



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

ICASS LTDA

S.I.T. N° 357

Santiago, Diciembre 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe de División Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Miguel Caro Hernández

INGENIERÍA Y CONSULTORÍA EN AGUAS LTDA

Wolf von Igel Grisar
Jefe de Proyecto
Hidrogeólogo

Profesionales:

Ingeniero Civil Scarlett Vásquez Paulus
Ingeniero Civil Bernardo Capino Díaz
Ingeniero Civil Gonzalo Jiménez Martínez
Hidrogeólogo Íñigo Irarrázaval
Geólogo Rodrigo Rauld
Geólogo Andrés Fock
Hidrogeólogo Felipe García Huidobro
Geofísico Juan Carlos Parra

Tabla de Contenido General

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
4.	GEOLOGÍA	5
5.	HIDROLOGÍA SUPERFICIAL	12
6.	HIDROGEOLOGÍA.....	14
6.1	SECTOR NORTE	16
6.2	SECTOR ORIENTAL	16
6.3	SECTOR SUR	20
6.4	NÚCLEO	21
7.	HIDROQUÍMICA	23
7.1	FUENTES DE INFORMACIÓN	23
7.2	PARÁMETROS	24
7.3	ANÁLISIS DIAGRAMAS DE PIPER Y SCHÖELLER.....	25
7.4	IDENTIFICACIÓN DE ZONA DE INTERFAZ CUÑA SALINA	26
8.	EVALUACIÓN RECURSOS HÍDRICOS.....	28
9.	MECANISMOS DE EVAPORACIÓN DESDE EL SALAR	31
9.1	EVAPORACIÓN DESDE EL AGUA SUBTERRÁNEA.....	31
9.2	EVAPORACIÓN CUERPOS SUPERFICIALES	32
9.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN VEGAS, BOFEDALES Y ÁREAS CULTIVADAS	33
10.	DI SEÑO DE RED DE MONITOREO	34
11.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39

Índice de figuras

FIGURA 3-1 UBICACIÓN SALAR DE ATACAMA.....	3
FIGURA 4-1 PRINCIPALES MORFOESTRUCTURAS Y UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA.....	6
FIGURA 4-2 PERFIL W-E EN ELABORADO POR FOCK 2011. FUENTE: FOCK (2011).	9
FIGURA 4-3 TRAZADO EN SUPERFICIE DE LOS PERFILES TEM Y MT REALIZADOS EN EL BORDE ESTE SALAR	11
FIGURA 6-1 ZONAS SALAR	15
FIGURA 6-2 PIEZOMETRÍA BORDE ORIENTAL (SALAS ET AL., 2010).....	17
FIGURA 6-3 SISTEMA SONCOR (SALAS ET AL., 2010)	19
FIGURA 6-4 DIAGRAMA HIDROGEOLOGÍA SECTOR SUR (MODIFICADO DE EIA RWL)	21
FIGURA 7-1 CUÑA SALINA	27
FIGURA 8-1: MODELO CONCEPTUAL (MODIFICADO DE DICTUC, 2004).....	29
FIGURA 9-1 EVAPORACIÓN V/S PROFUNDIDAD. MODIFICADO DE KAMPF, 2002	32
FIGURA 10-1: DISEÑO LISÍMETRO.....	34
FIGURA 10-2 FOTOGRAFÍA LISÍMETRO	35
FIGURA 10-3: MEDIDAS ESTANQUE.	36
FIGURA 10-4 DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS PIEZÓMETRO	37

Índice de tablas

TABLA 8-1 BALANCE HÍDRICO ESTUDIOS SALAR DE ATACAMA	30
TABLA 10-1 UBICACIÓN ESTACIÓN DE MONITOREO (WGS84 / UTM ZONA 19S).....	38
TABLA 11-1 RESUMEN RECOMENDACIONES.....	43

1. Introducción

La cuenca del Salar de Atacama corresponde a una cuenca endorreica, donde el Salar se ubica en la parte más baja de esta. Desde el punto hidrológico, el acuífero del Salar constituye una fuente importante de agua para el abastecimiento de los diferentes pueblos del sector. Desde el punto de vista minero, la salmuera que se encuentra en el acuífero ubicado bajo la costra del Salar es una valiosa fuente de recursos minerales como el litio, potasio, nitratos y otros, los cuales han sido explotados por diversas empresas mineras a lo largo del tiempo. Finalmente, desde el punto de vista ambiental, en el Salar de Atacama ocurre que el agua subterránea aflora en algunos sectores generando lagunas, lo cual resulta fundamental para sostener la gran biodiversidad que incluye variadas especies vegetales, aves migratorias, mamíferos y reptiles.

Dado lo anterior resulta fundamental contar con herramientas que permitan estimar la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo para fomentar tanto las actividades productivas como de consumo humano, sin generar un perjuicio tanto en la flora como en la fauna del Salar.

