

Medida H-04: Investigación sobre Nuevas Fuentes de Agua en Cuencas de Salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas

Reporte Geología



28 de mayo de 2024

Versión 0

A21_1115_INF03_Reporte_Geologia_v0

Amphos 21 Consulting Chile Ltda.

Av. Nueva Tajamar, 481. WTC-Torre Sur- Of. 1005. Santiago (Chile)

+56 2 27991630

www.amphos21.com

Preparado por	Revisado por	Validado por
Matías Cárdenas Samuel Iglesias	Pilar Enguita	Juan Castaño

Índice

1	Introducción.....	6
1.1	Objetivos.....	6
1.2	Antecedentes generales.....	6
1.3	Área de estudio	7
2	Marco geológico.....	8
2.1	Geomorfología regional.....	8
2.2	Geología Regional.....	9
2.2.1	Basamento del arco volcánico	11
2.2.1.1	Pzlt Formación La Tabla (Paleozoico Superior)	11
2.2.1.2	Pzgp Granito Parinas (Pérmico)	11
2.2.1.3	Pzglm Granodiorita León Muerto (Pérmico superior)	11
2.2.2	Depósitos y rocas estratificadas.....	11
2.2.2.1	Miv Volcanes del Mioceno Inferior.....	11
2.2.2.2	Mimv Volcanes del Mioceno Inferior a Medio	12
2.2.2.3	Mmsv Volcanes del Mioceno Medio a Superior.....	13
2.2.2.4	MPv Volcanes del Mioceno Superior a Plioceno Inferior.....	13
2.2.2.5	PPlac Cordón Volcánico Atalaya-Chuta	14
2.2.2.6	PIHb Complejo Volcánico Bayo	15
2.2.2.7	PIHca Complejo Volcánico Cordón Azufre	16
2.2.3	Depósitos no consolidados.....	17
2.2.3.1	Mga Gravas de Atacama (Mioceno inferior a medio)	17
2.2.3.2	MHS Depósitos Salinos (Mioceno-Holoceno).....	18

2.2.3.3	MHac Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)	19
2.3	Geología estructural	19
2.4	Geología local.....	21
2.4.1	Cuenca Salar de Gorbea	21
2.4.1.1	Depósitos y rocas estratificadas	22
2.4.1.2	Depósitos no consolidados	23
2.4.1.3	Estructuras	23
2.4.2	Cuenca Salar de La Isla.....	24
2.4.2.1	Depósitos y rocas estratificadas	25
2.4.2.2	Depósitos no consolidados	26
2.4.2.3	Estructuras	27
2.4.3	Cuenca Salar de Las Parinas.....	29
2.4.3.1	Basamento del arco volcánico	30
2.4.3.2	Depósitos y rocas estratificadas	30
2.4.3.3	Depósitos no consolidados	32
2.4.3.4	Estructuras	33
2.4.4	Cuenca Salar de Aguilar	35
2.4.4.1	Depósitos y rocas estratificadas	36
2.4.4.2	Depósitos no consolidados	38
2.4.4.3	Estructuras	38
3	Síntesis geológica.....	41
4	Referencias	42

Índice de Figuras

Figura 1-1. Ubicación salares Gorbea, La Isla, Las Parinas y Aguilar. Fuente: Elaboración propia.	7
Figura 2-1. Perfil esquemático geomorfología del Norte de Chile. Fuente: Salares del Norte de Chile: Potenciales fuentes de litio (CEPAL, 2010).....	8
Figura 2-2. Cartas geológicas escala 1:100.000. Fuente: Naranjo et al., 2013 (a, b) SERNAGEOMIN. ...	10
Figura 2-3. Principales fallas y lineamientos a escala regional Chile-Argentina. En rojo demarcación de las cuencas de estudio. Extraído y modificado de Chernicoff et al., 2002.....	20
Figura 2-4. Mapa geológico de la cuenca Salar de Gorbea basado en la carta geológica Áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño de Naranjo et al., 2013b.....	21
Figura 2-5. Mapa geológico de la cuenca Salar de La Isla basado en la carta geológica Áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño de Naranjo et al., 2013a.....	24
Figura 2-6. Sistemas de fallas locales de orientación NS, NNO y NNE salar de La Isla. Información extraída de Naranjo et al, 2013a.	28
Figura 2-7. Mapa geológico de la cuenca del Salar de Las Parinas basado en la carta geológica Áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño de Naranjo et al., 2013a.	29
Figura 2-8. Sistemas de fallas locales de orientación NS y NNO en el salar de Las Parinas. Información extraída de Naranjo et al, 2013a.	34
Figura 2-9. Mapa geológico de la cuenca del Salar de Aguilar basado en la carta geológica Áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto de Naranjo et al., 2013a.....	35
Figura 2-10. Sistemas de fallas locales de orientación NNE y NNO en la cuenca Salar de Aguilar. Información extraída de Naranjo et a., 2013a.	39
Figura 2-11. Vista en sección del Salar de Aguilar, perfil dirección NO-SE. En la zona central se puede reconocer el 'horst' del domo resurgente. Extraído de Naranjo et al., 2013a.	40

1 Introducción

Codelco División Salvador (DSAL) adjudicó a Amphos 21, en septiembre de 2022, el proyecto “Medida 04: Investigación sobre Nuevas Fuentes de Agua en Cuencas de Salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas”, que se enmarca en los diferentes compromisos establecidos en el Avenimiento con el Consejo de Defensa del Estado en el proceso Rol D-7-2020 del Primer Tribunal Ambiental de Antofagasta y que, como objetivo principal, pretende generar información básica de carácter hidrogeológico en las cuencas de los salares indicados.

Como parte de las primeras actividades del servicio anteriormente mencionado, Amphos 21 realizó el levantamiento de las condiciones actuales de accesos a los salares, teniendo como base de operación el campamento La Ola de DSAL (Región de Atacama) y la ciudad de Taltal (Región de Antofagasta).

Las primeras actividades de terreno consistieron en la ejecución de una campaña de geofísica y una revisión de la geología del sector. El presente informe entrega un análisis de la geología de las cuencas La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas, en base a la revisión de antecedentes y a lo observado en terreno.

1.1 Objetivos

El objetivo general del proyecto (Medida H-04) consiste en la realización de un estudio que permita generar información básica para lograr un entendimiento hidrogeológico de los sistemas de las cuencas de salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas (Codelco, 2021).

El objetivo específico de este reporte es realizar una caracterización geológica de los salares, a partir de la información recopilada en la campaña de reconocimiento, apoyado por el análisis de imágenes satelitales e información disponible en la Hoja Salar de la Isla (Naranjo y Cornejo 1992) y las cartas geológicas área Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto (Naranjo et al., 2013a) y área Salar de Pajonales y Cerro Moño (Naranjo et al., 2013b).

1.2 Antecedentes generales

El área de interés ha sido objeto de estudios realizados en el pasado por Amphos 21, cuando realizó para la Dirección General de Aguas (DGA) en 2016 el proyecto “Diagnóstico de disponibilidad hídrica en Cuencas Alto - Andinas de la Región de Atacama, Fase 3” del cual se recopilaron informes previos acerca de la geología, hidrogeología, hidrología, hidroquímica,

piezometría, entre otros. Esta información se complementó con nuevos estudios a los que se tuvo acceso, realizados por SERNAGEOMIN y la Universidad de Chile hasta, el año 2018.

A partir de esta recopilación se generó una base de información que permitió actualizar la geología de las cuencas de estudio en base a la visita de reconocimiento en terreno durante noviembre del 2022.

1.3 Área de estudio

Las cuencas de los salares de estudio se ubican en el extremo noreste de la Alta Cordillera de la Región de Atacama, en el límite con la Región de Antofagasta y con Argentina, a alturas geográficas variables cuyos depocentros se ubican entre los 3.325 y 3.985 m s.n.m., aproximadamente. En la Figura 1-1 se presenta la localización de las cuencas de análisis.

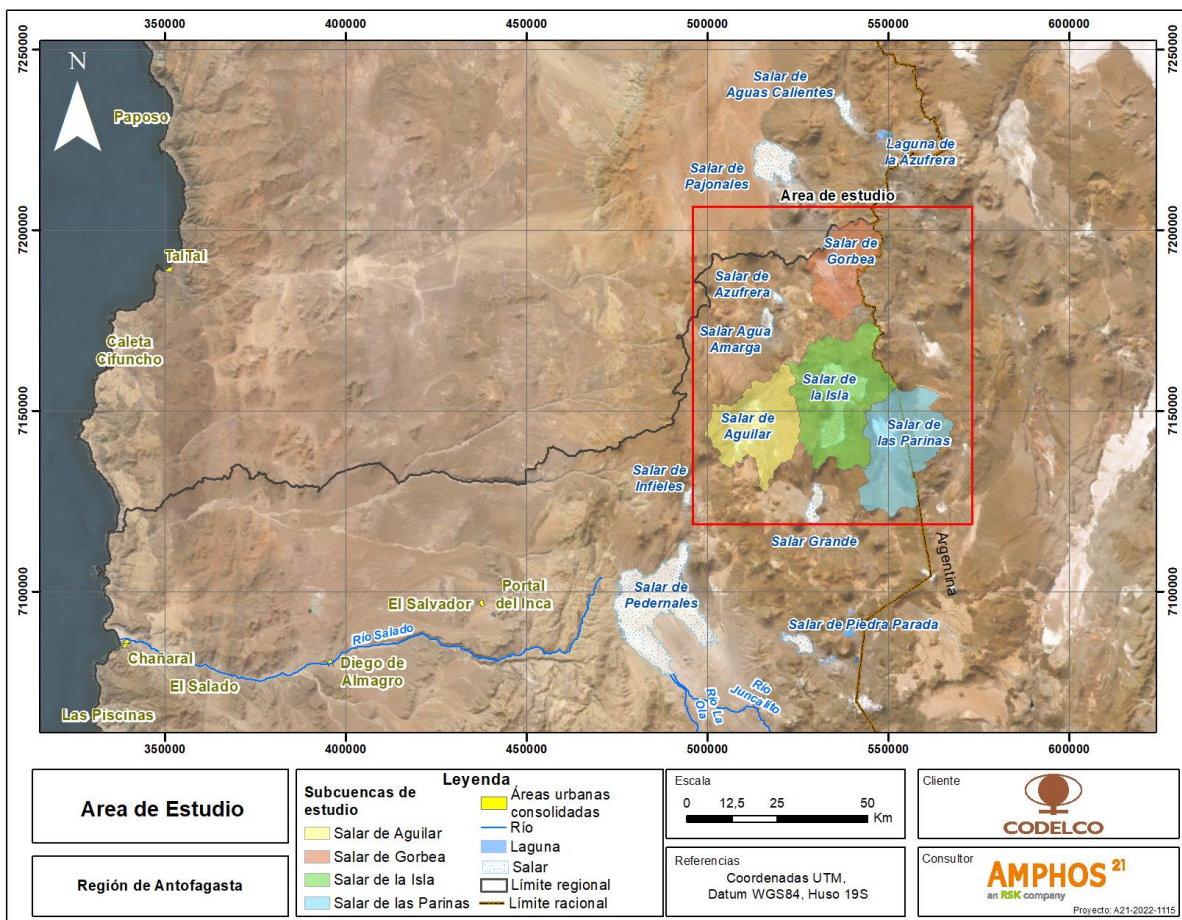


Figura 1-1. Ubicación salares Gorbea, La Isla, Las Parinas y Aguilar. Fuente: Elaboración propia.

2 Marco geológico

2.1 Geomorfología regional

El borde continental chileno se encuentra adyacente a la zona de subducción en donde la placa de Nazca se hunde por debajo de la placa Sudamericana, generando una intensa actividad tectónica desde hace millones de años y que hoy se refleja por la presencia de valles y cordilleras con orientaciones N-S paralelos a la zona de subducción.

Es posible reconocer cinco unidades morfológicas de oeste a este; Cordillera de la Costa, Depresión intermedia, Precordillera/Cordillera de Domeyko, Depresión Andina y Altiplano-Puna o Cordillera Andina (Figura 2-1).

Los salares en estudio se encuentran ubicados en el límite occidental del Altiplano, también llamado Cordillera Occidental. En ella se desarrolla el volcanismo del arco magmático actual, el cual comenzó en el Mioceno. Esta zona se caracteriza por edificios volcánicos de gran envergadura los cuales crean las condiciones para que existan las cuencas endorreicas, en donde la circulación del agua se ve restringida hacia bajos topográficos y además hay una ausencia de cauces fluviales.

