

ESTRATIGRAFÍA Y MINERALOGÍA DE LA COSTRA SALINA DEL SALAR DEL HUASCO.

AMBIENTES GEOLÓGICOS DE DEPOSITACIÓN.

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para
optar al Título de Geólogo

FELIPE ANDRÉS HERNÁNDEZ BAEZA

Profesora guía:

XIMENA PRIETO VÉLIZ

Miembros de la Comisión Evaluadora de Examen:

JORGE MORAGA BENAVIDES

WALDO VIVALLO SANDOVAL

SANTIAGO, CHILE

DICIEMBRE, 2020

RESUMEN

El salar del Huasco ubicado en la cordillera de Los Andes (región de Tarapacá, Chile), corresponde a un depósito salino activo emplazado al sur de la cuenca andina Huasco-Collacagua (1.550 km²), se dispone a 3.789 m s. n. m. y está constituido por una costra salina de hasta 150 cm de espesor de evaporitas y sedimentos clásticos, que sobreyacen una secuencia de sedimentos de 231 m de espesor formada por depósitos aluviales, volcanoclásticos y lacustres, con basamento de rocas volcánicas riolíticas (Sayes, 1968).

La presencia de paleolíneas de costa asociadas a terrazas lacustres a 50-55 m sobre la superficie actual del salar (Stoertz y Ericksen, 1974; López *et al.*, 1999) y de una secuencia de arcillas, limos y capas de diatomitas bajo la costra salina (Sayes, 1968), ha permitido postular la existencia de un paleolago Pleistoceno Medio-Holoceno (Gardeweg y Sellés, 2013), de edad probable entre 18,1 ka y 11,5 ka, determinado por su correlación con las fases lacustres Tauca (18,1-14,1 ka) y Coipasa (13,4-11,5 ka) desarrolladas en el altiplano de Los Andes Centrales y asociadas a eventos climáticos húmedos (Sáez *et al.*, 2016). Por lo que la evolución geológica y paleoambiental holocena más reciente del salar del Huasco se enmarca en un contexto regresivo con descenso del nivel base lacustre, relacionado a factores climáticos de desertización de la zona, con aumento de temperatura y disminución de precipitaciones respecto al periodo del paleolago.

La presencia de un cerro isla colonizado por estromatolitos, ubicado en el borde oriental del salar, es la evidencia más temprana de este estudio del pasado lacustre de la cuenca, asociado a un paleolago 21 m sobre el nivel base actual y un área máxima de inundación de 88 km² (24 veces el área de las lagunas actuales). Además, el estudio de los 1,5 m de sedimentos superficiales más recientes del salar registra en su base facies de limos ricos en materia orgánica, interpretadas como depósitos de ambiente de lago profundo y asociadas a la última etapa del paleolago del periodo húmedo. Estos limos infrayacen en discordancia neta a depósitos de facies evaporíticas y clásticas, que representan al menos un ciclo clásico de evolución de un salar depositados en el periodo árido, posterior a los 11,5 ka.

Mediante sedimentología, estratigrafía y espectrometría de reflectancia en Terra Spec, se registraron en el ciclo del salar depósitos de *fan delta* asociados a aportes aluviales episódicos, los cuales formarían lagos efímeros y someros (etapa de inundación), en cuyo descenso de su nivel base formarían playas, humedales y márgenes calcáreos en los dominios de borde lacustre, seguido por precipitación de sulfatos (yeso y blöedita principalmente) en el núcleo de salar al evolucionar la salmuera (etapa de concentración de evaporitas). Se registran gipsarenitas y texturas apiladas, que marcan la transición entre la etapa de concentración de evaporitas y de desecación, y que reflejan el desarrollo de salmueras evolucionadas e hiperconcentradas. La etapa de desecación está reflejada por depositación diagenética de nódulos salinos y/o sales intersticiales (yeso, mirabilita, bischofita, taumasita y polihalita) en las secuencias sedimentarias de los 1,5 m más superficiales del salar.

En la actualidad la superficie del salar está constituida por un núcleo ovoide de costra dura y lisa compuesta de yeso y epsomita, con halita, mirabilita y thenardita subordinadas. Rodeado por una aureola de costra blanda, rugosa y yesífera con epsomita y halita subordinada. En que las costras duras serían más antiguas a las blandas, lo que estaría controlado por la exposición a eventos de inundación. Además, el salar no responde a un modelo simétrico ni a uno asimétrico, y presenta orientación preferencial NO-SE en la distribución de sus unidades. Su composición está dominada por fases sulfatadas con pocos cloruros y casi ausencia de carbonatos, la que provendría de salmueras neutras dominadas por Na-K-Mg-Cl-SO₄ (yeso, halita, mirabilita/thenardita, epsomita y blöedita). Lo anterior podría estar controlado por el sustrato riolítico de la cuenca en que se emplaza el salar del Huasco, que aportaría gran cantidad de azufre al sistema.

SOLO USO ACADÉMICO

¿Quién vigila a los vigilantes?

AGRADECIMIENTOS

A Tamara Baeza y Fernando Hernández, y a mis hermanas Tamara y Claudia. Por su entrega de amor y ser un apoyo incondicional en la ruta. Por las enseñanzas y la paciencia. A toda mi familia (a mi sobrino León, tíos, primos, cuñado), han forjado mis pensamientos e ideales.

Infinitas gracias a mi profesora guía, Ximena Prieto, por su templanza y entrega de conocimiento, por su dedicación y ser comprensiva, por tener disposición y paciencia en todo este proceso. Pero no sólo por este proceso, sino por todo lo externo que me enseñó y me hizo comprender, por su rol de docente en el sentido más completo de la palabra.

A los miembros de la comisión Jorge Moraga y Waldo Vivallo por su motivación e interés en este estudio y los comentarios que realizaron. Sin duda han sido de gran ayuda.

A quienes pasaron por la Escuela de Geología de la U. Mayor y por enseñarme este oficio hermoso que llamamos geología. Pero ante todo, por motivarme a profundizar, a buscar, a dudar e ir más allá del horizonte do remonta la verdad, al fin y al cabo la docencia es un lugar privilegiado para contagiar la pasión (Deleuze).

A mis amistades, sobre todo a Katherine, Gabriel y Dominique, que han estado, estuvieron y estarán. A Jonash, Marco, Rulo y Sebita (que vuelas lo más alto que puedas, el águila sabe qué agua está envenenada). Vieron esta evolución, vieron cómo recomencé y me metí en “ésto”. Y cómo no, a “Petrólogos”, por el aguante sin parangón, por las noches de desvelos. No sólo gané “la geología”, también amistades que permanecerán y que comparten la misma pasión. A la familia de Cabrera y de Parra por abrimos las puertas y hacernos sentir familia.

A la comunidad por enseñarme –recordarme más bien- en un momento extraño de vida, cuando “Chile se acabó (18 de octubre de 2019)”, que para ser perfectamente lúcido hay que embriagarse ante la vida. Gracias por tantas epifanías en esta recta final (Catita, Shaggy, Nico pato, Maca, Feña, Nere, Negro, Moka).

Al mundo. A quienes pasaron por mi camino y tal vez no están ahora.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Formulación del estudio propuesto.....	1
1.2 Hipótesis del estudio	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.4 Metodología	4
1.4.1 <i>Trabajo de preparación de terreno</i>	4
1.4.2 <i>Trabajo de terreno</i>	5
1.4.3 <i>Análisis de Laboratorios</i>	6
1.4.4 <i>Trabajo de Gabinete</i>	6
1.5 Ubicación y vías de acceso	8
CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO Y PALEOCLIMÁTICO.....	9
2.1 Geología de la cuenca Huasco-Collacagua.....	10
2.2 Geología del salar del Huasco.....	16
2.3 Geología económica del salar del Huasco.....	17
2.4 Clima y Paleoclima de la cuenca Huasco-Collacagua	19
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO.....	22
3.1 Definiciones básicas.....	22
3.2 Zonación de un salar	23
3.3 Ciclo del Salar	25
3.4 Ambientes de depositación	27
3.4.1 Estructuras salinas menores	29
3.5 Asociaciones de ambientes.....	30
CAPÍTULO 4: FACIES SEDIMENTARIAS Y SISTEMAS DE DEPOSITACIÓN.....	32
4.1 Columnas estratigráficas	33

4.2 Facies sedimentarias.....	49
4.3 Asociaciones de facies	52
4.4 Información de CORFO (1981).....	59
4.5 Sección geológica y correlación de columnas estratigráficas	61
CAPÍTULO 5: GEOLOGÍA DE LA COSTRA SALINA.....	65
5.1 Costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita	68
5.2 Costra dura y rugosa sulfatada.....	70
5.3 Costra blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos.....	72
5.4 Costra blanda, rugosa y yesífera	74
5.5 Costra blanda, lisa y yesífera	80
5.6 Costra dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita	81
5.7 Costra inundada	82
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN	85
6.1 Periodo de estado alto del nivel del paleolago.....	85
6.2 Periodo de estado bajo del nivel del lago	88
6.3 Costra Salina actual	93
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	99
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
CAPÍTULO 9: ANEXOS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Distribución de salares en los Andes Centrales	2
Figura 1.2: Ubicación y vías de acceso al salar del Huasco	8
Figura 2.1: Esquema morfoestructural de la carta Collacagua-Rinconada	11
Figura 2.2: Sector central del mapa geológico de la hoja Collacagua-Rinconada	13
Figura 2.3: Perfil de la cuenca Huasco-Collacagua.....	18
Figura 3.1: Evolución química y mineralógica de aguas.....	24
Figura 3.2: Esquemas de salinidad.....	25
Figura 3.3: Ciclo de un salar	26
Figura 3.4: Diagrama idealizado de subambientes	31
Figura 4.1: Distribución de columnas estratigráficas	32
Figura 4.2: Columna estratigráfica 1.	34
Figura 4.3: Facies de la columna 1	35
Figura 4.4: Columna estratigráfica 2.....	36
Figura 4.5: Facies de la columna 2	37
Figura 4.6: Columna estratigráfica 3.....	39
Figura 4.7: Facies de la columna 3.....	40
Figura 4.8: Columna estratigráfica 4.....	41
Figura 4.9: Facies de la columna 4.....	43
Figura 4.10: Columna estratigráfica 5.....	44
Figura 4.11: Facies de la columna 5.....	44
Figura 4.12: Columna estratigráfica 6.....	45
Figura 4.13: Facies de la columna 6.....	46
Figura 4.14: Columna estratigráfica 7.....	48
Figura 4.15: Facies de la columna 7.....	49
Figura 4.16: Sección Oeste-Este (O-E-E'').....	63
Figura 4.17: Distribución en superficie de dominios de asociaciones de facies.....	64
Figura 5.1: Mapa de unidades de la costra salina del salar del Huasco	67
Figura 5.2: Costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita	69
Figura 5.3: Piscinas relictas, crestas de presión y grietas poligonales hexagonales	69
Figura 5.4: Costra dura y rugosa sulfatada	71
Figura 5.5: Costra blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos	72
Figura 5.6: Piscinas salinas	73
Figura 5.7: Lóbulos salinos	74
Figura 5.8: Costra blanda, rugosa y yesífera	75
Figura 5.9: Semilunas y grietas poligonales.....	76
Figura 5.10: Montículos salinos y grietas poligonales centimétricas.....	77
Figura 5.11: Canales salinos.....	78
Figura 5.12: Domo andesítico	79
Figura 5.13: Costra blanda, lisa y yesífera	80
Figura 5.14: Grietas de desecación	81
Figura 5.15: Costra dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita.....	82
Figura 5.16: Estructuras de costra inundada y sus bordes inmediatos.....	84
Figura 6.1: Paleogeografía.....	87
Figura 6.2: Ciclos en etapa árida	93
Figura 9.1: Mapa de distribución de asociaciones mineralógicas.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Facies sedimentarias clásticas.....	51
Tabla 4.2: Facies sedimentarias químicas.....	52
Tabla 4.3: Asociaciones de facies.....	58
Tabla 4.4: Equivalencia de facies.....	60
Tabla 5.1: Características relevantes de los distintos tipos de costras.....	66
Tabla 5.2: Estructuras menores presentes en los distintos tipos de costras.....	68
Tabla 6.1: Autores que han mapeado el salar del Huasco.....	94
Tabla 9.1: Minerales del salar del Huasco.....	107
Tabla 9.2: Métodos de análisis de mineralogía para las distintas muestras.....	108

SOLO USO ACADÉMICO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto

En los Andes Centrales, durante el Pleistoceno y Holoceno, se han desarrollado cuencas endorreicas en la Cordillera de la costa, la zona pre andina y la zona Andina, las que fueron ocupadas por lagos salinos y sus depósitos (Zappettini *et al.*, 2001; Risacher *et al.*, 2003; Gardeweg y Sellés., 2013). En el caso de los salares andinos, se emplazan en depresiones intramontanas formadas sobre un basamento de rocas volcánicas pliocenas-holocenas, dentro de un cordón montañoso conformado por estratovolcanes andesíticos de la misma edad, ubicados en el límite entre Chile, Bolivia y Argentina (Figura 1.1).

Estos depósitos salinos continentales se acumularon en los depocentros de cuencas endorreicas cubiertas por salmueras¹, con altas tasas de evaporación y bajas tasas de precipitación (Chong, 1988. En: López *et al.*, 1999), las que recibieron episódicamente el aporte de mezclas densas de agua, sedimentos y depósitos volcánicos.

La gran cantidad de salares presentes en la región ha generado interés, no sólo por los ecosistemas únicos que contienen, sino también por sus recursos hídricos y el interés económico que presentan para la industria minera, por sus altos contenidos de litio, potasio, boro, sodio, magnesio y compuestos salinos en general. Conviene destacar que los salares altiplánicos de Bolivia, Chile y Argentina concentran aproximadamente el 62% de los recursos mundiales de litio (COCHILCO, 2013).

El salar del Huasco (Figura 1.1), ubicado a 150 km al este de la ciudad de Iquique (Figura 1.2) corresponde a un depósito salino continental activo (Risacher *et al.*, 1999), con un clima actual de tundra de carácter semiárido y con tasas de evaporación superiores a la recarga de agua, la que se da fundamentalmente por precipitaciones estivales.

¹ Solución acuosa natural con altas concentraciones de sales disueltas superiores a 30 gr/l (Alonso, 2010).

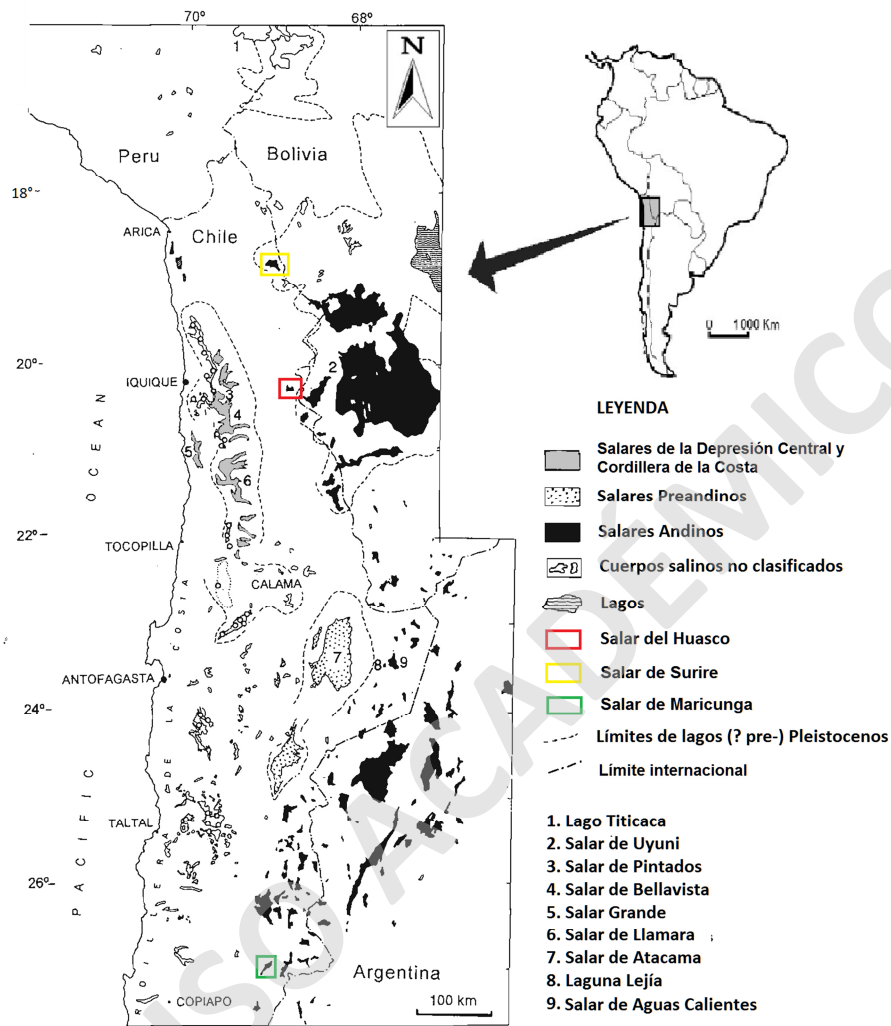


Figura 1.1: Distribución de salares en los Andes Centrales entre los 18°S y 26°S. Contexto en el que se encuentra el salar del Huasco (polígono rojo). Modificada de Cabrera *et al.* (1995).

Stoertz y Ericksen (1974), Cabrera *et al.* (1995) y Gardeweg y Sellés (2013) indican que los salares del sector andino habrían evolucionado desde paleolagos pleistocenos debido al incremento de la temperatura y disminución de las precipitaciones durante el Holoceno.

La composición del relleno de la cuenca que aloja el salar del Huasco ha sido descrita por Sayes (1968) en base a dos sondajes realizados en el salar, según los cuales la cuenca tendría al menos 231 m de espesor y su relleno estaría compuesto por unidades volcanoclásticas, aluviales y lacustres y, por una costra salina superficial con un espesor inferior a 1,5 m (Gardeweg y Sellés, 2013) constituida por evaporitas eflorescentes y limos. La costra salina

estaría compuesta principalmente por sales sódicas procedentes de la evaporación de las aguas de un paleolago en una cuenca endorreica (Garcés *et al.*, 2010).

Antecedentes generales de la composición del salar se encuentran en Stoertz y Ericksen (1974), Chong (1984), Vergara *et al.* (1984) y en Gardeweg y Sellés (2013). Estudios geoquímicos de sus aguas se encuentran en Risacher *et al.* (1999) y Risacher *et al.* (2003). Sobre la evolución de su salmuera en López *et al.* (1999). Propuestas de modelos hidrogeológicos en Acosta (2004), Acosta *et al.* (2008) y en DIHA-PUC (2009). El potencial económico por la presencia de sulfatos de sodio ha sido evaluado por CORFO (1981) y su zonación mineral registrada a través de técnicas de teledetección (Véliz, 2018).

Hasta la fecha, no se conoce la existencia de estudios estratigráficos de mayor detalle, orientados a establecer la evolución geológica y ambiental de la cuenca salina del Huasco durante el Holoceno. Con el fin de lograr este objetivo es necesario realizar un estudio que permita establecer la estratigrafía de las capas superficiales (1,5 m del relleno superior) del salar del Huasco y analizar el ambiente y condiciones depositacionales de las unidades sedimentarias identificadas.

1.2 Hipótesis del estudio

El estudio estratigráfico de los depósitos sedimentarios salinos y clásticos de los 1,5 m más superficiales del salar del Huasco, permitirá establecer las condiciones ambientales y los mecanismos controladores de la sedimentación, durante la evolución holocénica de la cuenca del salar del Huasco.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Proponer una evolución geológica y paleoambiental del salar del Huasco, durante el Holoceno más reciente.

1.3.2 **Objetivos Específicos**

- 1) Reconocer y determinar la distribución de las unidades geológicas de la costra salina y de las unidades estratigráficas de los primeros 1,5 m superficiales del salar del Huasco.
- 2) Inferir los ambientes específicos y mecanismos depositacionales que representan las facies reconocidas en el intervalo estudiado, al interior del salar del Huasco.

1.4 **Metodología**

Para lograr los objetivos mencionados, las actividades fueron divididas en cuatro etapas:

1.4.1 **Trabajo de preparación de terreno**

- i) *Revisión de información bibliográfica* relacionada con salares y cuencas intramontanas de la zona andina, del extremo norte de Chile, en relación a geología, condiciones climáticas, distribución lateral y vertical de sus facies, química e hidrogeología, con el fin de comprender la evolución geológica, el desarrollo de los ambientes de depositación de estos sistemas y los factores controladores (objetivos 1 y 2).
- ii) *Generación de bases de datos* del área de estudio: en relación a información química, geológica y mineralógica de estudios anteriores, y de campañas de sondajes de exploración minera (objetivos 1 y 2).
- iii) *Procesamiento y análisis de imágenes satelitales* para la preparación del trabajo en terreno en relación a: propuestas de rutas, puntos de interés y mapa preliminar mediante la utilización de imágenes LANDSAT 8 de agosto de 2018 y mayo de 2019, corregidas y procesadas en ENVI 5.3² y ArcMap 10.3 utilizando la combinación de bandas 567 (Flahaut *et al.*, 2017; Véliz, 2018), con el apoyo de imágenes 3D obtenidas de *Google Earth* (objetivos 1 y 2).

² Los procesos ejecutados en ENVI 5.3 fueron realizados por Jaime Villegas (2020), memorista de pregrado de la carrera de Geología de la Universidad Mayor, cuyo tema es el análisis de variables físico-químicas y composición mineralógica del salar del Huasco, a través de técnicas de teledetección.

iv) *Determinación de puntos de interés* para ser levantados en terreno, en base a los antecedentes bibliográficos y el procesamiento de imágenes LANDSAT (objetivos 1 y 2).

1.4.2 Trabajo de terreno

i) *Levantamiento geológico de la superficie de la costra salina* entre los días 14 de junio y 18 de junio de 2019, mediante transectas delimitadas por puntos escogidos en la etapa de preparación del trabajo en terreno, en que se describieron facies mineralógicas, estructuras presentes y morfologías asociadas, con el fin de generar un mapa geológico a escala 1:50.000 (objetivo 1).

Recolección de al menos 30 muestras de la costra superficial en los puntos de terreno definidos y otros, con el fin de caracterizar la mineralogía y determinar su distribución (objetivo 1). Las muestras obtenidas fueron envueltas en papel *tissue*, etiquetadas y resguardadas en bolsas plásticas y embaladas.

ii) *Levantamiento de columnas estratigráficas*, en siete puntos de interés (objetivos 1 y 2), escogidos en base a dos criterios: a) teledetección, en que se determinaron zonas del salar de interés, y b) revisión bibliográfica (acápites 1.4.1, i y iii).

Las columnas se levantaron en calicatas realizadas con pala y picota, con profundidad máxima variable en función al nivel de agua en cada calicata. La determinación final de su ubicación consideró la presencia de escarpes naturales o depresiones de disolución que facilitaron la excavación en sus bordes. Además, la cantidad de excavaciones se limitó al tiempo de terreno y los permisos acordados con CONAF.

En cada excavación se registró la profundidad total y el espesor de las capas. Su descripción incluyó la petrografía, texturas, estructuras primarias y relaciones de contacto (objetivos 1 y 2). Además, se realizó un registro fotográfico de cada columna y se recolectaron muestras de cada capa de las columnas estratigráficas, con el fin de realizar descripciones con lupa binocular y análisis mineralógico.

Para el análisis mineralógico se obtuvo muestras de al menos 50 gr que fueron transportadas en bolsas *Ziploc* (objetivos 1 y 2). En las capas con facies clásticas se colectó muestras de al menos 400 gr, para realizar descripciones en lupa binocular (objetivos 1 y 2).

1.4.3 Análisis de Laboratorios

i) Para el análisis de distribución vertical y lateral de evaporitas en unidades geológicas *de la costra salina superficial y de las capas estratigráficas*, se realizó la *determinación mineralógica* mediante la interpretación de espectros utilizando la técnica de espectroscopía de reflectancia de radiación (*reflectance spectroscopy*) en Terra Spec. Este trabajo fue realizado por la geóloga Mariana Ordóñez durante el 2019 especialmente para la realización de esta memoria (objetivos 1 y 2) y la tesis de Villegas (2020).

ii) *La descripción petrográfica* de las muestras colectadas, se realizó con *lupa binocular* en el laboratorio de rocas de la Universidad Mayor (objetivos 1 y 2).

1.4.4 Trabajo de Gabinete

i) Se confeccionó un *mapa geológico, escala 1:50.000*, de la costra salina actual. Integrando información bibliográfica, la obtenida en terreno y la analizada en laboratorios, con información recopilada de estudios anteriores (López *et al.*, 1999; Gardeweg y Sellés, 2013; Véliz, 2018) en que el análisis mineralógico de la costra salina fue realizado por difracción de rayos X (DRX). Esta información se encuentra en el capítulo 9 de Anexos, sintetizada en las tablas 9.1 y 9.2, mientras que su distribución espacial se muestra en la figura 9.1 (objetivo 1).

Los criterios para definir las unidades en la costra salina y construir este mapa fueron los tipos de costras y la distribución mineralógica en el salar. Tal como sigue:

Primero se consideraron los tipos de costras, en base a la textura-morfología de sus coberturas y la presencia de estructuras menores en ellas, las que se fotografiaron y describieron en detalle, durante la realización del terreno.

Luego se construyó un mapa de la distribución de asociaciones mineralógicas, escala 1:50.000, utilizando la información obtenida del análisis mineralógico mediante espectrometría de reflectancia de Terra Spec en 36 muestras colectadas en terreno de la costra salina. De modo complementario, se utilizó información de análisis mineralógicos de trabajos previos, los cuales utilizaron difracción de rayos X (DRX): 3 muestras obtenidas por López *et al.* (1999), 3 muestras de Gardeweg y Sellés (2013) y 8 muestras de Véliz (2018). En sectores sin datos mineralógicos se utilizó la información aportada por Villegas (2020) en su tesis de pregrado, quien estudia el

salar del Huasco utilizando técnicas de teledetección en base a la interpretación de espectros en Terra Spec.

Por último, a partir del mapa de distribución de asociaciones mineralógicas y la descriptiva del tipo de costra (textura-morfología y estructuras), se confeccionó el mapa de unidades geológicas a escala 1:50.000 (Figura 5.1).

ii) Se confeccionaron siete columnas estratigráficas (objetivos 1 y 2). En base a descripciones de unidades litológicas definidas en calicatas levantadas en terreno, las que fueron complementadas con fotografías, descripciones de muestras con lupa binocular, así también con estudios mineralógicos. A partir de estas descripciones se *definieron litofacies* utilizando como referencia las tablas de facies de Miall (1978 y 1985) y los conceptos de Walker (1992), resaltando en el caso de las facies silicoclásticas su granulometría, composición y color; mientras que para las facies evaporíticas su composición y su contenido de detritos. Las columnas se digitalizaron por medio del *software* SEDLOG 3.1 y se editaron en *Adobe Illustrator* CC 2018.

iii) Se confeccionó una sección oeste-este, en la cual se correlacionaron las asociaciones de facies de las columnas estratigráficas involucradas (objetivos 1 y 2) con el objetivo de analizar la geometría y distribución, en referencia al nivel base lacustre actual (DATUM) e interpretar ambientes. Se compararon las alturas y profundidades de las columnas y se posicionaron espacialmente utilizando modelos de elevación digital ALOS PALSAR. A lo anterior se integró información litológica aportada por calicatas realizadas por CORFO (1981).

iv) Se analizó la geomorfología de un cerro isla (domo andesítico), a partir de la cual se hizo una reconstrucción paleogeográfica y se calculó (objetivo 2): máxima altura de columna de agua, perímetro de paleolínea de costa en un máximo de inundación y área máxima de transgresión de paleolago.

v) Se realizó el análisis integrado de la información obtenida en este estudio y la de estudios previos. Se redactaron informes de avance, presentaciones y esta memoria (objetivos 1 y 2).

1.5 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio se ubica 150 km al este de Iquique y a 110 km al este de Pozo Almonte, en el Altiplano Andino, Región de Tarapacá del Norte Grande de Chile. Desde Pozo Almonte se puede acceder por la ruta A-65, camino asfaltado en buen estado, y desde la localidad de Pica (60 km al suroeste del salar) por la ruta A-675, camino de tierra en estado regular (Figura 1.2).

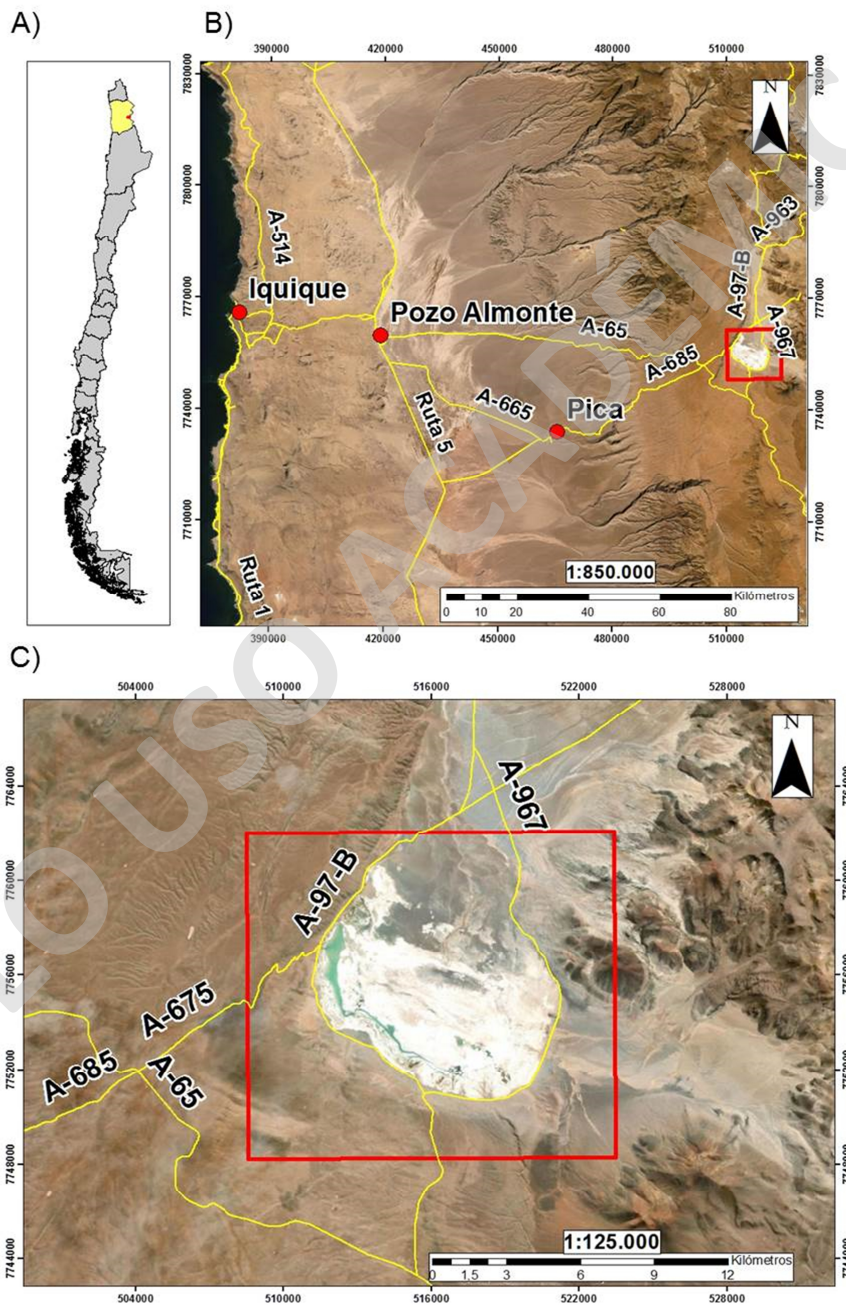


Figura 1.2: Ubicación y vías de acceso al salar del Huasco. A) Región de Tarapacá, Chile; B) Vías de acceso a la zona de estudio, rutas A-65 y A-675; ciudades-poblados de referencia: Iquique, Pozo Almonte y Pica; C) Ubicación de zona de estudio, escala 1:125.000.

CAPÍTULO 2: MARCO GEOLÓGICO Y PALEOCLIMÁTICO

La geología del salar del Huasco, se enmarca en un ambiente de margen convergente asociado a un proceso de subducción, característico de la evolución geológica de los Andes Centrales en el extremo norte de Chile (17°S-28°S), el que se habría iniciado en el Jurásico Inferior y desarrollado hasta la actualidad (Charrier *et al.*, 2007).

En el Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (26-19 Ma), se habría iniciado la formación del arco magmático actual de los Andes Centrales seguido por su migración hacia el este, hasta su posición actual, como consecuencia de un nuevo ajuste en la convergencia casi ortogonal de placas en el margen sudamericano, obteniendo como resultado la construcción de los principales dominios morfoestructurales de la actualidad (Somoza, 1998). Durante la intensa actividad volcánica del arco, rocas volcánicas y depósitos volcanosedimentarios, habrían ocupado gran parte de la región (Gardeweg y Sellés, 2013).

Desde el Mioceno Superior se registra el alzamiento final de la Cordillera (Kley *et al.*, 1999) y magmatismo Neógeno-Cuaternario que origina rocas piroclásticas silíceas del Plioceno-Cuaternario (Gardeweg y Sellés, 2013). Este periodo de alzamiento consolidó un sistema de drenaje endorreico y un incremento de las condiciones de aridez, facilitando la formación de cuencas evaporíticas intramontanas con aportes de agua superficiales esporádicos y/o subterráneos, en donde se emplazarían depósitos lacustres y evaporíticos de edades menores a 1,6 Ma (Zappettini *et al.*, 2001). Finalmente, durante el Plioceno-Cuaternario se acumularon depósitos fluviales, aluviales, coluviales, eólicos y glaciares.

Durante el Holoceno en los Andes Centrales, se formaron salares a partir de los cuales se generaron yacimientos químicos sedimentarios con presencia de sales de Na, Li, K, Mg y boratos, aportados por la actividad volcánica, lixiviación de rocas volcánicas aledañas y concentración por mecanismos de evaporación en las cuencas endorreicas, en condiciones de extrema aridez (Zappettini *et al.*, 2001). Los más importantes yacimientos corresponden al salar de Uyuni (Li, K, Mg), Río Grande de Lípez (B₂O₅) y Surire (B₂O₅) en Bolivia, al salar de Atacama (Li, K) en Chile y al salar Hombre Muerto (Li) en Argentina.

2.1 Geología de la cuenca Huasco-Collacagua

A una escala más acotada, en torno al salar del Huasco se distinguen tres áreas geomorfológicas principales, denominadas de oeste a este: Altos de Pica, Depresión intermontana (Cuenca Huasco-Collacagua, incluye al salar del Huasco) y Cordillera Principal (Figura 2.1).

La cuenca Huasco-Collacagua está limitada por dos estructuras mayores de orientación noreste-suroeste: la falla Huasco por el oeste y la falla Guañada por el sureste del salar del Huasco. Ambas corresponden a fallas inversas y constituyen el sistema estructural de mayor desplazamiento que, junto a los edificios volcánicos neógenos que se ubican al este, serían los responsables del carácter de cuenca intramontana estructural que adquiere la depresión (Figura 2.1).

El cordón Altos de Pica, al oeste del salar, es un terreno compuesto por tobas riolíticas soldadas del Mioceno (Ignimbrita Huasco) alzadas por fallas inversas (Blanco *et al.*, 2012. En: Gardeweg y Sellés, 2013) como la falla Huasco de rumbo NNE y vergencia este, que corresponde a la mayor estructura de este cordón.

En este dominio también se describen fallas normales de rumbo NE-SO que cortan la Ignimbrita Huasco, entre las que destaca la falla Diablo Marca (noroeste de la figura 2.1) generando angostos grábenes durante el Mioceno Superior (Gardeweg y Sellés, 2013).

Al este del salar la cuenca está flanqueada por edificios volcánicos del Neógeno (unidades Mmv y Msv, Figura 2.2) que constituyen la Cordillera Principal. Al sureste del salar del Huasco, se describe una falla inversa de vergencia oeste denominada Guañada (Figura 2.1) cuya traza se pierde hacia el norte, antes de alcanzar el borde oriental del salar, en donde se ubican los edificios volcánicos neógenos.

Gardeweg y Sellés (2013) interpretan esta depresión intermontana (Figura 2.1) en que se emplaza el salar del Huasco, como un “graben en compresión” por la vergencia opuesta que presentan las fallas Huasco y Guañada.

Por último, tanto la falla Huasco como la falla Guañada, predatan el relleno cuaternario de la cuenca y posdatan la Ignimbrita Huasco (ca. 16 Ma). Gardeweg y Sellés (2013) asocian ambas estructuras al periodo compresivo del Oligoceno-Mioceno Superior (26-19 Ma) relacionado a una rápida convergencia de las placas tectónicas, casi ortogonal al margen sudamericano.