Al ser la cuenca del Salar de Atacama del tipo endorreica, en régimen natural la única descarga de agua subterránea corresponde a la evapotranspiración. Por lo tanto el acercamiento que se ha utilizado hasta ahora en la mayoría de los trabajos que han estudiado los recursos hídricos del Salar se basan en este parámetro para estimar la recarga de agua subterránea que llega al acuífero. Dentro de este contexto el trabajo más importante de estimación de evaporación corresponde al realizado por Mardones en 1986 en el cual se estimaron las tasas de evaporación a través de lisímetros.

Este trabajo tiene como principal objetivo aportar al conocimiento sobre la evaporación que se produce en el Salar de Atacama.

2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es desarrollar y aplicar una metodología que permita estimar la evaporación proveniente del agua subterránea en el Salar de Atacama. Se busca mejorar las estimaciones de evaporación realizadas a la fecha y proporcionar un monitoreo continuo en el tiempo de la evaporación desde el agua subterránea, con el fin de mejorar el conocimiento de los recursos hídricos de la cuenca.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Recopilación y revisión de antecedentes
- Levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica
- Instalación de estaciones de monitoreo que cuentan con lisímetro, pluviómetro, sensor de temperatura y piezómetro) e instalación de red complementaria de piezómetros
- Desarrollo de un modelo conceptual y balance hídrico del sistema

Se recopilará y analizará la información disponible del salar de Atacama, la que será complementada con observaciones en terreno. Existe una gran cantidad de información de las compañías mineras que extraen salmuera en el núcleo del salar, como niveles de agua subterránea, características del acuífero y signatura hidroquímica del agua, sin embargo esta información es en su mayoría confidencial y por lo tanto no se puede contar con su totalidad. Considerando esto, para este estudio se solicitó la colaboración de distintas compañías mineras con presencia en el Salar de Atacama, las han facilitado la información perteneciente a los planes de seguimiento ambiental, que es de carácter público, pero que aún no están disponibles en sus versiones más recientes.

3. Localización de la zona de estudio

La cuenca del salar de Atacama se ubica en la Región de Antofagasta, aproximadamente a 150 kilómetros al sureste de la ciudad de Calama, entre los 22°57' y 23°47' latitud sur. La cuenca corresponde a una cuenca endorreica donde el Salar de Atacama se ubica en la parte más baja de la cuenca homónima, tiene forma elipsoidal con un eje mayor de 85 km y una anchura máxima de 50 km. La parte central se encuentra a 2300 m.s.n.m. (Muñoz et al., 2004)

En las cercanías del Salar de Atacama se encuentran los poblados de San Pedro de Atacama en el norte y Toconao y Peine en el margen este. En la Figura 3-1 se destaca la ubicación del Salar de Atacama y su cuenca en color azul.