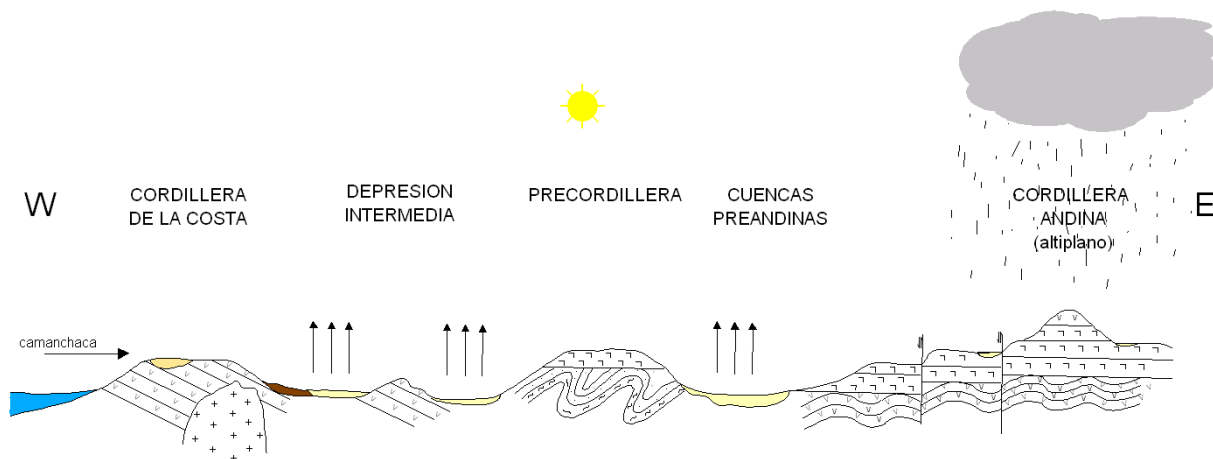


Figura 2-1. Perfil esquemático geomorfología del Norte de Chile. Fuente: Salares del Norte de Chile: Potenciales fuentes de litio (CEPAL, 2010).

2.2 Geología Regional

El sector occidental de la cadena volcánica del Cenozoico superior, en el cual está presente el área de interés, corresponde a una franja variable entre 45 y 75 km de ancho, donde se distinguen más de 100 centros volcánicos que incluyen desde grandes calderas hasta pequeños conos piroclásticos y domos de composiciones andesítica, dacítica y andesítica-basáltica.

El basamento de la región tiene escasa distribución superficial, aflorando en el sector este del salar de Las Parinas, siendo muy restringidos para conocer detalles de su edad de base. Corresponde a rocas de origen volcánico y plutónico del paleozoico superior y sin reconocimiento de unidades pertenecientes al mesozoico sobre este o bajo las unidades cenozoicas.

Las edades de estos centros volcánicos están comprendidas entre el Mioceno-Holoceno y según la definición de Naranjo y Cornejo (1992) y Naranjo et al. (2013a, b) en base a los grados de erosión en conjunto con la litología, petrografía, geoquímica y radiometría, fueron divididos en diferentes complejos volcánicos.

Las ignimbritas de la zona en estudio tienen composiciones andesíticas, dacíticas y riolíticas con texturas vitroclásticas y eutaxíticas. Sus afloramientos están estrechamente relacionados a sus fuentes de emisión, algunas con extensiones mucho mayores a los límites del área de estudio, y en gran parte cubiertas por unidades volcánicas más jóvenes o que sufrieron procesos erosivos. Abarcan desde el Mioceno inferior al Pleistoceno.

Durante el Cenozoico Superior, se formaron depósitos sedimentarios no consolidados a partir de la denudación de las unidades de rocas formadas desde el Mioceno inferior. Dentro de estas formaciones no consolidadas se encuentran las Gravas de Atacama, la cual se encuentra por toda la extensión del arco Volcánico Cenozoico Superior.

La geología regional se basa en los trabajos realizados por Naranjo et al., 2013 en las cartas geológicas de las Áreas Salar de Pajonal y Cerro Morro y de las Áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto (Figura 2-2. Cartas geológicas escala 1:100.000. Fuente: Naranjo et al., 2013 (a, b) SERNAGEOMIN..

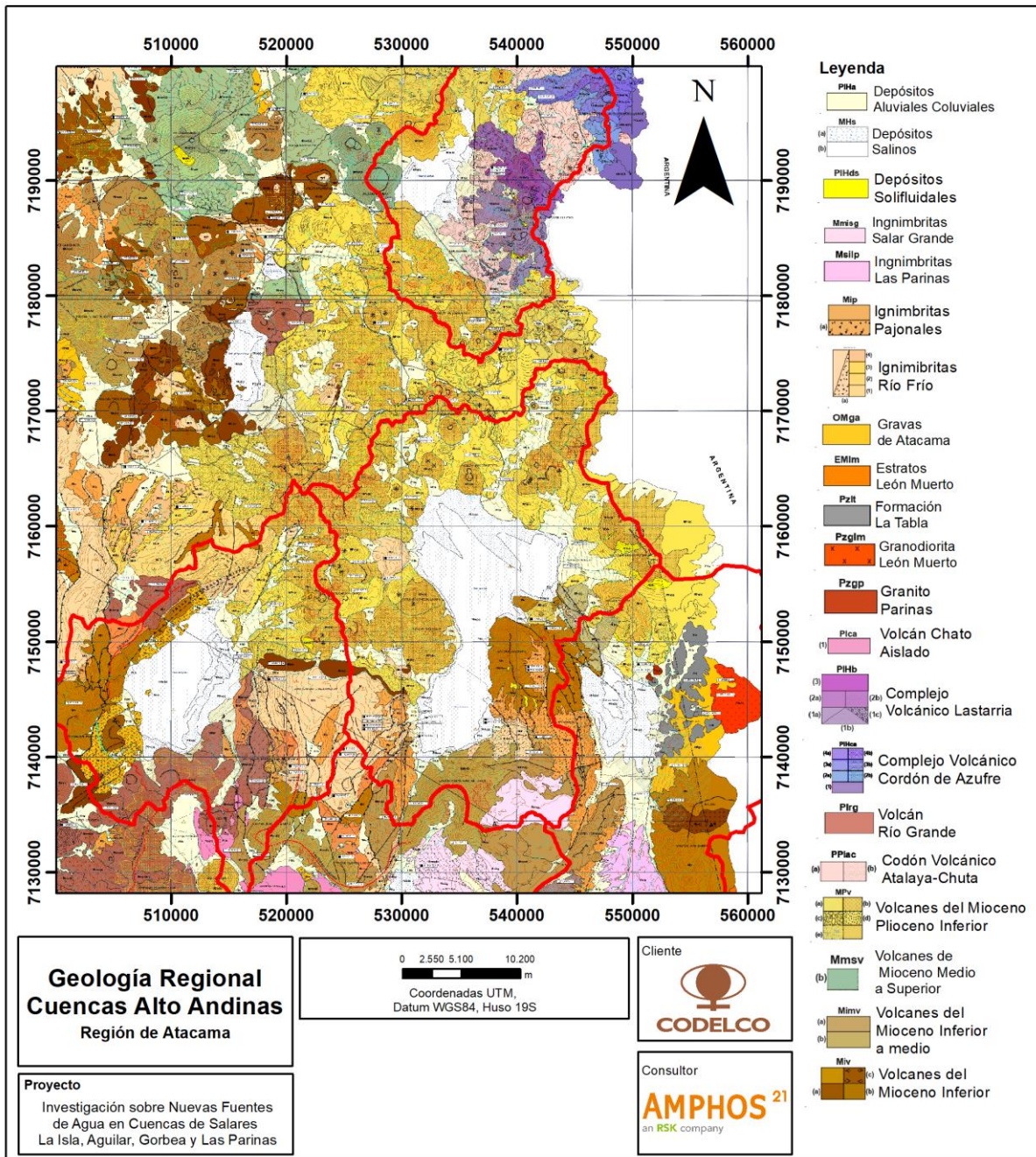


Figura 2-2. Cartas geológicas escala 1:100.000. Fuente: Naranjo et al., 2013 (a, b) SERNAGEOMIN.

A continuación, se detallan las unidades geológicas principales de la región de estudio.

2.2.1 Basamento del arco volcánico

2.2.1.1 Pzlt Formación La Tabla (Paleozoico Superior)

Está constituida por tobas soldadas y pórfidos riolíticos, además de lavas que son típicamente porfíricas con ojos de cuarzo y cristales de feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Las tobas son líticas y de cristales, con rasgos de fluidez y soldamiento, en las que son comunes las 'fiammes' y texturas axiolíticas. Se desconoce la base de esta unidad que, inmediatamente al oeste de la zona, se encuentra cubierta con discordancia de erosión y angular por rocas de la Formación Quebrada del Salitre del Triásico Superior (Naranjo y Puig, 1984). Al este del salar de Las Parinas, sus afloramientos están en contacto transicional con cuerpos porfídicos hipabisales del Granito Parinas, y están intruidos por la Granodiorita León Muerto y parcialmente cubiertos por depósitos de las Gravas de Atacama.

2.2.1.2 Pzgp Granito Parinas (Pérmico)

Corresponde a un intrusivo monzogranítico rosado, de textura porfídica gruesa y micrográfica, que en el mapa de Naranjo y Cornejo (1992) se denomina Plutón Parinas. Aflora inmediatamente al este del salar de Las Parinas, y sus rocas presentan un contacto gradual con los pórfidos riolíticos y volcanitas de la Formación La Tabla (Pzlt). Este cuerpo se encuentra cubierto por lavas del volcán Aguas Blancas, de edad miocena superior.

2.2.1.3 Pzglm Granodiorita León Muerto (Pérmico superior)

Esta unidad corresponde a una granodiorita leucocrática que aflora de forma continua en una penillanura, al norte de los cerros de León Muerto y este del salar de Las Parinas, en territorio argentino. La Granodiorita León Muerto intruye a las volcanitas de la Formación La Tabla y, al igual que éstas, se encuentra cubierta por depósitos de las Gravas de Atacama.

2.2.2 Depósitos y rocas estratificadas

2.2.2.1 Miv Volcanes del Mioceno Inferior

Anteriormente definida como Conjunto Volcánico I por Naranjo y Cornejo (1992), incluye a un conjunto de estratovolcanes, esqueletos de volcanes, secuencias de lavas y piroclastos estratificados, moderada a intensamente erosionados, cuyos remanentes se encuentran cubiertos discordantemente por la unidad de Ignimbritas Río Frío, las Gravas de Atacama y las

subsecuentes unidades de roca. Los afloramientos se presentan como remanentes de estratovolcanes, por lo que es infrecuente la presencia de estructuras y formas volcánicas definidas. Una de las estructuras volcánicas mejor conservadas corresponde al cerro La Plataforma, con formas destructivas, probablemente por actividad de tipo explosivo y/o colapso, y que presenta un cráter de caldera que alberga rocas de las ignimbritas Río Frío.

En esta unidad se distinguen facies de lavas y depósitos piroclásticos de caída. Las lavas pertenecientes a esta unidad corresponden a andesitas de orto y clinopiroxeno, con hornblenda y/o biotita, en menor proporción. Estas rocas presentan texturas porfídicas ricas en cristales de plagioclasa y piroxeno. Los depósitos piroclásticos de caída corresponden a tefras de lapilli escoriáceo y líticos, hasta bombas y bloques. Se encuentran en los remanentes de edificios volcánicos y poseen intercalaciones subordinadas de coladas de lava. Ocurren en capas que varían desde algunos decímetros hasta niveles del orden de 10 m de espesor, y presentan diversas tonalidades entre las que destacan tonos rojizos debido a oxidación al momento de la depositación.

La unidad Volcanes del Mioceno inferior es contemporánea con los productos de la denudación de relieves generados por el alzamiento Andino, como las Gravas de Atacama del Mioceno inferior a medio.

2.2.2.2 Mimv Volcanes del Mioceno Inferior a Medio

Definida como Complejo Volcánico II por Naranjo y Cornejo (1992), corresponde a estratovolcanes medianamente erosionados, lavas y brechas que presentan cordones y bancos laterales parcialmente preservadas. Sobreyacen a las ignimbritas Río Frío.

La mayoría de los volcanes incluidos en esta unidad conservan sus estructuras primarias, pudiendo distinguirse sus cráteres o formas dómicas correspondientes. Las lavas de esta unidad son principalmente andesitas grises, generalmente porfíricas, con cantidades variables de plagioclasa, piroxenos (orto y clino), anfíbol, biotita y opacos. Los depósitos de piroclastos de caída se observan con una intercalación de lavas subordinadas, principalmente como parte de la estructura de aquellos edificios volcánicos cuyo grado de degradación permite observar parte de la estratificación de los flancos.

Las lavas de esta unidad corresponden a andesitas porfíricas de orto y clinopiroxeno, con escasas hornblendas y biotitas, cuyo principal mineral accesorio es magnetita. Aparecen esporádicamente dacitas y andesitas basálticas. La plagioclasa se encuentra cribada y no cribada. Las lavas de esta unidad son, composicionalmente andesitas ricas en potasio (58 a 62% SiO₂, ~2% K₂O).

2.2.2.3 Mmsv Volcanes del Mioceno Medio a Superior

Según la descripción de Naranjo et al. (2013a, 2013b) y Naranjo y Cornejo (1992), donde fueron denominados Conjunto Volcánico III, son estratovolcanes de grandes dimensiones, con grados de erosión débil a medio. En los registros se pueden distinguir algunos edificios volcánicos que presentan calderas de avalancha y estructuras de domos. Las lavas de estos volcanes sobreyacen a rocas volcánicas erosionadas del Mioceno Inferior a Medio y localmente a las Ignimbritas Pajonales y Río Frío. Subyace a los Volcanes del Mioceno superior – Plioceno inferior mediante contacto concordante.