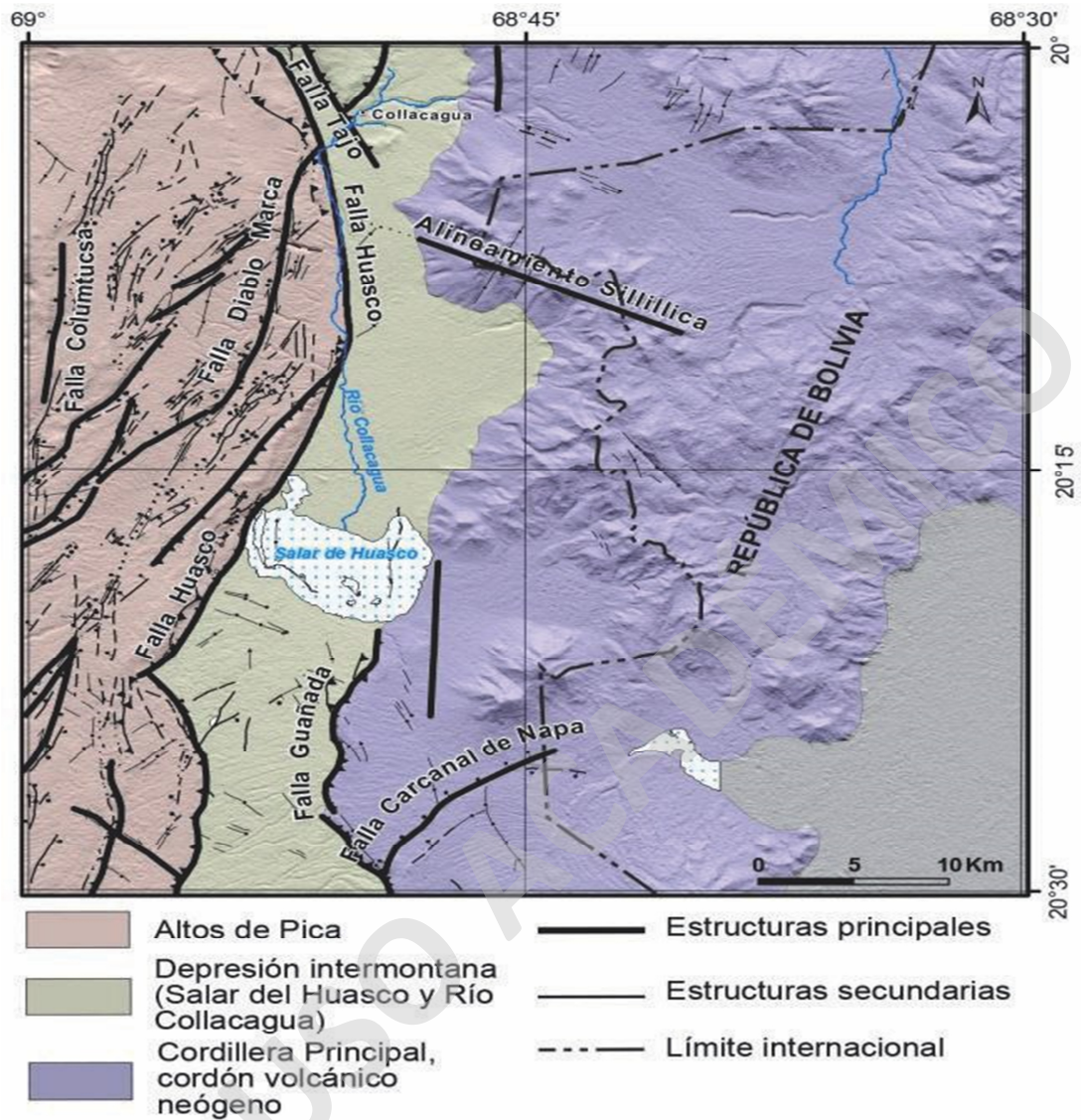
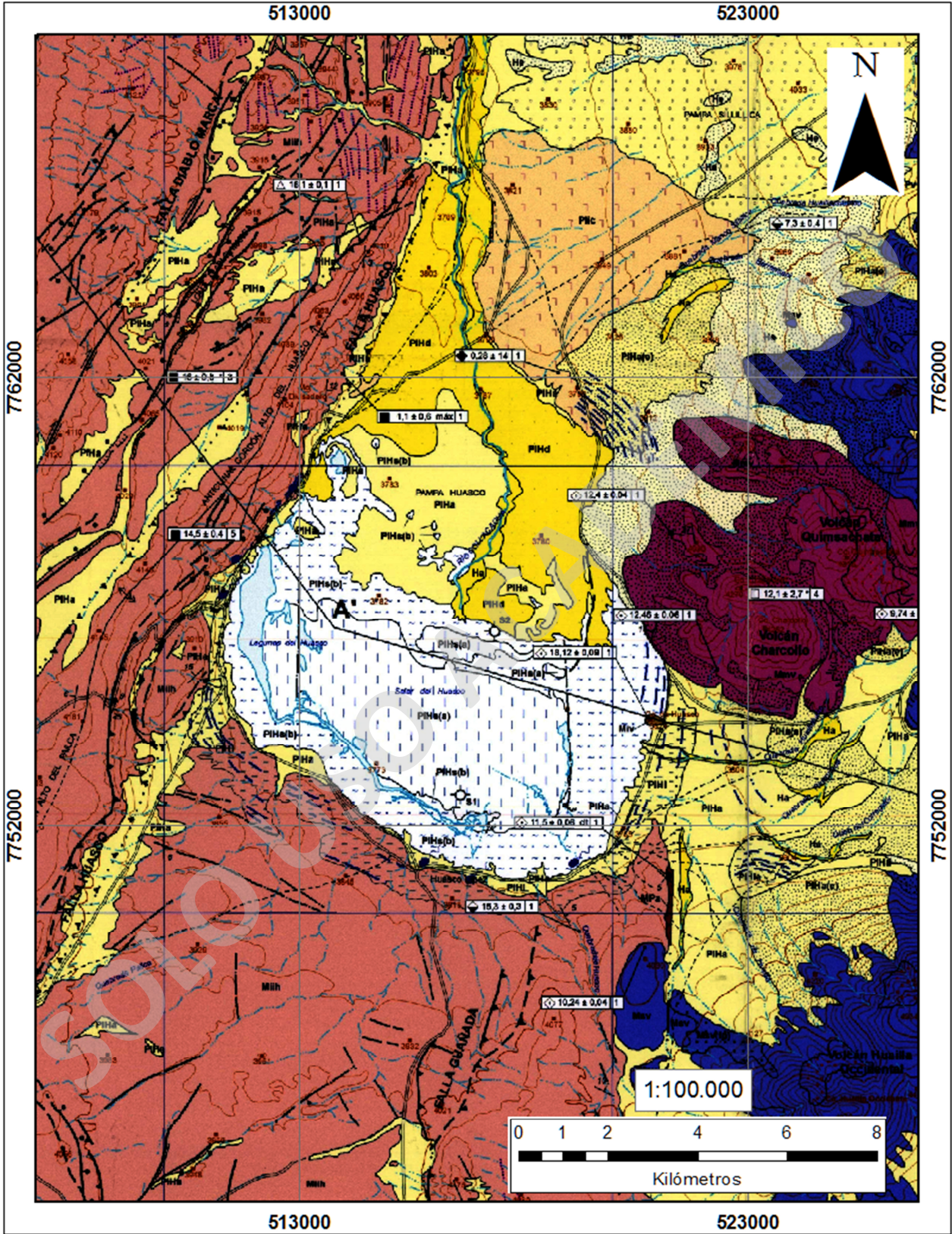


Figura 2.1: Esquema morfoestructural de la carta Collacagua-Rinconada, en el que resaltan las principales estructuras presentes en la zona de estudio. Extraído de Gardeweg y Sellés (2013).

Las unidades que afloran en las inmediaciones del salar corresponden a rocas estratificadas continentales, mayoritariamente volcánicas y sedimentarias subordinadas, y depósitos de sedimentos no consolidados del Pleistoceno al Holoceno. Gardeweg y Sellés (2013) describen estas unidades, de más antigua a más joven, como sigue (Figura 2.2):



LEYENDA

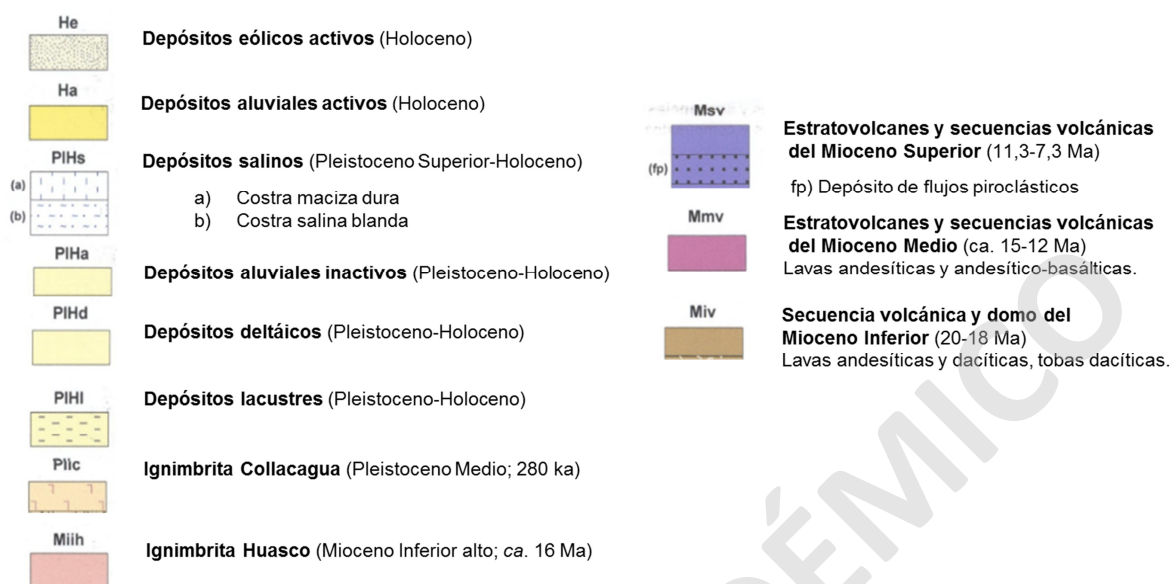


Figura 2.2: Sector central del mapa geológico de la hoja Collacagua-Rinconada. Modificado de Gardeweg y Sellés (2013).

Secuencia volcánica y domo del Mioceno Inferior Miv (Mioceno Inferior; ca. 20-18 Ma): secuencia volcánica y sedimentaria continental, compuesta por andesitas, dacitas, tobas dacíticas, conglomerados y areniscas. Alcanza un espesor de 200 m, su base es desconocida y está cubierta, en discordancia ligeramente angular o paraconcordancia por la Ignimbrita Huasco. Se tiene un reducido afloramiento en el margen oriental del salar del Huasco: cerro Huasco, pequeño cerro isla (domo andesítico) compuesto por andesitas de anfíbola subhorizontales, de color oscuro, grano fino y pobres en fenocristales (<2-3%), cubiertas por depósitos carbonatados del Pleistoceno–Holoceno.

Ignimbrita Huasco Miih (Mioceno Inferior; ca. 16 Ma): se trata de una toba soldada riolítica rica en cristales (hasta un 40% de 1-4 mm de cuarzo, sanidina y biotita) y que en la parte media presenta textura eutaxítica. Se extiende al norte de la carta, al oeste y sur del salar del Huasco y cubre una superficie de 1.800 km². Dispuesta como manto subhorizontal (manteos <7°), se ha reconocido, por medio de sondajes (Sayes, 1968) a 110 m y 230 m de profundidad bajo el salar. Sobreyace en ligera discordancia de erosión o paraconformidad a unidades pre-miocénicas, y subyace concordante o paraconcordante a rocas de unidades volcánicas y sedimentarias del Cenozoico Superior.

Estratovolcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Medio Mmv (ca. 15-12 Ma): corresponde a una cadena de orientación norte-sur, compuesta por estratovolcanes y complejos volcánicos. Incluye conos fuertemente erosionados, de composición andesítica a andesítica basáltica ubicados al oriente del salar del Huasco. Sobreyace en concordancia o paraconcordancia a la Ignimbrita Huasco, en tanto subyace a lavas del Mioceno Superior y a arenas eólicas del Holoceno. Destacan remanentes de los aparatos volcánicos Charcollo (4.252 m) y Quimsachata (4.315 m).

Estratovolcanes y secuencias volcánicas del Mioceno Superior Msv (11,3-7,3 Ma): corresponde a una secuencia volcánica y sedimentaria de lavas andesíticas y dacíticas, tobas dacíticas, conglomerados y areniscas. Presenta grandes edificios volcánicos, con conos bien preservados y en otros casos intensamente erosionados, de composiciones andesíticas a dacíticas. Las lavas andesíticas de estos complejos sobreyacen concordantes a lavas andesítico basálticas a andesíticas y secuencias piroclásticas del Mioceno Medio, y subyacen a lavas del Plioceno.

Ignimbrita Collacagua Plic (Pleistoceno Medio; ca. 280 ka): corresponde a una toba dacítica blanca a gris clara, no soldada, maciza, rica en fragmentos juveniles pumíceos blancos y, en menor grado, grises densos, con proporciones variables de fragmentos líticos. Sobreyace a la Ignimbrita Huasco y a lavas del Mioceno Superior y Plioceno, engrana con depósitos lacustres y aluviales, y subyace a depósitos eólicos de su propio retrabajo. Se presenta subhorizontal y con ligeros manteos de depositación. Rellena gran parte de la cuenca, sobre todo en el sector norte, aunque su material retrabajado es ubicuo en la cuenca.

Depósitos lacustres PIHI (Pleistoceno-Holoceno): son depósitos no consolidados de limos amarillos-grises laminados, arenas y depósitos calcáreos porosos de tufa y travertino negro-pardo, con intercalaciones subordinadas de gravas aluviales. Afloran en torno al salar del Huasco y bajo su costra salina (Sayes, 1968). Sobreyacen a las ignimbritas Huasco y Collacagua, en tanto engranan con depósitos aluviales, eólicos y salinos. Se observan paleolíneas de costa bien preservadas, en algunos casos asociadas a terrazas lacustres. Su altimetría es homogénea en torno al salar (ca. 3.845 m s.n.m.) e indican un nivel máximo del lago 50-55 m por sobre la superficie actual del salar. El lago habría tenido una sección de 14 km de diámetro máximo y una superficie de 110 km², 2,5 veces superior a la del salar actual (Gardeweg y Sellés, 2013).

Depósitos deltaicos PIHd (Pleistoceno-Holoceno): corresponden a depósitos de arcillas y limos blancos-amarillos, laminados o con estratificación gruesa, con restos de organismos vegetales e intercalaciones de arenas y gravas finas pardas, matriz soportadas, afloran en el curso inferior del río Collacagua. Forman un paleoabanico deltaico que engrana con los depósitos lacustres a la entrada de un paleolago de mayor extensión que el salar actual (Gardeweg y Sellés, 2013). Forman una planicie de suave inclinación hacia el sur con 8 km de extensión que cubre una superficie total de ca. 28 km².

Depósitos aluviales inactivos PIHa (Pleistoceno-Holoceno): corresponden a gravas, ripios, arenas y limos polimícticos, expuestos en abanicos aluviales inactivos, en su mayoría provenientes de la erosión de la Ignimbrita Collacagua. Sobreyacen a las ignimbritas Huasco y Collacagua. Engranar con los depósitos lacustres del paleolago Huasco, con los depósitos deltaicos del río Collacagua y con los depósitos salinos del salar del Huasco.

Depósitos salinos PIHs (Pleistoceno Superior-Holoceno): se ubican en el salar del Huasco y componen una delgada costra salina que constituye un cuerpo evaporítico sedimentario continental. Presenta eflorescencias salinas sobre gravas, limos y cenizas que conforman el relleno de la cuenca Huasco-Collacagua. Formada principalmente por sulfatos de sodio (thenardita y mirabilita) en el núcleo y cloruros y sulfatos (halita, thenardita, proporciones variables de yeso y otras sales) en los márgenes (López et al., 1999; Gardeweg y Sellés, 2013). Gardeweg et al. (2015) proponen que sería producto de la evaporación de un paleolago.

Depósitos aluviales activos Ha: corresponden a gravas, ripios, arenas y limos polimícticos, con variables grados de selección, asociados a sistemas de drenajes activos, pero efímeros, la mayor parte de los cuales sólo está activo en la temporada de lluvias altiplánicas estivales y/o invernales, con excepción del curso superior del río Collacagua.

Depósitos eólicos activos He: compuestos por arenas blancas, bien seleccionadas, con estratificación cruzada, activas y de granos redondos (plagioclasa, cuarzo y sanidina), finos a medios. Cubren a todas las unidades precedentes y localmente están cortadas por depósitos aluviales activos. Conforman dunas en el borde oriental de la cuenca, principalmente con material re TRABAJADO de la Ignimbrita Collacagua.

2.2 Geología del salar del Huasco

El salar del Huasco se emplaza en una depresión geológica estructural de forma ovalada, elongada hacia el norte y hacia el sur, en la que se han reconocido depósitos deltaicos, aluviales, fluviales, eólicos y lacustres (López *et al.*, 1999), en cuyos márgenes se han identificado paleolíneas de costas lacustres.

La geometría de perfil de la cuenca, expuesta en una sección norte-sur (Acosta y Custodio, 2008; Figura 2.3) presenta un lecho inclinado al sur con profundidades que varían entre los 100 m y 260 m y, un depocentro ubicado en el extremo meridional, sector en donde se emplaza el salar del Huasco.

A partir de dos sondajes realizados en el salar, Sayes (1968) reconoció sobre un zócalo constituido por la ignimbrita Huasco (Mioceno Medio), una unidad basal aluvial y volcanoclástica, una unidad intermedia lacustre y una costra superficial salina (Figura 2.4).

La unidad basal consistente en una sucesión de depósitos aluviales y volcanoclásticos (areniscas, conglomerados finos y posibles tobas) distribuidos ampliamente en toda la cuenca. Su espesor no ha sido especificado, pero se estima mayor a 150 m y abarca gran parte de la secuencia.

Sobre la unidad basal, próximos al depocentro, se reconocieron depósitos lacustres de limos arcillosos, mantos de diatomitas de hasta 75% de pureza, limos verdes oscuros con restos orgánicos vegetales y conchas de ostrácodos y diatomitas. Su espesor no ha sido especificado.

La unidad más joven, reconocida por Sayes en el extremo sur de la cuenca, consiste en los depósitos de la actual costra salina del salar, los que han sido denominados como Depósitos Salinos PIHs de edad Pleistoceno Superior-Holoceno (Gardeweg y Sellés, 2013; acápite 2.5).

En la costra salina de esta cuenca, Gardeweg y Sellés (2013) han distinguido una facies salina central maciza lisa (a), bordeada por una facies salina blanda y pulverulenta (b), las que se describen como:

- a) Costra salina maciza lisa: es dura, cristalina, compuesta de sulfatos de sodio (thenardita y mirabilita), de aproximadamente 1 m de espesor, posee cantidades variables de yeso, halita y calcita. Localmente cubierta por 50-70 cm de limos y sales pulverulentas

(sulfatos y cloruros). Sobreyace a depósitos clásticos y lacustres. López *et al.* (1999) reportan además la presencia de boratos (hidroboracita).

- b) Costra salina blanda y pulverulenta: es blanda, pulverulenta, de 5 a 10 cm de espesor, de color pardo-blanco, de superficie irregular, localmente con textura botroidal o microrelieve, con la presencia de depresiones de disolución, en que predomina la halita y thenardita con cantidades variables de yeso, otras sales y detritos. Sobreyace a sedimentos detríticos y salinos mezclados, de color gris oscuro, y engrana con depósitos lacustres y aluviales en los bordes del salar. En algunos sectores está cubierta por bofedales y pequeños cuerpos de agua lagunares.

2.3 Geología económica del salar del Huasco

La franja metalogénica de los salares dispuesta en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama posee 60 salares distribuidos en la Cordillera de la Costa, la Depresión Central, y fundamentalmente en los sectores Preandinos y Andinos, los que en conjunto contienen, principalmente, sales de litio, potasio, boro y sodio, tanto en sus costras salinas como en sus salmueras (Gajardo, 2014).

En el caso de los salares Preandinos y Andinos, el elemento de mayor interés económico es el litio. No obstante, el salar del Huasco se caracteriza por escasas concentraciones de litio, y abundancia de sales de sodio, razón por la cual ha sido objeto de campañas de prospección (CORFO, 1981).

En la costra salina del núcleo del salar del Huasco se ha identificado sulfato de sodio (Na_2SO_4) principalmente en forma de mirabilita y thenardita.

De acuerdo a una evaluación realizada por CORFO (1981) en el núcleo del salar:

a) Las salmueras tienen una baja concentración de K, B y Li, con excepción de tres puntos (10 g/l de K y 4 g/l de H_3BO_3).

b) Se tiene un estrato superficial de sulfato de sodio hidratado (mirabilita, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) en una superficie de 20 km^2 , de potencia promedio de 0,70 m, y una ley de <57 peso % de Na_2SO_4 . Así, CORFO (1981) estimó 10.000.000 toneladas de Na_2SO_4 en el salar.

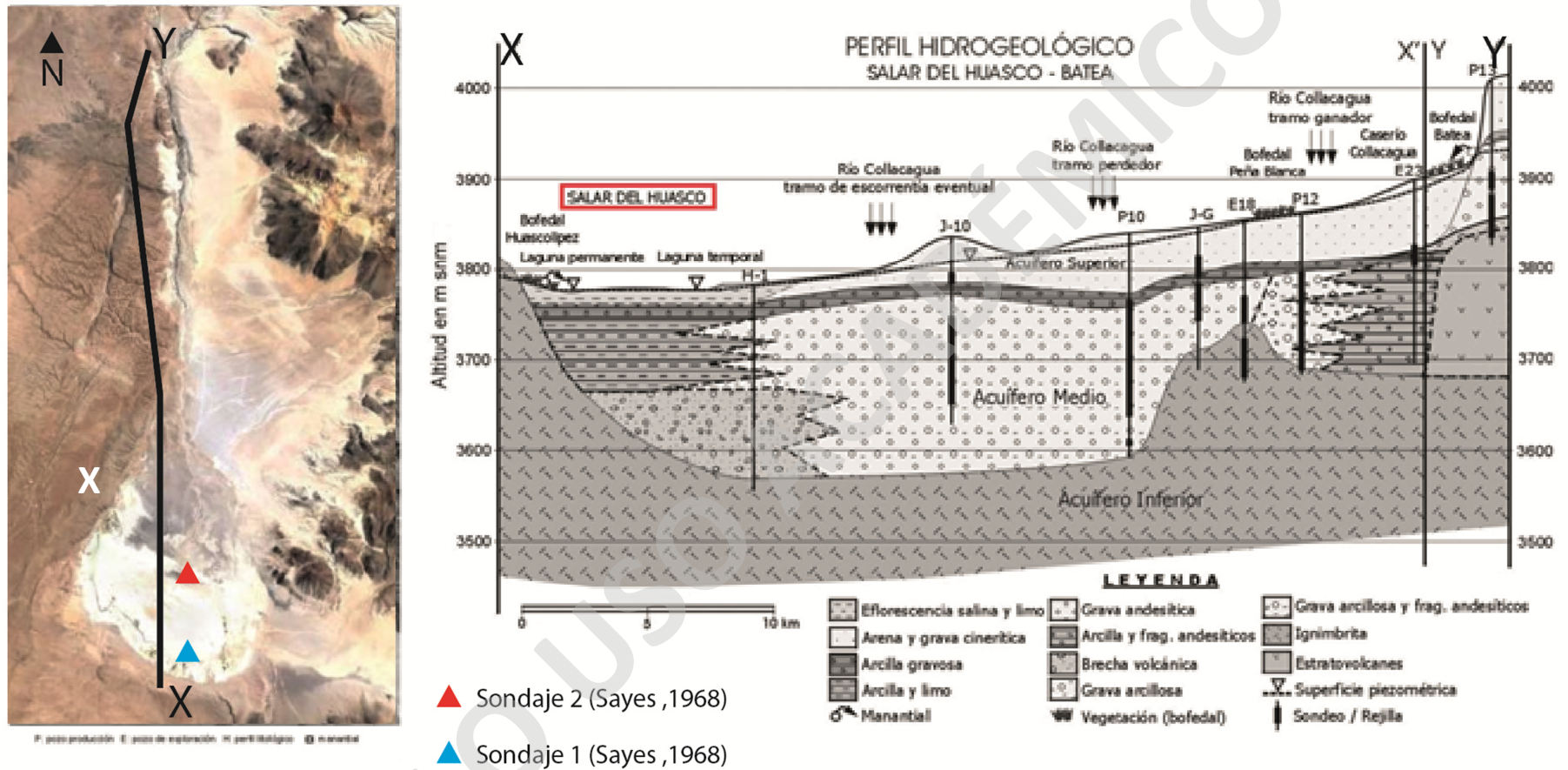


Figura 2.3: Perfil de la cuenca Huasco-Collacagua. Perfil orientado sur-norte (X-Y), en el que se destaca con un rectángulo rojo la ubicación del salar del Huasco, el perfil es esquemático y fue realizado en el contexto de la definición de un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca. Extraído y modificado de Acosta y Custodio (2008).

2.4 Clima y Paleoclima de la cuenca Huasco-Collacagua

En la actualidad, el Norte de Chile (18°S-27°S) se caracteriza por presentar un clima desértico con condiciones de extrema aridez en altitudes menores a 2000 m s. n. m. Sobre esta altura y en el área en la que se encuentra el salar del Huasco, las condiciones son de aridez o semi aridez.

La aridez actual está controlada por tres factores principales: masas de aire anticiclónicas, efectos de la corriente de Humboldt y el bloqueo por parte de la cordillera de Los Andes (desde el Mioceno Medio -14 Ma- a la actualidad) de la humedad proveniente del Atlántico desde la cuenca amazónica (Le Roux, 2012).

Por una parte el anticiclón del Pacífico, que corresponde a zona de altas presiones característico en las regiones subtropicales, en donde tienden a emplazarse los desiertos del mundo, se relaciona a celdas de circulación atmosféricas en que el aire es seco.

Respecto a la corriente de Humboldt, se asocia a la surgencia de corrientes de aguas frías en las costas chilenas del Océano Pacífico, atenuando la humedad proveniente del Pacífico al disminuir las temperaturas de la superficie oceánica.

Por último, las masas de aires húmedos que provienen del Océano Atlántico y de la cuenca amazónica, sobre todo durante el verano del hemisferio sur, generan aires húmedos y tibios que ascienden por el margen oriental de la Cordillera de los Andes, se enfrían y precipitan, dejando como remanente masas de aire secas que cruzan Los Andes (Bobst *et al.*, 2001), fenómeno conocido como “sombra de precipitación”.

En el caso del salar del Huasco, dado que se sitúa sobre los 3700 m s. n. m., posee un clima de tundra, y recibe precipitaciones estivales entre diciembre y marzo, de origen convectivo generadas por ascenso de masas de aires húmedas desde el oriente de la Cordillera de Los Andes, provenientes de la cuenca del Amazonas y océano Atlántico y que se asocian al “Invierno Boliviano” o *South American Summer Monsoon* (SASM) (DIHA-PUC, 2009). La media anual de precipitaciones en la cuenca Huasco-Collacagua entre 1961-2000 fue de 134 mm (Acosta *et al.*, 2008).

Además, el salar presenta amplia oscilación térmica entre el día y la noche, con una temperatura media anual que no supera los 5°C, promedio que implica temperaturas invernales mínimas de hasta -20°C, medidas entre junio y septiembre.

Consideraciones paleoambientales y paleoclimáticas

Diversos autores han propuesto que el clima del pasado en los Andes Centrales, sería de menor aridez que en la actualidad, situación que habría permitido el emplazamiento de lagos durante el Pleistoceno Medio al Holoceno en lugares en que hoy se disponen salares (Stoertz y Ericksen, 1974; Cabrera *et al.*, 1995; Gardeweg y Sellés, 2013).

El desarrollo de paleolagos, tanto en el altiplano como en el desierto de Atacama, habría ocurrido por una combinación de mayor humedad en Los Andes, proveniente principalmente de la cuenca amazónica, y temperaturas 5° a 8° C menores a las actuales (Thompson *et al.*, 2000).

Stoertz y Ericksen (1974) estiman que la formación de lagos permanentes en las cuencas andinas sobre los 3.000 m s. n. m. durante el Pleistoceno tendría un promedio de precipitación anual de 381 mm *versus* los 203 mm actuales, y con una temperatura de 1,12 °C más baja que el presente. Sin embargo, de acuerdo a valores de $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ e isótopos de Sr y U en carbonatos de paleolagos, se ha estimado que habrían precipitaciones significativas, con paleotemperaturas que fluctuarían entre los 2-10°C (~8°C) y una humedad más alta (~60%) respecto a la actual que es de un 20% (Placzek *et al.*, 2011).

En el desierto de Atacama se registran evidencias de emplazamiento de paleolagos durante los ~46,9 a 7,7 ka, con tasas de recargas entre 1,5 a 4 veces a las actuales (Amundson *et al.*, 2018).

En el área altiplánica, los registros climáticos del Pleistoceno indicarían eventos húmedos en los últimos 20.000 años, especialmente dos fases que presentarían un máximo de humedad, lo que habría permitido la conformación de grandes paleolagos altiplánicos (16°S-20°S) entre los 3.600 y 4.500 m s. n. m.: la fase lacustre Tauca (18-14 ka) y la fase lacustre Coipasa (13-10 ka) (Sáez *et al.*, 2016).

En base a dataciones de fósiles carbonatados hallados en sedimentos lacustres en terrazas correspondientes a paleocostas (Baker *et al.*, 2001), se ha determinado una edad de 18.100-14.100 años al paleolago Tauca (emplazado en el altiplano de Bolivia) que alcanzó profundidades mayores a 140 m y un área seis veces mayor a la extensión actual del lago Titicaca (Placzek *et al.*, 2013). Esta fase lacustre estaría controlada por la intensificación de precipitaciones provenientes del noreste del monzón tropical de verano y a condiciones atmosféricas y oceánicas del Pacífico relacionadas al fenómeno de La Niña (Placzek *et al.*, 2011).

De igual forma, se ha determinado una edad de 13.400-11.500 años para el paleolago Coipasa (emplazado al norte del salar de Uyuni, Bolivia) cuya profundidad habría alcanzado hasta 55 m (Placzek *et al.*, 2006). En este caso la fase lacustre se relacionaría con precipitaciones provenientes del sureste desde la región del Chaco (amazonas argentinas) (Placzek *et al.*, 2011). Además, estos periodos de humedad estarían registrados en fangos ricos en diatomitas, reflejo de depositación en lagos perennes.

Por lo que, a fines del Pleistoceno al Holoceno, prevalecerían épocas de mayor humedad y mayor intensidad de precipitaciones que en la actualidad, salvo breves periodos de aridez (Quade *et al.*, 2008; Plackzed *et al.*, 2009).

En periodos de aridez durante el Holoceno se habrían formado tormentas poco frecuentes y precipitaciones intensas controladas por celdas convectivas (ENSO: El Niño Southern Oscillation), produciendo numerosos flujos de detritos reflejados en depósitos aluviales y la ausencia de capas orgánicas, durante el Holoceno Medio (~10-3,1 ka, Sáez *et al.*, 2016).

En los sectores más distales de estos abanicos aluviales podrían haberse desarrollado playas lacustres (*playa lakes*) en dirección al depocentro, en donde habría alternancia de fangos y arenas (Amundson *et al.*, 2018), es decir, de facies lacustres y de playa respectivamente, gradando lateralmente a arenicas fangosas calcáreas que representarían puntos de transición, de borde de lago, en donde los carbonatos serían reemplazados por yesos como respuesta al aumento de la aridez (Sáez *et al.*, 2016).

Finalmente, habría ocurrido un aumento en las temperaturas y disminución de precipitaciones, condiciones de desertización que aumentarían la aridez en la zona, permitiendo la sedimentación de depósitos salinos y la conformación actual de salares. Aunque la ausencia de registros glaciares, ya sea de depósitos y/o morfologías indicarían que el paleoclima no se diferenciaría tanto al actual.

El caso específico del salar del Huasco, la altura de paleolíneas de costa (3.845 m s. n. m.) ubicadas 50 a 55 m sobre la superficie actual del salar, indican la existencia de un paleolago de edad posterior 280 ka, es decir, del Pleistoceno Medio alto o más reciente (Gardeweg y Sellés, 2013) el que podría asociarse a la fase lacustre Tauca (18-14 ka) (Servant y Fontes, 1978) y/o a la fase lacustre Coipasa (13-10 ka). Por tanto el “salar del Huasco sería el resultado de una larga evolución paleoambiental, que se inicia con la formación de lagos de agua dulce los cuales se salinizan hasta su desecación asociado a la evolución paleoclimática tendiente a una aridez creciente que caracteriza a los Andes Centrales.” (Gardeweg y Sellés, 2013).

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Definiciones básicas

Salár: nombre que se utiliza en Sudamérica para referirse a un depósito salino, que presenta facies sedimentarias silicoclásticas así como facies evaporíticas (de carbonatos, sulfatos, cloruros, boratos, nitratos, etc.; Chong, 1988. En: López *et al.*, 1999).

Estos depósitos salinos detríticos se suelen acumular en depocentros de cuencas endorreicas de regiones con ambientes áridos a semiáridos, con altas tasas de evaporación en relación a sus bajas tasas de recarga de agua de la cuenca. En superficie forman planicies recubiertas de costras de sales (costra salina) (Chong, 1984. En: Irarrázabal, 2009).

Pueden estar expuestos a periodos de inundación formando lagos efímeros, como a periodos secos, en el que predominan evaporitas capilares intrasedimentarias depositadas por aguas subterráneas (Irarrázabal, 2009).

Evaporitas: sedimentos formados por fases minerales precipitadas desde una superficie o cerca a una superficie de salmuera concentrada por evaporación solar (Warren, 2006).

Se trata de sedimentos químicos, que se depositan como resultado de procesos inorgánicos (radiación solar) que permiten la precipitación de sales al evaporarse el agua en la que están disueltas (Alonso, 2006).

Pueden ocurrir en cuerpos de agua cerrados o de circulación restringida, en ambientes con temperaturas altas, humedad relativa baja y con tasas de evaporación que excedan la precipitación o recarga de agua.

Las evaporitas típicas consisten en sulfatos, cloruros, carbonatos y boratos de elementos alcalinos y alcalinos térreos (Alonso, 2010). Su distribución está controlada por factores hídricos, por la solubilidad y disponibilidad de sales.

Evaporitas primarias: se forman por precipitación directa de la evaporación solar del agua desde una salmuera (Warren, 2006). Se pueden formar en la superficie de la salmuera (interfase agua-aire) y/o en el fondo de la salmuera en un ambiente subacuoso (interfase sedimento-agua). Al precipitar desde la superficie presentan nucleación y cristales que se acumulan en el fondo de la salmuera.

Evaporitas secundarias: se forman en la zona subsuperficial sobre un nivel freático somero, y desarrollan texturas de reemplazo, disolución y cementación (Warren, 2006). Se forman dentro del sedimento (intrasedimentarios), en costras precipitadas en la superficie o en la zona de ascenso capilar (minerales eflorescentes).

Salmuera: se define como solución acuosa natural que presenta altas concentraciones de sales disueltas (>30 gr/l; en Alonso, 2010). En ambientes evaporíticos se reconocen salmueras primitivas que evolucionan en su composición química y mineralógica, en la medida que se intensifica la evaporación (Hardie y Eugster, 1970; Risacher y Fritz, 2008; Navarrete, 2012).

3.2 Zonación de un salar

Hardie y Eugster (1970) proponen un modelo teórico que da cuenta de la evolución química de aguas controlada por evaporación, y que permite hacer un seguimiento secuencial de la formación de minerales evaporíticos, cuando ocurre precipitación de cristales por sobresaturación de compuestos químicos.

Desde una salmuera primitiva se pueden seguir distintos caminos evolutivos (Figura 3.1). A medida que aumentan los componentes disueltos al evaporar agua, se produce precipitación secuencial de minerales, desde los de más baja solubilidad a los más solubles. Siempre, en primera instancia precipita calcita (CaCO_3), cambiando las concentraciones relativas de Ca^{++} y CO_3^- en el agua residual, siendo el compuesto mayoritario el que indique una vía evolutiva (I o II en figura 3.1).

Luego, de acuerdo a la vía evolutiva disponible (I o II) y las concentraciones del compuesto que domine, habrá precipitación de ciertos minerales (sales de magnesio, natrón, trona, yeso, halita, mirabilita, antarcticita, etc.). En ese sentido, las concentraciones de Ca^{++} , CO_3^- y SO_4^- controlarían la evolución, y formarían salmueras alcalinas, ricas en SO_4 o ricas en Ca.