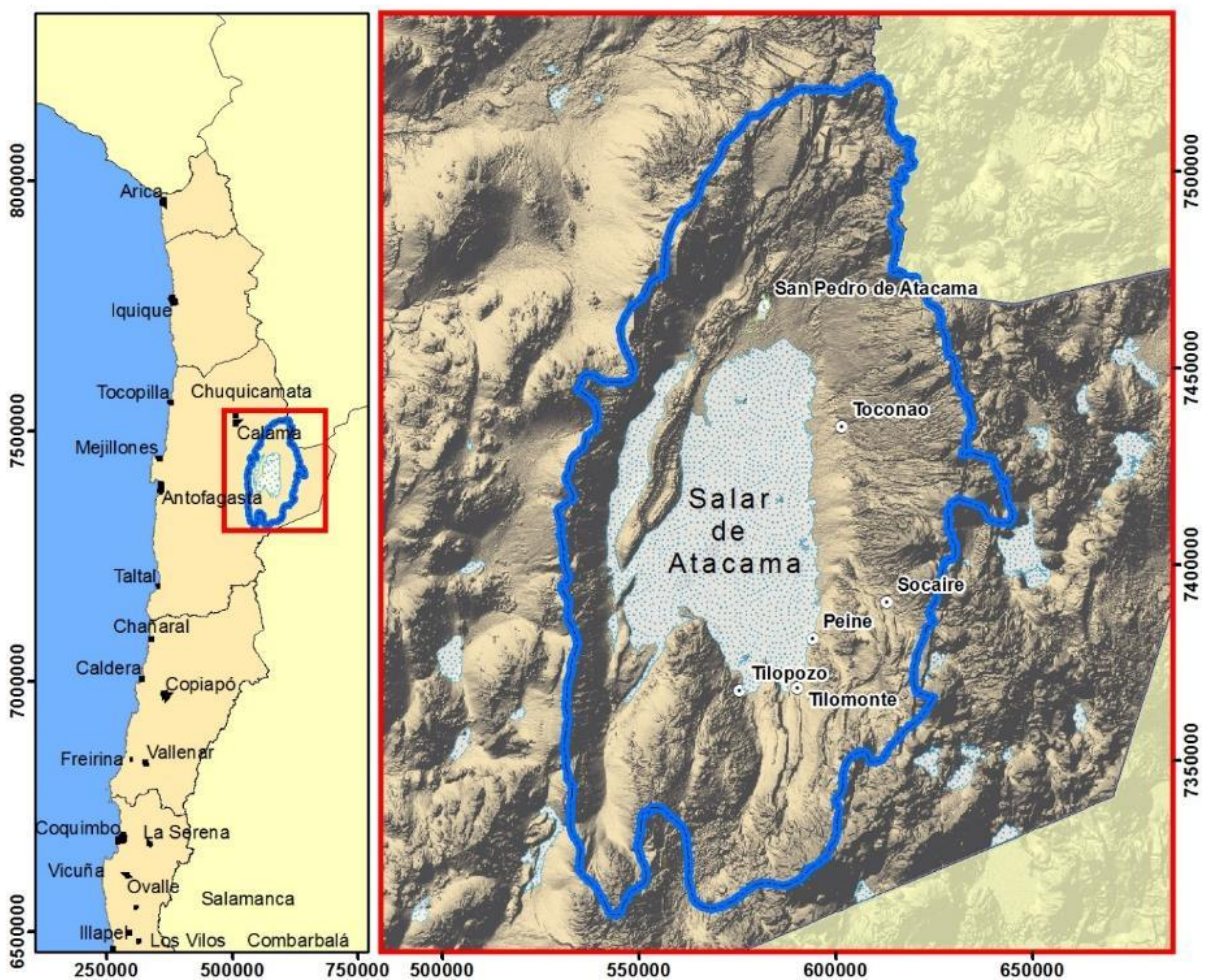


Figura 3-1 Ubicación Salar de Atacama

Cabe destacar que en toda la comuna de San Pedro de Atacama existe una fuerte presencia de pueblos originarios, entre los cuales se encuentran 8 comunidades con terrenos en el sector del Salar de Atacama. Además, existen reservas naturales del Servicio Nacional Áreas Silvestres (CONAF) y sitios Ramsar.

4. Geología

Se realiza una completa descripción de las unidades morfoestructurales, la geología de superficie, las estructuras y la geología en subsuperficie. En este resumen ejecutivo se presenta un mayor detalle de la geología de subsuperficie.

La hoya hidrográfica del Salar de Atacama está delimitada por morfoestructuras de orientación principal norte-sur, las cuales de oeste a este se disponen en el siguiente orden: Cordillera de Domeyko, Llanos de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Salar de Atacama, Cordillera Occidental de los Andes, donde se ubica el arco volcánico actual, y por el sur el Cordón de Lila (Figura 4-1).