Las lavas de los Volcanes del Mioceno medio a superior presentan un mayor intervalo composicional comparado con las unidades anteriores. Son principalmente andesitas y dacitas (55-66% SiO₂), con contenido de potasio (1,4-4,5% K₂O). Petrográficamente, las lavas corresponden a andesitas basálticas porfíricas de orto y clinopiroxeno y escaso olivino, seguidas en cantidad por andesitas. Todas tienen escasa hornblenda y biotita, y su principal mineral accesorio es magnetita, encontrándose a veces apatito.

Su edad está definida desde 14,5 a 10,5 Ma (Mioceno medio – superior) de acuerdo con las dataciones de K-Ar en roca total realizados por Naranjo y Cornejo (1992).

2.2.2.4 MPv Volcanes del Mioceno Superior a Plioceno Inferior

Anteriormente definido como Conjunto Volcánico IV por Naranjo y Cornejo (1992) y según Naranjo et al. (2013a, 2013b), corresponde a un conjunto de estratovolcanes y conos de escorias de dimensiones pequeñas, con buena preservación y coladas de lavas de grandes volúmenes asociadas a los conos. También se distinguen depósitos de avalancha volcánica relacionados a cicatrices de colapso.

Las lavas son de bloques y se presentan bien definidas, con formas superficiales que exhiben cordones arqueados y bancos laterales. Litológicamente, corresponden principalmente a andesitas grises y pardas, siempre porfíricas, con plagioclasa, anfíbol, biotita.

En la parte media a alta de los edificios volcánicos es común encontrar depósitos de piroclastos de caída los que, generalmente, forman parte de la estructura de los edificios volcánicos y presentan intercalaciones de niveles de lava subordinada. Suelen estar asociados a zonas de alteración hidrotermal, lo que les otorga un color amarillento a blanquecino. Las capas de piroclastos sin alteración son de color variable entre tonos negros, rojos y pardos.

Las lavas de esta unidad se emplazaron desde fuentes localizadas al este, sobre las rocas y estructuras volcánicas de los conjuntos más antiguos, con contactos contrastantes, bien marcados. Las relaciones de contacto son todavía más distintivas respecto de las lavas de los conjuntos volcánicos más jóvenes y la ignimbrita Caletones Cori, que la sobreyacen.

Constituye una franja volcánica de distribución aproximadamente noreste en el norte y norte-sur hacia el sur, con anchos variables desde 7,5 hasta 30 km en el territorio chileno, prolongándose hacia el oriente.

Los análisis químicos de rocas realizados por Naranjo et al. (2013a, b) comprenden el intervalo composicional desde andesitas basálticas hasta dacitas (53,3-68,6% SiO₂), todas con un alto porcentaje de potasio (1,5-4,1%). Petrográficamente, corresponden a andesitas porfíricas de dos piroxenos, con abundante hornblenda y escasa biotita, además de dacitas y andesitas basálticas subordinadas.

Las coladas de lava de la unidad Volcanes del Mioceno superior a Plioceno inferior están emplazadas sobre las estructuras y formas volcánicas relativamente más desgastadas, pertenecientes a las unidades de Volcanes del Mioceno inferior a superior. Naranjo y Cornejo (1992), obtuvieron 25 edades K-Ar, en roca total, biotita y plagioclasa, de muestras de los diversos volcanes de esta unidad, las cuales se ubican entre los 8,3 y 3,7 Ma y Naranjo et al. (2013a, b) presenta 5 nuevas dataciones, $40\text{Ar}/39\text{Ar}$: $7,42 \pm 0,1$ Ma y $5,37 \pm 0,03$ Ma en masa fundamental, $5,74 \pm 0,18$ y $4,12 \pm 0,12$ en anfíbola, y $4,09 \pm 0,05$ en biotita. Por lo tanto, esta unidad tiene una edad miocena superior a pliocena inferior.

2.2.2.5 PPlac Cordón Volcánico Atalaya-Chuta

Es un cordón montañoso de orientación N-S, de aproximadamente 24 km de extensión y 1.250 m de altura sobre su base, constituido por a lo menos 10 volcanes y sus productos, entre los que sobresale el volcán Atalaya (5.425 m s.n.m.). Anteriormente fue definido dentro del Complejo Volcánico V según Naranjo y Cornejo (1992).

Los volcanes y productos del Cordón Atalaya-Chuta constituyen la base de los complejos volcánicos Cordón del Azufre y Bayo, y sobreyacen los volcanes del Mioceno superior–Plioceno inferior. Se distribuyen principalmente en el sector este del Salar de Gorbea.

Son lavas que varían entre andesitas y dacitas (60-66% SiO₂), ricas en potasio (3-4%), con concentraciones de elementos mayores similares a las observadas en los volcanes del Mioceno superior-Plioceno inferior.

Naranjo y Cornejo (1992) realizaron 3 análisis K-Ar en roca total en muestras de esta unidad, y obtuvieron dos edades iguales de $1,6\pm 0,4$ Ma, y otra de $2,5\pm 0,9$ Ma. Naranjo et al. (2013a, b) obtuvo edades radiométricas de $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ en masa fundamental, con valores de $1,762\pm 0,012$, $2,767\pm 0,017$, y $3,50\pm 0,02$ Ma. Teniendo en cuenta edades radiométricas y las relaciones estratigráficas, se asigna al Plioceno superior–Pleistoceno inferior.

2.2.2.6 PIHb Complejo Volcánico Bayo

Corresponde a un cordón de volcanes de orientación NNE, formado por tres unidades estructurales en las cuales se desarrollaron a lo menos 11 centros de emisión, principalmente cráteres de entre 0,17 a 2 km de diámetro, con lavas, ‘coulées’ y depósitos piroclásticos de caída, muy bien preservados. Esta unidad fue definida por Naranjo y Cornejo (1992) dentro del Complejo Volcánico VI.

Se ubica al sur del Complejo Volcánico Cordón Azufre, este del salar de Gorbea. Sobre la base de las características estratigráficas, morfológicas, distribución y preservación de los productos de este complejo, se identifican tres subunidades.

- Bayo 1. Ubicada en la zona sur del complejo, en ella se identifican lavas cuyos rasgos morfológicos han sido parcialmente suavizados, no obstante es posible identificar diversas ‘coulées’ y coladas de lava con crestas transversales y abruptos frentes de hasta 150 m. Estas ‘coulées’ corresponden a lavas de bloque dacíticas, con fenocristales de biotita, con cuarzo, plagioclasa, piroxeno, hornblenda y masa fundamental muy vítrea, con bandas de flujo. En la parte oriental se identifica una serie de conos cuya estructura interna evidencia un predominio de depósitos de piroclastos de caída, con intercalaciones subordinadas de lavas. Estos depósitos presentan un color grisáceo a pardo y muestran un color blanquecino-amarillo donde han sido alterados. Por otra parte, en su límite sur se identifican depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, los que tienen formas dendríticas y se emplazan sobre lavas del Cordón Volcánico Atalaya-Chuta. Corresponden a flujos piroclásticos de pómez y pómez escoriáceas de hasta 5 cm, con fragmentos líticos y matriz de cenizas líticas de color amarillo, y porfíricas.
- Bayo 2. Las lavas de esta subunidad se ubican en la estructura norte del complejo y alcanzan hasta 8,5 km de largo y hasta 80 m de espesor en su frente. En ellas se identifican claramente ‘levées’ laterales, crestas transversales y un canal central, y destacan la forma lobulada y distribución dendrítica de las coladas. Litológicamente, corresponden a andesitas de clinopiroxeno, grano grueso, con abundante plagioclasa y escasas biotita y hornblenda, en una masa fundamental gris vidriosa. Las formas cónicas

representan las etapas culminantes de esta subunidad y están formadas por depósitos de piroclastos de caída de textura suave y continua. Estos depósitos son principalmente de color pardo a gris claro, aunque en el interior de los cráteres es posible reconocer tonos amarillentos, debido al efecto de alteración hidrotermal.

- Bayo 3. La tercera subunidad de este complejo corresponde a lavas dacíticas de tipo 'coulée', que se extienden hacia el noroeste por hasta 3,5 km desde su fuente. Ambas 'coulées' preservan sus cordones transversales de manera excelente, mientras que la lava septentrional exhibe 'levées' laterales y un canal central. Alcanzan un espesor de hasta 250 m en su frente y cubren, parcialmente, a las coladas de lava de la subunidad precedente. Litológicamente, corresponden a riodacitas de biotita, anfíbol y piroxenos, con variedades de tonos grises y bandas muy vesiculares de textura vítrea.

Según los análisis realizados por Naranjo et al. (2013a, b) corresponden a andesitas a dacitas (61-67% SiO₂) ricas en potasio (3-4%).

De acuerdo con los análisis radiométricos de Naranjo et al. (2013a, b) mediante ⁴⁰Ar/³⁹Ar en lavas se obtuvieron los siguientes resultados; en las lavas más antiguas (Bayo 1) se obtuvo una edad en anfíbol de 270±20 ka. En tanto, para las lavas más jóvenes (Bayo 3) se obtuvieron edades de 142±14 ka, 80±40 ka, y 23±17 ka, en biotitas y masa fundamental. Por lo tanto, se le asigna una edad Pleistoceno-Holoceno.

2.2.2.7 PIHca Complejo Volcánico Cordón Azufre

Asignado al Complejo Volcánico VI por Naranjo y Cornejo (1992), corresponde a una cadena de volcanes de orientación norte-sur, que incluye 12 centros de emisión y cráteres de entre 0,14 y 1 km de diámetro, con lavas y conos piroclásticos. Sobreyace el Cordón Volcánico Atalaya-Chuta, y sus lavas se extienden hacia el oeste hasta cubrir parte de los productos de los volcanes del Mioceno superior–Plioceno inferior.

Se sitúa al norte del Complejo Volcánico Bayo, en la frontera entre Chile y Argentina. Sobre la base de las características morfológicas, distribución y preservación de los productos de este complejo, se identifican cuatro subunidades en este complejo:

- Cordón Azufre 1. Forma parte del flanco oriental del complejo e infrayace a los productos de las unidades posteriores. Comprende coladas de lava gruesas, de hasta 120 m de espesor, cuya morfología primaria ha sido parcialmente cubierta por depósitos piroclásticos; no obstante, es posible observar 'levées' y algunas crestas transversales. Son de color gris claro a gris oscuro.

- Cordón Azufre 2. Está constituido por lavas y conos piroclásticos que aflora en la parte sur del complejo y que cubren a los productos de la subunidad 1; hacia el norte están cubiertos por lavas y conos piroclásticos de las etapas posteriores. Se reconocen coladas de lava de extensión reducida, cubiertas parcialmente por depósitos piroclásticos de caída. Los depósitos se identifican en flancos como suaves mantos de color gris y pardo, y como parte de la estructura del cono, con colores amarillentos y blanquecinos.
- Cordón Azufre 3. Corresponde a la subunidad más extendida y efusiva del complejo y está constituida principalmente de lavas de bloque que alcanzan hasta 7,8 km hacia el oeste. Éstas presentan 'levées' laterales, crestas transversales y canales centrales bien desarrollados. Alcanzan hasta 80 m de espesor en su frente y conservan perfectamente su forma lobulada y distribución dendrítica. Corresponden a andesitas porfíricas de dos piroxenos, de colores grises con bandas de flujo, que muestran alternancias de texturas vítrea y vesicular.
- Cordón Azufre 4. Se desarrolla a partir del volcán más septentrional y de mayor altitud del complejo (5.475 m.s.n.m.), de éste fueron emitidas diferentes coladas de lava bloques, que destacan por su color oscuro y aspecto muy fresco, característica principal de este volcán. Tanto los 'levées' laterales como las crestas transversales de estas coladas se encuentran bien desarrolladas. Estas lavas son andesitas de biotita, comúnmente con bloques irregulares de hasta 3 m de diámetro, de color gris oscuro, con pátinas de color pardo. Los depósitos de piroclastos de caída son de color gris oscuro.

Según los análisis de roca realizados a lavas de las subunidades 3 y 4, son andesitas (60-62% SiO₂) ricas en potasio (~3%).

Naranjo et al. (2013a, b) realizó análisis radiométricos ⁴⁰Ar/³⁹Ar en biotita de una muestra de la subunidad 3 que arrojó un valor de 199±14 ka y en la subunidad 4 no se pudo obtener resultados confiables por la joven edad de las rocas. En consecuencia, se asigna esta unidad al Pleistoceno-Holoceno.

2.2.3 Depósitos no consolidados

2.2.3.1 Mga Gravas de Atacama (Mioceno inferior a medio)

Esta unidad corresponde a una denominación dada para los depósitos polimícticos de gravas, bolones mal seleccionados, generalmente no consolidados, aunque en ocasiones cementados, de amplia extensión presentes en el Norte de Chile. En el área de estudio se intercalan depósitos piroclásticos de las ignimbritas Río Frío y Pajonales y, al este del salar de Las Parinas, engranan con niveles salinos, cubren a rocas paleozoicas de la Formación La Tabla y el Granito Parinas y

la Granodiorita León Muerto, así como también al Miembro Superior de la Formación Vizcachera (Mioceno inferior), a volcanes de las unidades Volcanes del Mioceno inferior y niveles de la ignimbrita Grande, de edad miocena media. Están parcialmente cubiertas por lavas de Volcanes del Mioceno inferior a medio.