Este modelo permite entender el orden de formación y la distribución mineralógica clásica de los salares, desde los más solubles a lo menos soluble: núcleo de halita/cloruros, rodeado por sulfatos y, en los márgenes, carbonatos.

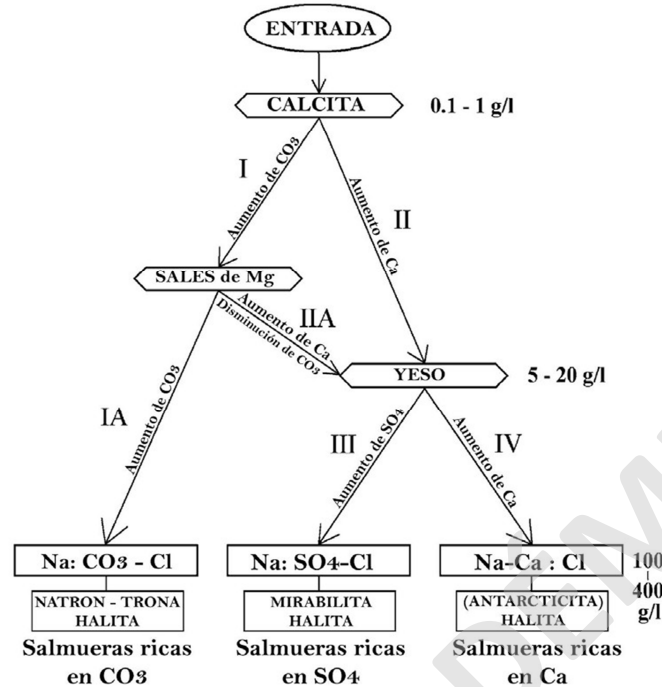


Figura 3.1: Evolución química y mineralógica de aguas sometidas a evaporación. Extraída de Irrázabal (2009), después de Hardie y Eugster (1970), y Risacher y Fritz (2008). En el costado derecho aparecen las concentraciones a partir desde las cuales debiesen comenzar a precipitar las evaporitas indicadas, su concentración está en gramos por litro (gr/l).

A partir del modelo de Hardie y Eugster (1970) se han construido modelos que explican la distribución geométrica de evaporitas en un salar. A continuación, se presentan los modelos publicados por Ortí (2010; Figura 3.2)

Modelo concéntrico o simétrico (*bull's-eye*): es usual en cuencas de desecación total o con alimentación esporádica, en que se forma una distribución concéntrica de evaporitas, con un núcleo de precipitados de halita, en torno al cual se dispone primero un anillo de yeso (aureola de sulfatos) y hacia la periferia otro de carbonato cálcico (Figura 3.2a).

Modelo asimétrico (*tear-drop*): su característica es un marcado gradiente lateral de salinidad que distribuye sales menos solubles en la zona de alimentación, a sales más solubles en el extremo distal. En estos salares el núcleo resulta con precipitados de carbonatos cálcicos, rodeado de un anillo de yeso (anillo sulfatado) y en la parte periférica más distal a la alimentación, precipitados de halita (Figura 3.2b).

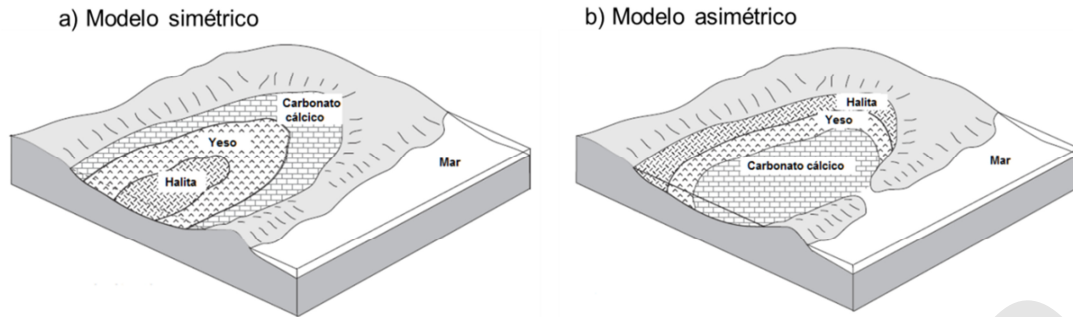


Figura 3.2: Esquemas de salinidad: a) Modelo simétrico (*bull's eye*), evaporación de agua en una cuenca endorreica; b) Modelo asimétrico (*tear-drop*), evaporación de agua en una cuenca semi aislada. Extraída y modificada de Nichols (2009).

3.3 Ciclo del Salar

Los salares normalmente se encuentran en cuencas endorreicas emplazadas en zonas de ambiente árido, cuyas planicies están generalmente secas, salvo cuando hay tormentas y/o flujos de detritos que convierten el salar en lagos temporales (Lowenstein y Hardie, 1985. En: Irrarázabal, 2009). Estos cambios ambientales producen ciclos reiterativos en la vida de los salares, en los cuales se puede reconocer tres etapas de evolución: etapa de inundación (lago efímero), etapa de concentración de evaporación (salmueras) y etapa de desecación (costra salina seca y dura, la más usual) hasta que se inicia un nuevo ciclo (Figura 3.3). Cada etapa es reconocida por el tipo de precipitados y sus texturas depositacionales.

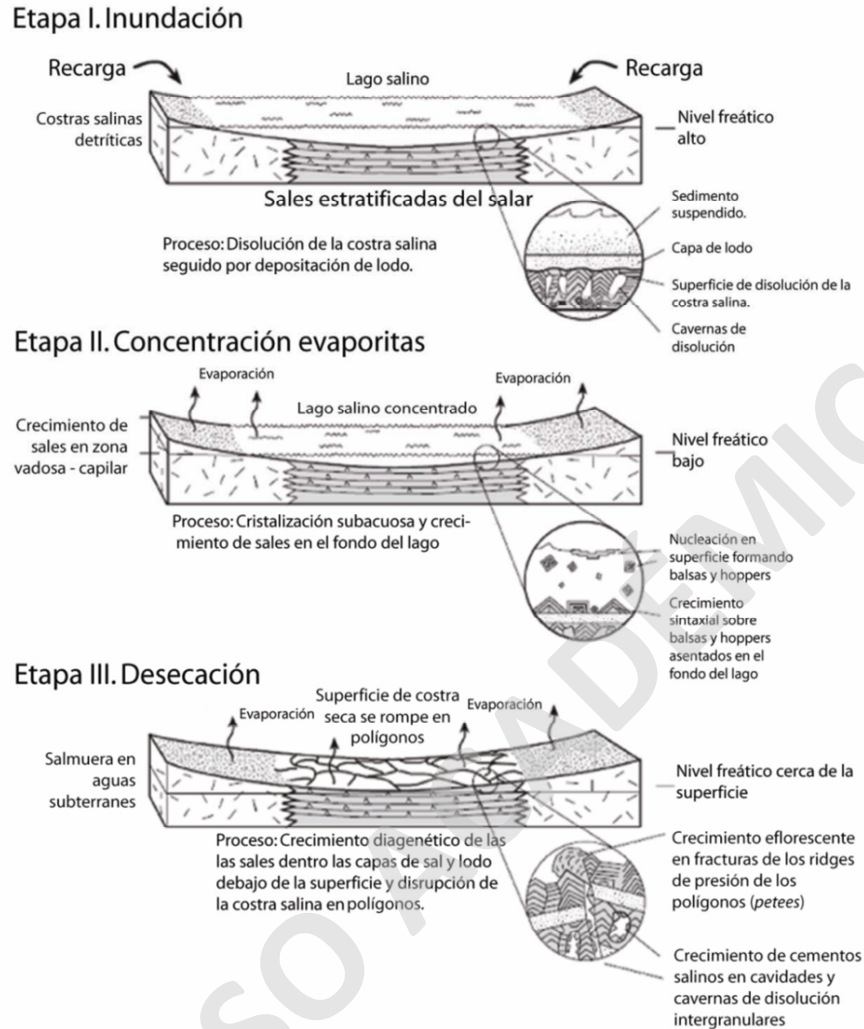


Figura 3.3: Ciclo de un salar. Extraída de Irrázabal (2009), después de Lowenstein y Hardie (1985).

Etapa de Inundación

Representa la etapa de expansión lacustre, con aguas débilmente salinas, la que puede ser esporádica o estacional (Ortí, 2010). La interrupción del ambiente seco puede estar controlada por tormentas o el derretimiento de nieve, generando lagunas someras. El agua fresca disuelve parcialmente la costra salina, transportando como clastos las sales más insolubles como el yeso, al cual somete a retrabajo, y redeposita como sedimentos detríticos.

En esta etapa, existe proceso de disolución de las capas expuestas de sales, suavizando su superficie y truncando las puntas de cristales precipitados previamente. El agua ingresa a capas más profundas y genera cavernas tubulares por disolución, que siguen la fábrica de los cristales previos.

Por último, la inundación controla la disolución de la costra salina lo que es seguido por sedimentación de lodo, resultando en la depositación de capas de evaporitas centimétricas intercaladas con lodo y otros sedimentos clásticos, comúnmente de arenas eólicas.

Etapa de Concentración de evaporitas (o de Lago Efímero)

Tras la etapa de inundación ocurre concentración evaporítica y reducción del cuerpo lacustre hacia un lago menor (efímero), en donde precipita una costra salina (Ortí, 2010). En la medida que se intensifica la disolución y evaporación, el lago se satura en sales generando cristales milimétricos a centimétricos en la interfase aire-salmuera. Estos cristales luego se unen formando balsas que al colapsar decantan al fondo de la salmuera, acumulándose en capas horizontales. Finalmente los cristales y balsas sirven de núcleos para el crecimiento de otros cristales, propio del crecimiento subacuoso.

Etapa de Desecación

Al continuar con la evaporación y eventualmente cristalización de halita, la costra puede quedar seca, y el agua puede descender a niveles subsuperficiales, lo que controla la cristalización y relleno de cavidades en la zona capilar, este crecimiento de cristales se da de manera intersticial o en forma de nódulos, sin orientación preferencial en capas de arenas y arcillas someras.

Al descender el nivel de agua, se forma además una red de polígonos métricos, en cuyas grietas crece sal eflorescente por ascenso capilar, y en donde se forman crestas de presión.

3.4 Ambientes de depositación

Asociados a los diferentes estadios del desarrollo de un salar se reconocen cuatro ambientes depositacionales característicos: lago salado permanente, lago efímero, llanura fangolítica salina y llanura fangolítica seca.

Lago salado permanente (*perennial saline lake*) (Figura 3.4): se caracteriza por la presencia de cuerpos de agua estables y que afloran en superficie. Perduran un largo periodo de tiempo

(decenas a miles de años) y sus profundidades varían ampliamente, aunque la mayoría apenas supera las decenas de metros (Ortí, 2010).

Los precipitados evaporíticos se forman presentando las siguientes texturas y estructuras:

- a) Cristales apilados (*cumulates*) que corresponden a capas de cristales sueltos, delgados, aplastados y euhedrales, que se depositan por hundimiento desde la interfase aire-agua o desde el mismo cuerpo de agua.
- b) Capas o costras, con fábricas rígidas y bien trabadas, en que los cristales crecen en el fondo compitiendo por el espacio y dirigidos hacia arriba.
- c) Depósitos detríticos, por transporte de corrientes o flujos gravitacionales. Estos flujos retrabajan los cristales generando clastos de cristales redondeados, sobre todo de evaporitas menos solubles como es el caso del yeso (Kendall, 1992).
- d) Crecimientos de cementación e intrasedimentarios, por salmueras intersticiales.

Lago salado efímero (*saline pan, ephemeral saline-lake, salt pan, salina, lago-playa salado*) (Figura 3.4): corresponden a áreas que en la mayor parte del tiempo están secas. Se presentan en depocentros de cuencas endorreicas y están rodeadas por llanuras fangolíticas salinas. La estratificación clásica consiste en capas evaporíticas separadas por superficies de disolución o niveles arcillosos con cristales de crecimiento intrasedimentario (Ortí, 2010). El ciclo de depositación fue descrito en el acápite 3.3.

En la medida que se intensifique los niveles de evaporación podría darse una evolución desde lagos profundos a lagos someros, pasando por lagos salinos (*saline lakes*) a salares (*saline pan*) (Amundson *et al.*, 2018).

Llanura fangolítica salina (*saline mudflat, salt-encrusted playa*) (Figura 3.4): corresponde a una superficie de sedimentos clásticos finos que normalmente bordean a los lagos salados. Se componen de sedimentos que van desde arcilla húmeda y plástica hasta fango arenoso rígido.

Las evaporitas que se producen en este ambiente precipitan desde salmueras subterráneas someras (< 1 m) por ascenso capilar que destruye estructuras sedimentarias como grietas de desecación o laminaciones (Kendall, 1992). Lo anterior produce una mezcla caótica de evaporitas inmersas en una matriz de fango macizo.

En este ambiente Ortí (2010) reconoce:

a) Evaporitas intrasedimentarias, con precipitación en la zona vadosa (cristales finos crecidos en zonas porosas) y en la zona freática (cristales grandes desplazantes).

b) Costras salinas de eflorescencias, son superficiales y derivan de la evaporación de agua subterránea, son efímeras y difícilmente se conservan en el subsuelo.

Llanura fangolítica seca (*dry mudflat*) (Figura 3.4): corresponde a una superficie llana de sedimentos clásticos finos, con muchas evidencias de desecación, agrietada con polígonos de desecación métricos (Kendall, 1992). Otros nombres con los cuales se la identifica: *playa flats*, *playa mudflats*, *clay pans*, *playa*, etc. El agua subterránea es muy profunda para formar y preservar cantidades significativas de evaporitas. Es muy usual que las matrices sean silicoclásticas o fangos calcáreos, como también podría tratarse de arenas o evaporitas precipitadas previamente (Kendall, 1992).

3.4.1 Estructuras salinas menores

A continuación, se describen algunas estructuras que podrían desarrollarse en las costras salinas, cuya ocurrencia se asocia a agentes o controladores físicos y químicos determinados o a la presencia de cierta mineralogía o profundidad determinada del nivel freático.

Crestas de presión (*salt pressure ridges*): Vila (1975) las denomina escarpes de compresión y las describe como lomos alargados (3 m) de relieve suave (0,2 m de alto y 0,3 m de ancho), generadas en costras sulfatadas relativamente duras.

Nódulos salinos (*salt nodules*): se forman en bordes de canales o lagos internos por redisolución y recristalización de costras salinas, producto de neblina nocturna (Stoertz y Ericksen, 1974); poseen formas arriñonadas, un diámetro no superior a los 0,5 m y se componen principalmente de sulfato de calcio pulverulento (Vila, 1975).

Escarpes yesíferos (*gypseous ramparts*): los lagos salinos suelen estar bordeados por estas crestas yesíferas, con altura de hasta 1,5 m y ancho máximo de 6 m. Se producen por el arrastre eólico del aerosol evaporado sobre los cuerpos de agua, lo que permite la precipitación de minerales en los bordes (Stoertz y Ericksen, 1974).

Grietas poligonales (*drying cracks*): polígonos centimétricos, con profundidades de 2-3 cm, ancho de 0,5-1 cm, no orientados y con 4 lados, o polígonos orientados con cinco a seis lados

con áreas individuales de hasta 3 m². Se forman en sectores en que la costra es dura, seca y sulfatada como respuesta al descenso del nivel freático (Vila, 1975).

Grietas de desecación (*mud-crack polygons*): corresponden a polígonos centimétricos y no orientados, que se desarrollan en superficies de sustrato limoso y seco. En el contexto de salares, se asocian a playas de arcilla, limo y arena fina (*playa clay*), por inundaciones poco frecuentes (Stoertz y Ericksen, 1974).

Depresiones de disolución (puquios, dolinas, piscinas de salmueras o *brine pools*): depresiones subcirculares a ovaladas. Su diámetro disminuye en profundidad y permite el crecimiento de sales en los costados. Se producen por procesos de disolución controlados por vertientes con influjos subterráneos (Stoertz y Ericksen, 1974).

Lóbulos salinos (cúspides salinas o *salt cusps*): morfologías lobulares que poseen escarpes de 30 cm de alto. Indican el contacto entre una costra antigua y una joven. La costra salina joven forma una leve depresión (Stoertz y Ericksen, 1974).

Montículos salinos (montículos de freatófitas, *phreatophyte mounds* o *moundsprings*): se originan por precipitación de sales disueltas de la transpiración de plantas freatófitas, que cementan un montículo en la medida que crecen, en caso que la planta muera si las raíces dejan de conectarse con el nivel freático, el montículo se destruye (Vila, 1975).

Canales salinos: corresponden a conductos de circulación de agua de amplitud y profundidad restringida (0,5 m), su longitud podría cruzar el depósito salino entero. Normalmente se dan por el afloramiento de aguas subterráneas (Vila, 1975).

3.5 Asociaciones de ambientes

El modelo clásico para entender las facies de evaporitas continentales es la de una cuenca endorreica con evaporitas que se acumulan en las partes centrales (o en los depocentros) en asociación a salares y *playa-lake* rodeados de llanuras fangolíticas salinas y secas. De acuerdo a Alonso (2006) una cuenca endorreica intramontana presenta los siguientes subambientes, desde los bordes al centro:

- a) Abanicos aluviales coalescentes (*alluvial fan*).
- b) Llano arenoso con formación de dunas y otros tipos de acumulaciones eólicas (*sand flat*).

c) Llanura fangolítica seca con eflorescencias salinas (*dry mudflat*).

d) Llanura fangolítica salina (*saline mudflat*).

e) Salar con ocasionales cuerpos salinos lacustres someros (*salt pan*) (Figura 3.4).

De modo que los salares se emplazarían en sectores terminales de abanicos aluviales, en donde se formarían playas lacustres (*playas lake*) (Amundson *et al.*, 2018) y ambientes palustres (bofedales o vegas) entre canales o lagos someros perennes, con depositación de capas negras ricas en materia orgánica (como frústulas de diatomeas bentónicas), fangolitas con raíces y capas ricas en carbonatos y yeso (Sáez *et al.*, 2016).

Por último, Smoot y Lowenstein (1991. En: Ortí, 2010) reconocen las siguientes asociaciones de subambientes como combinaciones frecuentes en cuencas endorreicas.

Abanico aluvial - lago salado: sus facies se engranan lateralmente, lo más común es que se traten de lagos salados efímeros y/o llanuras fangolíticas secas. Una variante típica es la asociación abanico aluvial, río y lago permanente, con aportes fluviales permanentes.

Río - lago salado: lo más frecuente es la asociación río efímero, lago salado efímero (y/o llanura fangolítica seca) y campos interdunares. Una variante sería la asociación río permanente, lago permanente y campos interdunares

Surgencia - lago salado efímero - lago salado permanente: en estos casos los lagos están alimentados por surgencias subaéreas o subterráneas.

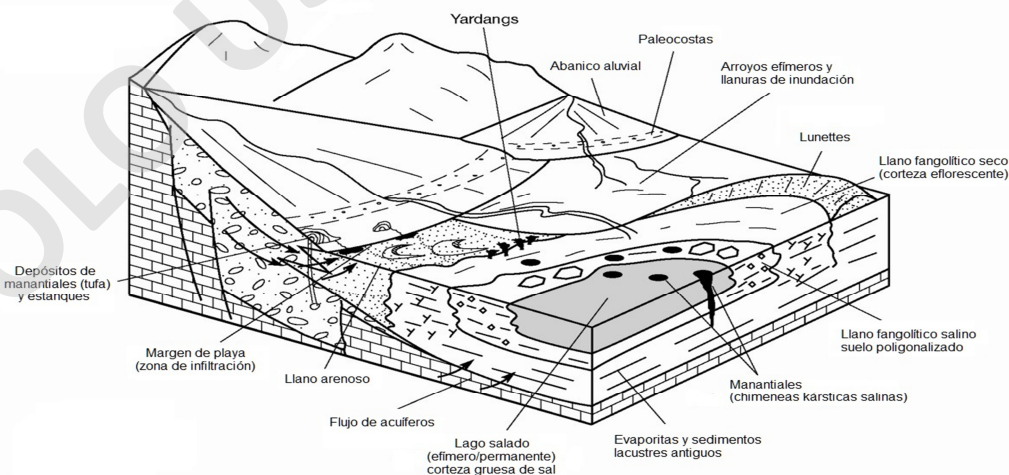


Figura 3.4: Diagrama idealizado de subambientes y algunas morfologías que ocurren en cuencas endorreicas áridas, puede aplicarse a cuencas intramontanas. Extraída y modificada de Shaw *et al.* (2011), después de Hardie, Smooth y Eugster (1978).

CAPÍTULO 4: FACIES SEDIMENTARIAS Y SISTEMAS DE DEPOSITACIÓN

En este capítulo se presenta un análisis integrado de la información litoestratigráfica de los 1,5 m superficiales del salar del Huasco, levantada en este trabajo y en estudios anteriores. El objetivo es determinar la distribución de unidades, por medio de la correlación de asociaciones de facies, e inferir ambientes y mecanismos que controlaron la depositación de éstas.

De manera que se describieron siete columnas estratigráficas levantadas en calicatas realizadas durante el terreno de este trabajo. En base a esta información se definieron facies y asociaciones de facies, a la cual se le integró información extraída de calicatas realizadas por CORFO (1981) en el salar (Figura 4.1).

Por último, se confeccionó un perfil O-E, en el cual se presentan correlaciones de asociaciones de facies con el fin de estudiar la distribución espacial y geometría de los cuerpos, e interpretar la temporalidad de los procesos de depositación (Figura 4.1).

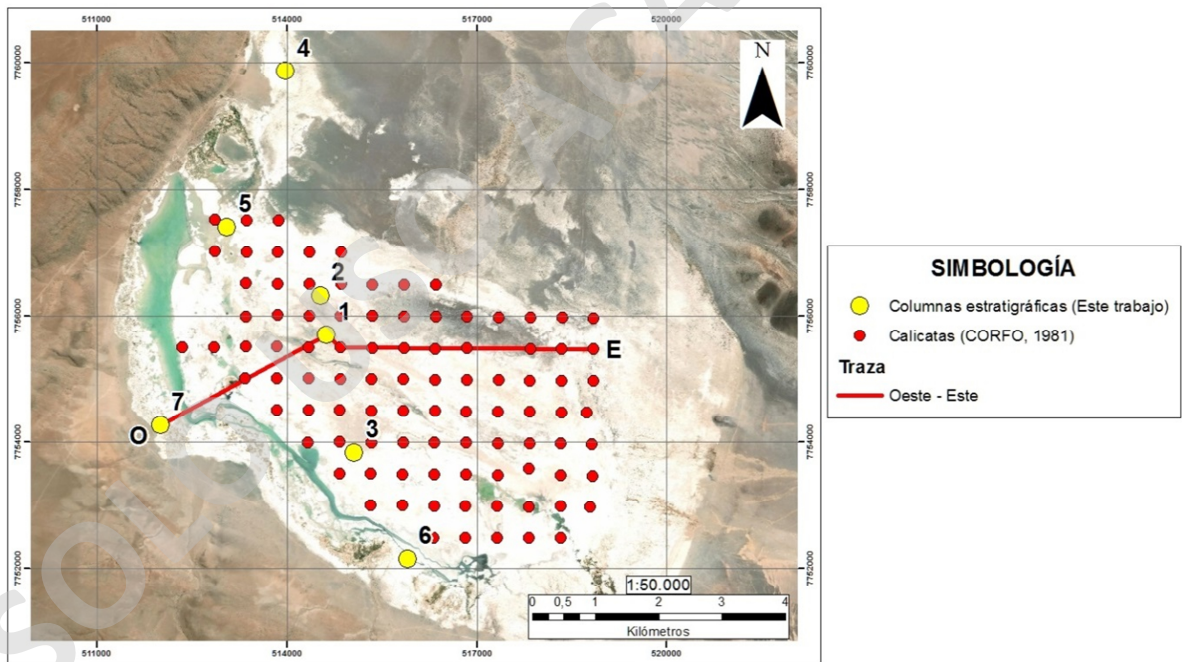


Figura 4.1: Distribución de columnas estratigráficas de este estudio y calicatas realizadas por CORFO (1981). La traza O-E presenta la ubicación de la sección geológica.

4.1 Columnas estratigráficas

En este apartado, se expone la información de las siete columnas estratigráficas levantadas en terreno, con su respectiva descripción litoestratigráfica, leyenda y simbología. Las descripciones fueron realizadas en muestras obtenidas en cada una de las capas identificadas en terreno, en las que se estableció granulometría y porcentaje de componentes utilizando lupa binocular. La mineralogía de las sales evaporíticas fue determinada por espectrometría de reflectancia en Terraspec.

En general, las columnas estratigráficas están compuestas por depósitos clásticos de granos finos de arcillolitas a areniscas gruesas, en algunos casos con cemento calcáreo, presencia de sales intersticiales y nódulos salinos, además de niveles compuestos predominantemente por evaporitas.

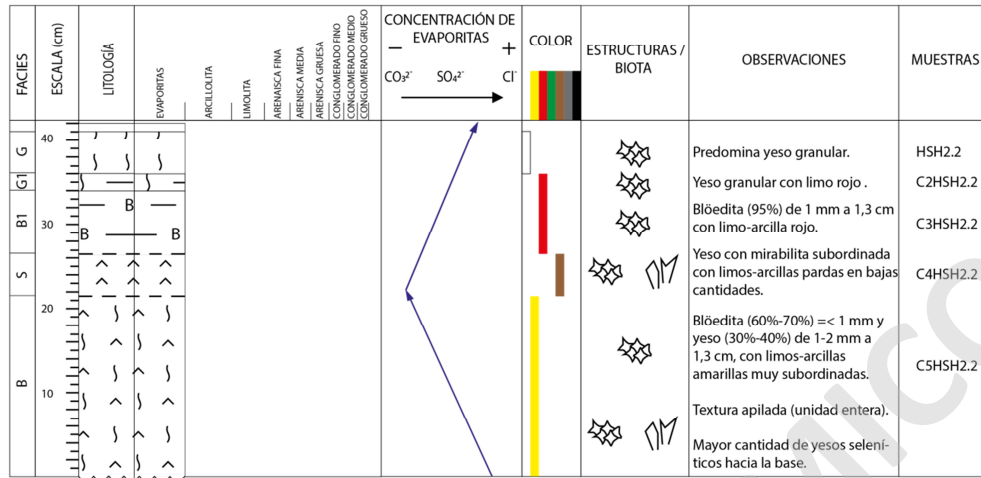
A continuación se describe cada columna:

Columna Estratigráfica 1

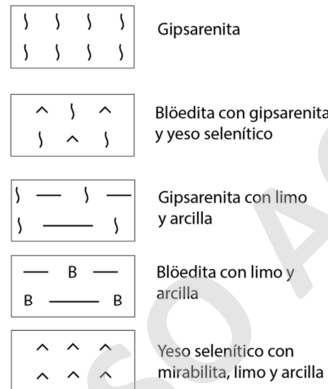
Se ubica en el núcleo del salar (Figura 4.1), los depósitos expuestos en la columna estratigráfica (Figura 4.2) son predominantemente cristalinos (Figura 4.3) y está constituida por 41 cm de cristales de sulfatos, sin base expuesta, con textura apilada. Los sulfatos identificados corresponden a mirabilita, blöedita, yeso selenítico y gipsarenita (definición de Ortí, 2010), los que tienden a presentar disminución de tamaño de los cristales hacia el techo. Posee detritos de tamaño limo-arcilla subordinados.

A continuación, se describe la columna de base a techo como sigue:

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA 1



LEYENDA



SIMBOLOGÍA

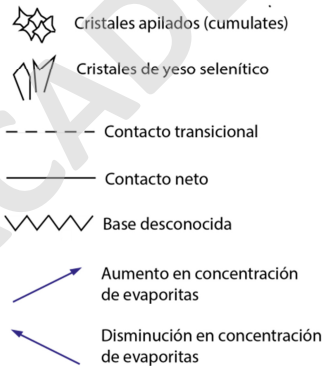


Figura 4.2: Columna estratigráfica 1.

0-21,5 cm capa de evaporitas de base desconocida en que predomina blöedita (60-70%) blanca y granular, de tamaño ≤ 1 mm, con subordinación de gipsarenita y yeso selenítico translúcidos y granulares, y hábito prismático en el caso de los yesos de mayor tamaño. Posee coloración amarilla por la presencia minoritaria de fango que no supera los 2-3%. Los cristales se presentan apilados (*cumulates*). Corresponde a la facies B.

5 cm capa de evaporitas en contacto transicional con la unidad anterior. Contiene cristales (70%) que se disponen apilados en los que predomina yeso selenítico translúcido y de hábito granular (30%) o prismático en el caso de los cristales de mayor tamaño (30%), también

presenta mirabilita (10%) blanca y granular de tamaño ≤ 1 mm. El resto (30%) se compone de fango pardo. Corresponde a la facies S.

7,5 cm capa de cristales apilados de blöedita (95%) que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. El tamaño promedio de los cristales es de 1 mm, con hábito granular y tabular, prismático para los de mayor tamaño (hasta 1,3 cm). Contiene fango (5%) de color rojo. Corresponde a la facies B1.

2 cm capa de gipsarenitas (80-85%) que sobreyace en contacto neto y concordante a la unidad anterior. Se observa desarrollo de cristales apilados, donde el yeso se presenta blanco, con hábito granular, prismático y tabular. El 10-15% restante está compuesto de fango de color pardo-rojizo. Corresponde a la facies G1.

5 cm capa de gipsarenitas (100%) apiladas que sobreyace en contacto neto y concordante a la unidad anterior. Se observa que predomina yeso con hábito granular y un tamaño promedio ≤ 1 mm; también de hábito tabular y prismático. Corresponde a la facies G.

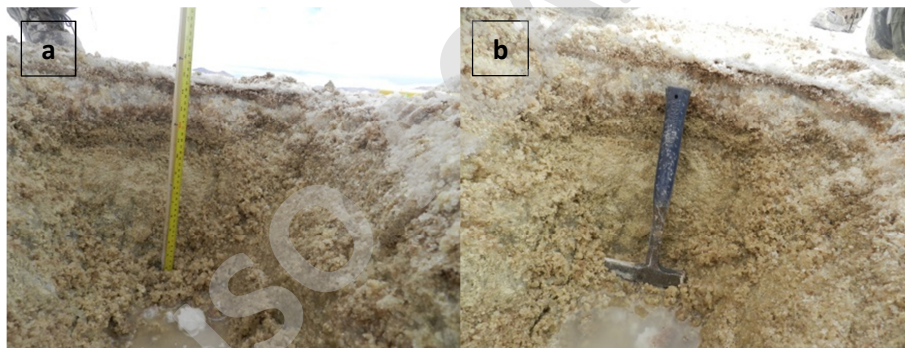


Figura 4.3: Facies de la columna 1. En (a) y (b) se presenta la columna completa y sus facies, además se observa que en la base de la columna surge el nivel freático.

Columna Estratigráfica 2.

Se ubica 600 metros al noroeste de la Columna 1, en el núcleo del salar (Figura 4.1). Los depósitos expuestos en la columna estratigráfica (Figura 4.4) tienen un espesor de 36 cm (Figura 4.5) y registra en su base areniscas gruesas con 95% de cristales de yeso retrabajados, sobre los cuales se dispone en contacto neto a transicional arenisca fina con cristales intersticiales de blöedita y yeso. También en contacto transicional, en el techo se expone una facies cristalina compuesta de cristales de blöeditas y yesos apilados.

A continuación, se describe la columna estratigráfica de base a techo como sigue:

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA 2

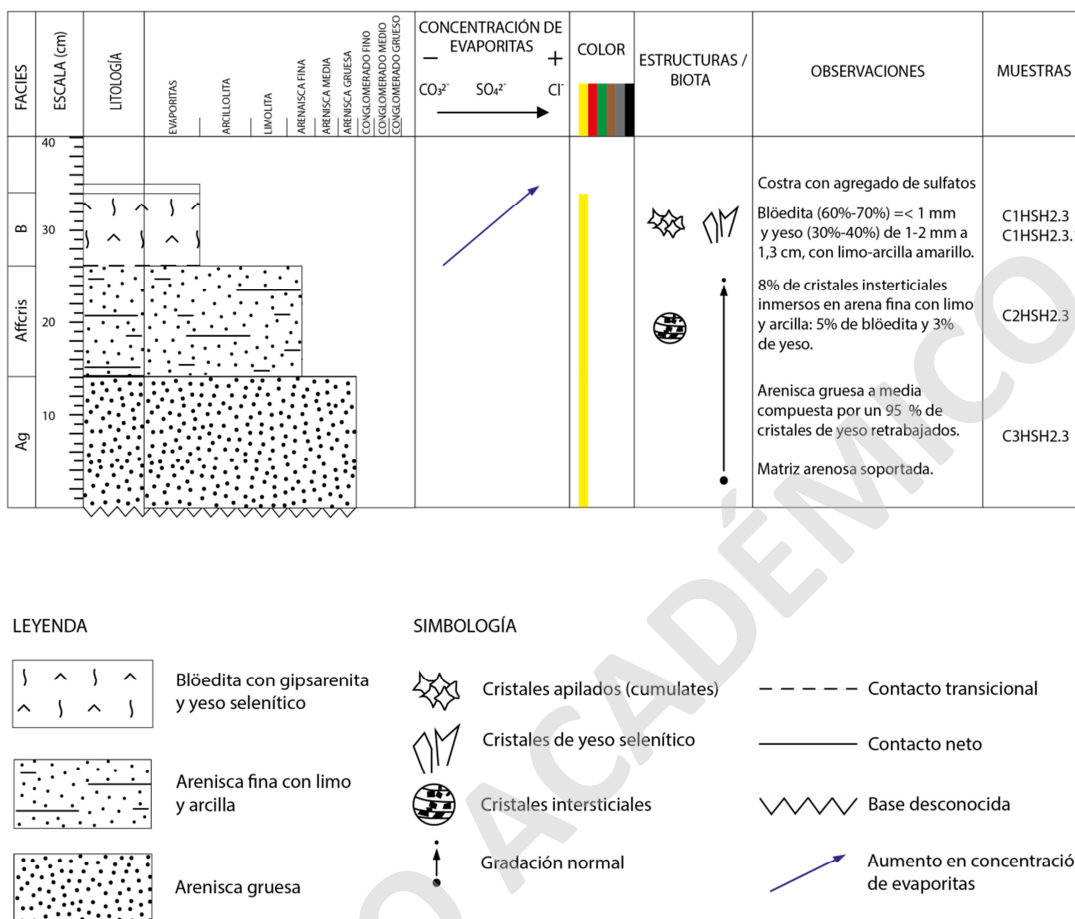


Figura 4.4: Columna estratigráfica 2.

0-14 cm capa de arenisca gruesa de base desconocida. Posee un tamaño promedio =< 1 mm, de carácter macizo y moderada a buena selección. Predominan clastos con formas ovaladas (95%), de color blanco y translúcido, interpretados como yesos retrabajados. El 5% restante corresponde a 3% de líticos y 2% de cristales negros micáceos (biotita) de tamaño =< 0,5 mm. Su base es desconocida. Corresponde a la facies Ag.

12 cm capa de arenisca fina con limo y arcilla (92-93%) que sobreyace en contacto neto a transicional con tendencia granodecreciente a la unidad anterior. Presenta carácter macizo con cristales intersticiales de blöedita (5%) blanca, con hábito granular alargado de tamaño =< 1 mm y cristales de yeso translúcido (2-3%). Corresponde a la facies Affcris.

8 cm capa de evaporitas apiladas con una pequeña proporción de detritos finos que sobreyace de forma transicional a la unidad anterior. Posee blöedita (60-70%) blanca y granular de tamaño ≤ 1 mm, yeso (30-40%) translúcido y granular de tamaño ≤ 1 mm. Los yesos pueden alcanzar tamaños máximos de 3 cm cuyos hábitos pueden ser granulares, prismáticos o tabulares. Posee coloración amarilla por la presencia minoritaria de fango que no supera los 2-3%. Corresponde a la facies B.

