNY, J. 2004. Uplift of the western Altiplano plateau: Evidence from the Precordillera between 20° and 21°S (northern Chile). Tectonics, 23: 24 pp.

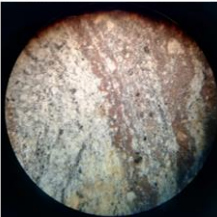
Vila G, T. (1975). Geología de los depositos salinos Andinos, Chile. Revista Geológica de Chile(N. 2), p. 41-55.

Vinante, D., & Alonso, R. (2006). Evapofacies del Salar del Hombre Muerto, Puna Argentina: Distribución y Genesis. Revista de la Asociación Geológica Argentina 61, p. 286-297.

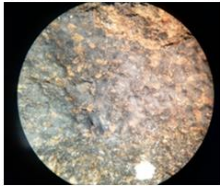
Yaksic, A. (2008). "Análisis de la disponibilidad del Litio en el largo plazo". Tesis para obtener grado de Magíster en Ingeniería. Escuela de Ingeniería. Universidad Católica de Chile. Santiago.

9. Anexos

Muestra P1D1			
Ubicación		19 K 626195.61 E UTM 7464280.12 S	
Clasificación		Toba lítica	
Textura		Piroclástica	
Color	Cara fresca	Gris oscuro a negro	
	Cara alterada	pardo oscuro	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño de los cristales		Muy fino	
Forma de los cristales		subhedral y anhedral	
Observaciones: masa fundamental oscura con tonos rojizos (60%), cristales de plagioclasas menores a 1 mm (10%), líticos (30%).			

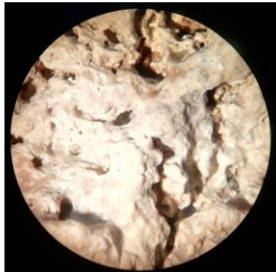


Anexo 1. Descripción litológica P1D1

Muestra PsD1				
Ubicación		19 K	644468.25 E	 
		UTM	7448078.80 S	
Clasificación		Lava andesítica		
Textura		Porfírica		
Color	Cara fresca	Gris azulado		
	Cara alterada	Gris pardo		
Grado de cristalinidad		Hipocristalino		
Tamaño relativo de los cristales		Medio		
Forma de los cristales		Euhedrales		
Observaciones: Presenta salificación y reemplazo en Plg por Qz.				

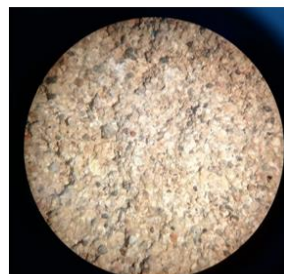
Anexo 2. Descripción litológica P5D1

Muestra P15D1			
Ubicación		19 K 663096 E UTM 7446222 S	
Clasificación		Travertino	
Textura		Cristalina	
Color	Cara fresca	blanca	
	Cara alterada	Pardo claro	
Fabrica		No se aprecia	
Tamaño del grano		No se aprecia	
Selección		No se aprecia	
Redondez		No se aprecia	
Esfericidad		No se aprecia	
Grado de compactación		No se aprecia	



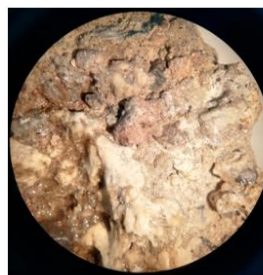
Anexo 3. Descripción litológica P15D1

Muestra P15 D1			
Ubicación		19 K 663096 E UTM 7446222 S	
Clasificación		Arenisca grano medio	
Textura		Lítica	
color	Cara fresca	Blanco pardusco	
	Cara alterada	Pardo a ocre	
Fabrica		micritica	
Tamaño del grano		Fino a medio	
selección		Buena selección	
Redondez		redondeado	
esfericidad		Sub anguloso	
Grado de compactación		muy compactado	



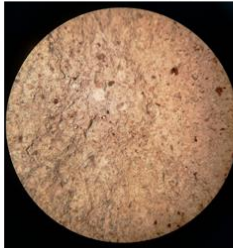
Anexo 4. Descripción litológica P15D1

Muestra P15D1			
Ubicación		19 K 663096 E UTM 7446222 S	
Clasificación		Calcita lítica	
Textura		Cristalina/Lítica	
Color	Cara fresca	blanca	
	Cara alterada	Pardo claro	
Fabrica		micrita	
Tamaño del grano		Grava	
Selección		Mala selección	
Redondez		angulosa	
Esfericidad		baja esfericidad	
Grado de compactación		Bien compactada	