Corresponde a un depósito polimíctico no consolidado de gravas y bolones (<50 cm de diámetro) parcialmente cementado por carbonatos y sulfatos, con clastos principalmente de lavas de diversos tipos, desde redondeados hasta subangulosos, en una matriz arenosa.

Las Gravas de Atacama constituyen acumulaciones de flujos de detritos generados a partir de la denudación del orógeno Andino. La erosión de los terrenos alzados se produjo contemporáneamente con la construcción de numerosos aparatos volcánicos y la actividad de la caldera Aguilar.

2.2.3.2 MHS Depósitos Salinos (Mioceno-Holoceno)

Los salares se desarrollan como cuencas endorreicas que concentran el drenaje, originado en edificios volcánicos, llanuras aluviales y planicies ignimbríticas de distintas edades. De acuerdo a las características de los bordes de los salares y su relación de contacto con las unidades que los rodean, se infiere que el principal aporte de sales ocurre a través de los niveles de aguas subterráneas y, en menor grado, por el aporte directo de aguas superficiales.

Los salares de interés en la zona de estudio corresponden a La Isla, Las Parinas, Gorbea y Aguilar. En estas cuencas salinas se identifican tres facies texturales superficiales:

- a) Superficies suaves, húmedas o secas, inundadas o frecuentemente inundables, compuestas principalmente por halita y otros minerales provenientes de las costras salinas adyacentes en periodos de inundación, los que luego son depositados y forman una superficie suave en que se observan pequeñas dunas dado lo fino del material. Las áreas frecuentemente inundables presentan una corteza húmeda, sujeta a inundaciones esporádicas, generalmente por elevación del nivel freático y muestra un predominio de cloruros (halita) sobre precipitados de sulfatos. Localmente, se desarrollan cuencas endorreicas de lago con costras salinas.
- b) Costra salina, compuesta principalmente de halita, en que se reconocen cortezas salinas superficiales observadas en imágenes satelitales de color oscuro. En general poseen una superficie rugosa con abundantes cavidades, las que permiten la circulación de fluidos en su interior. En ellas pueden ocurrir lagunas de salmuera, esporádicas o perennes, creadas

a partir de brotes de agua relativamente fresca que circula a través de las cavidades y disuelve las sales de la costra, impidiendo el crecimiento de esta en sus bordes.

- c) Facies lacustres, compuestas por intercalación de sedimentos acumulados en el fondo de antiguas lagunas de salmuera y costras de las actuales.

Particularmente en el borde oriental del salar de Las Parinas se reconocen depósitos de yeso de hasta 30 m de espesor y bancos salinos, intercalados en Gravas de Atacama que representan paleoniveles de una cuenca salina ancestral.

2.2.3.3 MHac Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)

Se distribuyen a través de toda el área y corresponden a depósitos heterogéneos de bloques, gravas, arenas y limos producidos por la denudación e incisión de las unidades preexistentes.

Los depósitos aluviales corresponden a materiales que han descendido por quebradas en forma de corrientes de barro o inundaciones de llanos, producidas por lluvias torrenciales, muy esporádicas, generando abanicos aluviales al extenderse a sectores abiertos no encajonados. Los depósitos coluviales corresponden a materiales producidos principalmente por procesos gravitacionales. Su distribución está controlada por la presencia de faldeos abruptos de escarpes, quebradas y cerros. Generalmente, son monomícticos y angulosos, gradando lateralmente a depósitos aluviales transportados por flujos torrenciales, que en coalescencia, forman llanuras o planicies aluviales.

Los procesos de denudación del paisaje que han formado estos depósitos se han desarrollado desde el Mioceno. Sin embargo, se ha extendido la edad hasta el Cuaternario en consideración a que, localmente, éstos se mantienen activos, aunque en forma disminuida.

2.3 Geología estructural

El Altiplano-Puna es una región que se caracteriza por múltiples sistemas de fallas de orientación N-S y NNO (Figura 2-3), profundos y de carácter translitosféricos que los relacionan directamente con el alzamiento del *plateau* altiplánico. Estos sistemas favorecieron la reactivación periódica acompañada de eventos tectónicos-magmáticos. De acuerdo con estos sistemas regionales se pueden identificar diferentes dominios morfoestructurales, destacando en el área de interés se dos dominios.

- El dominio occidental, que comprende la Cordillera de Domeyko y está caracterizado por la presencia de gravas y conglomerados de piedemonte, producto de la erosión de los depósitos paleozoicos alzados. Este dominio se forma a partir de la inversión de un

orógeno de elongación N-S sometido a un acortamiento E-O, controlado por fallas extensionales del mesozoico invertidas de rumbo NNE-SSO.

- El dominio oriental, que se caracteriza por estar cubierto, e incluye, el arco volcánico cenozoico, el cual se generó a partir de cámaras magmáticas y conductos formados en espacios estructurales conjugados en relación con las estructuras inversas compresivas.

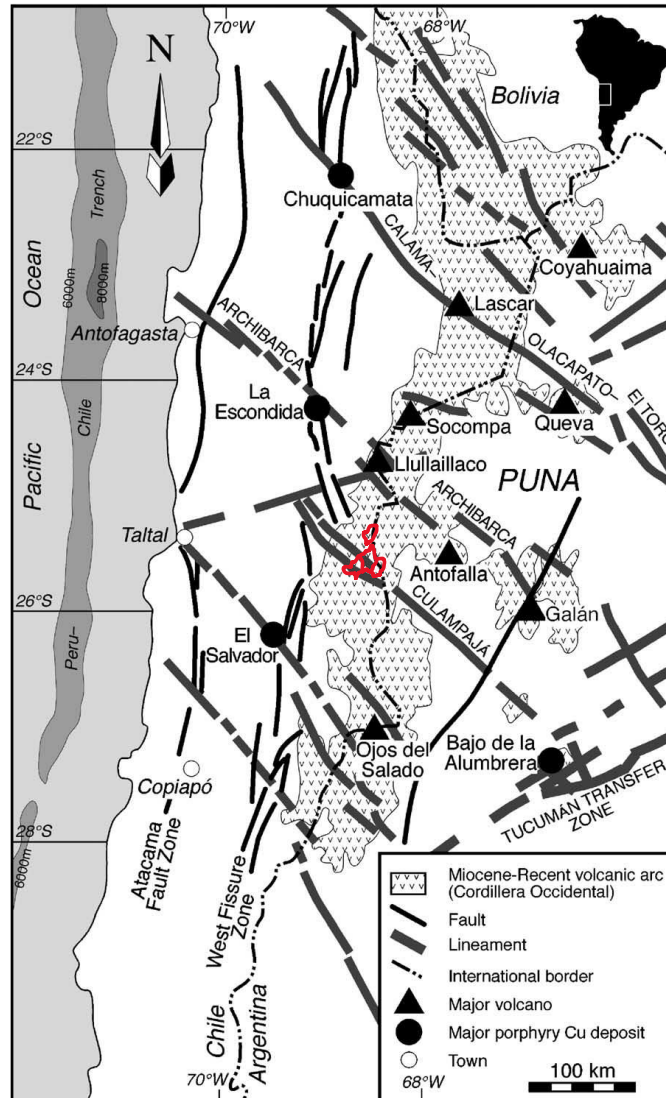


Figura 2-3. Principales fallas y lineamientos a escala regional Chile-Argentina. En rojo demarcación de las cuencas de estudio. Extraído y modificado de Chernicoff et al., 2002.

2.4 Geología local

2.4.1 Cuenca Salar de Gorbea

La cuenca Salar de Gorbea se ubica entre los 25°20´S y 25°30´S, se encuentra a una altitud aproximada de 4.450 m s.n.m. y ocupa una superficie de aproximadamente 364 km².

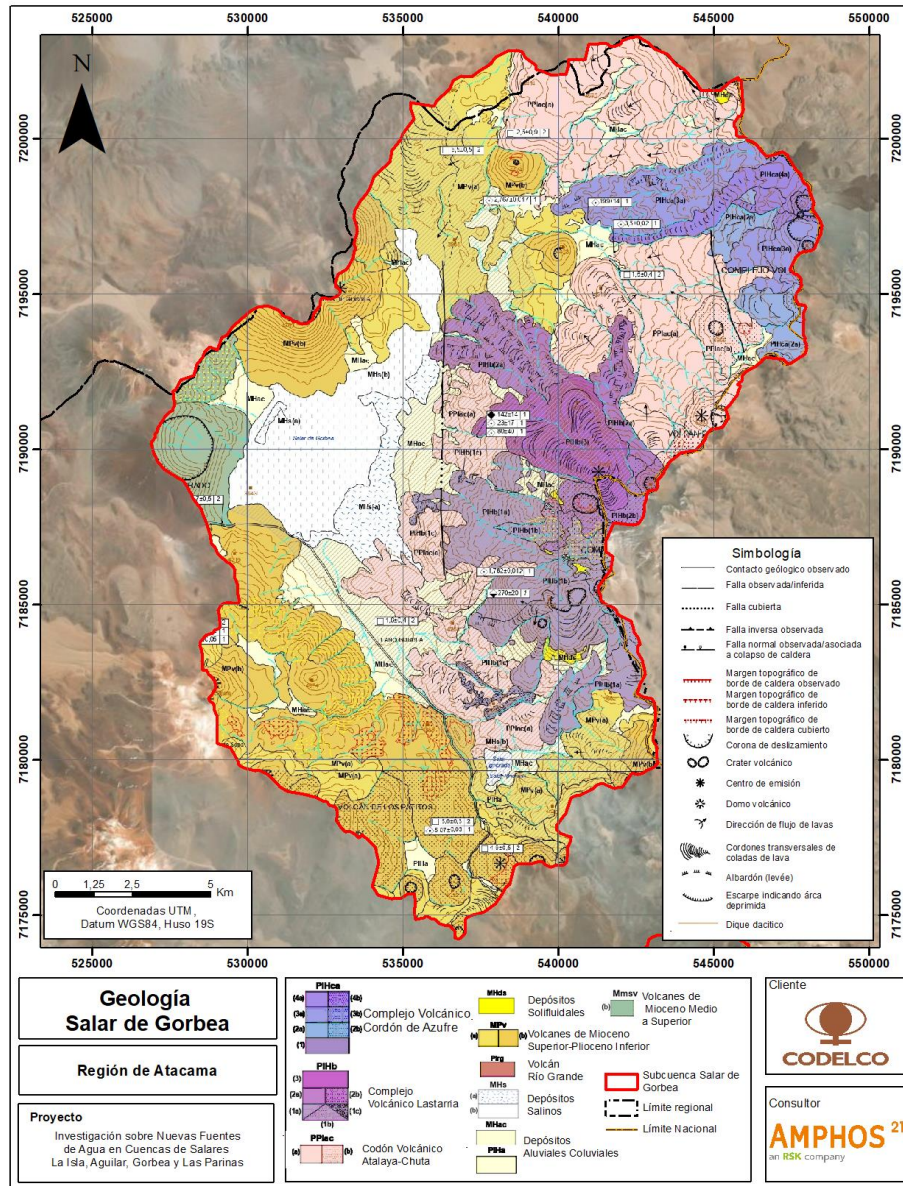


Figura 2-4. Mapa geológico de la cuenca Salar de Gorbea basado en la carta geológica Áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño de Naranjo et al., 2013b.

La geología de esta cuenca, de acuerdo con la Figura 2-4, se detalla a continuación:

2.4.1.1 Depósitos y rocas estratificadas

Mmsv Volcanes del Mioceno Medio a Superior

Estratovolcanes compuestos de grandes dimensiones, mediana a débilmente erosionados. Presentan ocasionalmente calderas de avalancha y domos. Contiene lavas de composición andesítica, andesíticas basálticas y escasamente dacíticas, lava-domos andesítico-dacítico y depósitos de piroclastos de caída con intercalaciones de lavas.

Se encuentran en el extremo oeste de la cuenca y están emplazadas bajo las unidades volcánicas de mioceno-pleoceno y los depósitos aluviales y coluviales.

MPv Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior

Son estratovolcanes y conos de escorias de pequeñas dimensiones, con niveles bajos de erosión. Se componen de lavas porfídicas, andesitas de piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita, en ocasiones andesitas basálticas de olivino y piroxeno, depósitos piroclásticos de caída de color amarillo a blanquecino y negro, rojos y pardos.

Se encuentran en los alrededores cercanos del salar, rodeándolo prácticamente en su totalidad. Los Volcanes del Mioceno Medio a Superior lo subyacen en contacto concordante y los sobreyace el Complejo Volcánico Atalaya-Chuta y los depósitos aluviales y coluviales.