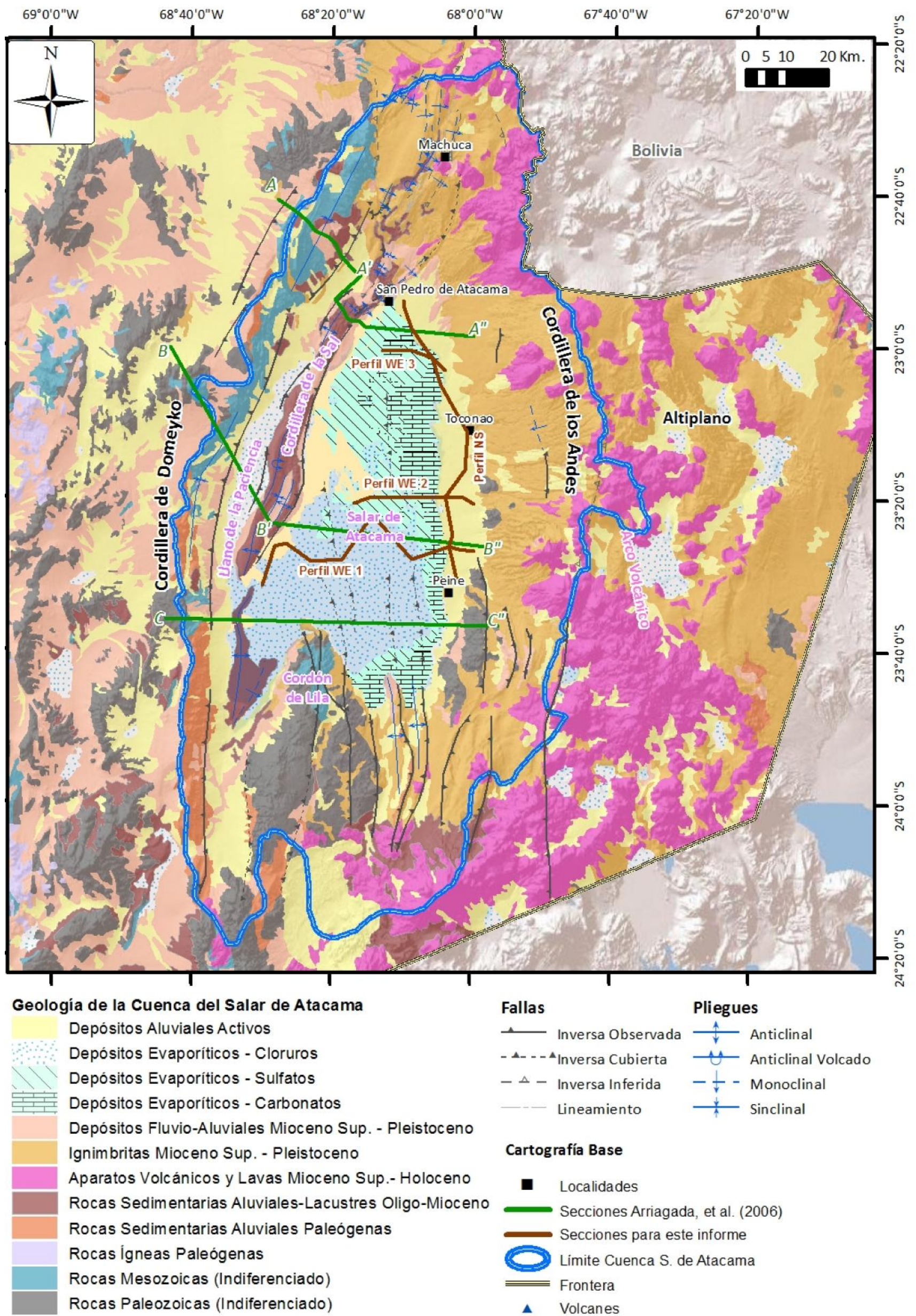


Figura 4-1 Principales morfoestructuras y unidades geológicas de la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Modificado de Bevacqua (1992), SERNAGEOMIN (2003), Aron, et al., (2008), Arriagada, et al., (2006).

El Salar de Atacama corresponde a una cuenca tectónica compresiva, delimitada por fallas inversas que afectan las rocas desde el basamento paleozoico hasta la cobertura actual (Kuhn (2002), Mpodozis, et al. (2005), Arriagada, et al. (2006), Jordan, et al. (2002) y (2007)). El espacio generado en los movimientos de estas fallas ha controlado desde el Mesozoico la depositación de las distintas formaciones reconocidas en el área, así como la morfología actual de la cuenca (Mpodozis, et al. (2005), Arriagada, et al. (2006)).

El principal estilo estructural reconocido en la cuenca del Salar de Atacama corresponde a fallas inversas de vergencia este, de rumbo aproximado NS a NNE (Flint, et al., (1993), Pananont, et al., (2004), Arriagada, et al. (2006), Cembrano, et al. (2007), Aron, et al. (2008), González, et al. (2009)). Las estructuras del sector son, desde oeste hacia el este, las siguientes.

La geología en Subsuperficie ha sido descrita a través de varios sondeos verticales y la construcción de perfiles geológicos por Díaz del Río (1972), Dalannais (1979), EDRA (1997), SQM (2005), NX UNO PEINE (2008). Cornellá et al. (2009), y Salas et al. (2009), cuya ubicación se presenta en la Figura 4-1. Díaz del Río (1972) y Dalannais (1979) mapearon los desechos recuperados durante la perforación de los pozos de exploración del margen oriental del Salar de Atacama en la década de los 60's y 70's por el proyecto CHI-535 del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y la CORFO.

A grandes rasgos, en subsuperficie se reconocen las mismas unidades reconocidas en superficie, pero con fuertes variaciones laterales de facies y engranes laterales entre las distintas unidades (ver Figura 4-2), los que se encuentran asociados a cambios en el volumen de agua disponible en la cuenca. De manera general, mientras mayor sea el contenido de agua disponible, los depósitos aluviales y facies marginales de carbonatos avanzarán más hacia el núcleo del Salar. En cambio, en períodos secos, el área que cubre el núcleo de halita será mayor.

Por otro lado, en los perfiles elaborados por Díaz del Río, et al. (1972), se observa la continuidad norte sur en las unidades reconocidas en subsuperficie en el borde este del Salar, reconociéndose al menos una gran unidad aluvial emplazada sobre una Ignimbrita y arcilla. Bajo esta unidad se reconocen nuevamente depósitos aluviales, que engranan hacia el oeste con los depósitos evaporíticos del salar.

Por último, en el presente estudio se realizó una recopilación de las estratigrafías provenientes de los estudios anteriores con lo que se elaboraron cuatro secciones geológicas. La ubicación en planta de estas secciones se presenta en la Figura 4-1.