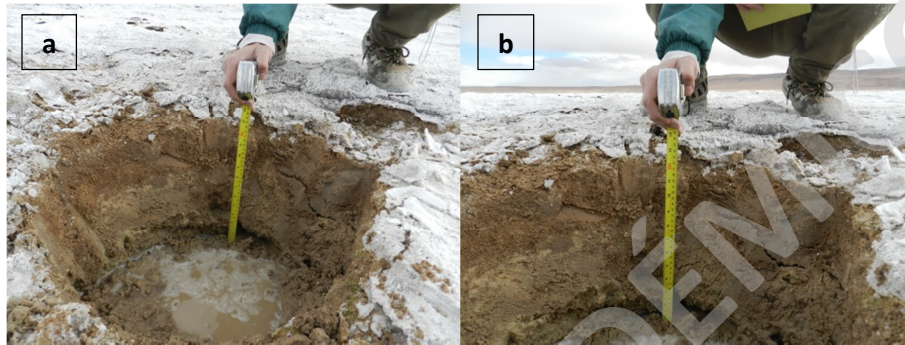


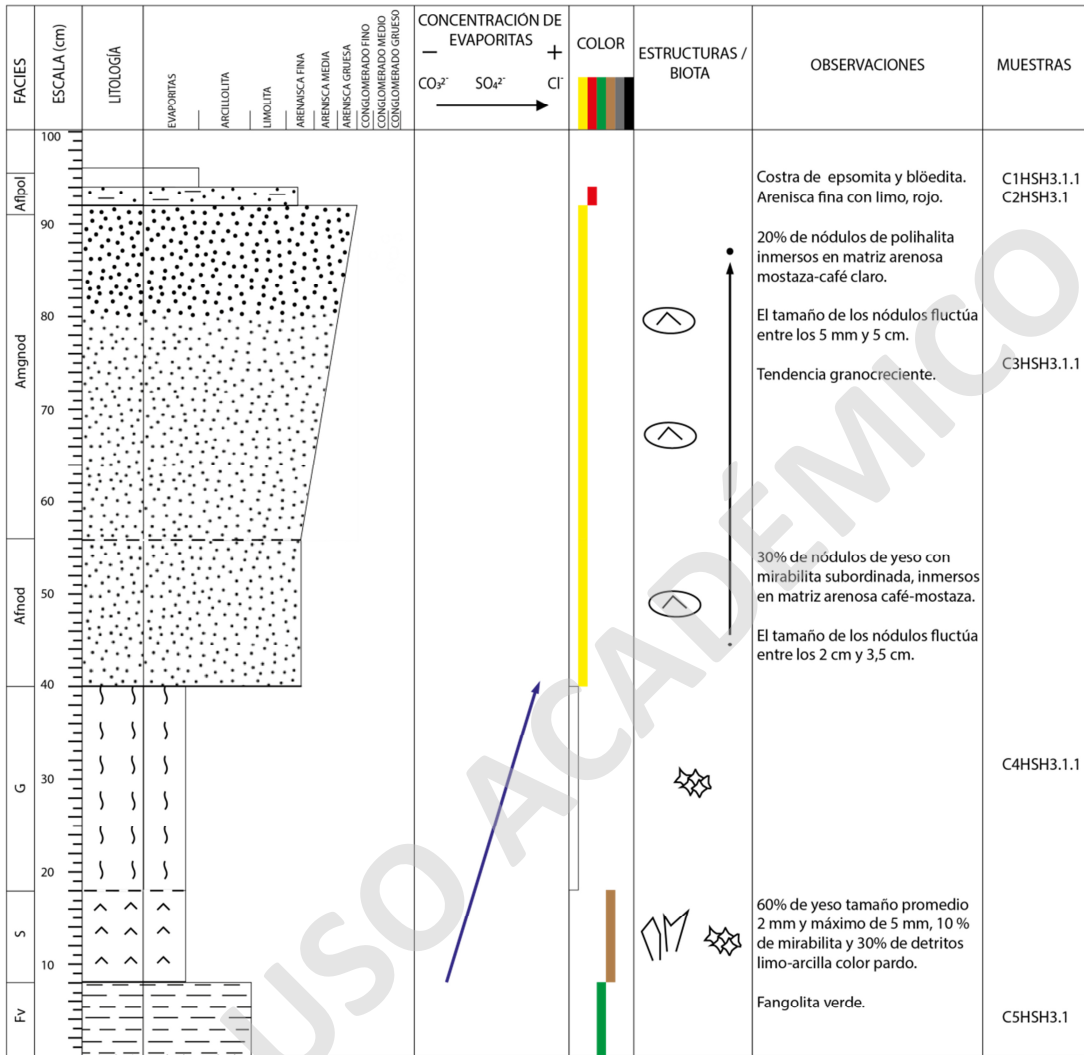
Figura 4.5: Facies de la columna 2. En (a) y (b) se presenta la columna completa y sus facies. En la base expuesta se observa el nivel freático.

Columna Estratigráfica 3.

Se encuentra en el núcleo del salar (Figura 4.1) y presenta un espesor de 96 cm (Figura 4.7). En la base de la columna estratigráfica (Figura 4.6) se exponen fangolitas, seguida en contacto neto por una capa compuesta por cristales de yesos seleníticos y gipsarenitas, que infrayace en contacto transicional a areniscas con nódulos de yeso, mirabilita y polihalita. Sobre la unidad anterior, se dispone en contacto neto una capa de arenisca fina con limo rojo hasta la actual costra salina de epsomita y blöedita eflorescentes.

A continuación, se describe la columna estratigráfica de base a techo como sigue:

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA 3



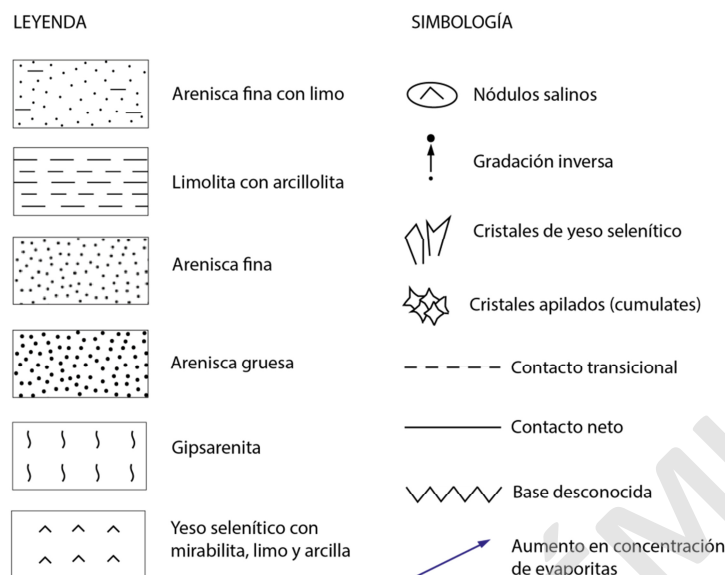


Figura 4.6: Columna estratigráfica 3.

0-8 cm capa de fangolita verde de carácter maciza y húmeda de base desconocida, se distinguen cristales de yeso (15%) blancos y algunos cristales de biotita. Corresponde a la facies Fv.

10 cm capa de evaporitas dispuestas de forma concordante y en contacto neto sobre la unidad anterior. Está constituida por cristales apilados (70%) de yeso selenítico apilado que se presenta de forma translúcida y granular (30%), o translúcida y prismática en el caso de los cristales de mayor tamaño (30%); también presenta mirabilita (10%) blanca y granular de tamaño ≤ 1 mm. El 30% restante es fango pardo. Corresponde a la facies S.

22 cm capa de gipsarenitas de color blanco (100%) que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. Se desarrollan cristales apilados, en que predomina el hábito granular y un tamaño promedio ≤ 1 mm, también se presentan con hábito tabular y prismático. El tamaño de los cristales disminuye hacia el techo. Corresponde a la facies G.

16 cm capa de arenisca fina con nódulos de yeso y mirabilita que sobreyace en contacto neto a la unidad anterior. La unidad es maciza y de color café-mostaza compuesta por clastos (40%) marrones-amarillos e incluso rosados, subredondeados, con baja esfericidad y tamaños ≤ 1 mm (¿ceniza?); cristales (20%) blancos, subredondeados, de baja esfericidad y tamaño $\leq 0,5$ mm similares a los presentes en nódulos; y clastos (10%) negros, angulosos-subangulosos y de

baja esfericidad. Presenta nódulos translúcidos (30%) de 2 cm a 3,5 cm, compuestos de agregados de cristales de yeso y mirabilita subordinada con hábitos granulares, prismáticos y tabulares. Es de moderada selección y posee una tendencia granodecreciente. Corresponde a la facies Afnod.

36 cm capa de arenisca fina a gruesa con nódulos de polihalita que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. La arenisca es maciza, de color mostaza y se compone por clastos (50%) marrones-amarillos e incluso rosados, subredondeados, con baja esfericidad y tamaño ≤ 1 mm (\approx ceniza?); cristales (20%) blancos, subredondeados y de baja esfericidad, de tamaño $\leq 0,5$ mm y similares a los cristales de los nódulos; y clastos (10%) negros, angulosos-subangulosos, de baja esfericidad y de tamaño $\leq 1/10$ mm. Presenta nódulos translúcidos (20%) de agregados de cristales de polihalita con tamaños promedios de los nódulos de ≤ 2 mm a 5 mm y máximos de 5 cm. Posee mala selección. Corresponde a la facies Amgnod.

2 cm capa de arenisca fina con limo de color rojo que sobreyace en contacto concordante y neto a la unidad anterior. Corresponde a arenisca polimíctica y en terreno presenta una coloración roja en estado húmedo. Se compone de clastos (80%) marrones-amarillos e incluso rosados, subredondeados, con baja esfericidad y tamaño ≤ 1 mm (\approx ceniza?) y cristales blancos (10%) de baja esfericidad y subredondeados con tamaño promedio de 0,5 mm. El 10% restante lo constituye clastos negros de baja esfericidad, angulosos-subangulosos de tamaños $\leq 1/10$ mm. Presenta moderada a buena selección. Corresponde a la facies Aflpol.



Figura 4.7: Facies de la columna 3. a) Facies G y Afnod; b) facies Amgnod.

Columna Estratigráfica 4.

Se ubica en el borde del extremo noroeste del salar (Figura 4.1). La columna estratigráfica (Figura 4.8) tiene 63 cm de espesor, presenta en su base arcillolita calcárea negra con raíces, en contacto neto le sobreyacen fangolitas y areniscas finas, calcáreas y con raíces con

tendencia estrato y grano creciente hasta la parte media de la columna estratigráfica (Figura 4.9).

A continuación, se describe la columna estratigráfica de base a techo, como sigue:

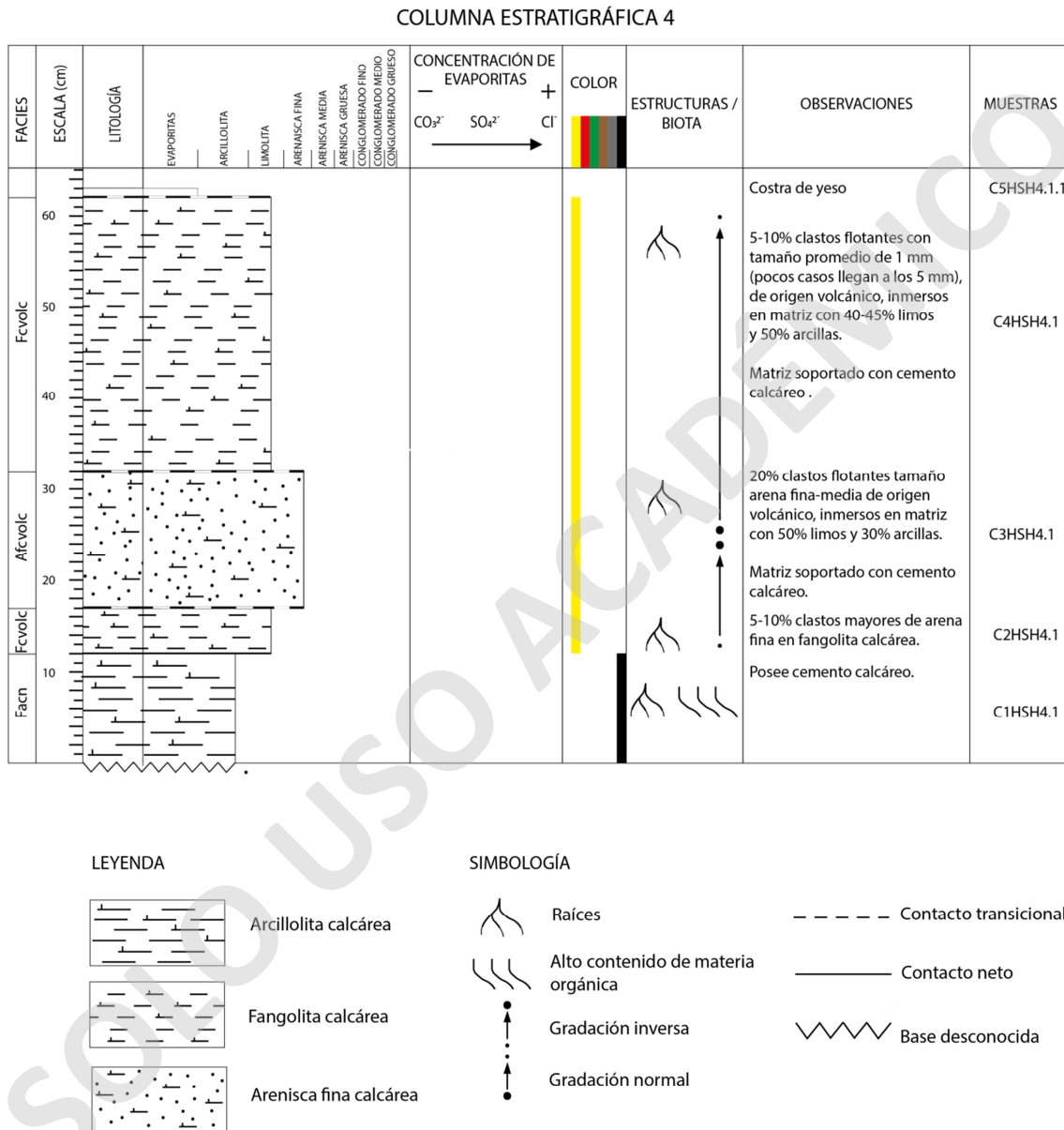


Figura 4.8: Columna estratigráfica 4.

0-12 cm capa de arcillolita calcárea negra de base desconocida, con 2% de arena fina, 13% limo y 85% arcilla, con raíces. Los clastos mayores de arena fina y limo, corresponden a líticos

volcánicos negros (10%) y cristales translúcidos (5%). La matriz (85%) es arcillosa y maciza con cemento calcáreo. La selección es moderada y en estado húmedo es de color negro-oscuro con alto contenido de materia orgánica. Corresponde a la facies Facn.

5 cm capa de fangolita calcárea con raíces que sobreyace en contacto concordante y neto a la unidad anterior. Los clastos mayores alcanzan tamaño arena fina-media (6%) con promedio de 1 mm y grava fina de hasta 5 mm (4%). Corresponden a clastos flotantes monomícticos caracterizados como líticos negros, mayoritariamente subredondeados, de origen volcánico con textura porfírica con fenocristales de hornblenda y plagioclasa y masa fundamental afanítica y negra. La matriz (90%) de la fangolita es maciza y arcillosa con cemento calcáreo, en que se identifican algunos clastos tamaño limo-arena fina correspondientes a: cristales translúcidos con hábitos granulares, tabulares y lenticulares (¿yeso?), subredondeados-redondeados y de baja esfericidad, además de algunos cristales de biotita y micas blancas, como también clastos blanquecinos-rosáceos (¿ceniza?). Es de mala selección. Corresponde a la facies Fcvolc.

15 cm capa de arenisca fina calcárea con raíces que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. Los clastos mayores (20%) presentan las mismas características que los descritos en la unidad anterior. De igual manera, la matriz (80%) es maciza, arcillosa con cemento calcáreo y contiene algunos clastos tamaño limo-arena fina semejantes a la unidad anterior: cristales translúcidos, de biotita y micas blancas, además de clastos blanquecinos-rosáceos. Por lo que, si bien ambas capas composicionalmente son similares, se distinguen por su granulometría. Corresponde a la facies Afcvolc.

30 cm capa de fangolita calcárea con raíces que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. Los clastos mayores (5%) son de tamaño arena fina-media a grava fina (5 mm) y corresponden a clastos flotantes monomícticos de líticos negros con las mismas características descritas en las dos unidades anteriores. Su matriz (95%) es maciza y arcillosa con cemento calcáreo, con algunos clastos tamaño limo-arena fina de la misma composición que en las dos unidades anteriores (cristales translúcidos con hábitos granulares, tabulares y lenticulares, subredondeados-redondeados y de baja esfericidad, cristales de biotita, micas blancas y clastos blanquecinos-rosáceos). Es de mala selección. Corresponde a la facies Fcvolc.

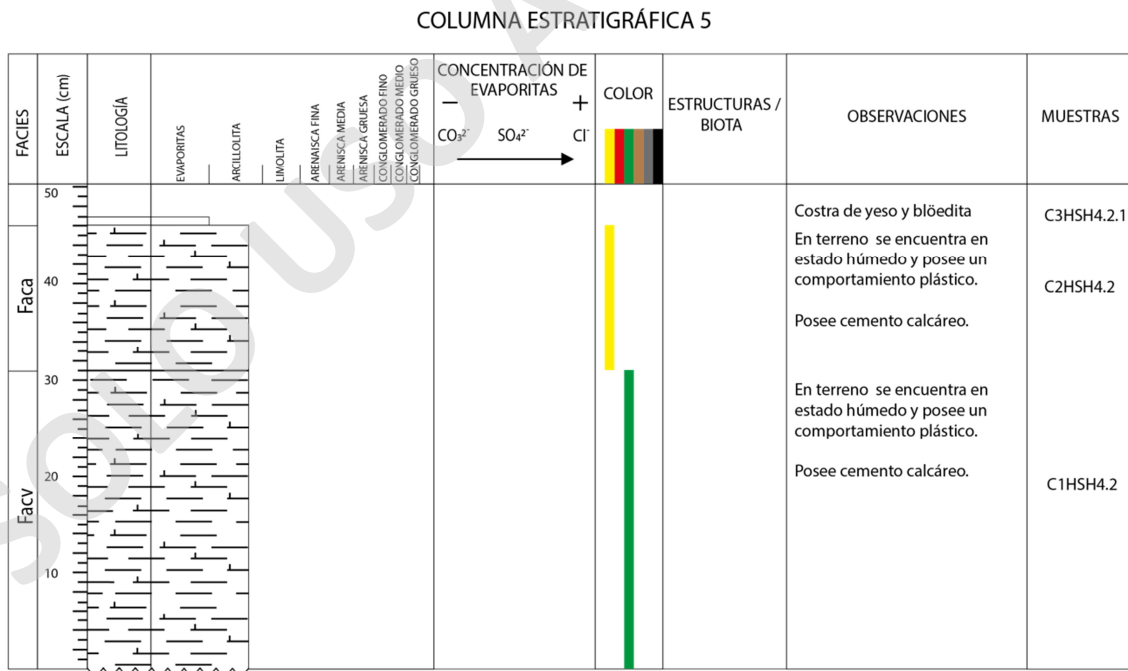


Figura 4.9: Facies de la columna 4. a) Contacto entre arcillolita calcárea negra (Facn) en la base y fangolita calcárea con raíces (Fcvolc), a la altura del lápiz; b) facies Afcvolc y Fcvolc; c) facies Fcvolc.

Columna Estratigráfica 5.

Se ubica en el borde noroeste, próximo al centro del salar (Figura 4.1). La columna estratigráfica (Figura 4.10) tiene 46 cm de espesor (Figura 4.11), en cuya base se exponen arcillolitas calcáreas verdes, sobre las cuales se disponen en contacto neto y concordante, arcillolitas calcáreas de color pardo blanquecino.

A continuación, se describe la columna estratigráfica presenta de base a techo, como sigue:



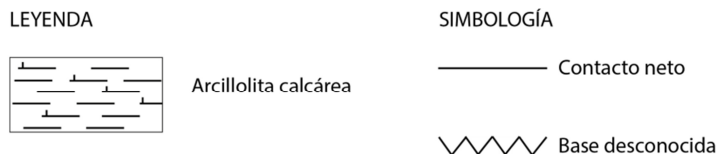


Figura 4.10: Columna estratigráfica 5.

0-31 cm capa de arcillolita calcárea, verde y plástica, con base desconocida. De carácter macizo, su color verde y comportamiento plástico se registra en terreno en estado húmedo. Es de buena selección. Corresponde a la facies Facv.

15 cm capa de arcillolita calcárea, blanquecina y plástica que sobreyace en contacto concordante y neto a la unidad anterior. Posee un carácter macizo, su coloración blanquecina se describe en terreno, en estado húmedo, como amarilla-mostaza con comportamiento plástico. Corresponde a la facies Faca.



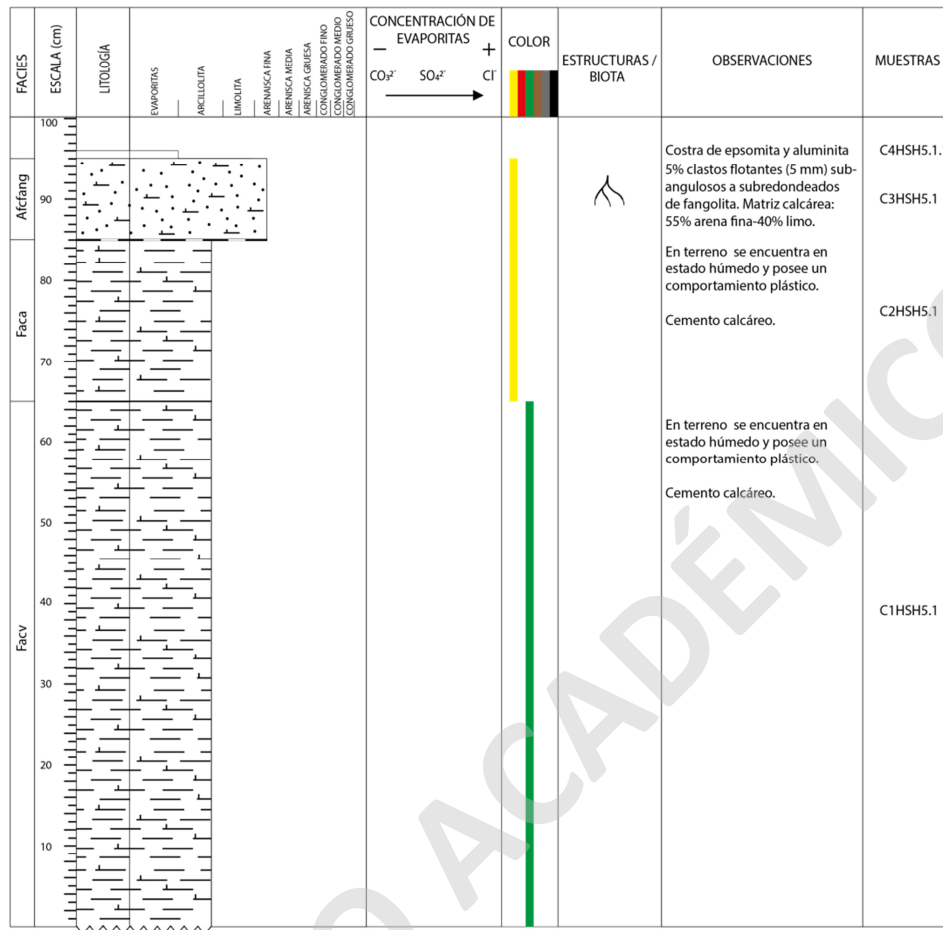
Figura 4.11: Facies de la columna 5. a) Con el nivel freático ubicado en la facies basal Facv; b) facies Faca.

Columna Estratigráfica 6.

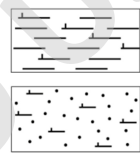
Se ubica en el margen sur del salar (Figura 4.1). La columna estratigráfica (Figura 4.12) tiene 96 cm de espesor (Figura 4.13), en cuya base se exponen arcillolitas calcáreas, verdes y plásticas; seguidas en contacto neto por arcillolitas calcáreas blanquecinas y plásticas, y hacia el techo en contacto transicional, le sobreyace arenisca fina calcárea, amarilla y con raíces.

A continuación, se describe la columna estratigráfica de base a techo, como sigue:

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA 6



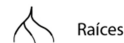
LEYENDA



Arcillolita calcárea

Arenisca fina calcárea

SIMBOLOGÍA



----- Contacto transicional

———— Contacto neto

∩∩∩∩ Base desconocida

Figura 4.12: Columna estratigráfica 6.

0-65 cm capa de arcillolita calcárea, verde y plástica de base no reconocida. De carácter macizo, su color verde y comportamiento plástico se registra en terreno en estado húmedo. Es de buena selección. Corresponde a la facies Facv.

21 cm capa de arcillolita calcárea, blanquecina y plástica que sobreyace en contacto concordante y neto a la unidad anterior. Posee un carácter macizo y es de coloración blanquecina, en estado húmedo se describe amarilla-mostaza con comportamiento plástico. Es de buena selección. Corresponde a la facies Faca.

10 cm capa de arenisca fina calcárea amarillenta con raíces, que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. Los clastos mayores corresponden a un 5% con tamaño promedio de 5 mm, de baja esfericidad y subangulosos a subredondeados, monomíticos de fangolitas. La matriz (95%) es arenosa-arcillosa y posee cemento calcáreo, es de color amarillo-mostaza en estado húmedo y no presenta comportamiento plástico. Es de mala selección. Corresponde a la facies Afcfang.



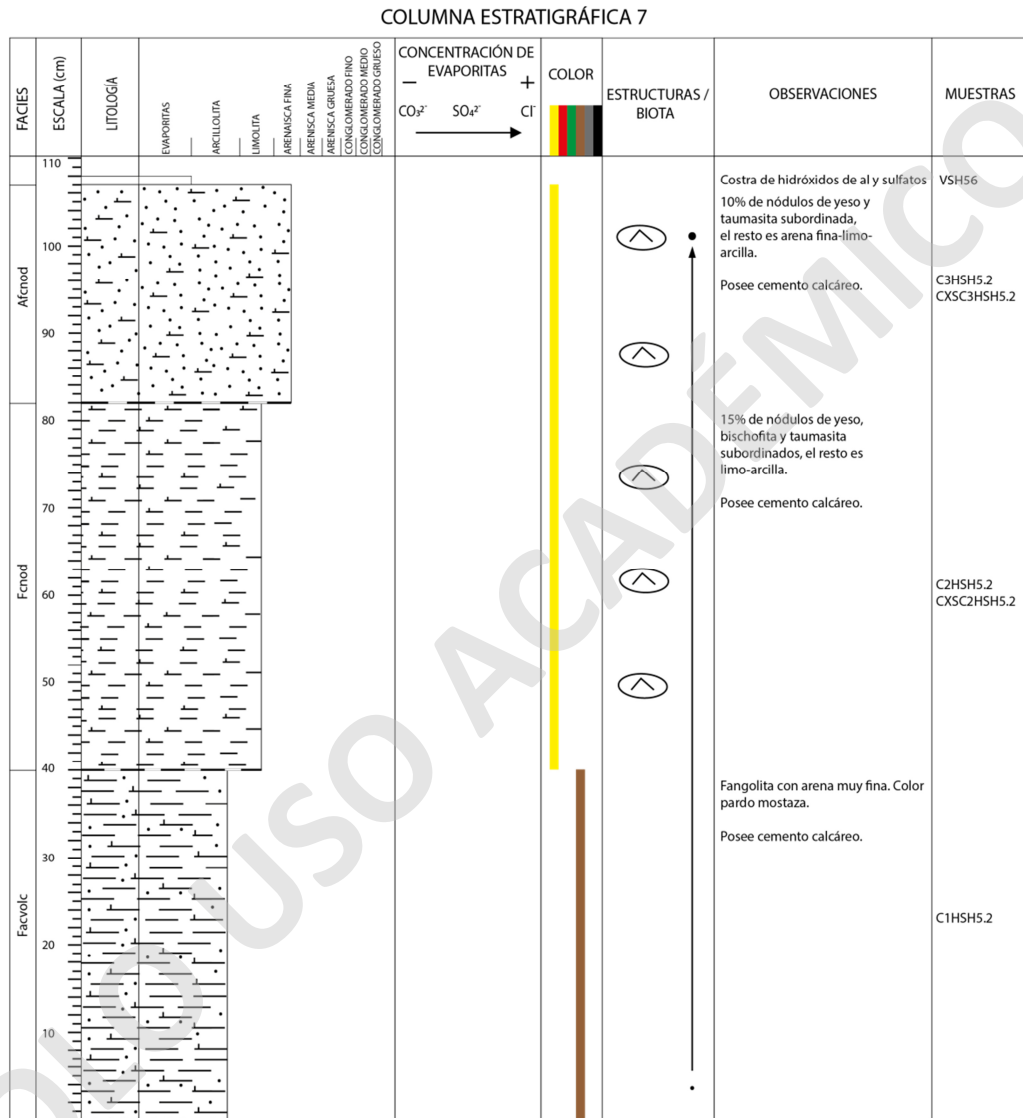
Figura 4.13: Facies de la columna 6. a) Vista general de la columna; b) *zoom* facies Facv, Faca y Afcfang, con énfasis en el contacto entre Facv y Faca; c) *zoom* en facies Faca y Afcfang; d) facies Afcfang.

Columna Estratigráfica 7.

Se ubica en el margen oeste del salar (Figura 4.1). La columna estratigráfica (Figura 4.14) tiene un espesor de 108 cm y expone en la base arcillolita arenosa calcárea parda que infrayace en contacto transicional a fangolita calcárea con nódulos de yeso, bischofita y taumasita. A la

unidad anterior, le sobreyace en contacto transicional arenisca fina calcárea con 10% de nódulos de yeso y taumasita (Figura 4.15).

A continuación, se describe la columna estratigráfica de base a techo:



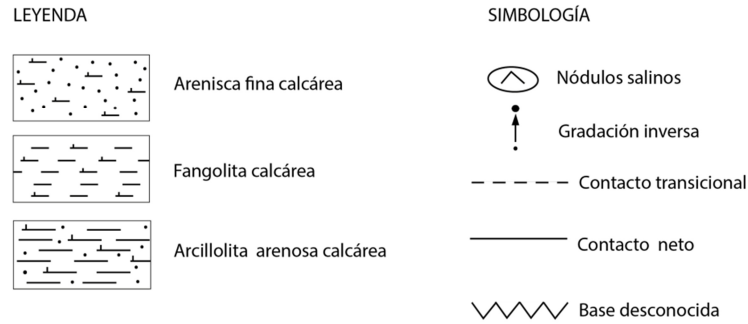


Figura 4.14: Columna estratigráfica 7.

0-40 cm capa de arcillolita arenosa calcárea de color pardo-mostaza y de base desconocida. De empaquetamiento matriz soportado, los clastos mayores corresponden a líticos negros, subangulosos, de tamaño limo-arena muy fina. La matriz es arcillosa con cemento calcáreo, maciza y posee un color pardo-mostaza en estado húmedo. Es moderadamente seleccionada. Corresponde a la facies Facvolc.

42 cm capa de fangolita calcárea con nódulos de yeso, bischofita y taumasita, que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. La capa es maciza y arcillosa con cemento calcáreo, dentro de la cual se distinguen líticos negros (15%) subangulosos de tamaño limo-arena muy fina, de color pardo-mostaza en estado húmedo. Esta capa posee una tendencia granocreciente en la parte superior. Presenta agregados de cristales en nódulos (15%) de yeso con bischofita y taumasita subordinadas, el tamaño de los nódulos varía entre grava fina a grava media. Es de moderada selección. Corresponde a la facies Fcnod.

25 cm capa de arenisca fina calcárea con nódulos de yeso y taumasita, que sobreyace en contacto transicional a la unidad anterior. La unidad es maciza y arcillosa con cemento calcáreo, se distinguen líticos negros (15%) subangulosos con tamaño limo-arena muy fina. Presenta agregados de cristales pulverulentos en nódulos (10%) de yeso con taumasita subordinada, el tamaño de los nódulos varía entre grava fina a media. Presenta mala selección. Corresponde a la facies Afcnod.

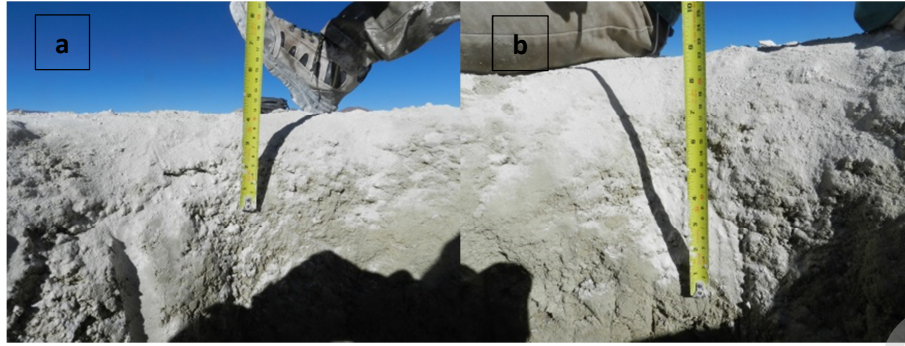


Figura 4.15: Facies de la columna 7. a) Parte superior de la columna (facies Afcnod); b) contacto entre facies Afcnod y Fcnod. El aspecto es homogéneo, por lo que la facies Facvolc en terreno es similar a Fcnod (estas facies se distinguen a través de la descripción en lupa binocular y la información mineralógica aportada por Terraspec).

4.2 Facies sedimentarias

En las columnas estratigráficas realizadas en este trabajo y descritas en el punto anterior se identificaron veinte facies sedimentarias, clasificadas como clásticas y químicas, utilizando la definición y criterios de Walker (1992).

Facies Clásticas.

Fueron definidas de acuerdo al tamaño de granos, la composición de clastos y el color de éstos. Incluyen desde arcillolitas a areniscas gruesas las que, en algunos casos, presentan estratificación gradada (normal o inversa), cemento calcáreo y/o la presencia de algún otro rasgo de connotación genética como nódulos salinos y sales intersticiales (Tabla 4.1).

Se distinguen 15 facies, como sigue:

Facies Ag: Arenisca gruesa amarilla con 95% de fragmentos clásticos de yeso re TRABAJADO.

Facies Amg: Arenisca media a gruesa polimíctica, granocreciente con nódulos de polihalita, de color amarillo.

Facies Afnod: Arenisca fina polimíctica con nódulos de yeso y mirabilita, de color amarillo.

Facies Afcnod: Arenisca fina calcárea con nódulos de yeso y taumasita, de color amarillo.

Facies Afcvolc: Arenisca fina calcárea con clastos volcánicos flotantes, de color amarillo.

Facies Afcfang: Arenisca fina calcárea con clastos flotantes de fangolita, de color amarillo.

Facies Aflpol: Arenisca fina con limo polimíctica de color rojo.

Facies Affcris: Arenisca fina con limo y arcilla, con cristales intersticiales de blöedita y yeso, de color amarillo.

Facies Facvolc: Arcillolita arenosa calcárea con clastos flotantes volcánicos, de color pardo.

Facies Fv: Fangolita verde.

Facies Fcvolc: Fangolita calcárea con clastos volcánicos flotantes, de color amarilla.

Facies Fcnod: Fangolita calcárea con nódulos de yeso, bischofita y tamasita, de color amarilla.

Facies Facn: Arcillolita calcárea negra.

Facies Facv: Arcillolita calcárea verde.

Facies Faca: Arcilla calcárea amarilla.

En la tabla 4.1 se presenta el resumen de las características de las facies clásticas mencionadas.

Tabla 4.1: Facies sedimentarias clásticas.

FACIES CLÁSTICAS				
Código de Facies	Granulometría	Características	Color	Rasgo de connotación petrogenética
Ag	Arenisca gruesa	con 95% de yesos retrabajados	amarilla	Yesos retrabajados
Amg	Arenisca media a gruesa	polimíctica / granocreciente con nódulos de polihalita	amarilla	Gradación inversa
Afnod	Arenisca fina	polimíctica / con nódulos de yeso y mirabilita	amarilla	Polimíctica
Afcnod	Arenisca fina	cemento calcáreo / con nódulos de yeso y taumasita	amarilla	Gradación inversa
Afcvolc	Arenisca fina	cemento calcáreo / con clastos volcánicos flotantes	amarilla	Clastos volcánicos flotantes
Afcfang	Arenisca fina	cemento calcáreo / con clastos flotantes de fangolita	amarilla	Clastos flotantes de fangolita
Aflpol	Arenisca fina con limo	polimíctica	rojo	Polimíctica
Affcris	Arenisca fina con limo y arcilla	cristales intersticiales de blöedita y yeso	amarilla	Gradación normal
Facvolc	Arcillolita arenosa	cemento calcáreo / con clastos flotantes volcánicos	parda	Clastos volcánicos flotantes
Fv	Fangolita	Maciza	verde	Maciza
Fcvolc	Fangolita	cemento calcáreo / con clastos volcánicos flotantes	amarilla	Clastos volcánicos flotantes
Fcnod	Fangolita	cemento calcáreo / con nódulos de yeso, bischofita y taumasita	amarilla	Moderada selección
Facn	Arcillolita	cemento calcáreo	negra	Buena selección
Facv	Arcillolita	cemento calcáreo	verde	Buena selección
Faca	Arcillolita	cemento calcáreo	amarilla	Buena selección

Abreviaciones utilizadas:

A – Arenisca; Af – Arenisca fina; F – Fangolita (y arcillolita); g – gruesa; m – media; a – arenosa; l – limo; f – limo y arcilla (fango); c – calcárea; nod – con nódulos; pol – polimíctica; fang – con clastos de fangolita; cris – cristales intersticiales; v – verde; n – negra; a – amarilla.