PPlac Cordón Volcánico Atalaya-Chuta (Plioceno superior-Pleistoceno inferior)

Cordón montañoso de orientación N-S, compuesto de lavas andesíticas porfíricas de grano medio y estructuras bien preservadas.

Se encuentra al este del salar abarcando una superficie que comienza en las cercanías del Volcán Lastarria y se extiende hacia el sur a la zona de los salares Las Parinas y La isla. Sobreyacen en contacto concordante a los Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior e infrayacen discordantemente los depósitos aluviales y coluviales del Mioceno-Holoceno.

PIHb Complejo Volcánico Bayo (Pleistoceno-Holoceno)

Complejo de volcanes NNE con estructuras asociadas a lavas bien preservadas, se conforma de bloques dacíticos con bandas de flujo, depósitos de piroclastos de caída, intercalaciones de lava, depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, lavas andesíticas de clinopiroxeno,

depósitos piroclásticos de caída pardos a gris claro y lavas dacíticas tipo 'couleé' riodacíticas de biotita, anfíbol y piroxeno con tonos grises.

Se encuentran al este del salar de Gorbea, sobreyace concordantemente al Cordón Volcánico Atalaya-Chuta y discordantemente a los Volcanes del Mioceno superior-Plioceno inferior.

PIHca Complejo Volcánico Cordón Azufre (Pleistoceno-Holoceno)

Cadena de volcanes N-S con lavas y conos piroclásticos bien preservados. Compuestos de coladas de lavas gruesas de color gris claro a gris oscuro, intercalaciones de coladas de lava y depósitos piroclásticos de caída, lavas de bloque andesíticas porfídicas de color gris con bandas de flujos y depósitos piroclásticos que forman mantos de color gris oscuro y coladas de lava andesíticas irregulares de color gris oscuro con depósitos de piroclastos de caída grises.

Se encuentran en el sector NNE del salar de Gorbea e inmediatamente al sur del Volcán Atalaya y al norte del Volcán Chuta. Esta unidad se encuentra localmente sobreyaciendo en contacto concordante el Complejo Volcánico Atalaya-Chuta.

2.4.1.2 Depósitos no consolidados

Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)

Corresponden a bloques, gravas, arenas y materiales finos, ocasionalmente cenizas arcillas y sales. Generalmente no tienen estratificación, a excepción de los sedimentos finos. Los depósitos aluviales son de carácter polimícticos y de mala selección y los coluviales monomícticos y angulosos. Se distribuyen por toda el área de la cuenca y sobreyacen a la mayoría de las unidades.

Depósitos Salinos (Mioceno-Holoceno)

Son depósitos de sales y sedimentos finos, en los que se reconocen dos facies; superficies suaves, húmedas o secas, inundadas o frecuentemente inundables compuestas por halita y otros minerales sulfatados y costras salinas principalmente de halita y lagunas de salmuera. Se ubican en la parte central de la cuenca y tienen una dirección NE-SO.

2.4.1.3 Estructuras

En el sector de la cuenca de Gorbea no se presentan estructuras ni lineamientos, se reconocen estructuras volcánicas como escarpes, cráteres y calderas.

2.4.2 Cuenca Salar de La Isla

La cuenca Salar de La Isla se ubica entre los 25°32´S y 25°55´S, se encuentra a una altitud aproximada de 4.325 m.s.n.m. y ocupa una superficie de aproximadamente 736 km².

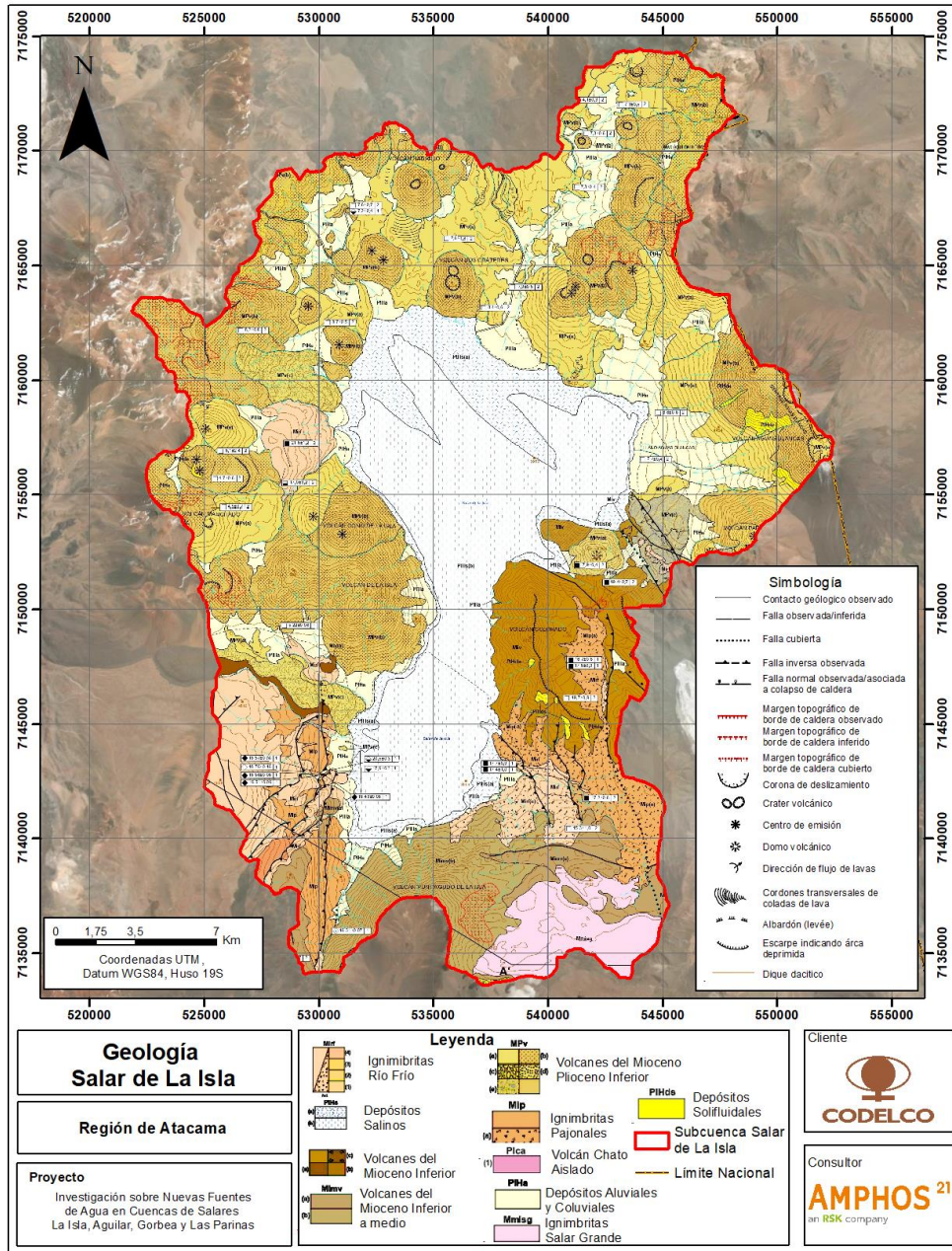


Figura 2-5. Mapa geológico de la cuenca Salar de La Isla basado en la carta geológica Áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño de Naranjo et al., 2013a.

La geología de esta cuenca, de acuerdo con la Figura 2-5, se detalla a continuación:

2.4.2.1 Depósitos y rocas estratificadas

Miv Volcanes de Mioceno Inferior

Conjunto de estratovolcanes, secuencias de lavas y piroclastos estratificados, moderada a intensamente erosionados. Lavas principalmente andesíticas y, en menor medida, andesitas dacíticas, además de andesitas basálticas.

Se distribuyen en el SO y ESE del salar, subyacen concordantemente a las Ignimbritas Río Frío y Pajonales, a las Gravas de Atacama y Volcanes del Mioceno Inferior a Medio y en contacto discordante los Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior y a los depósitos aluviales y coluviales.

Mirf Ignimbritas Río Frío (Mioceno inferior)

Conjunto de tobas dacíticas rosáceas y grises de cristales intensamente soldadas, con abundantes fiammes, plagioclasa, anfíbol, piroxenos y biotita. Se reconocen además depósitos de brechas piroclásticas de lapilli a bloques.

Están distribuidas en el O y SE del salar, sobreyacen concordantemente a los Volcanes del Mioceno Inferior y subyacen a las Ignimbritas Pajonales y Volcanes del Mioceno Inferior a Medio. También se encuentran en contacto discordante con los Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior y depósitos aluviales y coluviales.

Mip Ignimbritas Pajonales (Mioceno inferior a medio)

Tobas dacíticas de cenizas y cristales comúnmente rosáceas, moderada a débilmente soldadas, con plagioclasa, biotita, anfíbol, piroxeno y flujos ricos en pómez y líticos. Incluye la Ignimbrita Qatatiña, que corresponde a un nivel basal empobrecido en finos y rico en líticos polimícticos tamaño bloque y bombas juveniles.

Afloran al SSO y SE del salar. Sobreyacen a las lavas de los Volcanes Mioceno Inferior, a las Ignimbritas Río Frío e infrayacen discordantemente con lavas y estructuras de los Volcanes del Mioceno inferior a medio, Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior y depósitos aluviales y coluviales.

Mimv Volcanes del Mioceno Inferior a Medio

Estratovolcanes medianamente erosionados, lavas porfídicas y brechas con morfologías superficiales parcialmente preservadas. Lavas andesíticas de piroxeno y andesitas dacíticas de hornblenda. Depósitos piroclásticos de caída grisáceos claros a oscuro, intercalados con lavas y niveles rojizos por oxidación.

Se extienden por el sector sur del salar, sobreyacen a las Ignimbritas Río Frío y Pajonales y están cubiertas por depósitos aluviales y coluviales.

MPv Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior

Estratovolcanes y conos de escoria de dimensiones pequeñas, bien preservados, compuestos de lavas voluminosas medianamente porfídicas, andesíticas y dacíticas, ocasionalmente andesitas basálticas. En los flancos de las estructuras se encuentran depósitos piroclásticos de caída, depósitos de avalancha volcánica no consolidados y depósitos piroclásticos de bloques y cenizas andesíticos.

Se distribuyen desde la parte media del salar hacia el norte, cubren a todas las unidades volcánicas anteriores del sector y subyacen a los depósitos aluviales y coluviales.

2.4.2.2 Depósitos no consolidados

PIHds Depósitos Solifluidales (Pleistoceno-Holoceno)

Depósitos asociados a procesos de soliflucción que forman cordones sinuosos y lóbulos métricos que se han desarrollado principalmente sobre depósitos piroclásticos de caída y aluviales-coluviales.

Se distribuyen localmente hacia el este del salar en las cercanías del Volcán Colorado y Volcán Aguas Blancas y hacia el oeste en el Volcán Manchado.

MHac Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)

Corresponden a bloques, gravas, arenas y materiales finos, ocasionalmente cenizas, arcillas y sales. Generalmente no tienen estratificación, a excepción de los sedimentos finos. Los depósitos aluviales son de carácter polimícticos y de mala selección y los coluviales monomícticos y angulosos. Se distribuyen por toda el área de la cuenca y sobreyacen a la mayoría de las unidades.

MHs Depósitos salinos (Mioceno-Holoceno)

Son depósitos de sales y sedimentos finos, en los que se reconocen dos facies; superficies suaves, húmedas o secas, inundadas o frecuentemente inundables compuestas por halita y otros minerales sulfatados y costras salinas principalmente de halita y lagunas de salmuera. Se ubican en la parte central de la cuenca y tienen una dirección NE-SO.

2.4.2.3 Estructuras

Como se puede observar en la Figura 2-6 los niveles superficiales de la parte sur del domo resurgente (hacia el sur del salar) se encuentran afectados por fallas inversas con vergencia al este en el flanco occidental y oeste en el flanco oriental, formando un 'horst' de hasta 500 m de rechazo, donde el flanco oriental sobre-escurre la ladera oeste del Volcán Puntiajudo, al sur del salar.