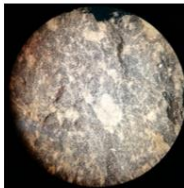
Anexo 5. Descripción litológica P15D1

Muestra P16D1			
Ubicación		19 K 660984 E UTM 7442788 S	
Clasificación		Toba de ceniza	
Textura		Piroclástica	
Color	Cara fresca	Grisáceo	
	Cara alterada	pardo oscuro	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño de los cristales		Muy fino	
Forma de los cristales		subhedral y anhedral	
Observaciones: masa fundamental oscura con tonos grises (80%), cristales de plagioclasas menores a 1 mm (10%), biotita (10%).			



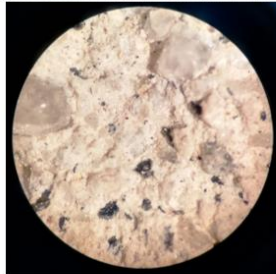
Anexo 6. Descripción litológica P16D1

Muestra P15D1			
Ubicación		19 K 663096 E UTM 7446222 S	
Clasificación		Lava andesítica	
Textura		Porfírica	
Color	Cara fresca	Gris azulado	
	Cara alterada	Gris pardo	
Grado de cristalinidad		Hipocristalino	
Tamaño relativo de los cristales		Medio	
Forma de los cristales		Euhedrales	
Observaciones: Presenta salificación y reemplazo en Plg por Qz.			



Anexo 7. Descripción litológica P15D1

Muestra P12D1			
Ubicación		19 K 658585 E UTM 7449937 S	
Clasificación		Toba de ceniza	
Textura		Piroclástica	
Color	Cara fresca	Grisáceo	
	Cara alterada	pardo oscuro	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño de los cristales		Muy fino	
Forma de los cristales		subhedral y anhedral	
Observaciones: masa fundamental oscura con tonos grises (80%), cristales de Qz menores a 1 mm (10%), biotita (10%).			



Anexo 8. Descripción litológica P12D1

Muestra P17D1			
Ubicación		19 K 651541 E UTM 7438877 S	
Clasificación		Toba de ceniza	
Textura		Piroclástica	
Color	Cara fresca	Grisáceo	
	Cara alterada	pardo oscuro	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño de los cristales		Muy fino	
Forma de los cristales		subhedral y anhedral	
Observaciones: masa fundamental oscura con tonos grises (80%), cristales de Qz menores a 1 mm (10%), biotita (10%).			



Anexo 9. Descripción litológica P17D1

Muestra Pd2			
Ubicación		19 K 646821.40 E UTM 7354721.03 S	
Clasificación		Toba de ceniza	
Textura		Piroclástica	
Color	Cara fresca	Grisáceo	
	Cara alterada	pardo oscuro	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño de los cristales		Muy fino	
Forma de los cristales		subhedral y anhedral	
Observaciones: masa fundamental oscura con tonos grises claros (80%), cristales de Qz menores a 1 mm (15%), biotita (5%). Semi compactada			



Anexo 10. Descripción litológica P4D2

Muestra P1D2:			
Ubicación		19 K 636391 E	
		UTM 7353535 S	
Clasificación		Toba de ceniza silicificada	
Textura		Piroclástica	
Color	Cara fresca	Grisáceo	
	Cara alterada	pardo oscuro	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño de los cristales		Muy fino	
Forma de los cristales		subhedral y anhedral	
Observaciones: masa fundamental oscura con tonos grises claros (80%), cristales de Qz menores a 1 mm (20%). Altamente silicificada.			