Facies Químicas.

Las facies químicas se definen en base al mineral evaporítico mayoritario, sus componentes secundarios (evaporitas y/o sedimentos clásticos) y el color que presenta la unidad (Tabla 4.2).

De este modo se reconocen 5 facies:

Facies S: Yeso selenítico con mirabilita, limos y arcillas pardas.

Facies G: Gipsarenita blanca.

Facies G1: Gipsarenita con limos y arcillas rojas.

Facies B: Blöedita con gipsarenita y yeso selenítico con limos y arcillas amarillas.

Facies B1: Blöedita con limos y arcillas rojas.

En la tabla 4.2 se presenta el resumen de las características de las facies químicas mencionadas.

Tabla 4.2: Facies sedimentarias químicas.

FACIES QUÍMICAS				
Código de Facies	Mineral evaporítico mayoritario	Componentes secundarios	Color de la capa	Rasgo de connotación petrogenética
S	Yeso selenítico	con mirabilita, limos y arcillas	pardas	Textura apilada
G	Gipsarenita	N. D.	blanca	Textura apilada
G1	Gipsarenita	con limos y arcillas	rojas	Textura apilada
B	Blöedita	con gipsarenita y yeso selenítico con limos y arcillas	amarillas	Textura apilada
B1	Blöedita	con limos y arcillas	rojas	Textura apilada

4.3 Asociaciones de facies

Este trabajo utiliza la acepción propuesta por Walker (1992) sobre asociación de facies, las que fueron definidas en base a litología y son interpretadas en el contexto de tres ambientes depositacionales: para las facies evaporíticas se utilizó el modelo de Kendall (1992) y Ortí (2010), para las facies aluviales el modelo de Miall (1985) y para las facies lacustres el modelo de Fregenal y Meléndez (2010).

Asociación de facies 1 (AF1): facies (S+G+G1+B+B1).

Yesos seleníticos a gipsareníticos, con texturas apiladas y tendencia granodecreciente, con intercalación de blöedita y yeso, acompañados de detritos finos subordinados.

Descripción: niveles cristalinos de evaporitas compuestas de yesos seleníticos en la base y gipsarenitas en el techo, cuyo espesor varía entre 19 y 40 cm, con tendencia granodecreciente, presentan cristales apilados y corresponden a las facies S y G. Intercalan con capas de blöeditas y gipsarenitas, ambas con 5% y 10% de limos y arcillas de coloración rojiza, las que corresponden a las facies B1 y G1.

Esta asociación de facies se encuentra en las columnas estratigráficas 1, 2 y 3, ubicadas en el núcleo del salar. La geometría de estos niveles es tabular, y los contactos entre las facies mencionadas son netos o transicionales. En la columna estratigráfica 3 las facies S y G se encuentran en contacto transicional, mientras que en la columna estratigráfica 1 se intercalan las facies B1 y G1 con contactos netos, entre las facies S y G.

Dentro de esta asociación también se encuentra la facies B, que se expone en la base de la columna estratigráfica 1 y en el techo de la columna estratigráfica 2, también presenta cristales apilados.

Interpretación: los cristales apilados de evaporitas precipitan en un ambiente acuoso o en la interfase agua-aire (Kendall, 1992; Ortí, 2010), así los cristales pueden crecer en la superficie del agua hasta hundirse, acumulándose en el fondo de la salmuera y formando capas de cristales apilados. Su tendencia granodecreciente, marcada por yesos seleníticos que hacia el techo son reemplazados por gipsarenitas, indica que en un inicio la profundidad del cuerpo de agua era mayor y menos saturado (formando cristales más grandes con menor tasa de nucleación) que hacia el final, con un cuerpo de agua somero y más saturado, propiciando la formación de cristales de menor tamaño con mayor tasa de nucleación. Esta tendencia también indica una evolución de la salmuera en que aumentan las concentraciones de sus componentes.

Esta asociación de facies está demarcada por depositación de cristales de yeso en un cuerpo de agua somero < 5 m (Kendall, 1992), los que en los niveles G1 y B1 presentan subordinado aporte, probablemente eólico, de limos y arcillas rojas, provenientes de un ambiente oxidante. Por último, la presencia predominante de sulfato de Na y Mg (blöedita) podría representar una variación lateral en la composición de la salmuera que refleja sectores con mayor saturación, es decir, la blöedita indicaría salmueras más evolucionadas respecto a salmueras yesíferas.

Esta asociación de facies representaría la precipitación de evaporitas desde lagos salinos (salmuras tardías o evolucionadas), en el depocentro del salar, producto de evaporación solar durante la Etapa de concentración de evaporitas del ciclo de un salar.

Asociación de facies 2 (AF2): facies (Ag+Affcris).

Areniscas gruesas a finas con tendencia granodecreciente, con cristales de yesos retrabajados en la base y cristales intersticiales de blöedita y yeso hacia el techo.

Descripción: niveles de areniscas gruesas a finas de 26 cm de espesor representados por las facies Ag y Affcris. Esta asociación se ubica en el núcleo del salar en la columna estratigráfica 2, en cuya base se identifica hasta un 95% de yesos retrabajados con tamaño ~1 mm, con disminución granulométrica hacia el techo en donde se identifican cristales intersticiales de blöedita y yeso en arenisca fina. Poseen geometría tabular e infrayacen en contacto neto a AF1.

Interpretación: las areniscas basales representan depósitos provenientes de la erosión de una costra salina previa rica en yeso, cuyos cristales se reincorporaron en forma de clastos retrabajados. El yeso, por su solubilidad relativamente baja, tolera transportes cortos (principalmente en *debris flow* y *mass flow*) o transportes algo más largos en suspensión turbidítica (Ortí, 2010), en un medio subacuoso. La base erosiva y la tendencia granodecreciente de la unidad favorecen la interpretación de un canal fluvial. En este contexto, la presencia de areniscas finas (Affcris) hacia el techo correspondería a una fase de abandono del sistema.

La presencia de cristales intersticiales de blöedita y yeso hacia el techo indica la precipitación de sulfatos desde salmueras evolucionadas o tardías, que circularon entre los clastos.

Esta asociación de facies representaría depósitos en un canal fluvial asociados a la Etapa de inundación. Este canal erosionaría una paleocostra salina formada en Etapa de concentración de evaporitas o de desecación. Además, estos depósitos presentan una posterior precipitación de sulfatos, producto de circulación de salmueras tardías.

Asociación de facies 3 (AF3): monofacies (Fv).

Fangolitas verdes.

Descripción: niveles de fangos verdes con espesor de 8 cm, representados por la facies Fv en la base de la columna estratigráfica 3. Se ubican en el núcleo del salar, poseen geometría tabular e infrayacen en contacto concordante neto a AF1.

Interpretación: los fangos decantaron en ambientes acuosos de baja energía y su color verde indica que contiene materia orgánica.

La AF3 es interpretada en engrane lateral con la asociación de facies aluviales (AF4) y correspondería a la depositación más distal de un abanico aluvial que ingresa a un cuerpo de agua, dejando el material más fino en suspensión para luego decantar (légamo) junto con

materia orgánica al disminuir la energía. Esta asociación representaría la zona distal de un fan delta durante la Etapa de inundación.

Asociación de facies 4 (AF4): facies (Afnod+Amgnod+Aflpol).

Areniscas finas a gruesas granocrecientes con nódulos salinos de yeso, mirabilita y polihalita, subyacentes a areniscas finas con limo rojo.

Descripción: niveles de areniscas finas a gruesas de 12 a 45 cm de espesor que presentan nódulos de yeso, mirabilita y polihalita, correspondientes a las facies Amgnod y Afnod. La cantidad de nódulos fluctúa entre un 20% a 30%. Esta asociación de facies se identifica en la parte superior de la columna estratigráfica 3 en contacto neto sobre la asociación AF1. Se dispone en el centro del salar.

Presentan geometría tabular y ambas facies se relacionan entre sí en contacto transicional. Las areniscas son macizas y presentan nódulos salinos, de yeso y mirabilita en niveles basales, y nódulos de polihalita al techo. Por último, en el techo de la columna estratigráfica 3 sobreyace en contacto neto a arenisca fina con limo polimíctico de color rojo (Aflpol).

Interpretación: la tendencia granocreciente, el carácter macizo y polimíctico de esta asociación de facies, indican la progradación de depósitos aluviales, transportándose por mezclas densas de fango, arenas y agua, en flujos alternos turbulentos y laminares, de moderada a alta energía, que ingresaron a un cuerpo de agua depositando su carga.

Esta asociación de facies representaría depósitos de la zona lobular de un fan delta en Etapa de inundación, cuya cobertura oxidada (facies Aflpol) correspondería al abandono del sistema con exposición subaérea en Etapa de desecación. Su extremo distal estaría constituido por la asociación AF3.

Posterior a la depositación, habría ocurrido una evaporación total del lago efímero con descenso del nivel freático a profundidades < 1 m en la subsuperficie, generando una zona porosa de ascenso capilar, con cristalización y cementación intersticiales de las evaporitas más solubles en las capas fangosas (Kendall, 1992; Alonso, 2006; Irrázabal, 2009; Ortí, 2010), evento en que crecen nódulos salinos de sulfatos. Al respecto, los nódulos de yeso y mirabilita de la parte basal son producto de una salmuera menos evolucionada que los nódulos ubicados

próximos al techo, en que la polihalita representaría mayores concentraciones por la química que la compone (K y Mg).

Existe una **variante calcárea** para **AF4** compuesta por las **facies (Facvolc+Fcnod+ Afcnod)**.

Corresponde a:

Arcillolitas calcáreas a areniscas finas calcáreas granocrecientes con nódulos salinos de yeso, bischofita y taumasita.

Descripción: niveles de arcillolitas calcáreas con clastos volcánicos flotantes; fangolitas calcáreas con nódulos de yeso, bischofita y taumasita, y areniscas finas calcáreas con nódulos de yeso y taumasita, con tendencia granocreciente y espesores de 25 a 42 cm, correspondientes a las facies Facvolc, Fcnod y Afcnod de la columna 7, parece ser la variante calcárea de AF4. Posee geometría tabular y es de carácter macizo.

Interpretación: el carácter macizo y granocreciente de esta asociación de facies se relaciona a zonas distales de flujo laminar gravitacional con detritos provenientes de la erosión de terrenos volcánicos. Los nódulos salinos reflejarían eventos postdepositacionales, controlados por los mismos procesos descritos en AF4, aunque en este caso la presencia de bischofita (cloruro de magnesio) en los nódulos, indica que hacia la base circularon salmueras más evolucionadas respecto a las que circularon hacia el techo.

Esta asociación de facies podría representar el llano de inundación del área supralobular del fan delta o, una playa de margen lacustre. Dependiendo del ambiente y la energía del mismo, el carácter calcáreo del depósito podría ser post depositacional o sincrónico a la depositación clástica, a partir de una salmuera poco concentrada durante la Etapa de inundación e inicios de la Etapa de concentración de evaporitas. La presencia de nódulos salinos de sulfatos indica una posterior circulación de salmueras evolucionadas o tardías.

Asociación de facies 5 (AF5): monofacies (Facn).

Arcillolitas calcáreas negras con presencia de raíces.

Descripción: niveles de arcillolitas calcáreas negras con presencia de raíces, poseen 12 cm de espesor, asociadas a la facies Facn en la base de la columna estratigráfica 4. Posee una geometría tabular y es de carácter macizo.

Interpretación: el color negro de las arcillolitas indica un ambiente reductor con alto contenido de materia orgánica posiblemente algal, por lo que su depositación por decantación se daría en un ambiente subacuoso, de baja energía, posiblemente palustre con aguas duras calcáreas, con condiciones favorables para que organismos se desarrollen y se preserve material orgánico (Shaw *et al.*, 2011). Representaría depósitos de un paleohumedal desarrollado en el llano de inundación del área supralobular de un fan delta durante la Etapa de inundación e inicios de la Etapa de concentración de evaporitas.

Asociación de facies 6 (AF6): facies (Fcvolc+Afcvolc).

Fangolitas calcáreas a areniscas finas calcáreas, ambas con clastos volcánicos flotantes, con tendencia granocreciente y presencia de raíces.

Descripción: niveles de fangolitas calcáreas y areniscas finas calcáreas, con presencia de raíces y espesores de 5 a 30 cm, representadas por las facies Fcvolc y Afcvolc de la columna 4 en secuencia granocreciente en contacto transicional. Presenta 10% a 20% de clastos flotantes volcánicos negros, en matriz fangolítica calcárea. La asociación es de geometría tabular y carácter maciza.

Interpretación: su carácter macizo y granocreciente se asocia a depósitos de fangos y detritos desde un flujo laminar gravitacional que progradan en un cuerpo de agua. Esta asociación representa un fan delta sin depositación diagenética de nódulos salinos, razón por la que se distingue de AF4.

Esta asociación de facies podría representar el llano de inundación del área supralobular del fan delta o, una playa de margen lacustre durante la Etapa de inundación e inicios de la Etapa de concentración de evaporitas. Dependiendo del ambiente y la energía del mismo, el carácter calcáreo del depósito podría ser post depositacional o sincrónico a la depositación clástica, a partir de una salmuera poco concentrada.

Asociación de facies 7 (AF7): facies (Facv+Faca).

Arcillolitas calcáreas verdes y amarillas macizas.

Descripción: arcillolitas calcáreas verdes y amarillas con comportamiento plástico en estado húmedo y con capas de espesores de 15 a 65 cm, correspondientes a las facies Facv y Faca

dispuestas en las columnas 5 y 6 en contacto neto. Poseen geometría tabular y son de carácter macizo.

Interpretación: las arcillolitas se depositaron por decantación en un ambiente acuoso de muy baja energía. Su color verde indica presencia de materia orgánica y el color amarillo un ambiente oxidante con cierta exposición subaérea. Esta asociación de facies representaría un borde lacustre calcáreo, relacionado a un estadio inicial de formación de salmueras por evaporación solar durante el inicio de la Etapa de concentración de evaporitas.

Asociación de facies 8 (AF8): monofacies (Afcfang).

Areniscas finas arcillosas calcáreas con clastos flotantes de fangolitas, de color amarilla. Con raíces.

Descripción: capa de arenisca fina arcillosa calcárea amarillenta, con raíces, de 10 cm de espesor. Los clastos mayores corresponden a un 5% con tamaño promedio de 5 mm, de baja esfericidad y subangulosos a subredondeados, monomícticos de fangolitas. La matriz (95%) es arenosa-arcillosa y posee cemento calcáreo. Es de mala selección. Su geometría es tabular y es de carácter macizo. Corresponde a la facies Afcfang en el techo de la columna 6.

Interpretación: esta asociación representaría depósitos de playas lacustres formadas por deflación eólica y oleaje, o en el llano de inundación del margen lacustre durante la Etapa de inundación.

Las interpretaciones de cada asociación de facies se resumen en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Interpretaciones de las asociaciones de facies.

ASOCIACIÓN DE FACIES	ETAPA	AMBIENTE
AF1	S + G + G1 + B + B1	Concentración de evaporitas
AF2	Ag + Affcris	Inundación sobre depósitos evaporíticos
AF3	Fv	Inundación
AF4	Afnod + Amg + Aflpol	Inundación
AF4	Facvolc + Fcnod + Afcnod	Inundación - Concentración temprana de evaporitas
AF5	Facn	Inundación - Concentración temprana de evaporitas
AF6	Fcvolc + Afcvolc	Inundación - Concentración temprana de evaporitas
AF7	Facv + Faca	Inicio de Concentración de evaporitas
AF8	Afcfang	Inundación

(*) En sección 4.4 se agrega la asociación de facies AF9 compuesta únicamente por facies descritas en las calicatas de CORFO (1981).

4.4 Información de CORFO (1981)

En este apartado se analiza información de calicatas realizadas en 1981 en el salar por CORFO, con el objetivo de integrar y contextualizar mejor los datos aportados en el presente estudio.

CORFO (1981) realizó un plan de prospección con el fin de ubicar y estimar la cantidad sulfato de sodio existente en el salar. Durante esta campaña se excavaron 96 calicatas distribuidas sistemáticamente en superficie (Figura 4.1) las que alcanzaron una profundidad máxima de 192 cm.

En términos generales las principales unidades estratigráficas definidas por CORFO corresponden a las siguientes, de base a techo:

- Materia orgánica, negra o amarilla, en algunos casos con cristales de Na_2SO_4
- Limo orgánico negro
- Limo orgánico
- Limo con cristales de Na_2SO_4
- Cristales de Na_2SO_4 con limo
- Limo, yeso y algunos cristales de Na_2SO_4
- Limo y yeso
- Yeso granular
- Costra salina

Las descripciones litológicas de las unidades realizadas por CORFO no poseen un lenguaje y una descripción sistemática similar a la utilizada en este trabajo, sin embargo, es posible reconocer equivalencias con facies definidas en este estudio, tal como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Equivalencia a facies definidas en este estudio. Se recodificaron las principales unidades descritas por CORFO (1981).

Unidades CORFO	Grupos de unidades CORFO	Facies equivalente en este estudio
Costra salina (CS)	Costras definidas (CS)	Costras definidas (CS)
Yeso granular y ulexita (YGU)	Yeso granular (YG)	Gipsarenita (G)
Yeso granular, limo y ulexita (YGLU)		
Yeso granular y limo amarillo (YGLA)		
Yeso granular y limo gris (YGLG)		
Yeso granular y limo (YGL)	Limo y ulexita (LU)	No tiene (NT)
Limo y ulexita (LU)		
Limo y yeso (LY)	Limo y yeso (LY)	Gipsarenita con limos y arcillas rojas (G1)
Limo, yeso, ulexita y algunos cristales de Na ₂ SO ₄ (LYUN)		
Limo, yeso y algunos cristales de Na ₂ SO ₄ (LYN)		
Na ₂ SO ₄ (N)	Na ₂ SO ₄ con limo (NL)	Bloedita con limo y arcilla (B1)
Na ₂ SO ₄ con limo (NL)		
Limo grisáceo con algunos cristales de Na ₂ SO ₄ (LGN)	Limo con cristales de Na ₂ SO ₄ (LN)	Bloedita con limo y arcilla (B1)
Limo carbonatado y yeso (LCY)	Limo carbonatado y yeso (LCY)	Fangolita verde (Fv)
Limo carbonatado, yeso y algunos cristales de Na ₂ SO ₄ (LCYN)		
Limo carbonatado y Na ₂ SO ₄ (LCN)	Limo carbonatado y Na ₂ SO ₄ (LCN)	Fangolita verde (Fv)
Limo amarillo (LA)	Limo amarillo (LA)	Fangolita verde (Fv)
Limo amarillo-verdoso (LAV)	Limo amarillo-verdoso (LAV)	Fangolita verde (Fv)
Limo con cristales de Na ₂ SO ₄ (50%) (LN)	Limo con cristales de Na ₂ SO ₄ (50%) (LN)	Fangolita verde (Fv)
Limo gris (LG)	Limo oscuro (LOs)	No tiene (NT)
Limo negro (LNe)		
Limo negro-gris intercalados (LNLG)		
Limo orgánico (LO)	Limo orgánico (LO)	No tiene (NT)
Limo orgánico y yeso (LOY)		
Limo orgánico, yeso y algunos cristales de Na ₂ SO ₄ (LOYN)		
Limo orgánico con cristales de Na ₂ SO ₄ (LON)		
Materia orgánica con cristales	Materia orgánica (MO)	No tiene (NT)
Materia orgánica negra con pocos cristales de Na ₂ SO ₄ (MONN)		
Arena y limo (AL)	Arena y limo (AL)	Arenisca gruesa con 95% de yesos retrabajados amarillos (Ag)
Limos carbonatados (LC)	Limos carbonatados (LC)	Arenisca fina calcárea con clastos volcánicos flotantes, de color amarillo (Afcvolc)

A partir de las equivalencias establecidas en la tabla 4.4, fue posible definir una nueva asociación de facies.

Asociación de facies 9 (AF9): unidades CORFO.

Limos orgánicos con cristales de sulfatos subordinados.

Descripción: esta asociación está compuesta por seis facies que se disponen a mayores profundidades que las reconocidas en el presente estudio. Corresponden a limo orgánico (LO), limo orgánico y yeso (LOY), limo orgánico, yeso y cristales de Na_2SO_4 (LOYN), limo orgánico con cristales de Na_2SO_4 (LON), materia orgánica con cristales de Na_2SO_4 (MON) y materia orgánica negra con pocos cristales de Na_2SO_4 (MONN).

Interpretación: estos limos orgánicos se habrían depositado en un ambiente de baja energía, subacuático y reductor, en una columna de agua de espesor indeterminado, probablemente a mayor profundidad que las facies anteriores. Esta asociación podría representar un ambiente palustre o facies lacustres de un lago perenne.

Con posterioridad a su depositación, estos limos presentan precipitación de sulfatos, producto de circulación de salmueras tardías-evolucionadas (sulfatos de Na y Ca), subsuperficiales que no alcanzan a ser tan evolucionadas como en el caso de las capas con nódulos de bischofita, taumasita o blöedita.

4.5 Sección geológica y correlación de columnas estratigráficas

La sección O-E muestra las correlaciones de las asociaciones de facies definidas a partir de las siete columnas estratigráficas ya descritas y de nueve calicatas de CORFO. Se utiliza como *DATUM* de referencia el nivel base lacustre actual (0 m), que se encuentra a una altura de 3789 m s. n. m. en el margen occidental del salar.

En la base de la sección, y bajo la superficie de máxima inundación, se registra la asociación de facies AF9 depositada en un ambiente lacustre durante el periodo húmedo del paleolago, a mayor profundidad relativa que el resto de las asociaciones, en condiciones de depositación anóxicas y ricas en materia orgánica, posiblemente algal. Por lo que el techo de esta asociación podría representar el límite entre el término de una etapa húmeda-lacustre con el comienzo de una etapa árida-evaporítica-tardía.

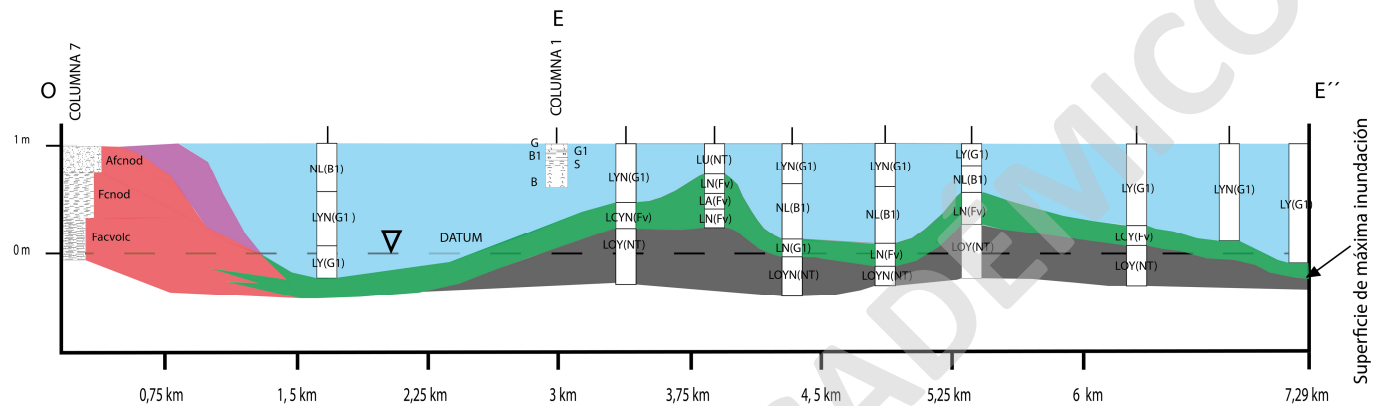
Sobre esta superficie se observa, en el borde oeste del salar, la asociación de facies AF4, interpretado como *fan delta*, con geometría sigmoide en engrane lateral con lógamo distal

(AF3). Arriba de AF4, se deposita AF7 que se interpreta como depósitos de borde lacustre carbonatado.

Sobre las asociaciones de facies ya indicadas, se deposita AF1 en el centro del salar, producto de la precipitación de sales controlada por evaporación solar. La asociación de facies AF1, representadas en la sección oeste-este de color celeste, integraría las unidades descritas por CORFO como núcleo mirabilítico cubicado por la empresa, que además presenta gran cantidad de yeso y ulexita subordinada.

SOLO USO ACADÉMICO

CORRELACIÓN Y SECCIÓN DE COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS Y CALICATAS OESTE-ESTE



LEYENDA

1. PERIODO HÚMEDO: PALEOLAGO

AF9 [Facies LOY(*)-LOYN(*)]:
LACUSTRE

2. PERIODO ÁRIDO: CICLO DE UN SALAR

ETAPA DE INUNDACIÓN

AF4 (Facies Facvolc-Fcnod-
Afcnod): ZONA LOBULAR
DE FAN DELTA

AF3 [Facies LCYN(*)-LN(*)-LA(*)-
LCY(*)]: ZONA DISTAL DE
FAN DELTA

ETAPA DE CONCENTRACIÓN DE EVAPORITAS

AF7 (Facies Facv-Faca):
BORDE LACUSTRE CALCÁREO
(inicio de concentración)

AF1 [Facies S-B1-B-G1-G-
NL(*)-LY(*)-LYN(*)-LU(*)]:
SALMUERA EVOLUCIONADA

SIMBOLOGÍA

▽ Nivel base lacustre actual

— Superficie inferida de lago actual

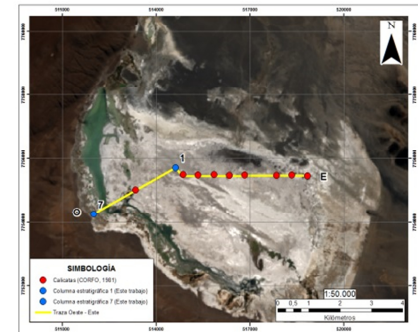


Figura 4.16: Sección Oeste-Este (O-E-E'') interpretada que muestra la distribución espacial de las columnas estratigráficas 1 y 7 (Este trabajo) y 9 calicatas de CORFO (1981). Asociándolas a cierta geometría y etapa/subambiente relacionado a las etapas del ciclo de un salar, para el caso de AF9 se relaciona con el periodo húmedo del paleolago. En el extremo derecho inferior se muestra un mapa con la ubicación de la traza.

(*) Corresponden a facies descritas por CORFO (1981). LA: limo amarillo; LCY: limo carbonatado y yeso; LCYN; limo carbonatado, yeso y algunos cristales de Na_2SO_4 ; LN: limo con cristales de Na_2SO_4 de hasta 50%; LY: limo con yeso; LYN: limo, yeso y algunos cristales de Na_2SO_4 ; LOY: limo orgánico y algo de yeso; LOYN: limo orgánico, yeso y algunos cristales de Na_2SO_4 ; LU: limo y ulexita; NL: Na_2SO_4 con limo.

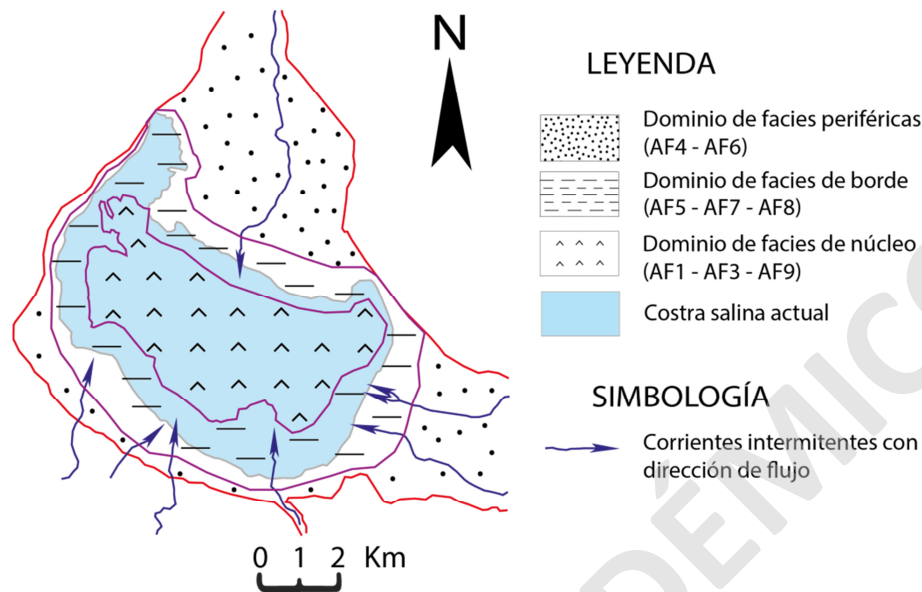


Figura 4.17: Distribución esquemática en superficie de las asociaciones de facies interpretadas y agrupadas en dominios de acuerdo a su distribución espacial. Imagen modificada de Stoertz y Ericksen (1974).

En el mapa de superficie de la figura 4.17 se representa esquemáticamente la distribución de las asociaciones de facies, anteriormente interpretadas en la sección O-E y agrupadas en dominios de acuerdo a su distribución espacial.

El dominio de facies periféricas, ubicado en los sectores externos por sobre la línea de borde del salar, corresponde a facies aluviales las que se relacionan con depósitos de *fan deltas* (AF4 y AF6) emplazados dentro de la cuenca actual del salar.

El dominio de borde representa la transición entre facies aluviales distales y de lagos efímeros, en donde se disponen playas lacustres o llanos de inundación de margen lacustres (AF7 y AF8) y de paleohumedal desarrollado en el llano de inundación del área supralobular de un *fan delta* (AF5). En este dominio, con el descenso del nivel freático somero subsuperficial, pueden precipitar nódulos y cristales salinos por ascenso capilar.

Por último, en el dominio de facies de núcleo dispuesto en la zona central del salar y en los bajos topográficos, se depositarían las facies lacustres con condiciones anóxicas, reductoras y ricas en materia orgánica (AF9), las facies aluviales más finas y distales (légamo, AF3) y las facies evaporíticas (AF1).

CAPÍTULO 5: GEOLOGÍA DE LA COSTRA SALINA

En este capítulo se definen las unidades geológicas expuestas en la costra salina superficial del salar del Huasco y su distribución, en base a la mineralogía y al tipo de costra presente, esta última caracterizada por las estructuras y morfologías observadas en este estudio.

La mineralogía ha sido determinada por Mariana Ordóñez el 2019 mediante espectroscopía de reflectancia de radiación, en muestras obtenidas en este trabajo. Además, se utiliza las determinaciones mineralógicas obtenidas en estudios anteriores mediante difracción de rayos X (López et al., 1999; Gardeweg y Sellés, 2013; Véliz, 2018). Los detalles de los datos referidos se encuentran en el Capítulo IX Anexos y sintetizados en la tabla 9.1 y 9.2, así como en la figura 9.1.

En este trabajo se han reconocido siete unidades de costras, cuya distribución se presenta en el mapa de la costra del salar a escala 1:50.000 (Figura 5.1). Tres de estas costras se caracterizan por ser duras y otras tres blandas, mientras que la restante corresponde a una costra inundada, por lo que esta última debería ser considerada más bien como un cuerpo de agua que como un tipo de costra.

Como se muestra en el mapa de la figura 5.1, en el núcleo del salar se disponen dos tipos de cortezas duras mayoritariamente sulfatadas (yeso y epsomita) que en su conjunto forman un ovoide, de marcada orientación noroeste-sureste con una longitud máxima de 8 km y un área de 21,2 km². En la parte norte de este núcleo se disponen cuerpos discontinuos orientados NO-SE de costra dura, lisa y maciza con sulfatos –yeso y epsomita- y halita en contacto por el sur con costra dura y rugosa sulfatada –yeso, epsomita y picromerita- que también se presenta en cuerpos discontinuos NO-SE.

También en el núcleo y entre ambas costras duras, se expone local y discretamente una costra blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos distribuida en dos cuerpos de orientación NO-SE, con una extensión areal de 0,36 km².

El núcleo duro está rodeado al norte, sur y al este, por un anillo periférico de costra blanda, rugosa y yesífera con epsomita, sin orientación preferencial y con un área de 23,31 km². En el sector noreste de este anillo aflora un domo andesítico basamental de 21 m de altura colonizado en su superficie por estromatolitos.

Hacia el oeste del núcleo duro se emplaza una costra blanda, lisa y yesífera elongada continuamente N-S y con un área de 0,87 km². Esta franja limita con el mayor cuerpo de agua presente en el salar, el que también posee una orientación N-S.

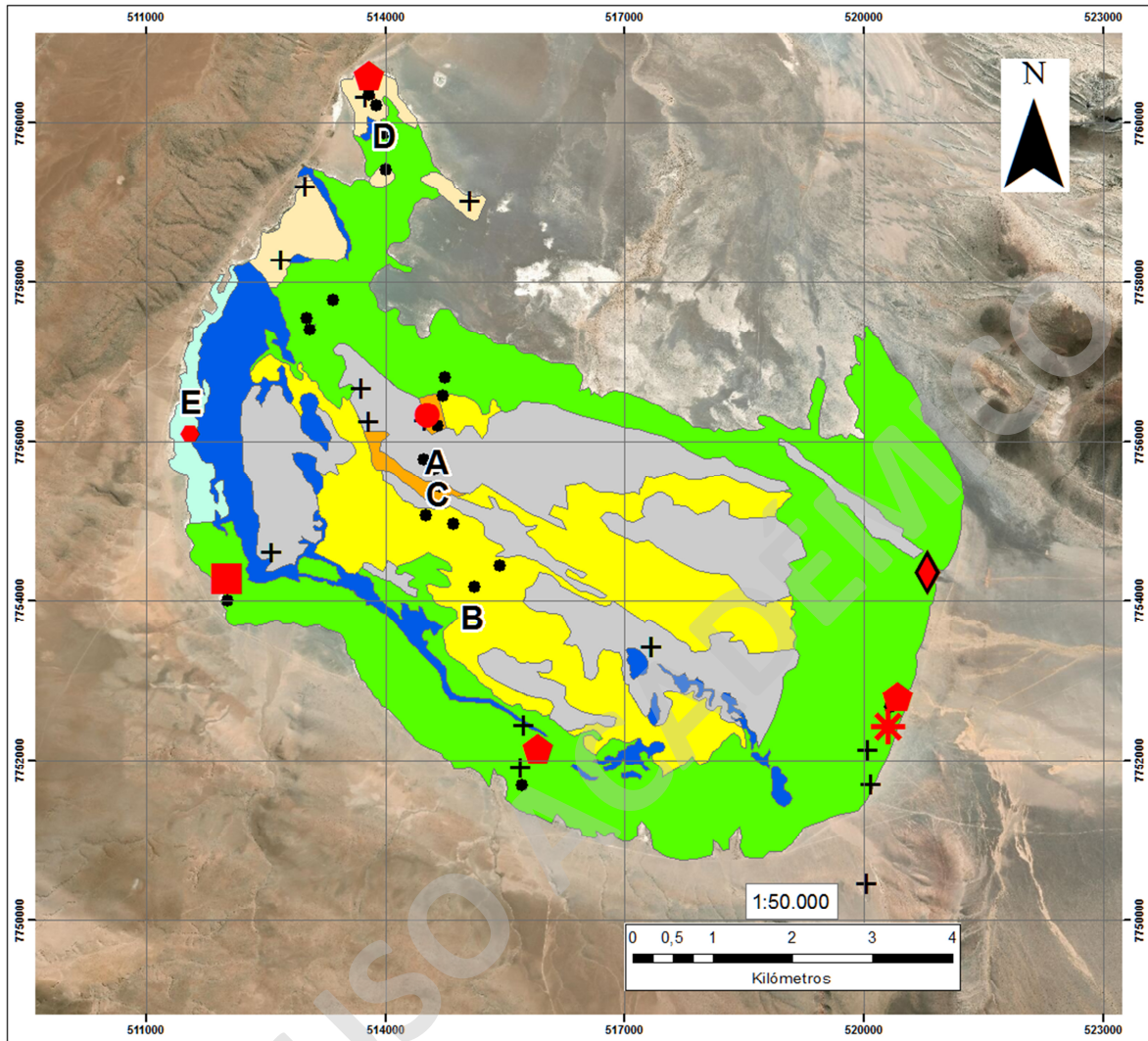
Localmente, en el extremo noroeste del salar, se expone discontinuamente una costra dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita, con un área total de 0,72 km², sin orientación preferente y limitada hacia el sur por la costra blanda, rugosa y yesífera, ya descrita.

Finalmente, en el extremo oeste y sur del salar se distribuye la costra inundada con un área de 3,58 km² y dispuesta de manera discontinua. El cuerpo de agua de mayor extensión se elonga N-S y limita el anillo de costras blandas del núcleo con costras duras, mientras que por el sur la orientación preferencial de los cuerpos de agua es NO-SE, y en este caso no marca el límite entre costra blanda y dura.

En la tabla 5.1 se muestra una síntesis con las características relevantes de las distintas unidades.

Tabla 5.1: Características relevantes de los distintos tipos de costras.