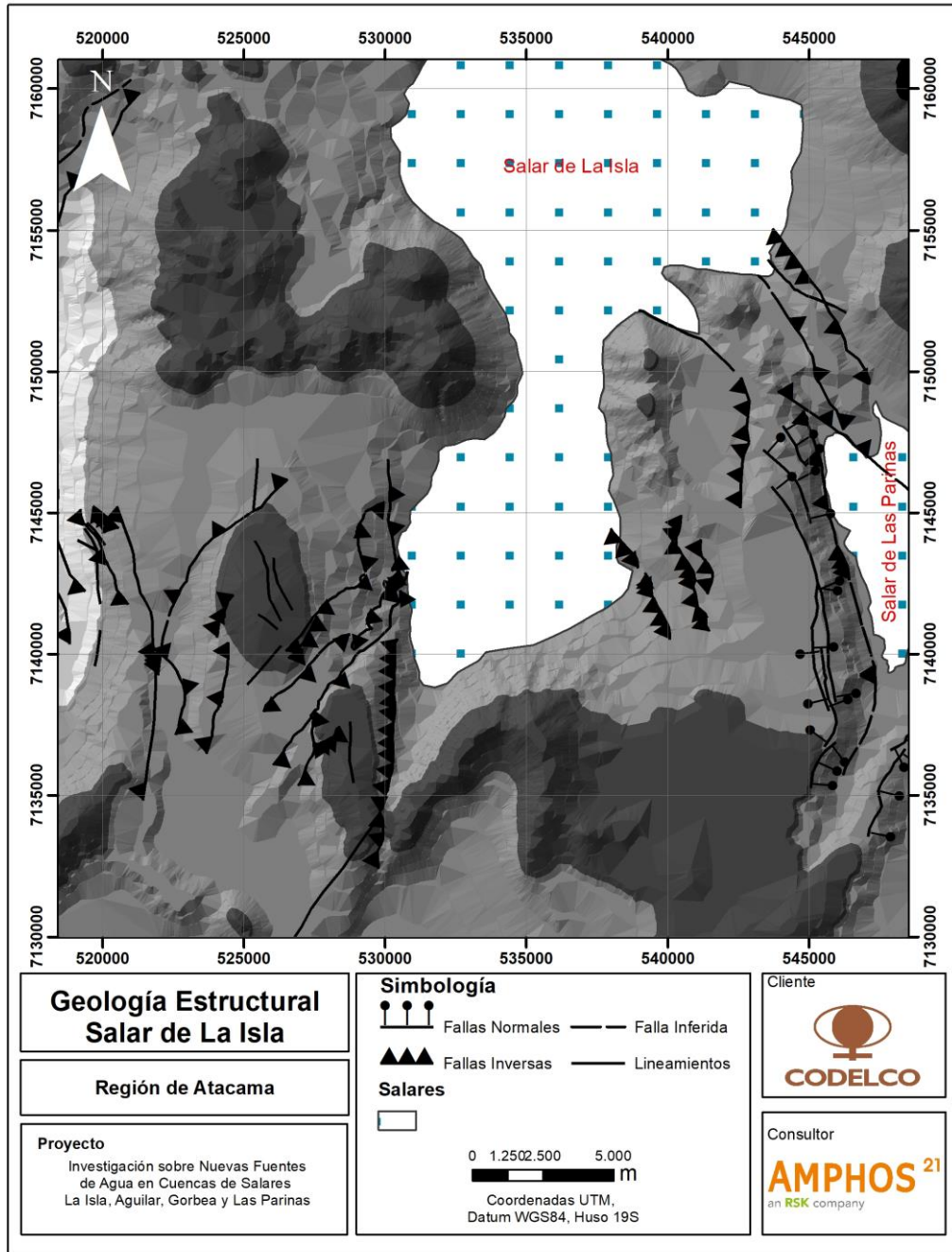


Figura 2-6. Sistemas de fallas locales de orientación NS, NNO y NNE salar de La Isla. Información extraída de Naranjo et al, 2013a.

2.4.3 Cuenca Salar de Las Parinas

La cuenca Salar de Las Parinas se ubica entre los 25°42´S y 26°02´S, se encuentra a una altitud aproximada de 4.370 m s.n.m. y ocupa una superficie aproximada de 614 km².

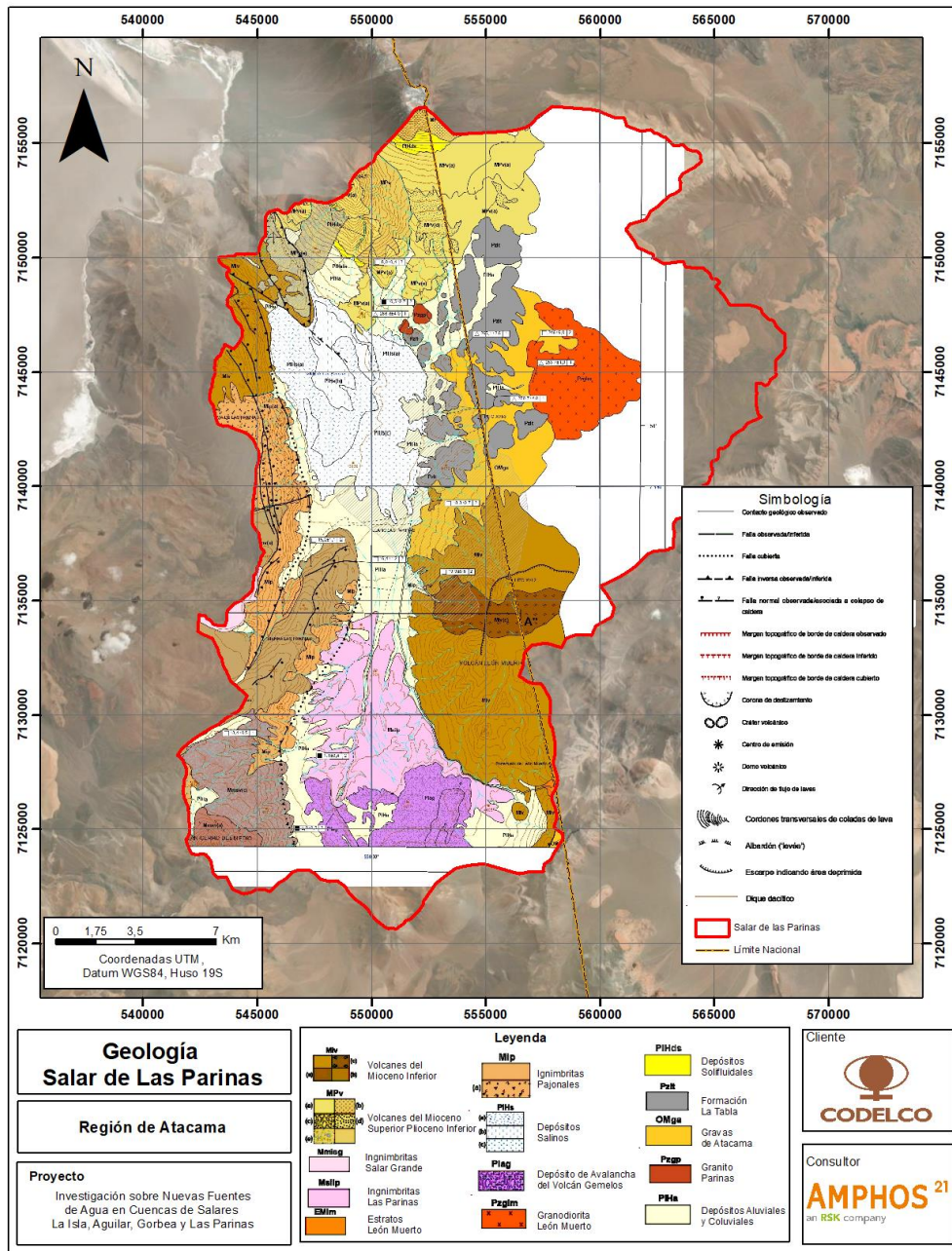


Figura 2-7. Mapa geológico de la cuenca del Salar de Las Parinas basado en la carta geológica Áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño de Naranjo et al., 2013a.

La geología de esta cuenca, de acuerdo con la Figura 2-7, se detalla a continuación:

2.4.3.1 Basamento del arco volcánico

Pzlt Formación La Tabla (Paleozoico superior)

Tobas soldadas, pórfidos riolíticos y lavas macizas riodacíticas, de colores morado, gris verdoso y anaranjado. Las lavas son porfídicas con cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Tobas líticas con cristales en forma de fiammes y texturas axiólíticas.

Se distribuyen en el este del salar donde subyacen a las Gravas de Atacama y son intruidos por el Plutón Parinas y León Muerto. Están cubiertos por depósitos aluviales y coluviales.

Pzgp Granito Parinas (Pérmico)

Definido por Naranjo y Cornejo (199) como Plutón Parinas. Pórfido monzogranítico rosáceo, de textura porfídica gruesa y micrográfica, con fenocristales de feldespato potásico y plagioclasa y relictos de biotita y circón.

Aflora al este del salar y presenta un contacto gradual con los pórfidos riodacíticos y volcanitas de la Formación La Tabla. Se encuentra cubierto por los Volcanes del Mioceno superior-Plioceno inferior y depósitos aluviales y coluviales.

Pzglm Granodiorita León Muerto (Pérmico superior)

Definido por Naranjo y Cornejo (1992) como Plutón León Muerto. Corresponde a una granodiorita leucocrática equigranular de grano grueso de biotita y anfíbol, plagioclasa y cuarzo, con escaso feldespato potásico. Incluye facies tonalíticas porfídicas grisáceas de grano más fino. Aflora el este del salar donde intruye a la Formación La Tabla y es cubierta por las Gravas de Atacama.

2.4.3.2 Depósitos y rocas estratificadas

Miv Volcanes de Mioceno Inferior

Conjunto de estratovolcanes, secuencias de lavas y piroclastos estratificados, moderada a intensamente erosionados. Depósitos de pórfidos félsicos de grano medio, pardos verdosos.

Se distribuyen en el SE y NO del salar, subyacen a las Gravas de Atacama y discordantemente a los Volcanes del Mioceno Medio a Superior y depósitos aluviales y coluviales.

Mirf Ignimbritas Río Frío (Mioceno inferior)

Conjunto de tobas dacíticas rosáceas y grises de cristales intensamente soldadas, con abundantes fiammes, plagioclasa, anfíbol, piroxenos y biotita. Se reconocen además depósitos de brechas piroclásticas de lapilli a bloques.

Se encuentran puntualmente al norte del salar subyaciendo discordantemente a los Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior y depósitos aluviales y coluviales.

Mip Ignimbritas Pajonales (Mioceno inferior a medio)

Tobas dacíticas de cenizas y cristales comúnmente rosáceas, moderada a débilmente soldadas, con plagioclasa, biotita, anfíbol, piroxeno y flujos ricos en pómez y líticos. Incluye la Ignimbrita Qatatiña en el este del salar, que corresponde a un nivel basal empobrecido en finos y rico en líticos polimícticos tamaño bloque y bombas juveniles.

Afloran al ESE del salar, sobreyacen a las Ignimbritas Río Frío y Volcanes del Mioceno Inferior, infrayacen con lavas y estructuras de los Volcanes del Mioceno inferior a medio e Ignimbritas Salar Grande y discordantemente a depósitos aluviales y coluviales.

Mimv Volcanes del Mioceno Inferior a Medio

Estratovolcanes medianamente erosionados, lavas porfídicas y brechas con morfologías superficiales parcialmente preservadas. Lavas andesíticas de piroxeno y daciandesitas de hornblenda.

Se extienden por el sector SO del salar, están cubriendo a las Ignimbritas Pajonales y subyacen a las Gravas de Atacama y los depósitos aluviales y coluviales.

Mmisg Ignimbritas Salar Grande (Mioceno Medio)

Sucesiones de unidades de flujo ignimbríticos, con distintos grados de soldamiento. Constituidas principalmente por cristales fragmentados de plagioclasa, cuarzo, pómez y fiammes, además de líticos porfídicos en matriz de esquirlas desvitrificadas de tamaño lapilli. También se aprecian intercalaciones vitrofírica oscuras.

Se distribuyen hacia el SO del salar y sobreyacen a los Volcanes del Mioceno Inferior a Medio y las Ignimbritas Pajonales.

MPv Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior

Estratovolcanes y conos de escoria de dimensiones pequeñas, bien preservados, compuestos de lavas voluminosas medianamente porfídicas, andesíticas y dacíticas, ocasionalmente andesitas basálticas. Depósitos laháricos dendríticos. Depósitos piroclásticos de bloques y cenizas andesíticos.

Distribuidas hacia el norte del salar, sobreyacen de forma discordante a los Volcanes del Mioceno Inferior y puntualmente a las Ignimbritas Río Frío y cubren a la Formación La Tabla y la Granodiorita León Muerto, además subyacen los depósitos aluviales y coluviales.

Msilp Ignimbrita Las Parinas (Mioceno superior)

Depósito ignimbrítico de toba de cenizas rosáceas a pardo claro, ricas en líticos y pómez, hacia su extensión norte presenta color blanquecino y un empobrecimiento de pómez y líticos, enriqueciéndose en matriz y cristales.

Distribuidas al sur del salar, cubren las lavas de los Volcanes de Mioceno inferior, las Ignimbritas Pajonales y a los Volcanes del Mioceno Inferior a Medio e infrayacen los depósitos aluviales y coluviales.

2.4.3.3 Depósitos no consolidados

PIHds Depósitos Solifluidales (Pleistoceno-Holoceno)

Depósitos asociados a procesos de solifluxión que forman cordones sinuosos y lóbulos métricos que se han desarrollado principalmente sobre depósitos piroclásticos de caída y aluviales-coluviales.

Se distribuyen localmente hacia el norte del salar en las cercanías del Volcán Parinas y hacia el este en el Volcán Colorado.

Mga Gravas de Atacama (Mioceno inferior a medio)

Depósitos de gravas y bolones, con matriz de arena, mal seleccionados, desde redondeados hasta angulosos, generalmente no consolidados, aunque ocasionalmente cementados por carbonatos y sulfatos, con clastos principalmente del basamento.