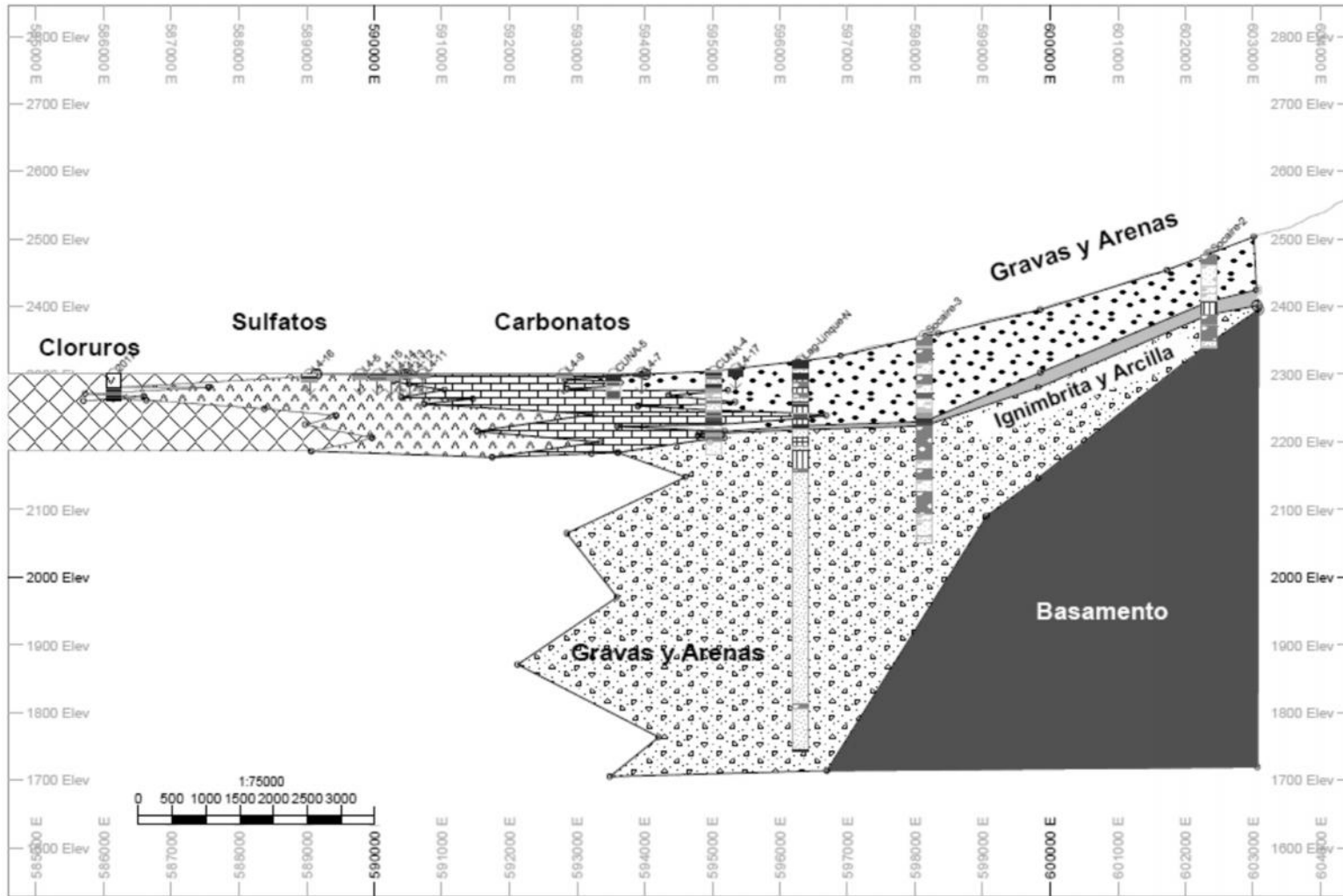


Figura 4-2 Perfil W-E en elaborado por Fock 2011. Fuente: Fock (2011).

Como parte de este estudio se realizó una campaña consistente en 5 secciones de transiente electromagnético (TEM) y Magnetotelúrica (MT). Estas secciones buscaban explorar el borde este del salar en profundidad, con el objetivo de identificar si es que existe recarga subterránea desde alguna cuenca ubicada hacia el oeste. La disposición general de estas secciones fue una sección principal de orientación norte-sur (ver Anexo 3 – Informe geofísico). La ubicación de las secciones geofísicas se presenta en la Figura 4-3.

En las secciones TEM se muestra un nivel superior de alta resistividad, cuya base se encuentra entre las cotas 2.200 y 2.250 m.s.n.m., y que representaría a las rocas asociadas a los edificios volcánicos actuales. Bajo esta primera unidad se identifica un nivel de baja resistividad que se acuña hacia el este y que desaparece en el extremo sur de la sección principal. A continuación se reconoce una nueva unidad de alta resistividad (menor que la primera) que en la mayor parte de la sección no alcanza su base. Finalmente, hay una zona de muy baja resistividad en la parte central y sur de la zona levantada.

Las secciones MT representan la zona ubicada bajo las secciones TEM, ya que la resolución de la metodología no permite ver las zonas ubicadas más cerca de la superficie. Bajo las unidades reconocidas en las secciones TEM se identifica una de alta resistividad, que es posible que coincida con la tercera unidad identificada por el TEM. Esta unidad tiene un espesor máximo de aproximadamente 700 m, y no alcanza los extremos norte ni sur de la sección principal, quedando cortada en la estación 2 por el norte y 18 por el sur.