Sección	Nombre de la costra	Ubicación en el salar	Extensión (km ²)	Orientación	Mineralogía principal
5.1	Dura y maciza con sulfatos y halita	Centro	11,5	NO-SE	Yeso acompañado de epsomita y halita
5.2	Dura y rugosa sulfatada	Centro	9,7	NO-SE	Yeso y también epsomita, picromerita y taumasita
5.3	Blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos	Centro	0,36	No tiene	Yeso y sulfatos no identificados
5.4	Blanda, rugosa y yesífera	Periferia	23,31	No tiene	Yeso y también epsomita
5.5	Blanda, lisa y yesífera	Borde oeste	0,9	N-S	Yeso y aluminita
5.6	Dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita	Extremo noroeste	0,72	No tiene	Mirabilita y también thenardita, yeso y halita
5.7	Inundada	Oeste y sur	3,58	N-S al oeste / NO-SE al sur	Sin muestras



LEYENDA	SIMBOLOGÍA	Fotografías
<ul style="list-style-type: none"> Costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita Costra dura y rugosa sulfatada Costra blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos Costra blanda, rugosa y yesífera Costra blanda, lisa y yesífera Costra dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita Costra inundada 	<p>Ubicación de estructuras</p> <ul style="list-style-type: none"> Domo andesítico Canales salinos, mounds agrupados ✱ Vegetación en semilunas Lóbulos salinos Grietas poligonales centimétricas <div style="position: absolute; top: 50%; left: 50%; transform: translate(-50%, -50%); font-size: 4px;">•</div> Grietas de desecación y grietas poligonales 	<p>Muestras analizadas</p> <ul style="list-style-type: none"> Este trabajo Otros autores <p>Fotografías</p> <ul style="list-style-type: none"> A Fotografías de figura 5.2 y 5.3 B Fotografías de figura 5.4 C Fotografías de figura 5.6 D Fotografías de figura 5.10 E Fotografías de figura 5.16

Figura 5.1: Mapa de unidades de la costra salina del salar del Huasco, escala 1:50.000. Las costras fueron definidas en base a la morfología de su cobertura, las estructuras salinas menores presentes, su mineralogía predominante y su distribución (dominio). La ubicación de las muestras de este estudio y las de otros autores, que fueron utilizadas para la realización de este mapa se encuentran en la figura 9.1 (capítulo de anexos) Mapa realizado en base a imagen LANDSAT 8 (agosto de 2018).

En la tabla 5.2 se resume la presencia de estructuras menores en cada tipo de costra.

Tabla 5.2: Estructuras menores presentes en los distintos tipos de costras.

ESTRUCTURAS MENORES	NOMBRE DE LA COSTRA						
	Dura y maciza con sulfatos y halita	Dura y rugosa sulfatada	Blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos	Blanda, rugosa y yesífera	Blanda, lisa y yesífera	Dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita	Inundada
Grietas poligonales	X			XX	X	X	X
Crestas de presión	X			XX			X
Nódulos salinos							X
Escarpes yesíferos		XX					X
Hummocky					XX		X
Depresiones de disolución	X						
Piscinas salinas relictas	X	XX	X				
Canales salinos relictos			X				
Vegetación en semilunas				X			
Montículos salinos				X			
Canales salinos activos				X	X		
Grietas de desecación					XX		
Lóbulos salinos	XX		X	XX			

X: presencia ocasional de estructuras o concentradas en sectores limitados de una costra. XX: presencia más abundante.

A continuación, se describen en detalle los distintos tipos de costras reconocidos:

5.1 Costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita

Se ubica en sectores centrales del salar con orientación noroeste-sureste, cubre una extensión de 11,5 km² y constituye seis cuerpos salinos planos y discontinuos.

Se caracteriza por poseer una cobertura blanca, maciza, dura y lisa, sin embargo se disponen sectores aislados con superficies rugosas y coberturas macizas, blancas lechosas y de gran dureza, en donde se encuentran cristales de yeso milimétricos prismáticos-aciculares.

Se registran depresiones de disolución relictas, piscinas relictas y grietas poligonales no orientadas con diámetros máximos de 2-3 m limitadas por crestas de presión. Las estructuras menores recién mencionadas se describen como sigue:

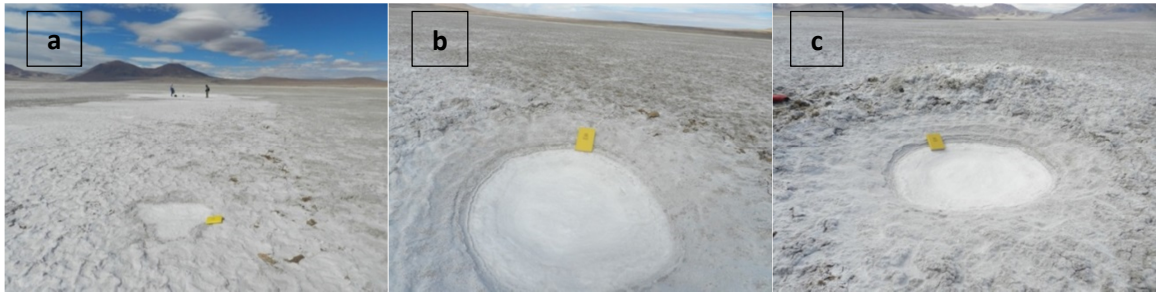


Figura 5.2: Costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita. a) Vista general; b) depresión de disolución relicta con núcleo salino, seco y masivo; c) depresión de disolución relicta.

Las **depresiones de disolución** (puquios, dolinas, piscinas de salmueras o *brine pools*) corresponden a depresiones subcirculares a ovaladas, con diámetros máximos de 185 cm y mínimos de 54 cm (Figura 5.2b y c). Se registran depresiones de disolución relictas, es decir, secas en cuyo centro la superficie es dura y lisa, con láminas macizas de sales con 2 cm de potencia y bordes de sales eflorescentes y pulverulentas. Su diámetro disminuye en profundidad y permite el crecimiento de sales en los costados.

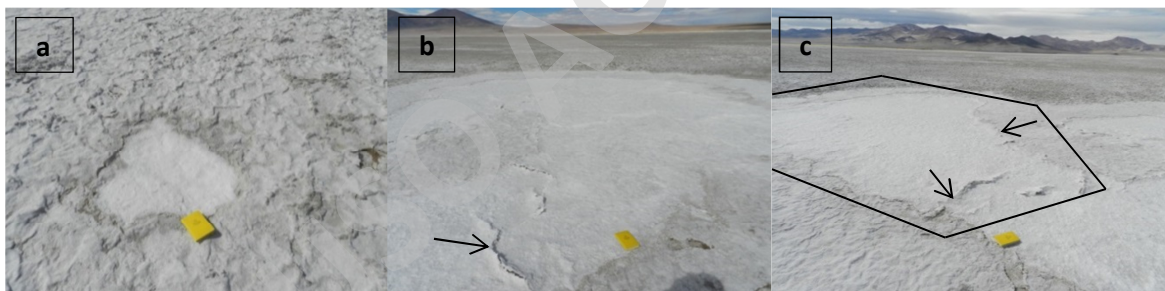


Figura 5.3: Piscinas relictas, crestas de presión y grietas poligonales hexagonales. En (a) se muestra una piscina relicta; (b) crestas de presión en superficie plana (flecha negra); c) grietas poligonales hexagonales métricas (polígono marca su forma), limitadas por crestas de presión (flechas negras).

Las **piscinas relictas** (Figura 5.3a) son similares a las depresiones de disolución relictas, pero sin geometría subcircular, y pueden alcanzar diámetros mayores. De superficie salina, maciza y dura, presentan una cobertura blanca lechosa con espesores de 2-5 cm.

Las **grietas poligonales** (*drying cracks*) se describen como polígonos salinos métricos, con profundidades de 2-3 cm, con diámetros máximos de 2-3 m, de cinco a seis lados y limitadas por crestas de presión (Figura 5.3c).

Las **crestas de presión** (*salt pressure ridges*) se presentan como elevaciones de hasta 7 cm de alto y 5 cm de ancho, se hallan en los bordes de grietas poligonales, y la textura de su superficie es lisa, ondulosa y blanca (Figura 5.3b y c).

Esta unidad es predominantemente sulfatada, con presencia mayoritaria de yeso (Ca) que es acompañado por epsomita (Mg), además de halita. Respecto a la mineralogía minoritaria, se identificaron otros sulfatos: aluminita, aphtitalita, bischofita, eugsterita, glaserita, loweita, mirabilita, polihalita, singenita y thenardita. También hay carbonatos (aragonito, calcita, dolomita), cloruros (carnalita, silvita), boratos (hidroboracita, hilgardita, inyoita) y trazas de cuarzo y estilbita.

Análisis: la superficie lisa de esta costra, podría explicarse por exposición frecuente a inundaciones (Stoertz y Ericksen, 1974). Por otra parte, la presencia subordinada de rugosidad, asociada a grietas poligonales y crestas de presión, reflejarían etapas de inundaciones, seguidas por un descenso del nivel freático (Vila, 1975), lo que permitiría que la costra se seque. La exposición aérea generaría rugosidad subordinada en algunos sectores aislados de la costra, debido a contracciones-dilataciones termales y la deshidratación de las sales de la costra, deflación eólica y meteorización.

Lo anterior es coherente con la presencia de depresiones de disolución y piscinas, ambas relictas al estar secas, las que indicarían presencia de agua superficial, seguida por desecación y descenso de nivel freático. La génesis de ambas estructuras es controlada por vertientes con influjos subterráneos someros (Stoertz y Ericksen, 1974).

Por otra parte, la presencia de epsomita (sulfato de Mg) y halita, que representan minerales de alta solubilidad, indicarían precipitación química de minerales desde salmueras en un estado de evolución intermedia, asociada al aumento de la concentración de evaporitas por evaporación solar progresiva.

5.2 Costra dura y rugosa sulfatada

Se emplaza en la zona central del salar y limita por el sur a la costra dura y maciza con sulfatos y halita. Cubre 9,7 km² y posee una cobertura salina con un espesor de hasta 2 mm, de color blanco y en algunos casos de tonos café-grises, es dura e irregular, de superficie rugosa y contiene cristales con hábito botroidal y no fácilmente deslenables.

Sobreyace a limo rojo y en algunos sectores sobreyace a limo pardo-mostaza (de mayor granulometría que el limo rojo), en donde disminuye la rugosidad de la superficie adquiriendo una apariencia más plana y una cobertura pulverulenta (Figura 5.4).

Presenta piscinas salinas relictas rodeadas de escarpes yesíferos, estructuras menores que se describen a continuación:



Figura 5.4: Costra dura y rugosa sulfatada. a) Depresión centimétrica (piscina salina relictas); b) borde de depresión (escarpe yesífero); c) textura rugosa e irregular que predomina en la costra y que sobreyace a limo rojo; d) costra con apariencia más plana; e) cristales pulverulentos, sobreyacen a limo pardo-mostaza.

Las **piscinas salinas relictas** (Figura 5.4a) son depresiones de extensiones métricas, que están rodeadas de escarpes en los bordes que marcan una diferencia de altura de hasta 30 cm, se les denomina relictas por no presentar láminas superficiales de agua. Los escarpes descritos en los bordes corresponden a **escarpes yesíferos** (*gypseous ramparts*) (Figura 5.4b).

Los análisis mineralógicos detectaron presencia mayoritaria de yeso, epsomita (sulfato de Mg), picromerita (sulfato de K y Mg), taumasita (sulfato y carbonato de Ca) y, de forma minoritaria, blöedita (sulfato de Mg y Na) y agregados de sulfatos indistintos. Por lo que se considera como costra sulfatada.

Análisis: la textura rugosa de esta costra indica que habría estado expuesta a periodos de inundaciones con posteriores descensos del nivel freático, sin embargo, esta costra también

habría estado sometida a un mayor tiempo de exposición subaérea que la costra dura, maciza y lisa con sulfatos y halita, anteriormente descrita.

Las piscinas salinas relictas y escarpes yesíferos, reflejan períodos con presencia de aguas superficiales por inundaciones que podrían estar controladas por influjos subterráneos. Por otro lado, los escarpes yesíferos se habrían formado por el arrastre eólico del aerosol evaporado sobre los cuerpos de agua, permitiendo la precipitación de minerales en el borde (Stoertz y Ericksen, 1974).

La presencia únicamente de sulfatos, sin halita, indica que la costra provendría de salmueras con compuestos menos solubles en comparación a la costra anterior (sección 5.1), es decir, relacionadas a salmueras en etapas iniciales de su evolución.

5.3 Costra blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos

Se ubica en la parte central del salar, entre ambas costras duras ya descritas. Presenta una cobertura con textura ondulosa, de colores blancos y marrones grisáceos, de hasta 2 mm de espesor. Cubre 0,4 km² y se caracteriza por ser una combinación de detritos y evaporitas. La costra es maciza, blanca lechosa y blanda, con algunos cristales milimétricos eflorescentes (Figura 5.5) y se compone de agregados de sulfatos indiferenciados, con predominio de yeso.

Presenta piscinas relictas métricas aisladas y, en otros casos, conectadas por medio de canales salinos relictos con orientación O-E (Figura 5.6).

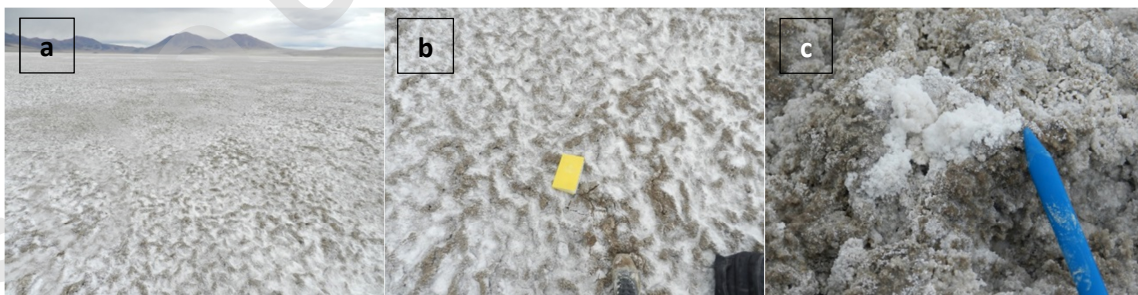


Figura 5.5: Costra blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos. a) Vista panorámica de la costra; b) zoom a cobertura salina y detritica; c) zoom a cristales botroidales que se concentran en sectores marrones grisáceos.

Las **piscinas relictas** de formas globulares, poseen una longitud máxima de 1,5 m y 1 m de ancho. Exhiben una configuración concéntrica con un núcleo salino traslúcido macizo, el cual

localmente presenta agregados de yesos con hábitos prismáticos entrecrecidos de 0,5 a 3 cm de largo (Figura 5.6a y c). El halo corresponde a una costra blanca lechosa, maciza con yesos prismáticos en los bordes, similares a los descritos en el núcleo.

Varias de estas piscinas se conectan en sentido O-E mediante **canales salinos relictos** (Figura 5.6b), los cuales poseen una costra irregular-rugosa compuesta de yeso blanco lechoso.

En los alrededores de los canales se presenta una costra rugosa y blanda, de color café y blanco, en el que se disponen cristales botroidales blancos. Alejándose de los canales, se observan **piscinas salinas métricas aisladas** (Figura 5.6d) de hasta 10 m de longitud.

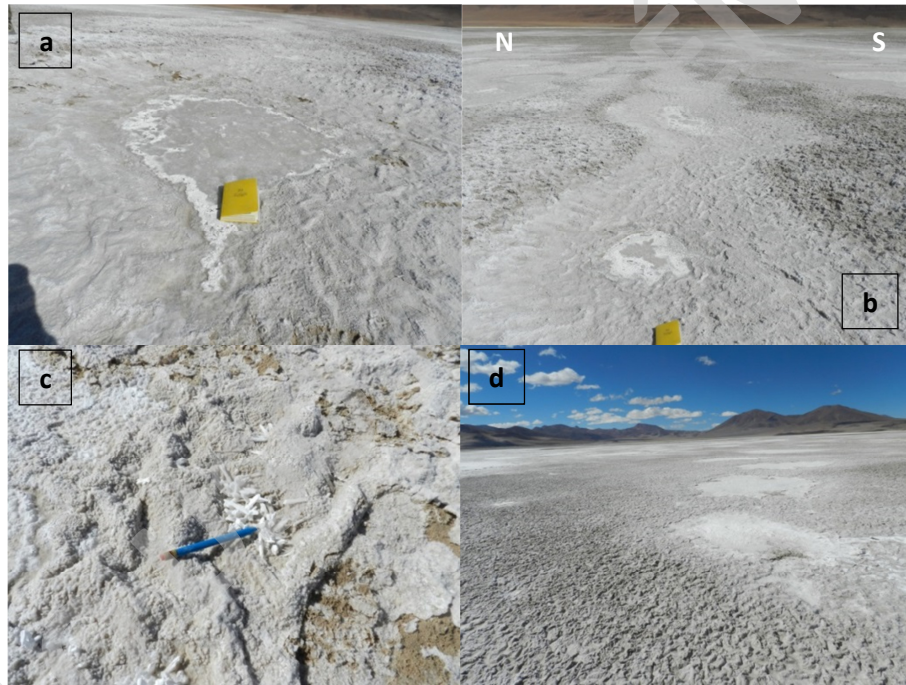


Figura 5.6: Piscinas salinas. a) Piscina salina con longitud de 1,5 m; b) piscinas salinas conectadas formando canales salinos relictos; c) agregado de yesos prismáticos que se hallan en núcleo y bordes de piscinas salinas; d) piscinas salinas métricas aisladas.

Análisis: la textura ondulosa podría representar una transición entre una costra lisa y una rugosa, es decir, con mayor tiempo de exposición aérea respecto a una costra lisa, pero no lo suficiente para adquirir una cobertura rugosa.

Las piscinas salinas relictas y los canales salinos relictos indican la presencia de agua, que podrían reflejar periodos de inundación y/o influjos subterráneos permanentes que afloran en la costra. Además, su carácter blando indica que la compactación de la costra no se ha producido, por lo que podría ser más joven que las costras duras.

La presencia de yeso indica que la depositación de esta costra provendría de salmueras con compuestos de menor solubilidad, es decir, de etapas más tempranas en la evolución de salmueras en comparación con costras con presencia de epsomita.

5.4 Costra blanda, rugosa y yesífera

Se emplaza en los sectores periféricos del salar, bordeando la zona central de costras duras, formando un anillo que las rodea por el norte, este y sur. En el sector norte del anillo, en el límite con la costra dura y maciza con sulfatos y halita se presentan lóbulos salinos (Figura 5.7).

El espesor de la costra no supera los 2 mm de espesor, es blanca lechosa y blanda. Cubre 23,3 km² y sobreyace a limo café muy claro y húmedo, aunque en zonas cercanas a cuerpos de agua sobreyace a limo rojo.

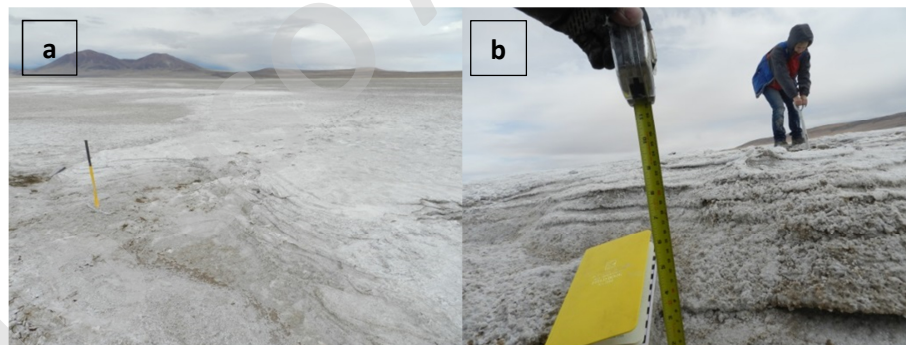


Figura 5.7: Lóbulos salinos. a) Lóbulo salino, a la derecha en altura se encuentra una costra dura y hacia la izquierda una costra blanda; b) laminación paralela en escarpe de lóbulo salino.

Los **lóbulos salinos** mencionados (cúspides salinas o *salt cusps*) se describen como morfologías lobulares asociadas a escarpes de 30 cm de alto, en que se observa laminación paralela superficial que afecta a la cobertura salina milimétrica y blanca (Figura 5.7). Se ubican

en el contacto entre costras, quedando la costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita en el bloque de mayor altura, y la costra blanda, rugosa y yesífera en el área deprimida.

En algunos sectores de esta costra los minerales se presentan pulverulentos y deleznable, en cambio en áreas colindantes a cuerpos de agua someros, la costra adquiere tonalidades rosáceas con superficies onduladas-sinuosas y cristales de aspecto sacaroidal, sin embargo, en zonas más alejadas del agua predominan cristales con hábitos botroidales difícilmente deleznable (Figura 5.8). En los bordes de estas láminas de aguas someras se disponen grietas poligonales hexagonales inundadas en que sobresalen crestas de presión en sus bordes (Figura 5.9).

Esta costra presenta vegetación de pequeñas dimensiones (coirós) y, en el extremo sureste, vegetación en semilunas (Figura 5.9). En algunas zonas se disponen montículos salinos (*muondsprings*) aislados con escarpes de 12-15 cm, en cuyas cimas crece vegetación (pastizal seco), como también agrupaciones de *muondsprings* cercanos a canales salinos activos (Figura 5.10). También se describen grietas poligonales no orientadas y centimétricas con intersecciones en forma de Y (Figura 5.8).

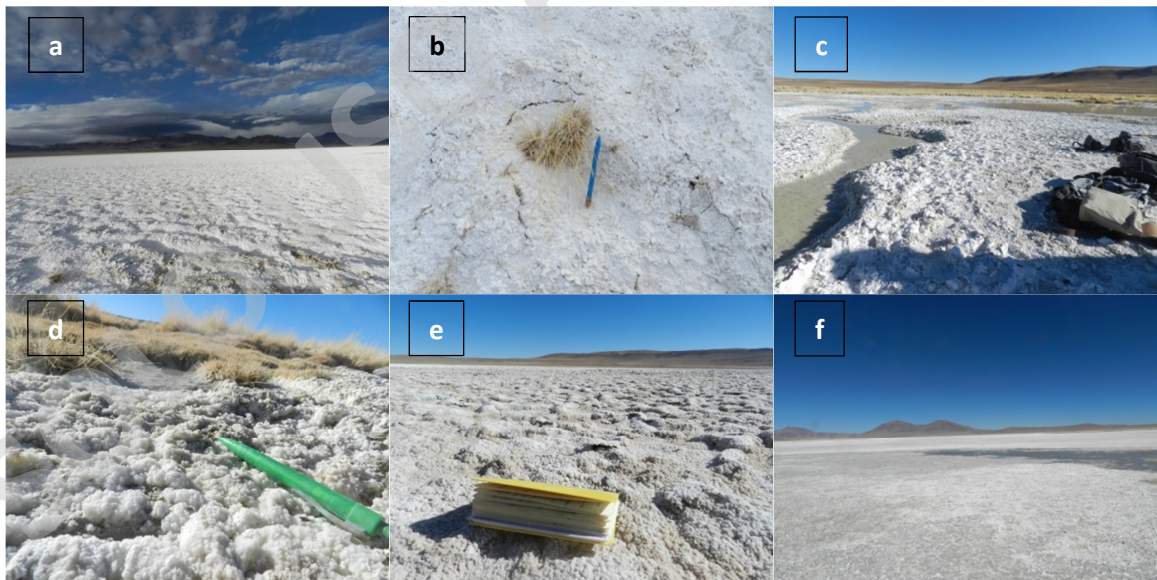


Figura 5.8: Costra blanda, rugosa y yesífera. a) Vista general de la costra; b) vegetación presente; c) canal salino activo; d) hábito botroidal de cristales; e) textura sacaroidal; f) cuerpo de agua somero.

La **vegetación en semilunas** presenta inclinaciones de 10° - 15° en barlovento, con alturas máximas de 30 cm, y una inclinación abrupta subvertical en la zona de sotavento, las cuales indicarían una dirección de viento NE-SO (Figura 5.9b). Se asocian a costra milimétrica, blanca, seca y rugosa, que sobreyace a limo-arcilla café-rosa. En sectores de escorrentía moderna la costra es húmeda y está constituida por una proporción significativa de limo-arcilla.



Figura 5.9: Semilunas y grietas poligonales. a) Vista panorámica de vegetación en semilunas; b) orientación de barlovento y sotavento indicarían una dirección de viento NE-SO; c) grietas poligonales hexagonales, métricas e inundadas, bordeadas por crestas de presión.

Tanto las **grietas poligonales hexagonales** como las **crestas de presión** presentan las mismas características que en la costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita (sección 5.1), con la diferencia que en este caso se encuentran inundadas (Figura 5.9c).

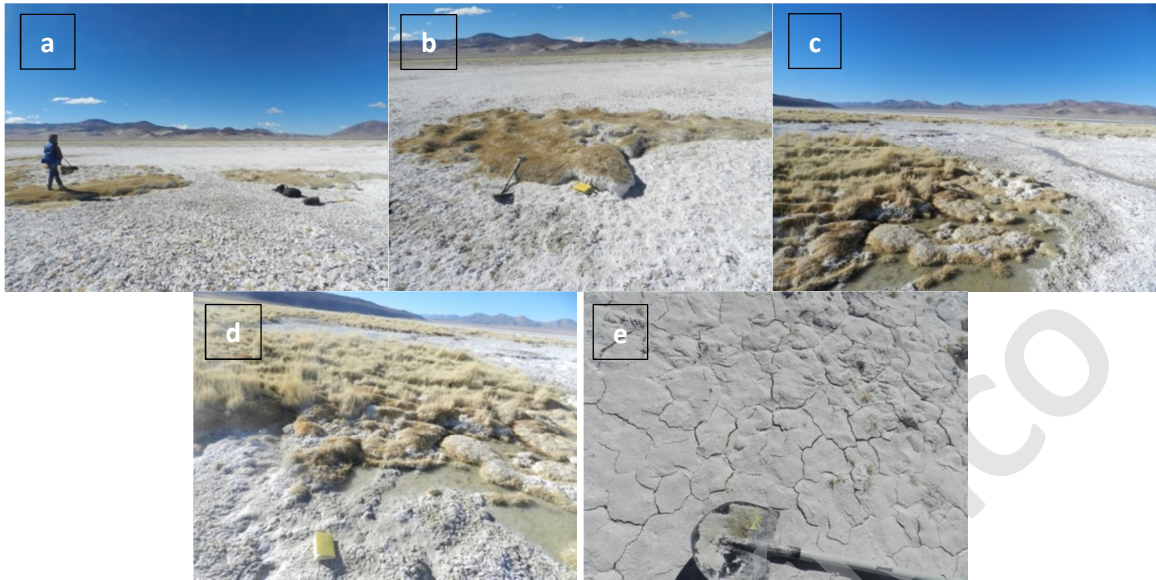


Figura 5.10: Montículos salinos y grietas poligonales centimétricas. En (a) y (b) se muestran *muondsprings* aislados, los que sobreyacen a capa de hielo; en (c) y (d) se encuentran agrupados en sectores proximales a láminas de aguas superficiales someras; e) grietas poligonales centimétricas no orientadas con intersecciones en forma de Y.

Los **montículos salinos** (*muondsprings*, montículos de freatófitas, *phreatophyte mounds*) son amorfos y tienen una altura promedio de 15 cm, se presentan aislados y en grupos, y se asocian a una cobertura salina pulverulenta que no supera el centímetro (Figura 5.10). En los *muondsprings* descritos en terreno, las raíces de la vegetación están asociadas con una capa de hielo somera de 15-30 cm de espesor. Alrededor se registra una costra blanca, blanda, con **grietas poligonales centimétricas no orientadas** (Figura 5.10e) con intersecciones en forma de Y, además de cristales botroidales, fácilmente deslucenables.

Respecto a los **canales salinos** (Figura 5.8c), son cauces de circulación de agua de amplitud y profundidad restringida (0,5 m), su longitud varía y puede llegar a cientos de metros e incluso cruzar el depósito salino entero. Corresponden a conductos que corta la costra previa disolviéndola (Figura 5.11), cuyo lecho contiene sales frescas y blancas.

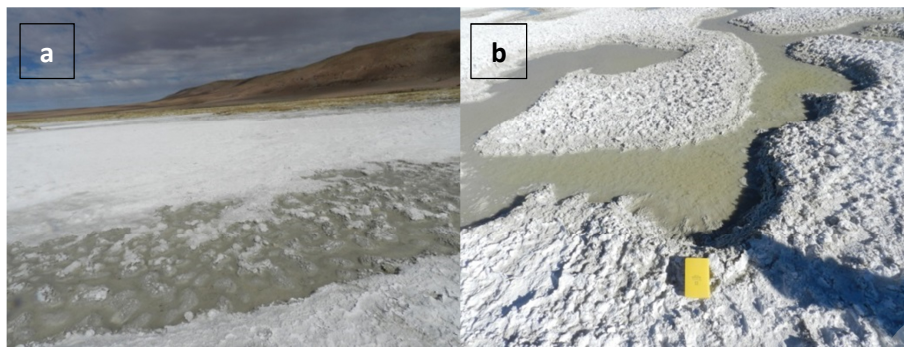


Figura 5.11: Canales salinos. En (a) y (b) se muestran canales salinos activos cortando la costra.

Los principales componentes mineralógicos de la costra son yeso y epsomita. Aunque el yeso es de carácter ubicuo, razón por la cual se denomina a la unidad como yesífera. En el extremo este y parte del extremo noroeste, se presenta principalmente yeso y epsomita, con arcillas (illita-esmectita y saponita).

De forma minoritaria se registran otros sulfatos (aluminita, alunógeno, blöedita, eugsterita, georgeyita, halotriquita, hanksita, melanterita, mirabilita, taumasita, thenardita y agregado de sulfatos no diferenciados), carbonatos (calcita magnésica, dolomita), cloruros (halita, silvita), cristobalita, nitratina e hidróxido de aluminio. Además, en agregado de cristales botroidales (Figura 5.8d) se detecta la presencia de blöedita, con taumasita y mirabilita subordinadas.

Por último, en el extremo este del salar, en el límite externo de la costra salina, se expone un domo andesítico que constituye parte del basamento de la cuenca. Este domo ocupa una superficie de 58 m² y mide 21 m de altura desde su base. Composicionalmente es una andesita con cristales de plagioclasa, olivino y clinopiroxeno (Véliz, 2018) de tonalidades negras grisáceas con bandeamiento magmático. El domo presenta en sus laderas y cima estromatolitos con diámetros máximos de 14 cm (Figura 5.12)

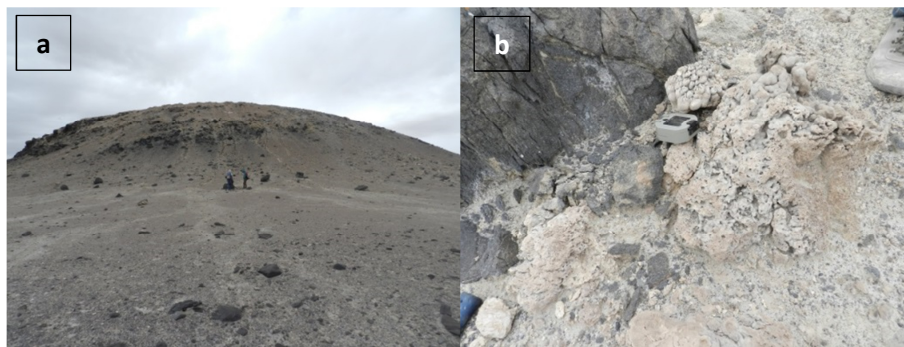


Figura 5.12: Domo andesítico. a) Afloramiento de domo andesítico; b) estromatolitos presentes desde la falda a la cima del domo (junto a brújula *Brunton*).

Análisis: en la parte norte del salar, esta costra blanda, rugosa y yesífera, limita hacia el núcleo con la costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita (sección 5.1). El carácter blando de la costra indica que la compactación no se ha producido, por lo que esta costra podría ser más joven que las costras duras. Por otra parte, en el contacto entre estas dos costras se disponen lóbulos salinos asociados a escarpes de 30 cm, quedando la costra dura en el bloque de mayor altura y la blanda en el área deprimida, esta relación indica que la costra salina blanda es más joven (Stoertz y Ericksen, 1974), por tanto más expuesta a eventos de inundaciones.

Las grietas poligonales centimétricas no orientadas indicarían el descenso del nivel freático en la costra salina sulfatada (Vila, 1975), sin embargo, la presencia de muondsprings, aislados y en grupos, revelan un nivel freático somero, pues estos montículos requieren que las raíces se conecten con el nivel freático (Vila, 1975), de lo contrario se destruirían.

Lo señalado anteriormente es coherente con la presencia de cuerpos de agua y de canales salinos activos, así como por la presencia de cristales pulverulentos, deleznable y eflorescentes. Estas características revelarían que parte de la costra estaría en interacción directa y constante con un nivel freático somero, con posibilidades de ascenso-descenso permanentes y, por tanto, expuesto a periodos de inundación frecuentes. De ahí que la costra no se componga de minerales tan solubles y sea predominantemente yesífera, lo que indica que la costra provendría de salmueras con compuestos menos solubles respecto a la costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita (sección 5.1), por lo tanto estaría asociada a salmueras en etapas iniciales de su evolución.

5.5 Costra blanda, lisa y yesífera

Se ubica en el borde oeste del salar, en la periferia, colindante al principal cuerpo de agua permanente. Cubre 0,9 km² y se describe como una planicie salina lisa, con cobertura centimétrica deleznable, blanca y pulverulenta, que sobreyace a depósitos de limo-arcilla café. Su composición mineralógica es sulfatada con yeso y aluminita (Al y Ca).

Presenta **grietas de desecación** en sectores con fango, denominados suelos salinos por la presencia subordinada de sales en comparación con el sustrato detrítico, y **grietas poligonales** centimétricas no orientadas con intersecciones en forma de Y (Figura 5.13c), ambas estructuras se forman en las zonas más secas y duras de la costra. En ambos casos las grietas se originan por deshidratación del sustrato, lo que cambia es la composición de éste: en las primeras predominan los detritos, en las segundas casi la totalidad lo constituyen sales sulfatadas.

Además, hay sectores de la costra húmedos y blandos en que se alternan zonas salinas y lodo húmedo, adyacentes a canales salinos activos (Figura 5.13a), que erosionan la costra. En el límite de costra inundada (lagunas) se disponen geometrías **hummocky** caracterizadas en la sección 5.7.

Las estructuras mencionadas presentan las siguientes características:

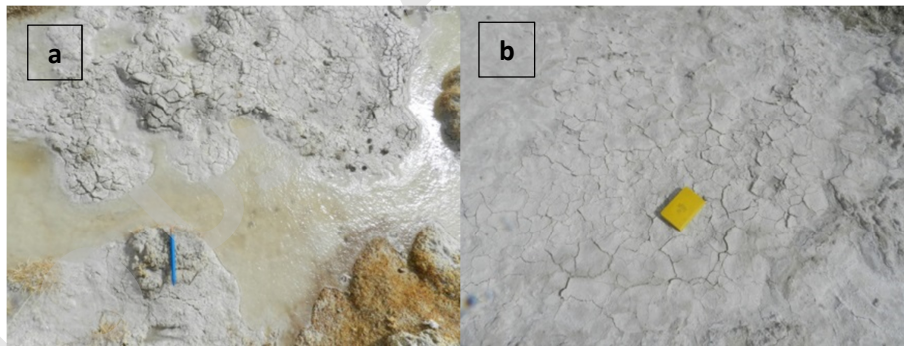


Figura 5.13: Costra blanda, lisa y yesífera. En (a) y (b) se disponen grietas poligonales centimétricas en sectores húmedos y secos, respectivamente.

Las **grietas de desecación** (*mud-crack polygons*) corresponden a polígonos centimétricos, superficiales y no orientados, se distinguen de las grietas poligonales pues se desarrollan en superficies cuyo sustrato es limo seco (Figura 5.14). Por lo demás, se asocian a arbustos, vegetación “en anillos” e “islas” blancas salinas (relictos) y tienden a poseer cuatro lados e intersecciones en forma de T.



Figura 5.14: Grietas de desecación. En (a) y (b) se observan grietas de desecación desarrolladas en sustrato predominantemente fangoso, en (a) se muestra vegetación “en anillos” y en (b) arbustos; en ambos casos los polígonos son de cuatro lados con intersecciones ortogonales en forma de T.

Tanto las **grietas poligonales centimétricas** no orientadas con intersecciones en forma de Y (Figura 5.13b y c) y los **canales salinos activos** se describen similares a las que se presentan en la costra blanda, rugosa y yesífera (sección 5.4) (Figura 5.10e y figura 5.11).

Análisis: la cercanía de esta costra con lagunas y la presencia de canales salinos activos, indican interacción frecuente y reciente con agua superficial, lo que podría controlar el carácter blando y liso, debido a la poca exposición aérea de la costra que permitiría el desarrollo de estructuras y rugosidad. Lo anterior sería la razón por la cual esta costra yesífera no se compone de minerales muy solubles, representando salmueras de etapas tempranas en su evolución.