Se distribuyen en el este del salar, sobreyacen el basamento paleozoico, subyacen a los Volcanes del Mioceno Inferior y están parcialmente cubiertas por depósitos aluviales y coluviales.

MHac Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)

Corresponden a bloques, gravas, arenas y materiales finos, ocasionalmente cenizas, arcillas y sales. Generalmente no tienen estratificación, a excepción de los sedimentos finos. Los depósitos aluviales son de carácter polimícticos y de mala selección y los coluviales monomícticos y angulosos. Se distribuyen por toda el área de la cuenca y sobreyacen a la mayoría de las unidades.

MHs Depósitos salinos (Mioceno-Holoceno)

Depósitos de sales y sedimentos finos, en los que se reconocen dos facies; superficies suaves, húmedas o secas, inundadas o frecuentemente inundables compuestas por halita y otros minerales sulfatados y costras salinas principalmente de halita y lagunas de salmuera. Se ubican en la parte central de la cuenca y tienen una dirección NW-SE.

2.4.3.4 Estructuras

En la Figura 2-8 se destaca un sistema de fallas en la zona norte en dirección al salar de La Isla, el cual está conformado por diversas fallas inversas de orientación N-S y NNO, y además se reconoce otro conjunto de fallas normales N-S que afectan el flanco occidental del salar asociadas a la parte alta de los escarpes, afectando principalmente a las ignimbritas.

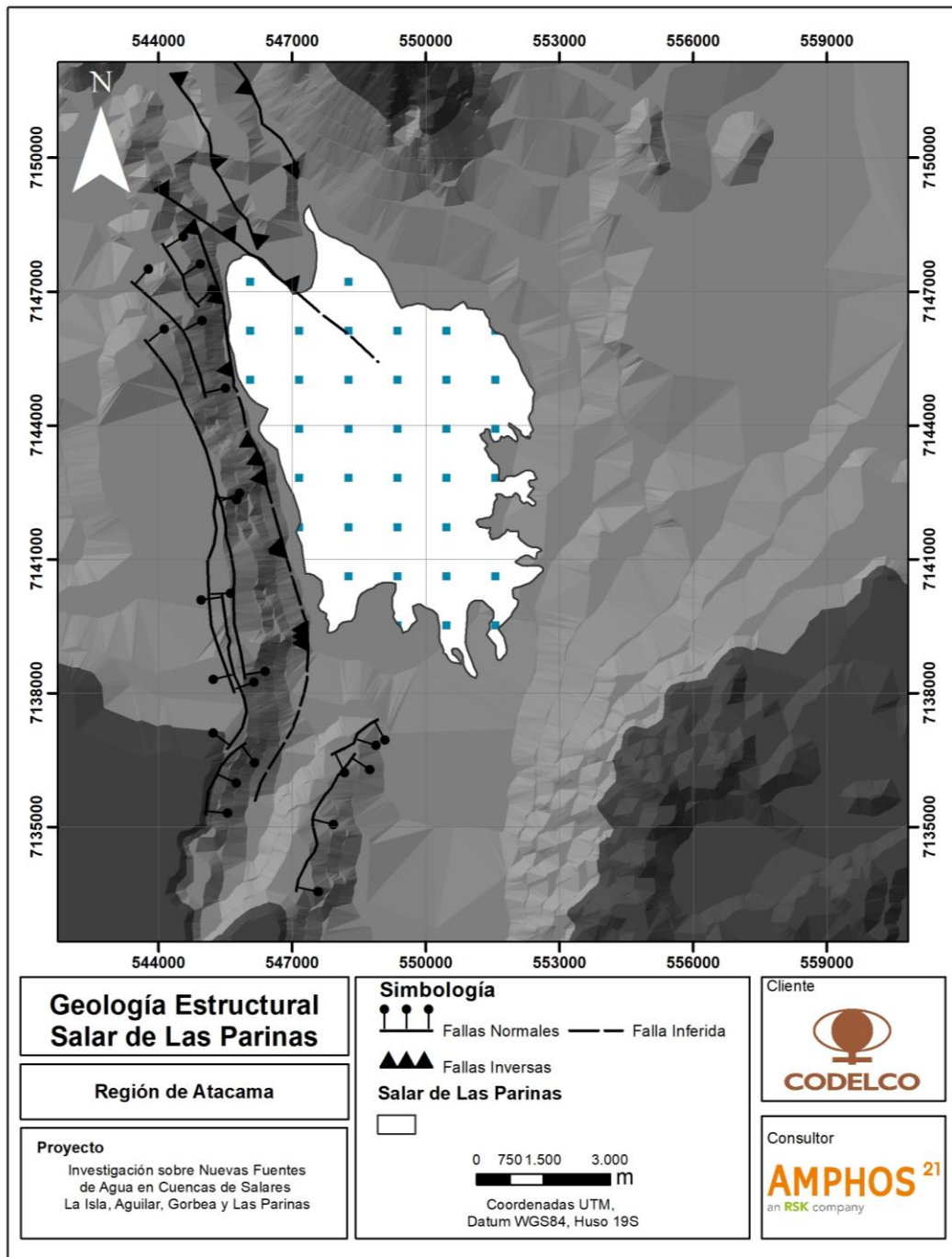


Figura 2-8. Sistemas de fallas locales de orientación NS y NNO en el salar de Las Parinas. Información extraída de Naranjo et al, 2013a.

2.4.4 Cuenca Salar de Aguilar

La cuenca Salar de Aguilar se ubica entre los 25°38´S y 25°58´S, se encuentra a una altitud aproximada de 3.920 m.s.n.m. y ocupa una superficie de aproximadamente 514 km².

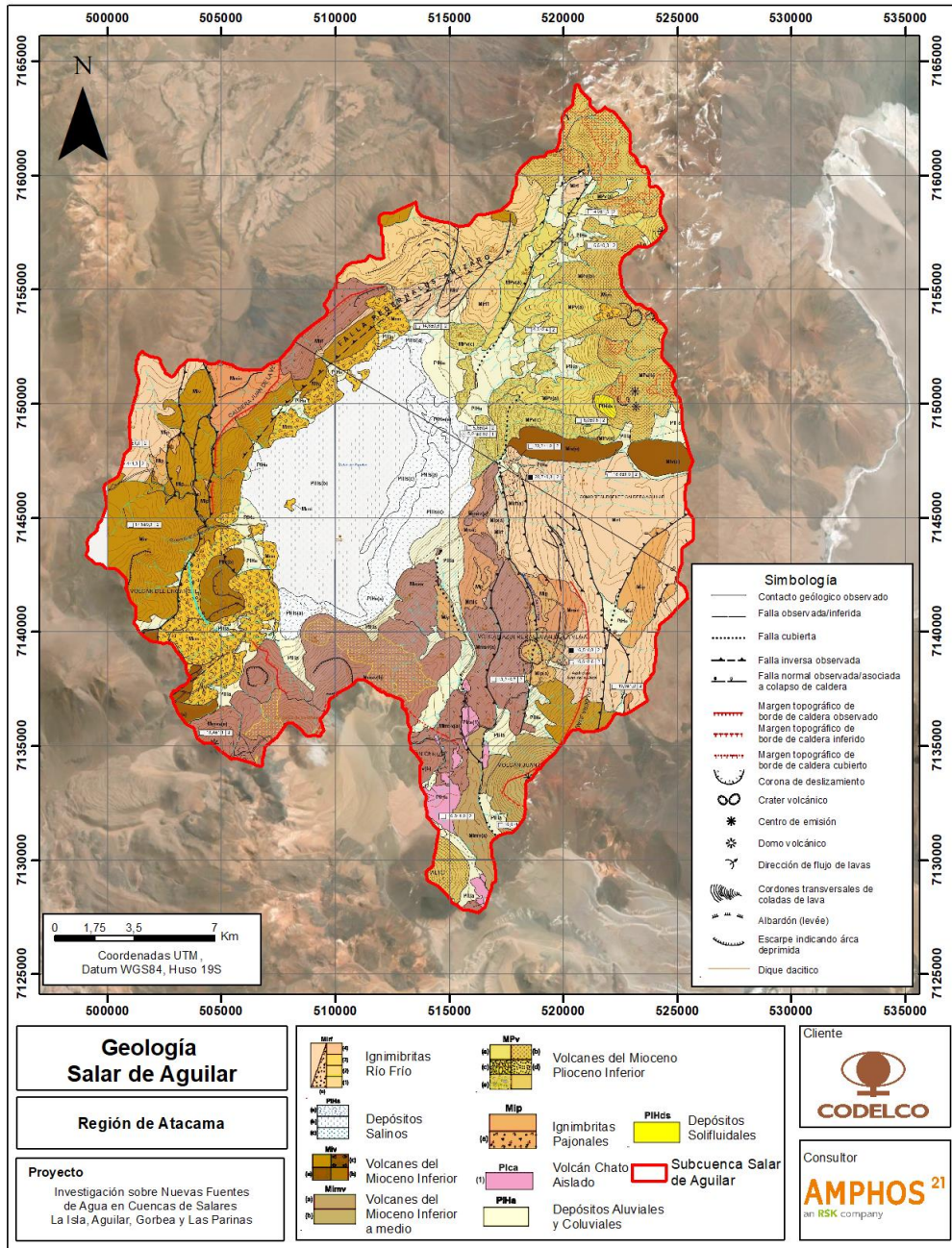


Figura 2-9. Mapa geológico de la cuenca del Salar de Aguilar basado en la carta geológica Áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto de Naranjo et al., 2013a.

La geología de esta cuenca, de acuerdo con la Figura 2-9, se detalla a continuación:

2.4.4.1 Depósitos y rocas estratificadas

Miv Volcanes de Mioceno Inferior

Conjunto de estratovolcanes, secuencias de lavas y piroclastos estratificados, moderada a intensamente erosionados. Lavas principalmente andesíticas y, en menor medida, andesitas dacíticas, además de andesitas basálticas. Depósitos piroclásticos de caída, tefras de lapilli y líticos, hasta bombas y bloques con intercalaciones subordinadas de lava.

Se distribuyen en el ONO y puntualmente al este del salar, subyacen concordantemente a las Ignimbritas Río Frío Pajonales y se encuentran en contacto discordante con los Volcanes del Mioceno Medio a Superior, Ignimbrita Chixi, depósitos de remoción en masa y depósitos aluviales y coluviales.

Mirf Ignimbritas Río Frío (Mioceno inferior)

Conjunto de tobas dacíticas rosáceas y grises de cristales intensamente soldadas, con abundantes fiammes, plagioclasa, anfíbol, piroxenos y biotita. Se reconocen, además, depósitos de brechas piroclásticas de lapilli a bloques.

Están distribuidas en el norte y este del salar, sobreyacen en contacto concordante a los Volcanes del Mioceno Inferior y subyacen a las Ignimbritas Pajonales, Chixi y los Volcanes del Mioceno Medio a Superior, además están cubiertas por depósitos aluviales y coluviales.

Mip Ignimbritas Pajonales (Mioceno inferior a medio)

Tobas dacíticas de cenizas y cristales comúnmente rosáceas, moderada a débilmente soldadas, con plagioclasa, biotita, anfíbol, piroxeno y flujos ricos en pómez y líticos.

Presenta afloramientos puntuales al oeste y SE del salar. Infrayacen a la Ignimbrita Chixi, a los Volcanes Mioceno Medio a Superior y depósitos aluviales y coluviales. Además, sobreyacen en contacto concordante a las Ignimbritas Río Frío y discordantemente a los Volcanes de Mioceno Inferior.

Mmic Ignimbrita Chixi (Mioceno Medio)

Flujo piroclástico mantiforme cuya base, localmente, corresponde a depósitos de caída lapilli fino a grueso, seguido de un nivel tobáceo no consolidado. En su parte superior corresponde a una brecha piroclástica residual soldada y oxidada.

Aflora hacia el NO y SE del salar, sobreyacen a las Ignimbritas Pajonales y Volcanes del Mioceno Medio y subyacen a los Volcanes del Mioceno Medio a Superior y depósitos aluviales y coluviales.

Mmsv Volcanes del Mioceno Medio a Superior

Estratovolcanes compuestos de grandes dimensiones, con buena preservación y ocasionalmente se presentan calderas de avalancha y domos. Lavas medianamente porfídicas de composición andesítica, andesitas basálticas, escasas dacitas y lava-domos andesítico-dacíticos. Se presentan alternancias de depósitos piroclásticos de caída negros y rojizos oxidados con lavas intercaladas.

Se distribuyen en el norte y sur del salar. Sobreyacen a los Volcanes del Mioceno Inferior y las Ignimbritas Pajonales y Chixi, subyacen a los Depósitos de Remoción en Masa y al Volcán Chato Aislado, además están cubiertas por depósitos aluviales y coluviales.

MPv Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior

Estratovolcanes y conos de escoria de dimensiones pequeñas, bien preservados, compuestos de lavas voluminosas medianamente porfídicas, andesíticas y dacíticas, ocasionalmente andesitas basálticas. En las partes media a alta se encuentran depósitos piroclásticos de caída con intercalaciones de lavas subordinadas, que suelen estar asociados a zonas de alteración hidrotermal.