A continuación hay una unidad que presenta importantes variaciones en su espesor y resistividad. El espesor máximo de esta unidad es aproximadamente 3.000 m, y al norte de la estación 14 desaparece para volver a aparecer entre las estaciones 17 y 18. Este último corte tiene una pendiente muy bien marcada, de aproximadamente 45°, y es probable que corresponda a una falla de Back Thrust con orientación NW asociada al fallamiento inverso resultante del régimen compresivo que domina en la zona, y que estaría levantando a las rocas de edad paleozoica que afloran al norte de Camar. Finalmente, hay una gran unidad de baja resistividad, de la cual no se identifica la base.

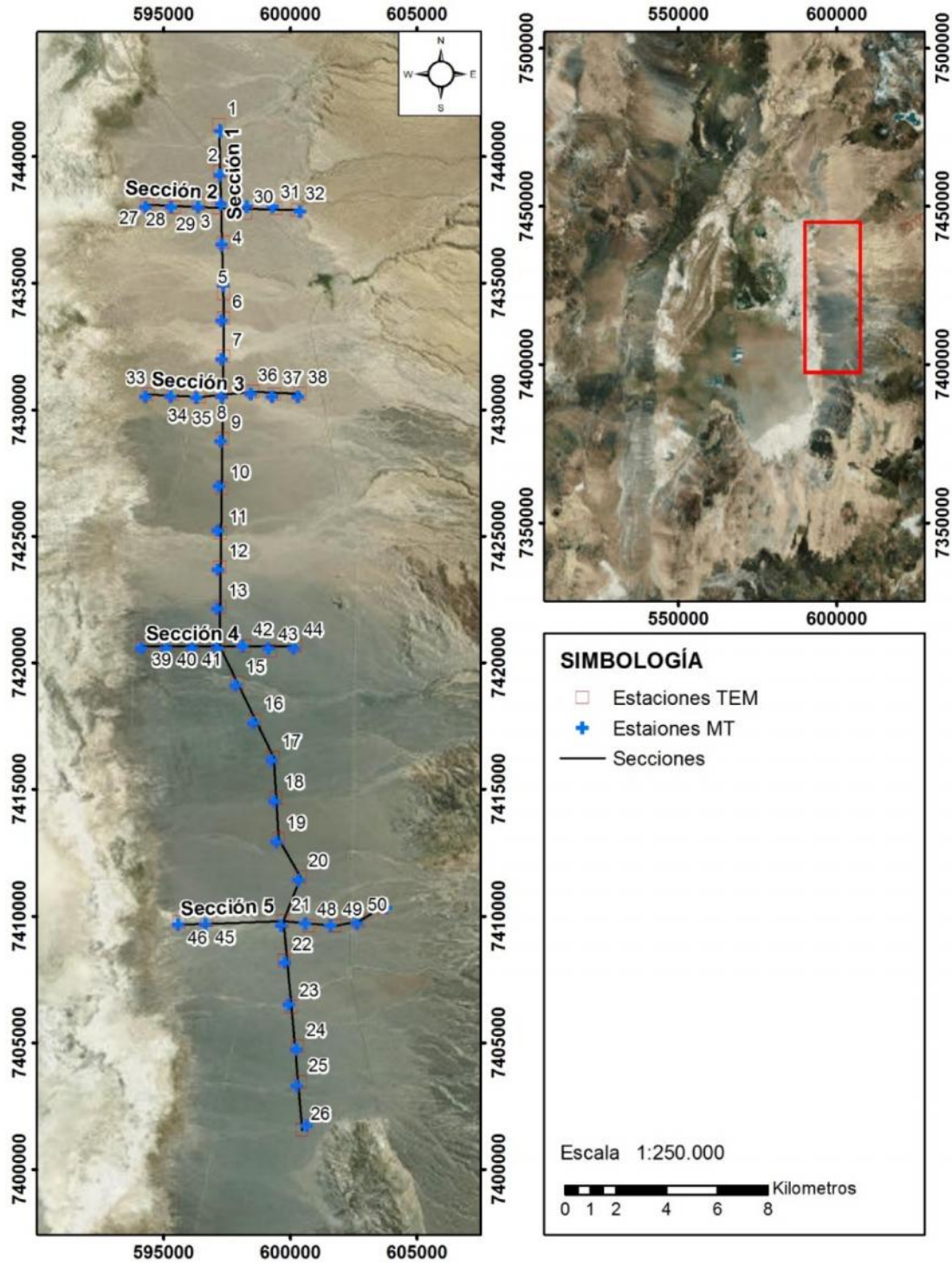


Figura 4-3 Trazado en superficie de los perfiles TEM y MT realizados en el borde este Salar

5. Hidrología superficial

Según la clasificación de Köppen, en la parte baja de la cuenca del Salar se observa un clima seco-árido frío (BWk) con una temperatura media anual inferior a los 18°C. En el sector alto se observa un clima frío de tundra (ETH) debido a las grandes alturas, con precipitaciones estivales producto del invierno boliviano Y temperaturas medias anuales del orden de los 11°C.