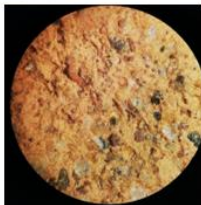
Anexo 11. Descripción litológica P1D2

Muestra D2P4			
Ubicación		19K 647089.00 m E UTM 7355214.00 m S	
Clasificación		Toba	
Textura		piroclástica	
Color	Cara fresca	Gris blanquecino	
	Cara alterada	Rojo a anaranjado	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño relativo de los cristales		equigranular	
Forma de los cristales		No visible	
Observaciones: presencia de alteración argílica avanzada muy pervasiva sobre toba			

Anexo 12. Descripción litológica P4D2

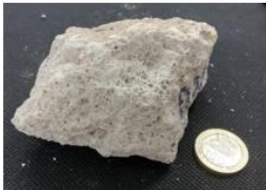
Muestra D ₂ P ₁			
Ubicación		19K 636334.00 m E UTM 7353402.00 m S	
Clasificación		Toba	
Textura		piroclástica	
Color	Cara fresca	Blanco marmolado	
	Cara alterada	Gris	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño relativo de los cristales		Fino a grueso	
Forma de los cristales		Subhedral a anhedral	
Observaciones: presencia de alteración propilitica reemplazando cristales de plagioclasa			

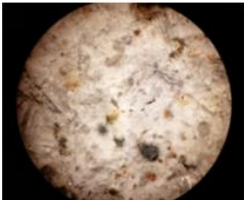
Anexo 13. Descripción litológica P1D2

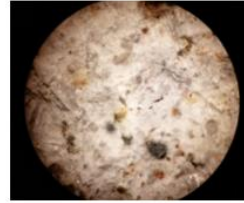
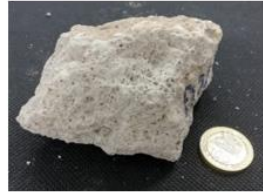
Muestra D ₃ P ₂			
Ubicación		19K 636334.00 m E	
		UTM 7353402.00 m S	
Clasificación		Toba litica	
Textura		piroclástica	
Color	Cara fresca	Blanco marmolado	
	Cara alterada	Gris	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño relativo de los cristales		Fino a grueso	
Forma de los cristales		Subhedral a anhedral	
Observaciones: toba presente también de D2P4 y D2P3, presenta imbricación de clastos, los clastos son de vidrio, líticos y pómez. En ciertos puntos los afloramientos presentan fracturas hexagonales.			

Anexo 14. Descripción litológica P5D3

Muestra D ₃ P ₂			
Ubicación		19K 646364.00 m E UTM 7390625.00 m S	
Clasificación		Toba de lapilli	
Textura		piroclástica	
Color	Cara fresca	Blanco a grisáceo	
	Cara alterada	gris anaranjado	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño relativo de los cristales		Fino a medio	
Forma de los cristales		Subhedral a anhedral	
Observaciones: toba presente en día 1 y durante gran parte de la transecta de día 3, presenta clastos son de vidrio, líticos y pómez.			

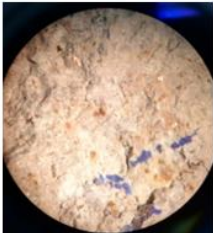




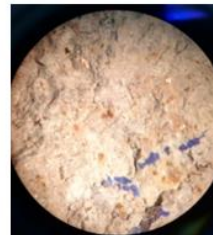


Anexo 15. Descripción litológica P2D3

Muestra D ₃ P ₄			
Ubicación		19K 637235.00 m E UTM 7399146.00 m S	
Clasificación		Toba de lapilli	
Textura		piroclástica	
Color	Cara fresca	Blanco a grisáceo	
	Cara alterada	gris anaranjado	
Grado de cristalinidad		Holohialina	
Tamaño relativo de los cristales		Fino a medio	
Forma de los cristales		Subhedral a anhedral	