Afloran hacia el sector NE del salar, sobreyacen a las unidades volcánicas anteriores del sector y subyacen al Volcán Chato Aislado y depósitos aluviales y coluviales.

Pica Volcán Chato Aislado (Pleistoceno Inferior)

Corresponde a un volcán constituido por una caldera de explosión, un domo exógeno y depósitos piroclásticos asociados. En el área afloran ignimbritas que corresponden a niveles tobáceos, cineríticos de pómez y cenizas, no consolidados a pobremente cementados.

Se distribuye hacia el sur del salar y sobreyace a los Volcanes del Mioceno Medio a Superior y Mioceno Superior-Plioceno Inferior, están cubiertos por depósitos aluviales y coluviales.

2.4.4.2 Depósitos no consolidados

Mrm Depósitos de Remoción en Masa (Mioceno)

Corresponden a depósitos de bloques angulosos e irregulares de tamaño variable, polimícticos, mal seleccionados, en una matriz esencialmente de arena y limo. Son comunes los bloques de decenas de metros y ocasionalmente mega-bloques de cientos de metros. Los depósitos desarrollan formas lobuladas y cerrillos en superficie.

Se distribuyen al oeste del salar y sobreyacen a los Volcanes del Mioceno Inferior, del Mioceno Medio a Superior y a la Ignimbrita Río Frío.

MHac Depósitos Aluviales y Coluviales (Mioceno-Holoceno)

Corresponden a bloques, gravas, arenas y materiales finos, ocasionalmente cenizas, arcillas y sales. Generalmente no tienen estratificación, a excepción de los sedimentos finos. Los depósitos aluviales son de carácter polimícticos y de mala selección y los coluviales monomícticos y angulosos. Se distribuyen por toda el área de la cuenca y sobreyacen a la mayoría de las unidades.

MHs Depósitos salinos (Mioceno-Holoceno)

Son depósitos de sales y sedimentos finos, en los que se reconocen dos facies; superficies suaves, húmedas o secas, inundadas o frecuentemente inundables compuestas por halita y otros minerales sulfatados y costras salinas principalmente de halita y lagunas de salmuera. Se ubican en la parte central de la cuenca y tienen una dirección NE-SO.

2.4.4.3 Estructuras

Dentro de la cuenca se han identificado fallas inversas de bajo ángulo que afectaron la cubierta volcánica Miocena y obliteraron el escarpe de la Caldera Aguilar (Figura 2-10). Por otra parte, estas estructuras son cortadas por el escarpe de la Caldera Salar Grande.

Al NO del salar se identifica un subdominio de fallas inversas NNE, que forman un 'horst' (Figura 2-11) de 300-400 m de elevación y que alza los niveles inferiores de Ignimbritas Río Frío y Pajonales. Hacia el noreste se reconoce una falla con orientación NNE, de cinemática inversa, vergencia al este y 22 km de longitud que afecta a los Volcanes del Mioceno Superior-Plioceno Inferior. En el SE, hacia el domo resurgente, existe un subsistema de fallas inversas con vergencia al este en el flanco occidental y oeste en el flanco oriental, formando un 'horst' de hasta 500 m de rechazo.

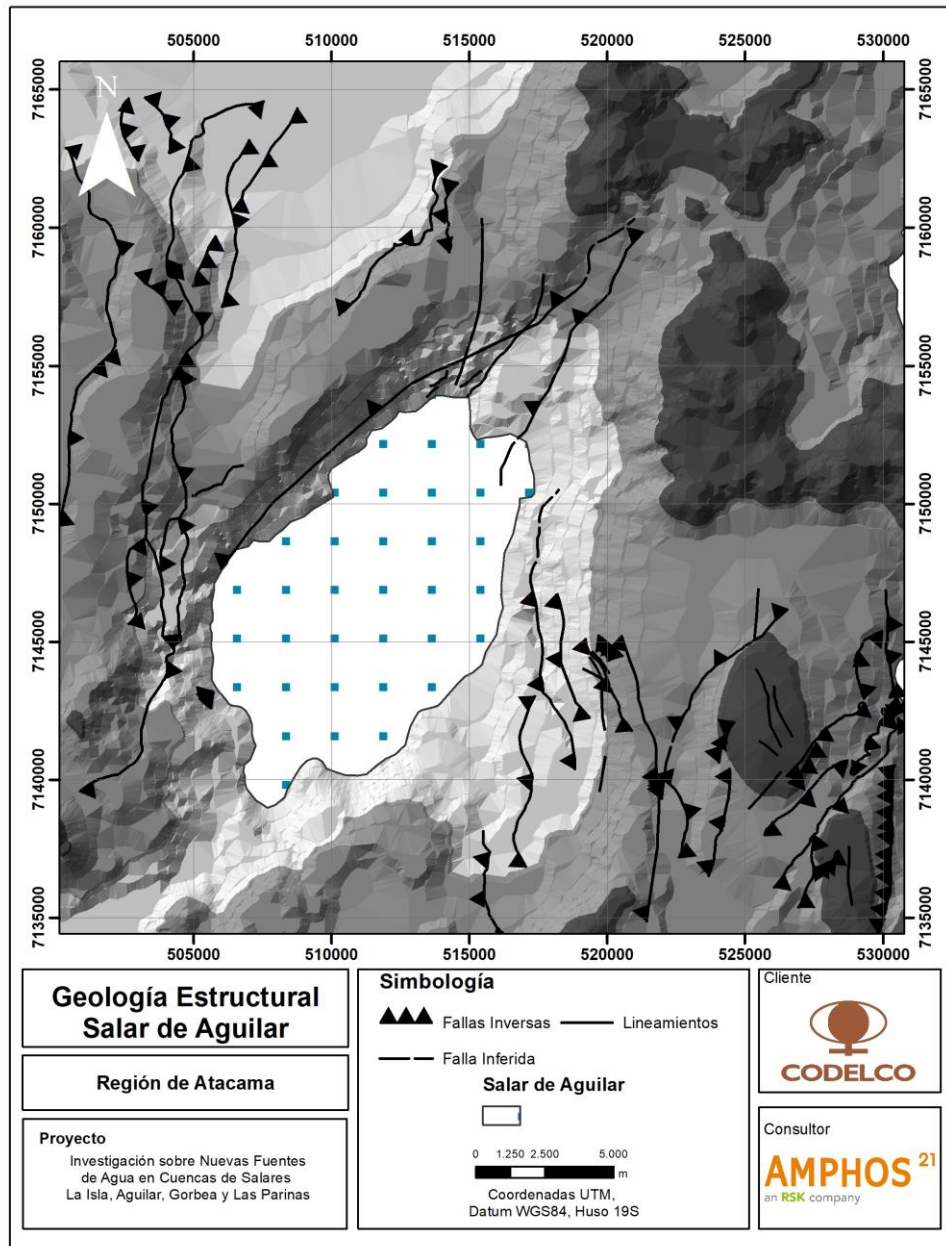


Figura 2-10. Sistemas de fallas locales de orientación NNE y NNO en la cuenca Salar de Aguilar. Información extraída de Naranjo et al., 2013a.

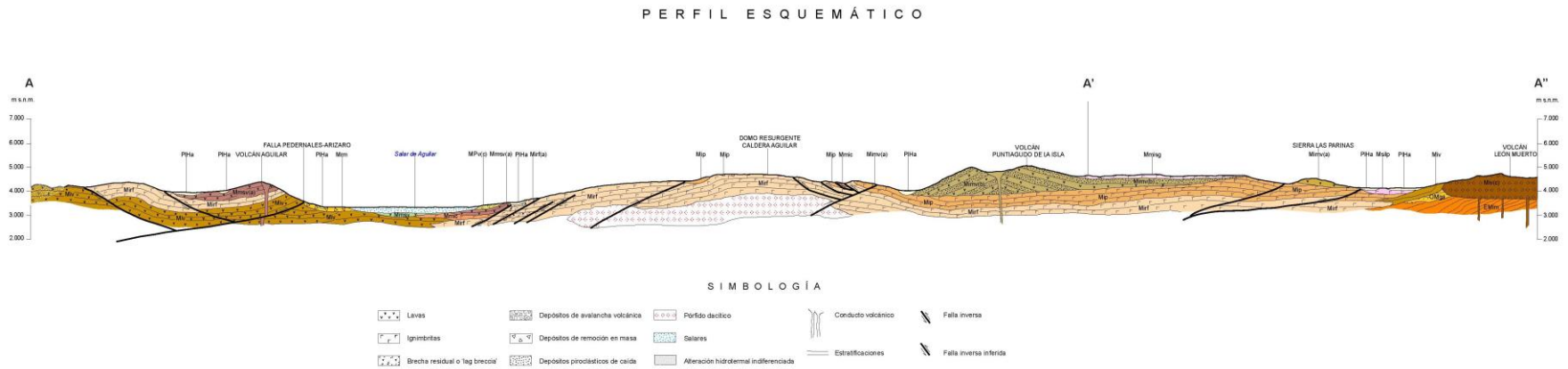


Figura 2-11. Vista en sección del Salar de Aguilar, perfil dirección NO-SE. En la zona central se puede reconocer el 'horst' del domo resurgente. Extraído de Naranjo et al., 2013a.

3 Síntesis geológica

El Arco Volcánico de los Andes Centrales se caracteriza por la presencia de cuenca endorreicas en las zonas más altas de la cordillera, en las cuales se acumularon aguas superficiales durante decenas de miles de años y que, sumado a las condiciones de extrema aridez existentes en este sector, permitieron que en las zonas de menor elevación topográfica de las cuencas se formaran salares con una alta concentración de elementos de interés económico.

Fueron también estas condiciones climáticas imperantes desde hace aproximadamente 15 Ma las que permitieron la preservación de las estructuras volcánicas, depósitos piroclásticos y lavas. Estos depósitos volcánicos y volcanoclásticos entregan un registro completo de la evolución y las etapas del arco volcánico desde el Mioceno hasta el presente.

Durante el Paleozoico Superior fue depositada la Formación La Tabla (Carbonífero – Pérmico), esta fue intruida por el Granito Parinas aproximadamente en el Pérmico Medio y luego por la Granodiorita León Muerto durante el Pérmico superior, constituyendo el basamento del arco volcánico cenozoico. Estas unidades son denudadas durante el alzamiento andino y sobre ellas son depositadas las Gravas de Atacama.

El periodo entre el Mioceno Inferior – Mioceno Medio, se caracteriza por la formación de grandes estructuras volcánicas tipo estratovolcanes, que luego serían cubiertas por unidades volcánicas de dimensiones muy menores a los pulsos predecesores. Simultáneamente al desarrollo de las estructuras volcánicas, se generaron tres grandes calderas en el sector. La caldera Aguilar, actualmente obliterada por la actividad tectónica y que solo conserva su domo resurgente, generó las Ignimbritas Río Frío y Pajonales entre el Mioceno inferior y medio. Debido al entrampamiento tectónico del drenaje y de las aguas subterráneas dentro de la caldera Aguilar se ocasionó un aumento en el nivel freático dentro de esta y posteriormente una explosión freatomagmática que dio origen a la caldera Juan de la Vega y a la Ignimbrita Chixi. Luego de este evento, la actividad volcánica se concentró hacia el sur de la caldera Aguilar, y que acabó repentinamente con el colapso de la caldera Salar Grande, en donde se generaron las Ignimbritas Salar Grande. Finalmente, la actividad magmática explosiva termina en el Pleistoceno inferior, con el magmatismo explosivo del Volcán Chato Aislado en la zona central de la caldera Salar Grande.

La remoción de los depósitos volcánicos y piroclásticos, zonas de alteración hidrotermal y otras unidades débiles fueron depositadas como abanicos aluviales debido a la acción de las lluvias y depósitos coluviales producto de la denudación local de las unidades, estos han sido acumulados permanente y continuamente en la evolución de arco magmático desde el Mioceno inferior y que se han preservado por más de 20 Ma.

4 Referencias

Amphos 21, 2016. Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto - Andinas de la Región de Atacama, Fase 3, Cuencas 10, 30, 31 y 32.

CEPAL, 2010, Salares del Norte de Chile: Potenciales fuentes de litio. Santiago.

Chernicoff, Carlos & Richards, Jeremy & Zappettini, Eduardo. (2002). Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: Geological, geophysical, and remote sensing evidence. *Ore Geology Reviews - ORE GEOL REV.* 21. 127-155. 10.1016/S0169-1368(02)00087-2.

Codelco, 2021. Avenimiento y Transacción Consejo Defensa del Estado. Rol D-7-2020.

Naranjo, José & Puig, A. (1984). Hojas Taltal y Chañaral, Cartas geológicas de Chile; 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.

Naranjo, J.A.; Cornejo, P. 1992. Hoja Salar de la Isla. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No. 72, escala 1:250.000.

Naranjo S. J.A; Villa, V; Venegas, C. 2013a. Geología de las áreas Salar de Aguilar y Portezuelo de León Muerto, región de Atacama, Escala 1:100.000.

Naranjo S. J.A; Villa, V; Venegas, C. 2013b. Geología de las áreas Salar de Pajonales y Cerro Moño, regiones de Antofagasta y Atacama, Escala 1:100.000.