5.6 Costra dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita

Se dispone en la periferia noroeste del salar y cubre 0,7 km². Esta costra es dura y ondulosa, presenta formas relictas de polígonos centimétricos no orientados y secos. La cobertura está constituida por cristales blancos y la presencia de vegetación.



Figura 5.15: Costra dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita. a) Vista general de la costra; b) acercamiento a textura ondulosa; c) grietas poligonales no orientadas y vegetación en la parte superior derecha de la fotografía.

Las **grietas poligonales centimétricas** no orientadas (Figura 5.15c) poseen las mismas características que la costra blanda, rugosa y yesífera (sección 5.4), y la costra blanda, lisa y yesífera (sección 5.5).

Se compone principalmente de mirabilita, thenardita, yeso y halita. De manera subordinada, presenta otros sulfatos (bassanita, blöedita, burkeita, eugsterita, glaserita, picromerita, polihalita, singenita), carbonatos (calcita, calcita magnésica, dolomita, kutnohorita-Mg), silicatos (albita, analcima, cristobalita, cuarzo), arcillas (illita-esmectita, saponita, sepiolita), silvita, nitratina e incluso trazas de azufre nativo. Dominan sulfatos de Na con halita.

Análisis: su dureza indica que no ha sido expuesta a inundaciones recientes y su carácter onduloso representa transición entre una cobertura lisa a una rugosa, lo que confirma cierto tiempo de exposición subaérea. La presencia de mirabilita (sulfatos Na) y de cloruros, como halita y silvita, indica que la depositación de esta costra provendría de salmueras con compuestos muy solubles, es decir, de etapas más tardías en su evolución.

5.7 Costra inundada

Se dispone en la periferia oeste y sur del salar y cubre un área de 3,6 km², posee aportes perennes de surgencia de aguas subterráneas y aportes esporádicos superficiales. Corresponde a cuerpos de agua someros en cuyos bordes se identifican crestas de presión que bordean grietas poligonales relictas, inundadas y de dimensiones métricas, y nódulos salinos. Los bordes están limitados por escarpes de 30 cm sobre la lámina de agua.

En los bordes se presenta vegetación (coirós) y luego, distanciándose del cuerpo de agua, montículos con vegetación a ras de suelo (yaretas), estas geometrías de *hummocky* poseen alturas de hasta 20 cm. Las estructuras se describen a continuación:

Tanto las **crestas de presión** como las **grietas poligonales métricas** relictas, presentan características similares a la costra dura y maciza con sulfatos y halita, con la salvedad que en este caso están inundadas por láminas de agua someras (Figura 5.16a).

Los **nódulos salinos** (*salt nodules*) se observan en los bordes de estos cuerpos de agua, tienen una forma convexa con una altura que no supera los 10 cm, sobresalen a la cobertura de agua hasta 7 cm. Su cima es blanca, blanda y salina con cristales de hábito botroidal, eflorescentes, pulverulentos y dezlenables. Se observaron junto a crestas de presión en los bordes (Figura 5.16b).

Los **escarpes yesíferos** (*gypseous ramparts*) se hallan en los bordes de casi todos los cuerpos de agua presentes. Poseen una diferencia de altura de 30 cm sobre la cobertura de agua y presentan una textura similar a la cima de los nódulos salinos (Figura 5.16a y c). Sobre los escarpes se registra vegetación (coirós), luego se presentan montículos con vegetación a ras de suelo (yaretas). Son similares a los que se encuentran en los bordes de piscinas salinas relictas secas presentes en la costra dura y rugosa sulfatada.

Las geometrías **hummocky** corresponden a montículos cubiertos por yaretas, no superan los 20 cm de alto, su cobertura vegetal no presenta cristales salinos, es de color café-amarillo, y entre medio se presentan coirós. Además, sobresalen montículos de aproximadamente 30 cm de alto, duros y con precipitados blancos (Figura 5.16d y e).

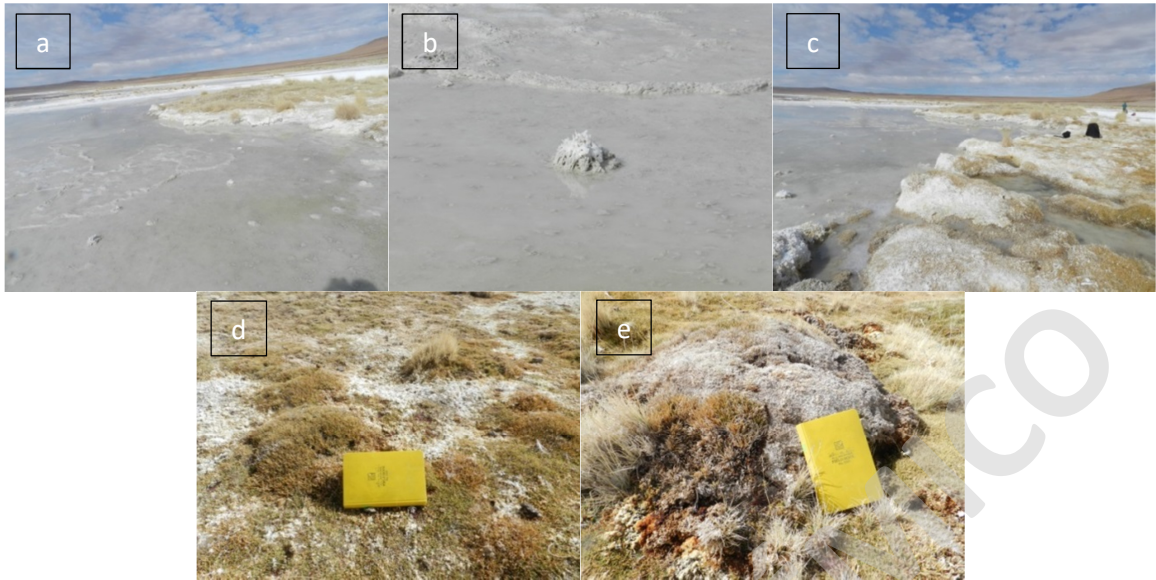


Figura 5.16: Estructuras de costra inundada y sus bordes inmediatos. a) Costra inundada en el que se identifican escarpes yesíferos, grietas poligonales métricas, crestas de presión y nódulos salinos; b) nódulos salinos; c) escarpes yesíferos en estanque salino; d) y e) morfología *hummocky*, sin y con precipitados salinos, respectivamente.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

Stoertz y Ericksen (1974) y Gardeweg y Sellés (2013) proponen que los salares del sector andino, y en particular el salar del Huasco, corresponderían a la evolución relicta de paleolagos pleistocénicos, debido al incremento de temperatura y disminución de precipitaciones durante el Holoceno, lo que provocó un descenso en el nivel base del paleolago controlado por evaporación solar.

Es así, que se puede separar la evolución geológica y climática del salar del Huasco en dos periodos: un periodo temprano asociado al emplazamiento de un paleolago en una fase climática húmeda y, un periodo tardío asociado a la regresión del paleolago y formación de depósitos asociados al ciclo de evolución de un salar en una fase de clima árido.

6.1 Periodo de estado alto del nivel del paleolago

Autores (Stoertz y Ericksen, 1974; Gardeweg y Sellés, 2013) han propuesto que en la cuenca del salar del Huasco se habría emplazado un paleolago con edad post 280 ka, en base a la presencia de paleolíneas de costa asociadas a terrazas lacustres, ubicadas 50 a 55 m sobre la superficie actual del salar, es decir, a 3.845 m s. n. m.

Al respecto, los registros paleoclimáticos del altiplano andino (16°S-20°S) indicarían la existencia de dos eventos de máxima humedad en los últimos 20.000 años, que permitirían la formación de grandes paleolagos altiplánicos, emplazados entre los 3.600 y 4.500 m s. n. m. Estos eventos corresponden a la fase lacustre Tauca (18,1-14,1 ka) y la fase lacustre Coipasa (13,4-11,5 ka) (Sáez *et al*, 2016).

Si el paleolago emplazado en la cuenca del salar del Huasco estuviese asociado a estos eventos de humedad, su edad estaría acotada a una antigüedad máxima de 18.100 años (inicio de fase lacustre Tauca) y una edad mínima de 11.500 años (final de fase lacustre Coipasa).

En este contexto, análisis de isótopos ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$, Sr y U) en carbonatos de paleolagos andinos han permitido estimar precipitaciones significativas, con paleotemperaturas que fluctuarían entre los 2-10°C (~8°C) y una humedad más alta (~60%) respecto a la actual (20%) (Placzek *et al.*, 2011) reflejando una mayor intensidad de precipitaciones que en la actualidad. Stoertz y Ericksen (1974) calcularon que la formación de lagos permanentes en las cuencas andinas sobre los 3.000 m s. n. m. durante el Pleistoceno, tendría un promedio anual de precipitaciones

con 381 mm *versus* los 203 mm actuales y una temperatura anual promedio de 1,12°C más baja que el presente. Además, la ausencia de depósitos y/o morfologías glaciares, indicarían que durante este periodo de tiempo el paleoclima habría sido afectado por eventos glaciales.

Hay registros en los depósitos sedimentarios que representan este periodo y que afloran en torno al salar del Huasco y bajo su costra salina (Gardeweg y Sellés, 2013). De acuerdo a dos sondeos realizados en el salar, Sayes (1968) describió que los depósitos de relleno de cuenca tendrían al menos 231 m de espesor y estarían compuestos por unidades volcanoclásticas, aluviales y lacustres, y por una costra salina, con un espesor inferior a 1,5 m constituida por evaporitas eflorescentes y limos.

Tal como se ha expuesto, en la zona habría existido un paleolago con una columna de agua de 50 a 55 metros sobre el nivel base actual (Figura 6.1a), desarrollado probablemente entre los 18,1 a 11,5 ka. Con posterior descenso del nivel base del paleolago, representando una regresión controlada principalmente por evaporación solar, disminuyendo la superficie de máxima inundación desde 140 km² a los 3,6 km² de lagunas actuales (Figura 6.1b).

En este estudio se ha reconocido la presencia de estromatolitos con diámetros máximos de 14 cm (Figura 5.12) en las laderas y cima de un domo andesítico, en el extremo este del salar, el cual posee una altura de 21 m sobre el nivel actual del salar (Figura 6.1a), lo que se utiliza como evidencia del emplazamiento del paleolago. El desarrollo de estromatolitos se da en la zona fótica de una columna de agua, cercana a la superficie, por lo que su presencia en la cima del domo representaría una columna de agua con 21 metros sobre el nivel base actual, con un descenso de 30 m de la columna de agua del paleolago y una disminución de la superficie de máxima inundación de 140 km² a 88 km² (Figura 6.1b). Corresponde a la evidencia del paleolago más temprana registrada en este trabajo.

Por otra parte, se ha interpretado que la asociación de facies AF9 dispuesta en la base del perfil O-E-E'' (Figura 4.16), sería parte del registro depositacional final de este periodo lacustre, cuyo techo correspondería a una discordancia, interpretada como superficie de máxima inundación o arcillosidad, por lo que la edad de AF9 sería previa a 11.500 años, y sobre la cual se depositarían los productos clásicos de un salar, revisados a continuación (sección 6.2).

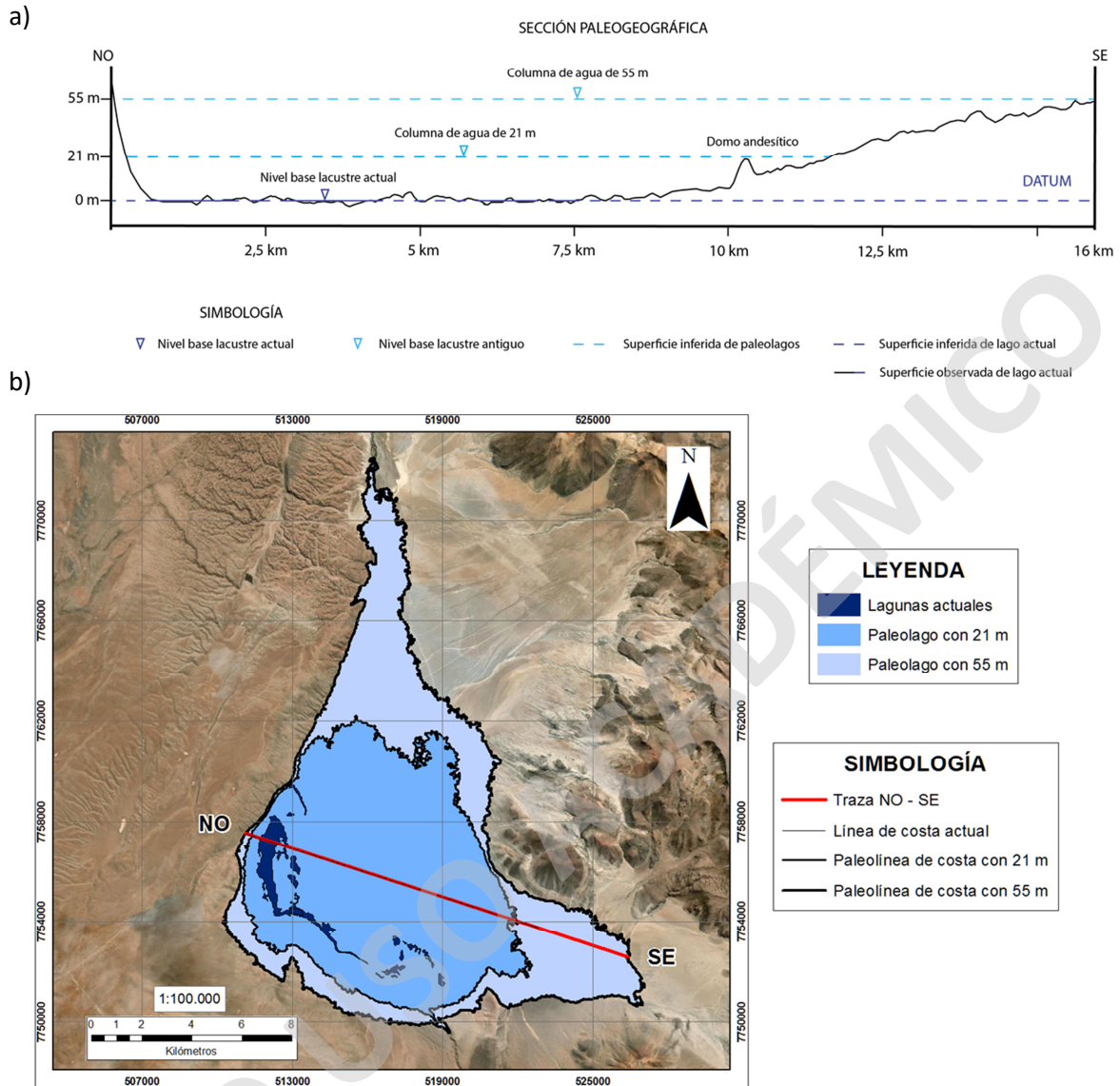


Figura 6.1: Paleogeografía de retroceso de la línea de costa del paleolago. a) Perfil esquemático de la paleogeografía de la etapa temprana en la reconstrucción de la evolución geológica y paleoambiental más reciente del salar del Huasco, con un paleolago de 55 m de columna de agua y uno posterior con 21 m, ambos sobre el nivel actual del salar. b) Mapa en donde se muestra la traza NO-SE a partir de la cual se realiza el esquema paleogeográfico, incluye las áreas de máxima inundación de los paleolagos con 55 y 21 m referidos, además de las lagunas actuales en el salar.

La descripción de la asociación de facies AF9 podría interpretarse como un ambiente palustre desarrollado en zonas distales de facies aluviales, o fondo lacustre. Los datos por sí solos no son suficientes para inclinarse por una de estas opciones, sin embargo, otros autores han descrito niveles lacustres bajo la costra salina a profundidades similares de AF9: a partir de 1 m según López *et al.* (1999); de 1,5 m según Gardeweg y Sellés (2013), y entre 1 y 1,92 m de

acuerdo a las calicatas de CORFO (1981). Complementariamente, Sayes (1968) describe unidades subyacentes a la costra salina, correspondientes a depósitos lacustres de limos arcillosos, mantos de diatomitas de hasta un 75% de pureza y limos verdes oscuro con restos orgánicos vegetales, denominados por Gardeweg y Sellés (2013) como unidad PIHI.

De este modo los limos orgánicos de AF9 habrían sido transportados en suspensión y decantados al disminuir la energía, bajo la zona fótica y en condiciones anóxicas de ambiente reductor, en un lago perenne de al menos 5 m de profundidad (Kendall, 1992) desarrollado en condiciones climáticas húmedas, y que podrían estar asociados a fauna lacustre (diatomeas) por el alto contenido de materia orgánica, en consistencia con las descripciones realizadas por Sayes (1968).

Estos mecanismos de depositación posiblemente se desarrollaron en las zonas centrales de un lago, en donde se alcanzan las mayores profundidades y la topografía más plana, donde dominan los procesos de decantación y precipitación de muy baja energía (Fregenal y Meléndez, 2010). Además estas zonas pueden recibir aportes de material fino transportado en suspensión por el viento.

Por lo que el techo de la asociación de facies AF9 correspondería a una discordancia, interpretada como superficie de máxima inundación asociada a un máximo de materia orgánica, que marcaría el cambio desde este periodo de estado alto del paleolago en condiciones húmedas-lacustres, al periodo de estado bajo del nivel del lago en condiciones áridas-evaporíticas, en el cual se desarrollan las etapas clásicas del ciclo de un salar.

6.2 Periodo de estado bajo del nivel del lago

Esta segunda etapa representa la regresión del paleolago mencionado anteriormente y la formación de los depósitos del salar, con edad posterior a los 11.500 años. La evolución de este periodo estaría controlada principalmente por factores como la evolución climática hacia condiciones de mayor aridez a principios del Holoceno (Gardeweg y Sellés, 2013), descartándose la incidencia eustática, por el carácter endorreico de la cuenca.

En este periodo se registran las etapas clásicas del ciclo de un salar: (1) etapa de inundación con la formación de lagos efímeros o no, seguida por una (2) etapa de concentración de evaporitas con la formación de salmueras y precipitación de costra salina, finalizando con una

(3) etapa de desecación con crecimiento diagenético de sales en capas de sales y lodo, y la constitución de costras salinas secas y duras.

A continuación se describe cada una de estas etapas:

Etapa de inundación

Está representada por depósitos sedimentarios asociados a eventos aluviales que ingresan a una cuenca endorreica con material detrítico y agua, formando lagos efímeros de bajas profundidades, en los que se desarrollan discretos *fan deltas*. En este escenario las asociaciones de facies AF4 y AF6, que corresponden a la zona lobular de un *fan delta* que, en zonas distales, estarían relacionadas en engrane lateral hacia el núcleo del salar con la asociación de facies AF3, légamo o zona distal de un *fan delta* y asociación de facies AF5, paleohumedal desarrollado en el llano de inundación del área supralobular de un *fan delta*.

Las asociaciones de facies AF4 y AF6 se interpretan como flujos de detritos (flujos gravitacionales) por su gradación inversa, carácter macizo y presencia de areniscas finas a gruesas, en el que depositaría primero lo más licuado y luego lo más pesado-grueso. La gradación inversa se adquiriría en el contacto entre el flujo y el cuerpo de agua (Figura 6.2a).

En el caso de las fangolitas verdes de la asociación de facies AF3, se podría interpretar de dos formas: como lluvia de ceniza que cae a cuerpo de agua, cuyo color verde adquiriría por desvitrificación de vidrio volcánico palagonitizado en agua, generando arcillas verdes (saponita y/o bentonita). O, correspondería a facies aluviales distales, constituyendo una cola de material fino distal (légamo) hacia el centro de la cuenca. Dada las descripciones de otros autores sobre la presencia en el área de estudio de fango verde con materia orgánica e, incluso, con presencia de diatomeas (Sayes, 1968; Gardeweg y Sellés, 2013) es más plausible la segunda opción.

En este contexto, la asociación de facies AF5 se interpreta como un paleohumedal desarrollado entre canales en la zona supralobular de este *fan delta*, correspondiendo a depósitos palustres ricos en materia orgánica en salmuera no madura de aguas duras, en un contexto reductor.

El ingreso de agua a la cuenca podría ocurrir en forma de flujos turbulentos de alta energía (episódica-puntual) o laminar de baja energía (río o surgencia de agua subterránea con continua alimentación a lago). Por el contexto climático de aridez del salar, lo más probable es que se trate de eventos esporádicos de inundación con precipitaciones intensas que

provocarían flujos de barro con la formación de lagos efímeros y someros. Por lo que estas cargas hídricas podrían darse por eventos meteorológicos puntuales, formando depósitos detríticos en eventos violentos o semicatastróficos.

Al respecto, es conocida la existencia de eventos de tormentas, de baja frecuencia, con precipitaciones intensas en la zona altiplánica, posteriores a las fases lacustres Tauca y Coipasa, controladas por celdas convectivas (ENSO: El Niño Southern Oscillation), produciendo flujos de detritos y depósitos aluviales (~10-3,1 ka, Sáez *et al.*, 2016).

La relación lateral de arenas progradantes y material fino distal es muy usual en flujos gravitacionales, como son los flujos de detritos (*debris flows*) y corrientes tractivas (Horton y Schmitt, 1996), que depositarían gravas y areniscas, además de fangos distales como producto de la decantación en el cese de la descarga masiva.

De acuerdo al modelo de ambientes en una cuenca endorreica árida (Eugster y Hardie, 1978), el caso del salar del Huasco representaría la relación de abanicos aluviales por el borde, con llanuras fangolíticas o playas y lago somero salino. Esta relación lateral entre lagos y abanicos aluviales en contextos áridos es usual (Fregenal y Meléndez, 2010).

Etapas de concentración de evaporitas

Luego de la formación de lagos efímeros y someros en una cuenca endorreica, éstos comenzarían a evaporarse al no tener recarga hídrica sustancial y sostenida en el tiempo, provocando la formación de salmueras y descenso del nivel base del agua.

Producto de la evaporación del agua se constituyen salmueras al somerizar cuerpos de agua a profundidades menores a 5 m (Kendall, 1992) y comienzan a precipitar evaporitas primarias, en este caso inicialmente carbonatos en los márgenes de lagos formando cuñas calcáreas (AF7) (Figura 6.2b y c), en playas o llanuras de inundación (AF8).

Al intensificarse la evaporación, aumenta la concentración de elementos y compuestos, dando inicio a la precipitación química de sales cada vez más solubles hacia el depocentro del lago, con depositación en primera instancia de sulfatos y luego cloruros subordinados (AF1) en respuesta al aumento de la aridez (Sáez *et al.*, 2016).

La asociación de facies AF1 que se dispone en la zona central del salar, contiene yeso y blöedita (Mg y Na), esta última representa mayor solubilidad que el yeso, por tanto mayor

salinidad, además la presencia minoritaria de limos-arcillas de color rojo podrían ser aportados por acción eólica a las salmueras. Cabe destacar que CORFO (1981) reconoció en calicatas la presencia de un volumen importante de mirabilita en esta Asociación de Facies (AF1).

Etapa de desecación

Corresponde al estado de crecimiento diagenético de evaporitas secundarias asociadas a salmueras más evolucionadas e hiperconcentradas, y está controlado por la intensificación de la evaporación solar, escasez de humedad en el sistema y exposición subaérea, lo cual permite la formación de costras salinas.

Al intensificarse la evaporación, también desciende el nivel del lago efímero y en los bordes se desarrolla un nivel freático somero que puede ser subsuperficial, formando una zona de evaporación y ascenso capilar sobre este nivel freático que controla la precipitación de evaporitas secundarias, en forma de cristales intersticiales y/o nódulos salinos. Este proceso se registra en la asociación de facies AF4 por la presencia de nódulos de yeso, mirabilita, bischofita, taumasita y polihalita inmersos en matrices de material fino.

Por otro lado, el aumento de la salinidad se ve reflejado en el techo de AF1, donde las gipsarenitas indicarían condiciones hiperconcentradas en las etapas finales de salmueras, con altas tasas de nucleación y bajas tasas de crecimiento, marcando una transición hacia la precipitación de sales eflorescentes y la formación de costras salinas.

La facies Aflpol de la asociación de facies AF4, ubicada en el techo de la columna estratigráfica 3, representa el abandono del sistema aluvial, es decir, exposición subaérea, indicada por su oxidación.

Por último, se registran evidencias de reiteración del ciclo del salar, como lo representa AF2 que indica erosión fluvial de una costra salina.

A continuación, se resume en orden evolutivo las etapas del ciclo del salar reconocidas en este periodo, las que reflejan secuencias de somerización como expresión de una situación regresiva (Ortí, 2010), desde un cuerpo de agua con salinidad normal a un cuerpo hipersalino, culminando en una exposición subaérea (Figura 6.2):

1° **Etapa de inundación** asociada a eventos de inundación que aportan sedimentos clásticos y agua a la cuenca, representada por **progradación** (Figura 6.2a) de asociaciones de facies de

fan deltas (AF4 y AF6) y paleohumedal (AF5), en engrane lateral con lógamo (AF3) en zonas distales.

2° **Etapa de concentración de evaporitas** con posibilidad de formación de playas (AF8) en la costa del lago efímero, con comienzo de deshidratación del sistema y depositación de facies calcáreas en el borde del lago, conformando **cuñas calcáreas** (AF7) (Figura 6.2b), o en la playa o llanura de inundación lacustre (AF8). Seguido por precipitación de sales cada vez más solubles hacia el depocentro del lago, como sulfatos de Ca, Na y Mg, y cloruros (AF1).

3° **Desecación** o comienzo de ésta (Figura 6.2c), por intensificación de la evaporación solar, escasez de humedad en el sistema e hiperconcentración de salmueras, formando gipsarenitas con texturas apiladas por precipitación en salmueras (AF1), presencia de cristales intersticiales y/o nódulos salinos (AF4), exposición subaérea de sistemas aluviales oxidados (Aflpol, techo de AF4), que representarían el paso a etapas finales de evaporación y desecación total de lagos efímeros.

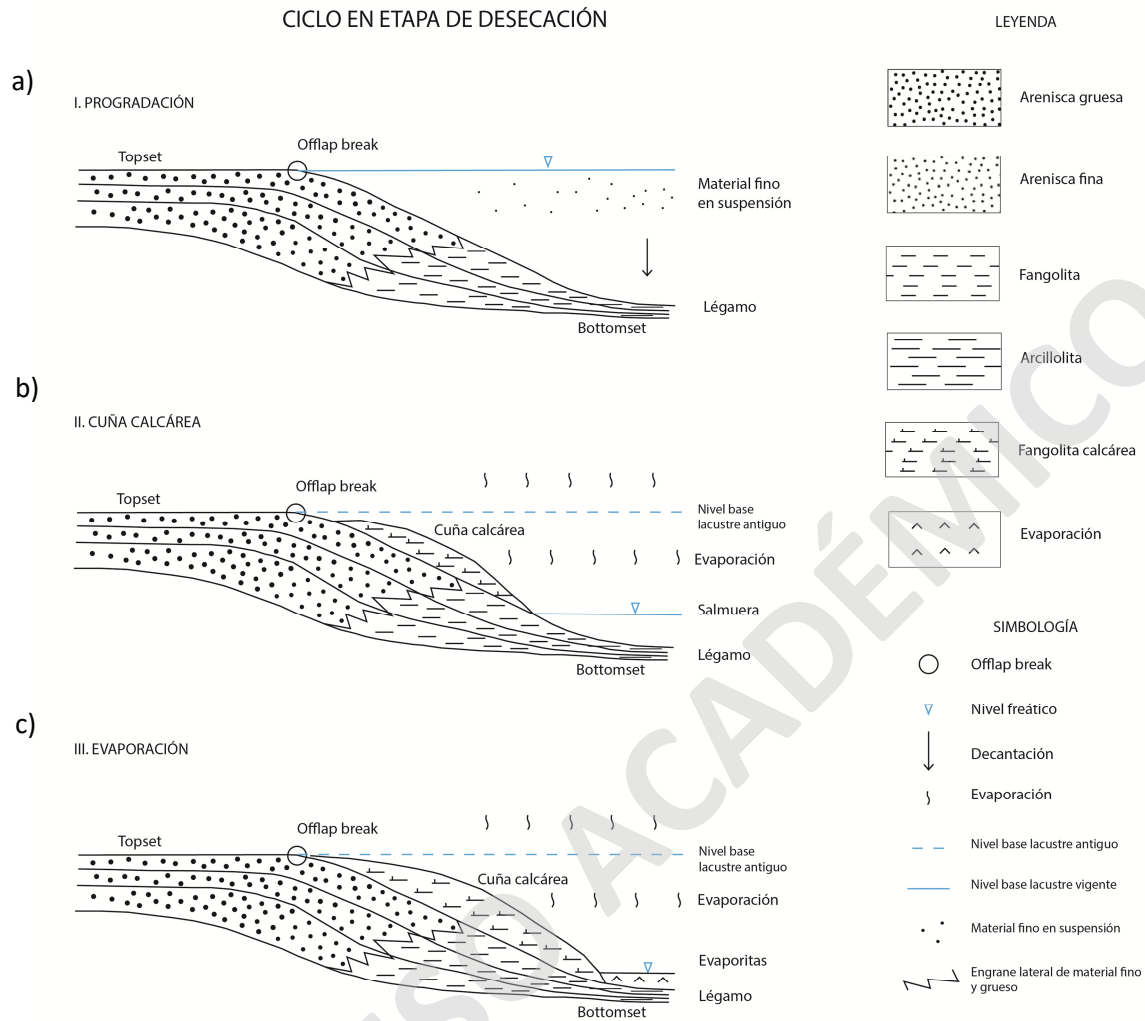


Figura 6.2: Etapas del ciclo de un salar. a) Progradación de abanicos aluviales y *fan deltas*, etapa de inundación con conformación de lagos efímeros y someros, además de la depositación de facies finas y distales por decantación; b) comienzo de la evaporación solar y descenso del nivel freático, formación de cuñas calcáreas y playas, etapa de concentración de evaporitas; c) etapas finales de evaporación de salmueras con precipitación de evaporitas y el paso a la etapa de desecación.

6.3 Costra Salina actual

En relación a la distribución de unidades de la costra salina definidas en este estudio y en comparación con mapeos anteriores realizados por otros autores, la tabla 6.1 sintetiza esta información.

Tabla 6.1: Autores que han mapeado el salar del Huasco.

Trabajo	Núcleo	Aureola
Stoertz <i>et al.</i> (1974)	<u>Sal blanca, maciza y nudosa.</u>	<u>Zona de sulfatos, indiferenciados; consiste principalmente en suelo yesífero suave y húmedo.</u>
López <i>et al.</i> (1999)	<u>Núcleo salino masivo. Mirabilita.</u> Sector salino de tipo masivo y composición predominantemente mirabilítico. Superficie prácticamente lisa.	<u>Aureola salina con sulfatos. Material detrítico con cloruros-sulfatos.</u> Costra poco cementada rica en yeso y con cantidades moderadas de halita, mirabilita, thenardita y ulexita. Microrrelieve (con desniveles de entre 15 y 20 cm) accidentado y difícil de transitar a pie.
Gardeweg <i>et al.</i> (2013)	<u>Costra salina maciza.</u> Costra dura, cristalina, de sulfato de sodio (thenardita y mirabilita) y yeso, halita y calcita.	<u>Costra salina blanda y pulverulenta.</u> De superficie irregular, con predominio de halita y thenardita y proporciones variables de yeso y de otras sales y detritos. De superficie irregular, de 5 a 10 cm de espesor, localmente con textura botroidal o microrrelieve, e incluso pozos de disolución, cuyo color varía entre pardo y blanco. Localmente está cubierta por bofedales y pequeños cuerpos de agua lagunares.
Véliz (2018)*	<u>Núcleo de halita y halita húmeda.</u> El mineral más soluble halita, se encuentra dispuesta en el sector centro del salar, este núcleo halítico no es concéntrico y se encuentra fraccionado, con morfologías estriadas de orientación ONO-ESE.	<u>Carbonatos, sulfatos y cloruros.</u> Zona dominante de carbonatos, distribuidos en el sector nororiental y oriental del salar. El grupo de sulfatos no presenta una orientación y distribución definida, ocupando un área cercana al 80% del salar.
Este trabajo**	Dura y maciza con sulfatos y halita. Dura y rugosa sulfatada. Blanda, ondulosa y yesífera con otros sulfatos.	Blanda, rugosa y yesífera con epsomita. Blanda, lisa y yesífera con aluminita. Dura y ondulosa con sulfatos de Na y halita.

* Sólo se enfoca en la distribución mineralógica, no utiliza criterios morfológicos.

** Se indica el nombre de los tipos de costras dispuestos en el núcleo y la aureola, no se detalla la descripción del tipo de costra, pues éstas fueron presentadas en el capítulo 5.

La mayoría de los trabajos distinguen un núcleo salino masivo cristalino de sulfatos, rodeado por una aureola salina sulfatada y húmeda, acompañada de material detrítico (Stoertz y Ericksen, 1974; López *et al.*, 1999), además de los cuerpos de agua o áreas con frecuentes inundaciones dispuestas en los extremos oeste y sur del salar.

Para Gardeweg y Sellés (2013), el núcleo del salar corresponde a una costra lisa y dura, de sulfatos de sodio (thenardita y mirabilita) con yeso, halita y calcita subordinadas, envuelta en la periferia por una costra blanda, pulverulenta y de superficie irregular, compuesta por halita y thenardita predominantes, y yeso, otras sales y detritos subordinados. Sin embargo, Véliz (2018) propone un modelo simétrico de núcleo halítico, rodeado por sulfatos, principalmente yeso, con un anillo periférico por los bordes oeste y este de carbonatos.

En el presente trabajo se ha reconocido un núcleo duro de yeso y epsomita, con halita y, un halo blando de yeso. Lo cual es consistente con casi todos los trabajos previos, aunque hay una diferencia importante de este estudio con respecto a López *et al.* (1999) y Gardeweg y Sellés (2013), cuyos análisis mineralógicos detectaron en la costra superficial del núcleo sectores con

mirabilita mayoritaria, mientras que en esta memoria sólo se ha reconocido mirabilita y thenardita de forma subordinada. Es necesario mencionar que CORFO (1981) registró un cuerpo importante de mirabilita en el núcleo del salar, bajo la superficie.

Respecto a la costra de la aureola del salar, diversos autores así como también este trabajo, reconocen que es sulfatada con gran abundancia de yeso (y halita). La presencia de carbonatos ha sido reconocida por Véliz (2018), pero no en este trabajo, lo que es un registro novedoso determinado por telemetría con técnicas de teledetección, por lo que esta propuesta sería más bien una interpretación sin validar.

A continuación, se analizan las tres costras de mayor extensión reconocidas en este estudio, vinculando su ocurrencia y distribución, efectos de estadias de inundación y de exposición subaérea, y cómo las estructuras presentes reflejan la agencia de éstos.

1) En la parte norte del núcleo se expone la costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita, que adquirió una superficie lisa por su exposición a inundaciones frecuentes (Stoertz y Ericksen, 1974). Sin perjuicio de lo anterior, en algunos sectores presenta grietas poligonales y crestas de presión que le imprimen rugosidad a la superficie. La presencia de estas estructuras es común en costras salinas duras, secas y sulfatadas como respuesta al descenso del nivel freático (Vila, 1975), lo que implica cierto rango importante de exposición subaérea, aunque no con el tiempo suficiente para que la costra adquiriera un aspecto rugoso generalizado. Lo anterior es coherente con el carácter duro de la costra, pues inundaciones más recientes la harían blanda.

Por otra parte, la presencia de depresiones de disolución y piscinas, ambas estructuras relictas, indicarían periodos de inundación o presencia de agua cercana a la superficie, pues en ambos casos su génesis es controlada por vertientes con influjos subterráneos (Stoertz y Ericksen, 1974). Es decir, esta costra presenta exposición a inundaciones, con intervalos de tiempo en que éstas no se producen, y descensos del nivel freático.

2) En la parte sur del núcleo se expone una costra dura y rugosa sulfatada, que presenta piscinas salinas relictas y escarpes yesíferos que indican zonas que estuvieron inundadas. Por lo que este tipo de costra habría estado expuesta a periodos de inundaciones en superficie, con posteriores descensos de niveles freáticos. Aunque con mayor exposición temporal subaérea que la costra anterior, dada su rugosidad.

3) Las costras del núcleo están rodeadas en la periferia por una costra blanda, rugosa y yesífera, con gran presencia de epsomita. La mineralogía es bastante similar a la costra dura y rugosa sulfatada (yeso y epsomita), pero se diferencian por la morfología y las estructuras

presentes. Presenta lóbulos salinos en el límite con la costra dura, lisa y maciza con sulfatos y halita, que cortan a la costra blanda y dejan a la costra dura en la parte alta de los escarpes de 30 cm que forman estas morfologías, por tanto la costra blanda es más joven por estar en la parte baja (Stoertz y Ericksen, 1974), su carácter blando así lo confirma, por no estar consolidada.