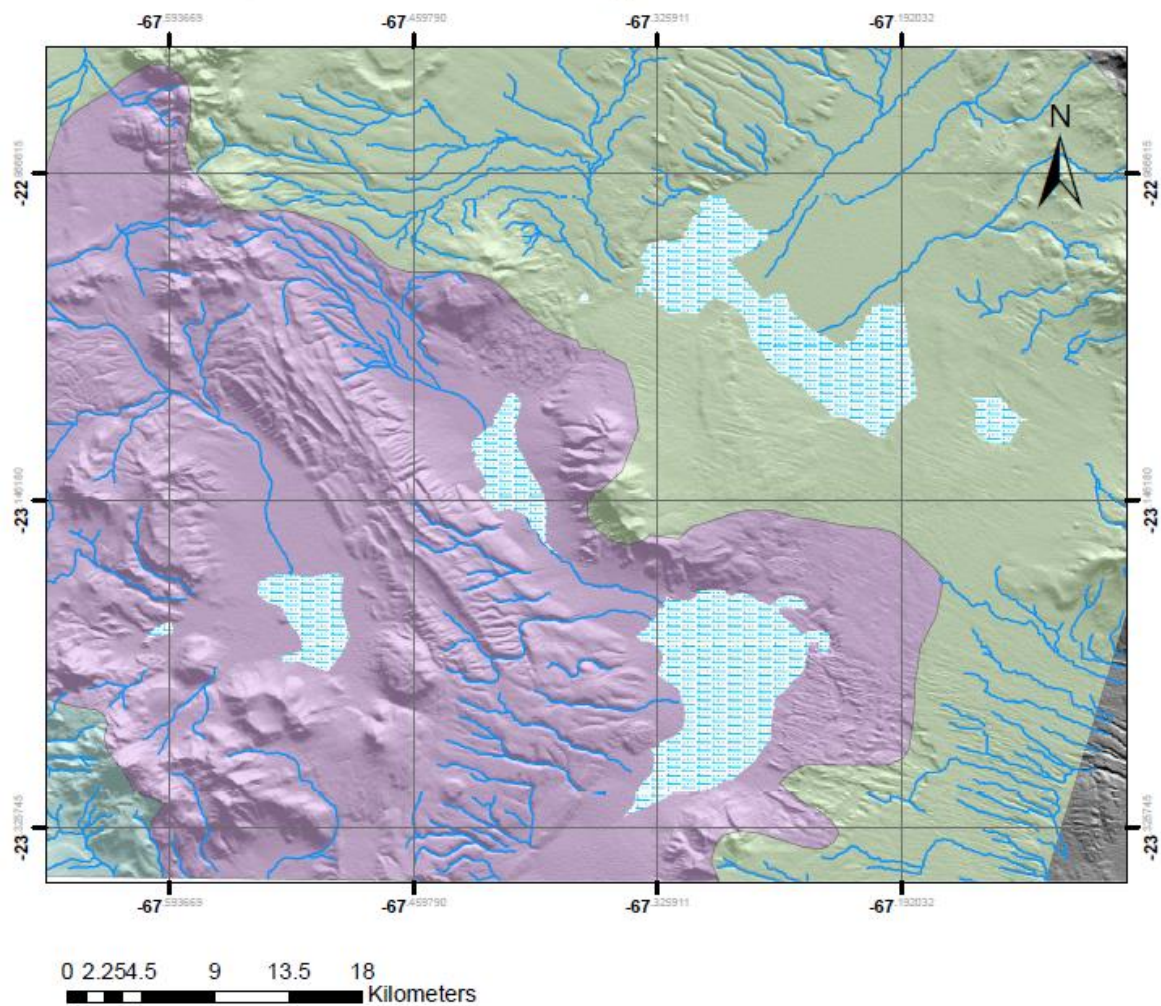


Observaciones: toba presente en día 1 y durante gran parte de la transecta de día 3, presenta clastos son de vidrio, líticos y pómez. Presenta bordes de alteración aparentemente oxidación en cristales.