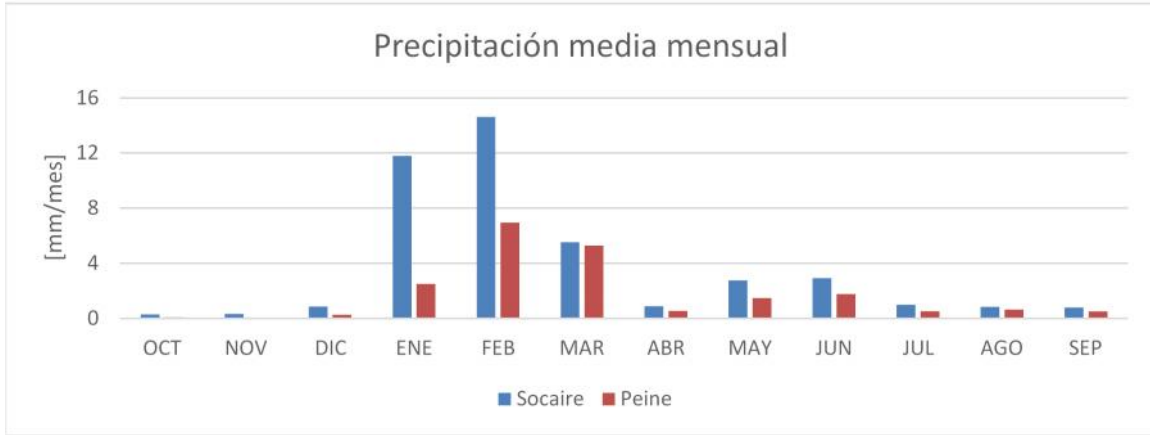
La red hidrográfica de la cuenca del Salar de Atacama se conforma principalmente por una serie de cauces en el sector norte y oriente de la cuenca, los cuales definen un total de 13 suc-cuencas (DGA/GCF, 2010). En el sector norte destacan el río San Pedro, formado por la confluencia de los ríos Grande y Salado, y el río Vilama, mientras que en el borde oriente de presentan una serie de quebradas con sentido de escurrimiento de este a oeste, pequeña longitud y caudales esporádicos y de baja magnitud.

En la cuenca del Salar se dispone de un total de 7 estaciones fluviométricas y 10 estaciones pluviométricas. Con respecto a la información fluviométrica se observa que el único registro importante corresponde a la estación Río San Pedro en Cuchabrachi, mientras que en el caso de las precipitaciones, 6 de las 10 estaciones cuentan con registros por más de 30 años.

Considerando el tamaño de la cuenca y la cantidad de información disponible, se concluye que la cobertura de estaciones no es suficiente para caracterizar las precipitaciones o caudales, particularmente en las zonas altas de las subcuencas aportantes al núcleo. Es por ello que se han realizado esfuerzos por ampliar y rellenar la estadística de la red de monitoreo, donde destacan los trabajos realizados por el Balance Hídrico de Chile de 1987, el estudio DGA/DICTUC de 2008 y el reporte DGA/GCF de 2010.

En el caso del Balance Hídrico de Chile se obtuvo como resultado un mapa de isoyetas de precipitación media anual a escala 1:500.000, las cuales representan de buena forma la variación espacial en términos relativos, no así en términos absolutos ya que sus valores se encuentran desactualizados. DGA/DICTUC (2008) rellenó y extendió la estadística a través de un modelo de regresión lineal, para luego generar isoyetas de precipitación anual las cuales se corrigieron en base a la topografía y gradientes de precipitación con respecto a la altura. En tanto DGA/GCF (2010) aplicó un modelo estocástico multivariado a nivel

mensual y se estimó la precipitación efectiva de la cuenca. En la siguiente figura se presentan las precipitaciones medias mensuales reistradas en las estaciones Peinte y Socaire.



En el caso de la fluviometría, no se cuenta con extensiones y/o rellenos de la estadística fluviométrica para la cuenca del Salar de Atacama. Lo anterior ya que la escasez de estaciones y las características de los escurrimientos, en que la infiltración resulta ser significativa, no permite generar correlaciones apropiadas. Se ha estimado un caudal total de 1239 [l/s] provenientes del sector norte del Salar y 505 [l/s] provenientes de las quebradas ubicadas en el borde oriental (CORFO, 1977).

6. Hidrogeología

La hidrogeología del Salar de Atacama puede ser clasificada en 4 zonas: el sector norte, borde oriental, el sector sur este y el núcleo del Salar.