En este caso grietas poligonales centimétricas no orientadas indicarían el descenso del nivel freático en la costra blanda sulfatada (Vila, 1975), y la presencia de *muondsprings* aislados y en grupos, revelarían una profundidad somera del nivel freático, pues las plantas requieren estar conectadas con agua de éste, de lo contrario se destruirían (Vila, 1975).

Lo anterior es coherente con la presencia de cuerpos de agua y canales salinos activos, además de cristales pulverulentos, dezlenables, eflorescentes y el carácter blando de la costra. Todas evidencias que la costra estaría en interacción directa y constante con un nivel freático somero, con ascensos-descensos permanentes y, por tanto, expuesta a periodos de inundación frecuentes. Distinto a la costra dura y rugosa sulfatada ya descrita, que poseería menor influencia del nivel freático y menor exposición a inundaciones.

De lo discutido anteriormente y, en términos temporales, considerando la costra más joven como la menos consolidada y en consecuencia más blanda; las costras más antiguas corresponderían a las duras y rugosas, luego las costras duras y lisas del núcleo y, finalmente, las costras blandas y rugosas del halo del salar. Lo anterior es coherente con la presencia de lóbulos salinos, en que las costras duras estarían en el bloque elevado, por lo que la costra blanda al estar en niveles deprimidos estaría más expuesta a inundaciones recientes. Luego, entre las costras duras, la intensa rugosidad indica mayor tiempo de exposición subaéreo, por tanto, mayor antigüedad.

La distribución periférica de las costras blandas se relaciona a que por el borde oeste y sur surgen aguas subterráneas; por el este y norte el borde estaría a menor altura que el núcleo (lóbulos salinos) y, por tanto, estas costras estarían más expuestas a ser inundadas y en consecuencia menos consolidadas.

Con respecto a la textura y geomorfología de las costras, todos los trabajos anteriores mapean un núcleo duro, macizo, liso y cristalino, bordeado por una periferia blanda y de superficie irregular con presencia de detritos. A groso modo, este trabajo coincide con las propuestas anteriores.

A continuación, se analizan en términos mineralógicos y químicos las tres costras de mayor extensión reconocidas en este estudio.

Ambas costras del núcleo duro son sulfatadas con importante presencia de yeso y epsomita, diferenciándose en que la costra lisa presenta halita, por lo que en la costra rugosa habría minerales de menor solubilidad. Las dos costras provendrían de salmueras evolucionadas de compuestos más solubles (halita) a menos solubles (sin halita), reflejando salmueras en distintos estados de evolución por evaporación progresiva, dilución y/o disolución de costras existentes, en que la costra lisa representaría depositación de salmueras más evolucionadas-concentradas.

La costra blanda del halo del salar es predominantemente yesífera, lo que sugiere que provendría de salmueras en etapas más tempranas de su evolución, similar a las salmueras que dieron origen a la costra dura rugosa.

De acuerdo a la composición de la costra, el salar del huasco representaría una salmuera neutra, sulfatada-clorurada, dominada por Na-K-Mg-Cl-SO₄, con cantidades despreciables de Ca, lo que explicaría la ausencia-subordinación de carbonatos y la tendencia del Ca a ser compatible con fases sulfatadas (Ortí, 2010). Los minerales principales de estas paragénesis son yeso, halita, mirabilita/thenardita, glauberita, epsomita y blöedita, la mayoría fases cristalinas registradas en este estudio y por otros autores (CORFO, 1981; Gardeweg y Sellés, 2013; Véliz, 2018), especialmente por López *et al.* (1999) que estudia la evolución química de las salmueras del salar del Huasco.

Por otro lado, existe una orientación preferencial NO-SE de las unidades mapeadas que podría estar controlada por fallamiento e inclinación de la cuenca (Stoertz y Ericksen, 1974). Este ligero basculamiento de la cuenca provocaría en la actualidad que las principales entradas de agua al salar se sitúen en las áreas elevadas del extremo NO, con aportes menores por el margen sur, generando una circulación de oeste a este concentrada principalmente por el sector sur (López *et al.*, 1999). Esta disposición estaría controlada por la falla Huasco de orientación N-NE, ubicada al oeste del salar.

Esta inclinación, con entradas de agua desde un sector preferencial, podría generar un modelo asimétrico (*tear-drop*) respecto a la distribución mineralógica, lo que no ocurre. Tampoco se da una distribución concéntrica de acuerdo a un modelo simétrico, ya que el salar del Huasco es sulfatado, con trazas de halita y carbonatos.

Una posible explicación composicional podría ser la ubicación tectono-estratigráfica, es decir, el basamento sobre el cual se emplaza el salar, que condicionaría las características mineralógicas, dada la disponibilidad del tipo de material soluble aportada por el sustrato (Vila, 1975; Gajardo, 2014). En este caso el basamento corresponde a la Ignimbrita Huasco, que podría aportar gran cantidad de azufre al sistema por medio de lixiviación de este sustrato riolítico.

Al respecto, al comparar la mineralogía de salares y suelos desérticos chilenos *versus* el resto del mundo, la particularidad local es la presencia de escasos carbonatos, que usualmente corresponden a trona, calcita y aragonito (Stoertz y Ericksen, 1974), y que se relaciona con los aportes de las unidades sobre las que se asientan los salares en Chile.

Adicional a la geomorfología de la cuenca y a la ubicación tectónico-estratigráfica representada por el basamento de la cuenca, otros factores que controlarían las dinámicas internas de distribución composicional del salar serían: la evaporación, y la interacción entre las aguas de recarga y la costra salina, en términos de disolución del yeso y de las sales solubles preexistentes (López *et al.*, 1999).

Por último, de acuerdo a los procesos controladores de la distribución de las costras salinas, los salares se constituyen como sistemas muy dinámicos, cuyas morfologías-texturas y distribución podría variar anualmente. Es así que costras inundadas asociadas a periodos lluviosos podrían dejar de serlo en días, semanas, meses o años. O viceversa, costras secas y antiguas podrían inundarse, con cambios significativos cada temporada (Navarrete, 2009).

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

La evolución geológica y paleoambiental más reciente del salar del Huasco comprende un periodo inicial de formación de un paleolago asociado a una fase climática húmeda, seguido por un periodo tardío regresivo con descenso del nivel base lacustre relacionado a desertización de la zona.

- El periodo inicial correspondería a la evolución del paleolago perenne con aportes de agua constante y profundidades de 50-55 m, propuesto por otros autores (Stoertz y Ericksen, 1974; Cabrera *et al.*, 1995; Gardeweg y Sellés, 2013), cuya edad estaría comprendida entre los 18.100 y 11.500 años, el cual corresponde a un periodo de mayor humedad que la actual, asociado a las fases lacustres Tauca y Coipasa desarrolladas en la zona andina de los Andes Centrales.
- El registro más temprano de este estudio podría corresponder a un cerro isla colonizado por estromatolitos en sus laderas y cima, que se relacionan a un ambiente lacustre con un nivel base de 21 m sobre el nivel base actual del salar y un área de máxima inundación de 88 km². El cual representaría un estado evolucionado del paleolago con un descenso de 30 m de la columna de agua desde su posición de máxima inundación.
- Los últimos depósitos asociados a este paleolago, han sido interpretados en el presente estudio como los pertenecientes a la Asociación de Facies 9, correspondientes a limos orgánicos depositados en ambiente lacustre de baja energía, posiblemente en la zona profunda.
- El techo de esta asociación de facies AF9 corresponde a una discordancia neta interpretada como superficie de máxima inundación o arcillosidad, sobre la cual se depositan facies que representan las etapas del ciclo de un salar. Esta superficie de inundación podría tener la edad aproximada de 11.500 años correspondiente al término del ciclo lacustre Coipasa.
- El periodo tardío siguiente se desarrolló en un ambiente de desertización climática y evaporación del cuerpo de agua, con descenso del nivel base y migración de la paleolínea de costa hacia la cuenca actual del salar, disminuyendo el área del lago inicial desde 140 km² hasta los 3,6 km² de las lagunas actuales del salar, y cuyo comienzo podría situarse en el término de la fase lacustre Coipasa, es decir, posterior a los 11.500 años.

- Las condiciones paleoclimáticas de esta desertización corresponden al aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones-humedad respecto a la época húmeda representada por el paleolago (60% en comparación con el 20% de humedad actual).
- Durante este periodo tardío, se habrían depositado en discordancia sobre los limos orgánicos de AF9, al menos 1,5 m de sedimentos clásticos y químicos correspondientes a la parte más superficial de la cuenca del salar. En los que se han reconocido un ciclo clásico de evolución de un salar: progradación de fan delta (inundación), formación de cuña calcárea y precipitación de sulfatos (concentración de evaporitas) y formación de evaporitas diagenéticas (desección).
- Se reconocen asociaciones de facies (AF3, AF4, AF5 Y AF6) que representan depósitos de *fan delta* y que indican aportes aluviales de agua y detritos a una cuenca, producto de eventos climáticos de tormentas episódicas. Sobre las cuales se disponen asociaciones de facies (AF7, AF8 y AF1) que indicarían somerización (evaporación y concentración de evaporitas) de lagos efímeros y someros, formados durante estos pulsos de precipitaciones intensas.
- Al descender el nivel freático de los lagos efímeros se formarían playas, humedales y márgenes calcáreos en los dominios de borde lacustre (AF7 y AF8), seguido por precipitación de sulfatos en el núcleo del salar (AF1) al evolucionar la salmuera.
- La asociación de facies AF1 está constituida principalmente por yeso (Ca) y blöedita (Mg y Na), y halita subordinada. Cabe destacar que CORFO (1981) reconoció la presencia de un volumen importante de mirabilita (Na). Lo anterior indicaría salmueras que evolucionarían desde facies sulfatadas de Ca a facies más evolucionadas sulfatadas ricas en Na y Mg, sin desarrollar un importante contenido de halita. Además, la presencia minoritaria de limos-arcillas de color rojo podrían ser aportados por acción eólica a las salmueras.
- Además, se observa depositación diagenética de nódulos salinos y/o cristales de sales intersticiales de sulfatos (yeso, mirabilita, bischofita, taumasita y polihalita) en las secuencias sedimentarias previamente descritas, debido al descenso progresivo del nivel freático producto de la desecación.
- Las partes más superficiales en la estratigrafía también reflejan el desarrollo de salmueras evolucionadas e hiperconcentradas, con formación de gipsarenitas y textura apilada, que marcan la transición entre las etapas de concentración de evaporitas y de desecación.

- En la actualidad la superficie del salar está constituida por un núcleo ovoide de costra dura mayoritariamente lisa compuesta de yeso y epsomita, con halita, mirabilita y thenardita subordinadas. Rodeado por una aureola de costra blanda yesífera con epsomita y halita subordinada, con textura rugosa. En que las costras duras serían más antiguas a las blandas, lo que estaría controlado por la exposición a eventos de inundación. Además de los cuerpos de agua permanentes (o costra inundada) dispuestos hacia el oeste y sur.
- En cuanto a la composición de la superficie del salar, la costra es mayormente sulfatada con pocos cloruros (halita) y la casi ausencia de carbonatos, de modo que el salar no correspondería a un modelo simétrico ni a uno asimétrico. Además, su inclinación controlada por la falla Huasco dispondría la ubicación de alimentadores de agua por el oeste mayormente y en algunos casos por el sur, controlando la orientación NO-SE de los distintos tipos de costras.
- Por último, la composición de la costra actual representa depositación a partir de salmueras neutras, sulfatadas-cloruradas, dominadas por el sistema Na-K-Mg-Cl-SO₄, cuyas fases minerales corresponden, mayormente, a yeso, halita, mirabilita/thenardita, epsomita y blöedita. La mineralogía precipitada desde las salmueras podría estar controlada por el sustrato riolítico de la cuenca en que se emplaza el salar del Huasco, que aportaría gran cantidad de azufre al sistema.

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, O. (2004).** Impactos de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (Norte de Chile). Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad de Cataluña, Barcelona.
- Acosta, O. J. y Custodio, E. (2008).** Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). Boletín Geológico y Minero, v. 119, N° 1, pp. 33-50.
- Alonso, A. (2010).** Petrología sedimentaria. Notas de teoría. 11. Las rocas evaporíticas. RE, Reduca (Geología). Serie Petrología Sedimentaria (Apuntes de curso). 2 (3): 117-124.
- Alonso, R. (2006).** Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina. INSUGEO, Serie Correlación Geológica, 21: 155-170. Tucumán, Argentina.
- Amundson, R., Carrevedo, M. L., De Pol-Holz, R., Finstad, K., Gayo, E., Heimsath, A., Jungers, M., Latorre, C., MacRostie, V., Pfeiffer, M., Rojas, R. y Santoro, C. (2018).** Chronology, stratigraphy and hydrological modelling of extensive wetland sand paleolakes in the hyperarid core of the Atacama Desert during the late quaternary. Quaternary Science Reviews 197, 224-245.
- Baker, P. A., Rigsby, C. A., Seltzer, G. O., Fritz, S. C., Lowenstein, T. K., Bacher, N. P. y Véliz, C. (2001).** Tropical climate changes at millennial and orbital timescales on the Bolivian Altiplano. Nature 409, 698-701.
- Blanco, N., Vásquez, P., Sepúlveda, F. A., Tomlinson, A. J., Quezada, A. y Ladino, M. (2012).** Levantamiento geológico para el fomento de la exploración de recursos minerales e hídricos de la Cordillera de la Costa, Depresión Central y Precordillera de la Región de Tarapacá (20°-21°S). Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-12-50, 246 p., 7 mapas escala 1:100.000, Santiago.
- Bobst, A., Lowenstein, T., Jordan, T., Godfrey, L., Ku, T-L, Luo, S. (2001).** A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 173, 21-42.
- Cabrera, Ll., Chong, G., Jensen, A., Pueyo, J., Sáez, A. y Wilke, H. (1995).** Cenozoic and Quaternary lacustrine systems in northern Chile (Central Andes, Arc and Fore-Arc zones). Excursion guidebook. GLOPALS – IAS Meeting, Antofagasta.
- Charrier, R., Pinto, L. y Rodríguez, M. P. (2007).** Tectono-stratigraphic evolution of the Andean orogeny in Chile. En: Geology of Chile, Chapter 3 (Gibbons, W. y Moreno, T., eds), The Geological Society, London, Special Publication, pp. 21-116.

- Chong, G. (1984).** Die Salare in Nordchile – Geologie. Struktur und geochemie. Goetektonische Forschung 67: 1-146.
- Chong, G. (1988).** The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18°00' and 27°00' south latitude. In: Bahiburg, H., Breitzkreuz, C. y Giese, P. (eds.). The Southern Central Andes. *Lecture Notes in Earth Sciences*, 17: 131-151.
- COCHILCO (2013).** Mercado Internacional del litio. Comisión Chilena del Cobre, Dirección de Estudios. Compilación de informes sobre: Mercado internacional del litio y el potencial del litio en salares del norte de Chile. Subsecretaría de minería, Chile.
- CORFO (1981).** Informe de prospección preliminar del Salar de Huasco. Informe realizado por Comité de sales mixtas para Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Tomo(s) 1, 19 p., Santiago de Chile.
- DIHA-PUC. (2009).** Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa II. Informe Final Parte IV, S.I.T. N° 195, Dirección General de Aguas y Pontificia Universidad Católica, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago.
- Eugster, H. y Hardie, L. (1978).** Geochemistry of saline minerals separated from Lake Qarun brine. *Chemical Geology*, vol.40, pp. 187-362.
- Flahaut, J., Martinot, M., Bishop, J., Davies, G., & Potts, N. (2017).** Remote sensing and in situ mineralogic survey of the Chilean salars: An analog to Mars evaporate deposits? *ELSEVIER Icarus*, p. 1-22.
- Fregenal, M. A. y Meléndez, N. (2010).** Lagos y sistemas lacustres. En: Arche, A. (ed.) (2010). Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España. pp. 299-396.
- Gajardo, A. (2014).** *Potencial de Litio en Salares del Norte de Chile* [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Potencial-de-Litio-en-Salares-de-Chile\(AnibalGajardo\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Potencial-de-Litio-en-Salares-de-Chile(AnibalGajardo).pdf) (Revisado el 06-06-2019, 23:30 hrs).
- Garcés, I. y López, L. J. (2010).** Monitoreo geoquímico de un sistema evaporítico natural: salar de Huasco (Chile). *Rev. Fac. Ing. Antioquía* N° 52, pp. 108-122.
- Gardeweg, M. y Sellés, D. (2013).** Geología del área Collacagua-Rinconada. Región de Tarapacá. Carta geológica de Chile, No. 148, Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile).
- Gardeweg, M., Blanco, N., Sellés, D. y Tomlinson, A. (2015).** Las Ignimbritas Tambillo y Huasco del Mioceno Inferior en la alta cordillera de Iquique, -Región de Tarapacá. XIV Congreso Geológico Chileno, Octubre 2015, La Serena, Chile.

- Hardie, L. y Eugster, H. (1970).** The evolution of closed-basin brines: *Spec. Pub. Mineral. Soc. Am.*, 3, 273-290.
- Hardie, L., Smooth, J. y Eugster, H. (1978).** Saline lakes and their deposits: A sedimentological approach. En: Matter, A. y Tucker, M. (eds.). *Modern and ancient lake sediments, Spec. Publ. Int. Assoc. Sedim.*, 2: 7-41.
- Horton, B. y Schmitt, J. (1996).** Sedimentology of a lacustrine fan-delta system, Miocene Horse Camp Formation, Nevada, USA. *Sedimentology* 43, 133-155.
- Irarrázabal, Í. (2009).** Estratigrafía y mineralogía de las evaporitas superiores zona SO, salar de Atacama. Tesis de pregrado de la carrera de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Kendall, A. (1992).** Evaporites. En: Walker, R. y James, N. (eds.). *Facies Models. Response to sea level change.* Geological Association of Canada, p. 375-406.
- Kley, J., Monaldi, C. R. y Salfity, J. A. (1999).** Along-strike segmentation of the Andean foreland: causes and consequences. *Tectonophysics*, Vol. 301, p.75-94.
- Le Roux, J. P. (2012).** A review of Tertiary climate changes in southern South America and the Antarctic Peninsula. Part 2: continental conditions. *Sedimentary Geology*, 247/248, 21-38.
- López, P. L., Garcés, I., Auqué, L. F., Gómez, J., Gimeno, M. J. y Lapuente, M. P. (1999).** Características geoquímicas y aspectos geológicos del Salar de Huasco (Chile). *Boletín Geológico y Minero*, v. 110. N° 3, pp. 73-91.
- Lowenstein, T. y Hardie, L. (1985).** Criteria for the recognition of salt-pan evaporites: *Sedimentology*, 32, 627-644.
- Miall, A. (1985).** Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth. Sci. Rev.* 22: 261-308.
- Miall, A. (1978).** Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary. *Fluvial Sedimentology. Can. Soc. Petrol, Geol.* 5: 597-604.
- Navarrete, N. (2012).** Análisis de la evolución de los ambientes sedimentarios y sus principales factores de control, nor-este del salar de Coposa, Chile. Tesis de pregrado de la carrera de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Nichols, G. (2009).** *Sedimentology and stratigraphy.* Wiley-Blackwell, Oxford.

- Ortí, F. (2010).** Evaporitas: introducción a la sedimentología evaporítica. En: Arche, A. (ed.) (2010). Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España. pp. 675-770.
- Placzek, C., Betancourt, J.A., Quade, J., Patchett, P.J., Latorre, C., Rech, J., Holmgren, C., English, N.B. y Matmon, A. (2009).** Climate in the dry, central Andes over geologic, millennial, and interannual timescales. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 96, 386–397.
- Placzek, C., Quade, J. y Patchett, P. (2013).** A 130 ka reconstruction of rainfall on the Bolivian Altiplano. *Earth and Planetary Science Letters* 363, 97-108.
- Placzek, C., Quade, J. y Patchett, P. (2011).** Isotopic tracers of paleohydrologic change in large lakes of the Bolivian Altiplano. *Quaternary Research* 75, 231-244.
- Placzek, C., Quade, J., y Patchett, P. J. (2006).** Geochronology and stratigraphy of Late Pleistocene lake cycles on the Southern Bolivian Altiplano: implications for causes of tropical climate change. *Geological Society of America Bulletin* 118, 515-532.
- Quade, J., Rech, J. A., Betancourt, J. L., Latorre, C., Quade, B., Rylander, K. A. y Fisher, T. (2008).** Paleowetlands and regional climate change in the central Atacama Desert, northern Chile. *Quat. Res.* 69, 343-360.
- Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. (1999).** Geoquímica de aguas en cuencas cerradas, I, II, III Regiones, Chile. Ministro de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Technical Report S. I. T. No 51, Santiago, Chile.
- Risacher, F. y Fritz, B. (2008).** Origin of salts and brine evolution of bolivian and chilean salars. *Aquat Geochem*, 14, 123-157.
- Sáez, A., Godfrey, L.V., Herrera, C., Chong, G., y Pueyo, J.J. (2016).** Timing of wet episodes in Atacama Desert over the last 15 ka. The Groundwater Discharge Deposits (GWD) from Domeyko Range at 25° S. *Quaternary Science Reviews* 145, 82-93.
- Sayes, J. (1968).** Sondajes en el salar de Huasco, Provincia de Tarapacá. En Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) (inédito), 59-60 pp.
- Servant, M. y Fontes, J.C. (1978).** Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cahiers ORSTOM, sér. Géol.* 10 (1), 9-23.
- Shaw, P. y Bryant, R. (2011).** Pans, playas and salt lakes. En: Thomas, D. (ed.) (2011). *Arid Zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*. Wiley-Blackwell (3rd edition). United Kingdom . Chap. 15, pp. 373-401.

- Smoot, J. P. y Lowenstein, T. K. (1991).** Depositional environments of non-marine evaporites. En: Melin, J. (ed.) (1991). *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources. Developments in Sedimentology*, 50, 189-347.
- Somoza, R. (1998).** Updated Nazca (Farallón) – South America relative motions during the last 40 Ma: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 11, p. 211-215.
- Stoertz, G. E. y Ericksen, G. E. (1974).** Geology of salars in Northern Chile. USGS Professional Paper No. 811, Washington, USA, 65 p.
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E. y Henderson, K. A. (2000).** Ice-core palaeo climate records in tropical south America since the last glacial maximum. *J. Quat. Sci.* 15, 377-394.
- Véliz, E. (2018).** Distribución de asociaciones evaporíticas en el Salar del Huasco, región de Tarapacá, Chile: análisis espacio temporal a través de sensores remotos. Tesis de pregrado de la Carrera de geología, Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ciencias de la Tierra.
- Vergara, H. y Thomas, A. (1984).** Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua, No. 59, Región de Tarapacá, Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile.
- Vila, T. (1975).** Geología de los depósitos salinos andinos, provincia de Antofagasta, Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Villegas, J. (2020).** Aplicación de sensores remotos para análisis e interpretación de la distribución de minerales evaporíticos y de variables físico-químicas de la superficie en el salar del Huasco, región de Tarapacá. Tesis de pregrado de la carrera de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor.
- Walker, R. (1992).** Facies, Facies Models and Modern Stratigraphic Concepts. En: Walker, R. y James, N. (eds.). *Facies Models. Response to sea level change.* Geological Association of Canada, p. 2-14.
- Warren, J. (2006).** *Evaporites. A Geological Compendium.* Springer.
- Zappettini, E., Godeas, M., Seggiaro, R., Korzeniewski, L., Rubiolo, D., Miranda-Angles, V., Uribe-Zeballos, H., Heuschmidt, B., Rodríguez, C., Vivallo, W., Gardeweg, M., Mpodozis, C., Palacios, O., Maidana, M., Boulanger, E., Carpio, M. y Cocking, R. (2001).** Mapa metalogénico de la región fronteriza entre Argentina, Bolivia, Chile y Perú (14°S-28°S). Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile. *Publicación Geológica Multinacional*, No 2.

CAPÍTULO 9: ANEXOS

Tabla 9.1: Minerales del salar del Huasco.

Mineral	Fórmula química	Grupo	Elemento(s)	Mineral	Fórmula química	Grupo	Elemento(s)
Esmectita	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Arcilla	Al	Cristobalita	SiO_2	Silicato	Si
Illita	$(K,H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}$	Arcilla	Al, Fe, K, Mg	Albita cálcica	$NaAlSi_3O_8$	Silicato	Al, Ca, Na
Saponita	$(Ca,Na)_{0.3}(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	Arcilla	Al, Fe, K, Mg	Analcima	$Na(Si_2Al)O_6 \cdot H_2O$	Silicato	Na
Inyoita	$CaB_3O_3(OH)_5 \cdot 4H_2O$	Borato	Ca	Natrolita	$Na_2(Si_3Al_2)O_{10} \cdot 2H_2O$	Silicato	Na
Hilgardita	$Ca_2B_5O_9Cl \cdot H_2O$	Borato	Ca	Basanita	$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$	Sulfato	Ca
Hexahidrobórita	$Ca[B(OH)_4]_2 \cdot 2H_2O$	Borato	Ca	Glaserita	K_2SO_4	Sulfato	K
Ameghinita	$NaB_3O_3(OH)_4$	Borato	Na	Loweita	$Na_{12}Mg_7(SO_4)_{13} \cdot 15H_2O$	Sulfato	Mg, Na
Hidrobóracita	$CaMgB_3O_4(OH)_3 \cdot 3H_2O$	Borato	Ca, Mg	Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Sulfato	Ca
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	Carbonato	Ca, Mg	Aluminita	$Al_2SO_4(OH)_4 \cdot 7(H_2O)$	Sulfato	Al
Calcita	$CaCO_3$	Carbonato	Ca	Bloedita	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Sulfato	Na, Mg
Calcita magnésica	$CaCO_3$	Carbonato	Ca, Mg	Mirabilita	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	Sulfato	Na
Aragonita	$CaCO_3$	Carbonato	Ca	Polihalita	$K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$	Sulfato	Ca, K
Kutnohorita-Mg	$CaMn^{2+}(CO_3)_2$	Carbonato	Ca, Mg, Mn	Epsomita	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Sulfato	Mg
Bischofita	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	Cloruro	Mg	Alunógeno	$Al_2(SO_4)_3(H_2O)_{12} \cdot 5H_2O$	Sulfato	Al
Halita	$NaCl$	Cloruro	Na	Halotriquitita	$Fe^{2+}Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Sulfato	Al, Fe
Halita potásica	$NaCl$	Cloruro	K, Na	Picromerita	$K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Sulfato	K, Mg
Silvita	KCl	Cloruro	K	Taumasita	$Ca_3Si(OH)_6(CO_3)(SO_4) \cdot 12H_2O$	Sulfato	Ca
Carnalita	$KMgCl_3 \cdot 6H_2O$	Cloruro	K, Mg	Melanterita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Sulfato	Ca
Hidróxido de aluminio	$Al(OH)_3$	Hidróxido	Al	Mirabilita	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	Sulfato	Na
Nitratina	$NaNO_3$	Nitrato	Na	Thenardita	Na_2SO_4	Sulfato	Na
Sepiolita	$Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$	Silicato	Mg	Eugsterita	$Na_4Ca(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$	Sulfato	Ca, Na
Cuarzo bajo	SiO_2	Silicato	Si	Singenita	$K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$	Sulfato	Ca, K
Albita	$NaAlSi_3O_8$	Silicato	Al, Na	Aphthitalita	$(K,Na)_3Na(SO_4)_2$	Sulfato	K, Na
Cuarzo	SiO_2	Silicato	Si	Alumbre de potasio	$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Sulfato	Al, K
Estilbita	$(Na,Ca)_n(Si_{27}Al_9)O_{72} \cdot 28H_2O$	Silicato	Si	Hanksita	$KNa_{22}(SO_4)_9(CO_3)_2Cl$	Sulfato, cloruro, carbonato	K
Albita alta	$NaAlSi_3O_8$	Silicato	Al, Na	Rejalgar	As_4S_4	Sulfuro	As

Tabla 9.2: Métodos de análisis de mineralogía para las distintas muestras.

Código Muestra	Coordenadas UTM		Minerales		Método	Fuente de información
	Este	Norte	Mayoritario(s)	Minoritario(s)		
VSH12	511547	7756089	Yeso	Aluminita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH57	512019	7753994	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH56	512081	7754268	Hidróxido de aluminio	Agregado de sulfatos	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH48	513005	7757544	Agregado de sulfatos		Esp. de reflectancia	Este trabajo
C3HSH4.2.1	513053	7757399	Yeso	Blöedita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH410	513334	7757769	Sulfato hidratado		Esp. de reflectancia	Este trabajo
4CVSA	513781	7760591	Mirabilita	Polihalita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH46	513787	7760348	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
4CSN	513878	7760221	Illita-Esmectita	Dolomita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH44	513974	7759855	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
C4HSH4.1.1	513977	7759860	Yeso	Mirabilita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH42	514005	7759412	Saponita	Sepiolita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH42.001	514005	7759412	Sepiolita		Esp. de reflectancia	Este trabajo
HSH2.1.1	514475	7755771	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
3SBBN	514502	7755066	Epsomita	Agregado de sulfatos	Esp. de reflectancia	Este trabajo
COHSH2.3.1	514529	7756322	Agregado de sulfatos		Esp. de reflectancia	Este trabajo
3BN	514602	7755658	Epsomita	Bischofita, Aluminita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
HSH2.2.1	514625	7755699	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH31.000	514671	7755433	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH31.001	514671	7755433	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH31.002	514671	7755433	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH311	514708	7756578	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
3CA	514734	7756802	Epsomita	Alunógeno, Halotriquita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH32	514847	7754967	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo

Código Muestra	Coordenadas UTM		Minerales		Método	Fuente de información
	Este	Norte	Mayoritario(s)	Minoritario(s)		
VSH32.001	514847	7754967	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
C1HSH3.1.1	515065	7753833	Epsomita	Blöedita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH34	515109	7754170	Picromerita		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH34.001	515109	7754170	Picromerita		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH14	520321	7752667	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
VSH24	514641	7756199	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
5CBL	512000	7754270	Blöedita	Taumasita, Mirabilita	Esp. de reflectancia	Este trabajo
C5HSH4.1.1	513977	7759860	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
HSH2.1.3	514475	7755771	Yeso		Esp. de reflectancia	Este trabajo
HU-02	512999	7759194	Thenardita, Calcita, Halita, Cuarzo Bajo, Albita, Burkerita, trazas de azufre		DRX	Véliz (2018)
HU-04	513752	7760317	Calcita magnésica, Thenardita, Halita, Nitratina, Eugsterita, Blöedita		DRX	Véliz (2018)
HU-06	513689	7756671	Halita, Yeso, Eugsterita, Dolomita, Singenita, Cuarzo, Nitratina, Stilbita, Inyoita, Thenardita		DRX	Véliz (2018)
HU-08	513782	7756242	Halita, Singenita, Yeso, Thenardita, Aroganita, Hilgardita, Aphthitalita, Rejalgar		DRX	Véliz (2018)
HU-13	520043	7752132	Yeso, Halita, Eugsterita, Cuarzo Bajo, Singenita		DRX	Véliz (2018)
HU-15	520029	7750450	Yeso, Cuarzo, Albita Alta, Hexahidrobórta		DRX	Véliz (2018)
HU-17	515697	7751910	Halita, Yeso, Eugsterita, Dolomita, Singenita, Potassium alum, Ameghinita		DRX	Véliz (2018)
HU-18	515727	7752439	Halita, Thenardita, Calcita magnésica, Silvita, Georgeyita, Nitratina, Cristobalita, Hanksita		DRX	Véliz (2018)
CR-206 B	514494	7756263	Halita, Bassanita	Cuarzo, posible Cristobalita	DRX	Gardeweg et al. (2013)
CR-214	520087	7751693	Yeso		DRX	Gardeweg et al. (2013)
A H-4 (Sector NO)	512683	7758265	Halita, Thenardita, Bloedita	Yeso, Singenita, Analcima, Silvita, Glacirita, Mirabilita	DRX	López <i>et al.</i> (1999)

Código Muestra	Coordenadas UTM		Minerales		Método	Fuente de información
	Este	Norte	Mayoritario(s)	Minoritario(s)		
B H-2 (Sector O)	512577	7754609	Halita, Yeso	Mirabilita, Singenita, Silvita, Thenardita, Loweita, Calcita	DRX	López et al. (1999)
B H-3 (Sector O)	512577	7754609	Yeso, Singenita	Loweita, Thenardita, Calcita, Natrolita	DRX	López et al. (1999)
C C1 (Sector Centro E)	517339	7753418	Halita, Thenardita	Glaserita, Calcita, Singenita	DRX	López et al. (1999)
C C-2 (Sector Centro E)	517339	7753418	Halita, Thenardita	Singenita, Yeso, Calcita, Glaserita, Carnalita, Polihalita, Epsomita	DRX	López et al. (1999)
C Y-1 (Sector Centro E)	517339	7753418	Halita, Calcita	Yeso, Singenita, Glaserita, Dolomita, Hidroboracita	DRX	López et al. (1999)

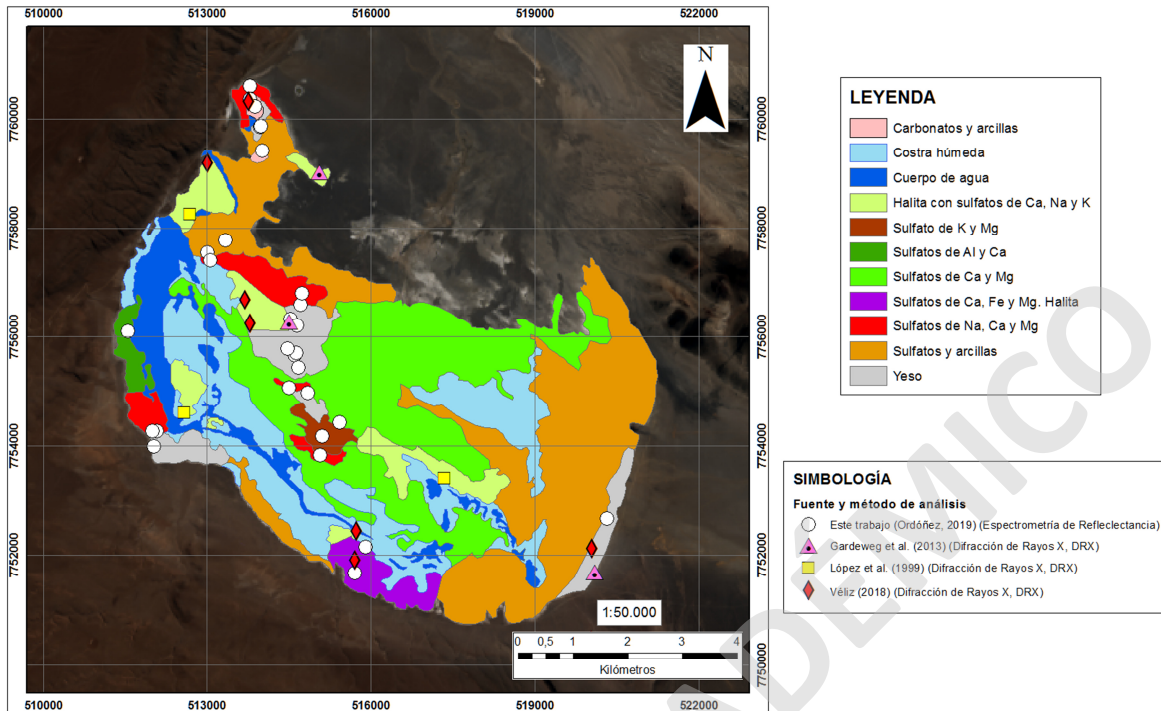


Figura 9.1: Mapa de distribución de asociaciones mineralógicas en la costra superficial del salar del Huasco, escala 1:50.000 (Este trabajo). Se muestra la distribución de muestras utilizadas para la confección del mapa: los círculos blancos pertenecen a los análisis realizados en este trabajo y analizados por Ordóñez (2019), en que se utiliza Espectrometría de Reflectancia en Terra Spec; el resto de las muestras fueron analizadas por otros autores en trabajos previos, mediante Difracción de Rayos X (DRX) (cuadrados amarillos: López *et al.* (1999); triángulos rosados: Gardeweg y Sellés (2013); rombos rojos: Véliz (2018)).

El mapa de distribución de asociaciones mineralógicas presentada en la figura 9.1, se construyó en base a los datos de las muestras presentadas en la tabla 9.2 (que incluye la mineralogía de cada muestra, el método de análisis y el trabajo fuente en que se presenta la información; en tanto la tabla 9.1 detalla la fórmula química, el grupo y elementos que contiene cada mineral registrado en el salar del Huasco).

Respecto a sectores en el que no se dispone de datos se utiliza la información aportada por Villegas (2020) quien mapea la distribución mineralógica a través de técnicas de teledetección, a partir de los espectros mineralógicos de las muestras trabajadas en esta tesis por medio de Terra Spec (para mayor detalle revisar su memoria de pregrado).