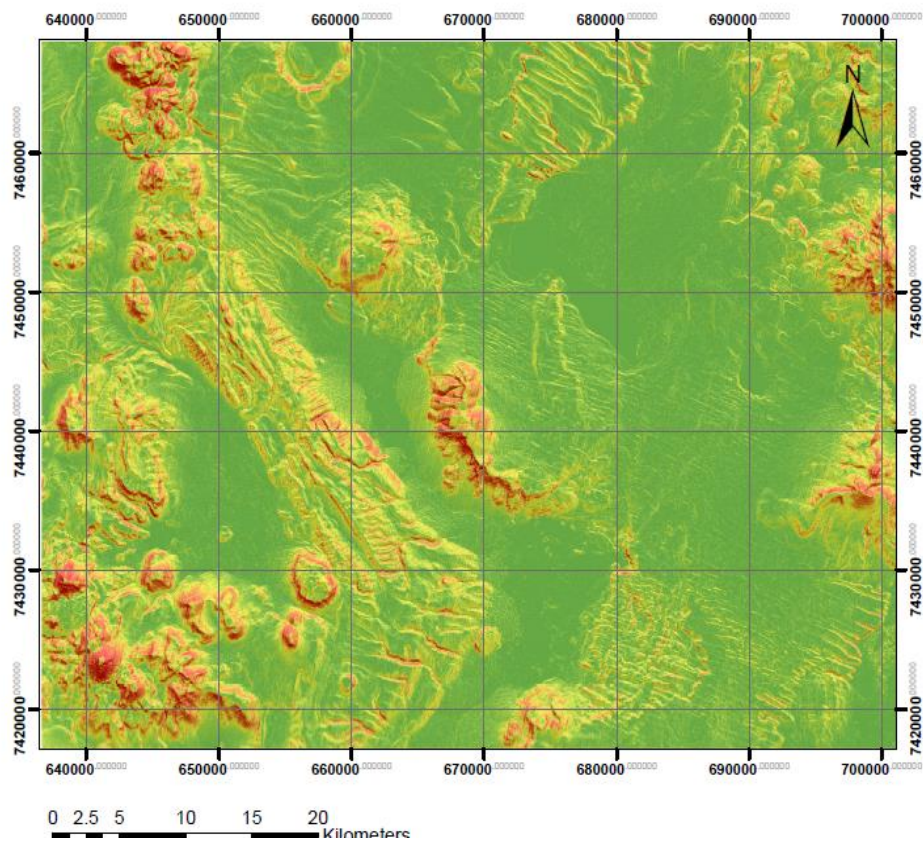
Anexo 16. Descripción litológica P4D3

Mapa cuencas hidrograficas 1:400.000



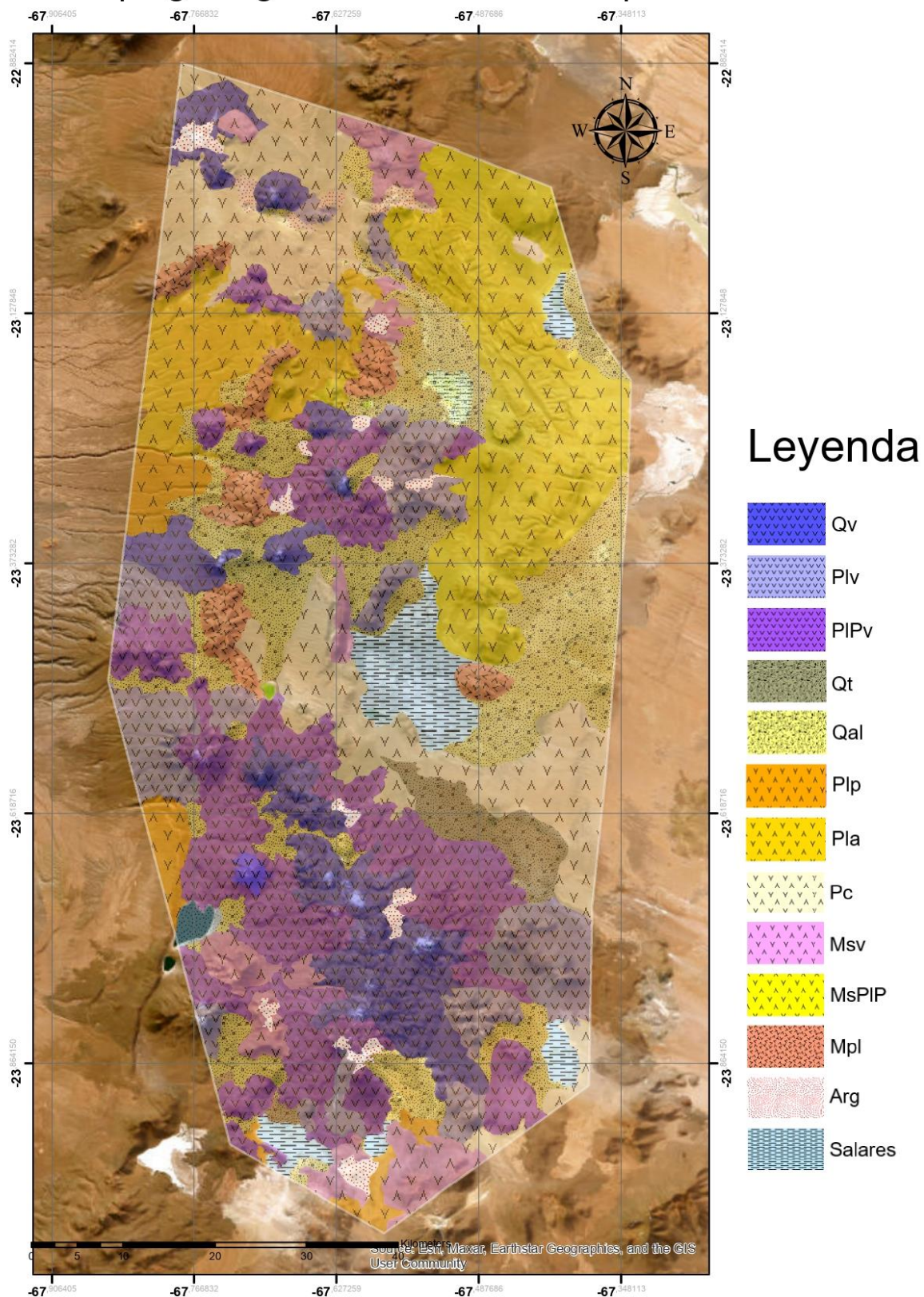
Anexo 17. Mapa de cuencas y redes de drenaje

Mapa de pendientes



Anexo 18. Mapa de pendientes

Mapa geológico 1:500.000 salares provincia del Loa



Anexo 19. Mapa litológico final

Anexo 20. Cálculos diagramas de Stiff y Piper para las muestras en el salar Pujsa.

Anexo 21. Cálculos diagramas de Stiff y Piper para las muestras en el salar Aguas calientes norte

[illegible]

Anexo 22. Cálculos diagramas de Stiff y Piper para las muestras en el salar El Laco

	K	Mg	Ca	Na	Cloruros	Sulfatos	Bicarbonatos		Na+K	K	Mg	Ca	Na	Cloruros	Sulfatos	Bicarbonatos	
Eq Wt	39	12	20	23	35.4	48	61										
Laguna 1	900	137	1625	33	2436	416	225.1		23.6421404	23.0769230	0.11416666	0.08125	0.56521739	0.68813559	0.08666666	3.690163934	
Ventiente 1	182	170	275	2.1	359	642	81		4.75797101	4.66666666	14.16666666	13.75	0.09130434	0.10141242	13.375	1.327868852	
Ventiente 2	60	62	180	500	980	447	109.3		23.2775919	1.53846153	5.16666666	9	21.7391304	27.6836158	9.3125	1.791803279	
Ventiente 3	60	60	170	550	935	424	104.8		25.4515050	1.53846153	5	8.5	23.9130434	26.4124293	8.83333333	1.718032787	
Ventiente 4	155	193	425	2.4	4.17	606	353.8		4.0787068	3.97435897	16.08333333	21.25	0.10434782	0.11779661	12.625	5.8	
Laguna 2	27	33	410	250	256	1186	57.1		11.5618729	0.69230769	2.75	20.5	10.8695652	7.23163841	0.02470833	0.9360655738	
Ventiente 5	85	150	230	1.1	1.85	689	2435		2.22791326	2.17948717	12.5	11.5	0.04782608	0.05225988	14.3541666	39.91803279	
Ventiente 6	45.5	85	140	650	1.135	343	164.5		29.4275362	1.16666666	7.08333333	7	28.2608695	0.03206214	7.34583333	2.696721311	
Laguna 1																	
catones	n1	aniones	n1														
Na+ + K+	23.6421404	Cl-	0.68813559						Na+ + K+	23.2775919	Cl-	27.6836158	Na+ + K+	25.4515050	Cl-	26.4124293	
Mg++	0.11416666	SO4=	0.08666666						Mg++	5.16666666	SO4=	9.3125	Mg++	5	SO4=	8.83333333	
Ca ++	0.08125	HCO3-	3.69016393						Ca++	8	HCO3-	76.0832778	Ca++	8.5	HCO3-	1.71803278	
vent 1																	
catones	n1	aniones	n1														
Na+ + K+	4.6797098	Cl-	0.11779661						Na+ + K+	11.5618729	Cl-	7.23163841	Na+ + K+	2.22791326	Cl-	0.02470833	
Mg++	18.0833333	SO4=	15.619						Mg++	2.75	SO4=	0.02470833	Mg++	14.3541666	SO4=	7.14583333	
Ca ++	22.25	HCO3-	9.8						Ca++	20.5	HCO3-	0.93606557	Ca++	39.9180327	HCO3-	12.8897213	

Anexo 23. Cálculos diagramas de Stiff y Piper para las muestras en el salar Aguas calientes sur