El sector norte incluye el área del Salar entre la latitud de San Pedro de Atacama y Toconao y limitado al oeste por la cordillera de la Sal y al oriente por los abanicos aluviales de la cordillera de Los Andes. En este sector, se encuentra el delta del río San Pedro además de las lagunas Tebinquinche, Baltinache y Cejas. El borde oriental corresponde al área comprendida entre los abanicos aluviales del margen este del salar y el núcleo del salar. Este sector incluye los sistemas de aguas superficiales sistema Soncor (Canal del Burro muerto, Laguna Chaxa, Laguna Puilar y Laguna Barros Negros) y el sector Aguas de Quelana. El sector sur, se encuentra al sur del Salar de Atacama, entre el Cordón de Lila y el margen oriental. Este sector incluye el sistema Peine (Lagunas Salada, Laguna Saladita, Laguna Interna) y Laguna La Punta y Laguna Brava. Por último, el núcleo del salar definido en el trabajo de (Moraga, Chong, Fortt, & Henriquez, 1974), corresponde a la zona centro y parte del borde occidental del salar. Este sector se caracteriza por presentar costras de cloruros.

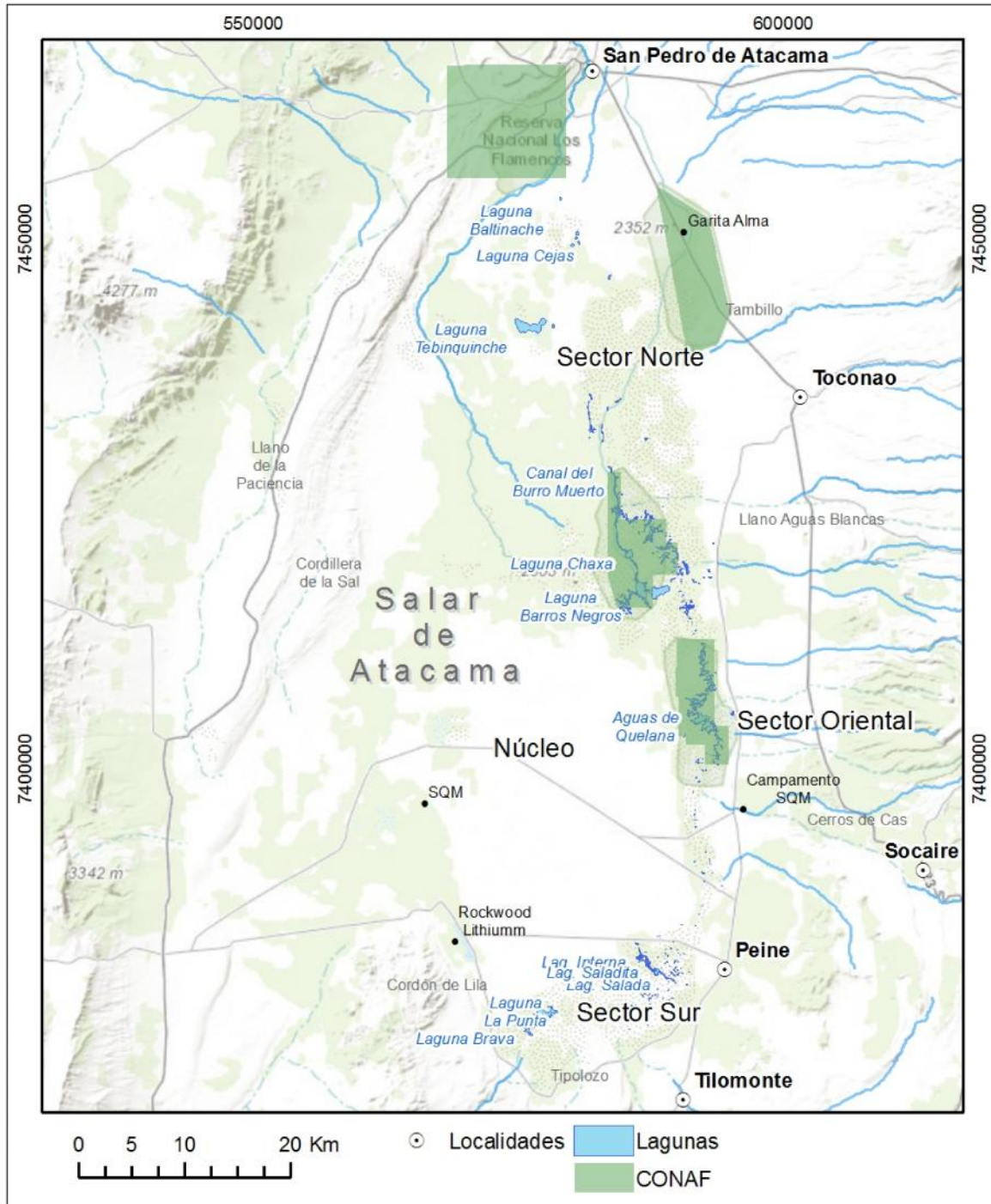


Figura 6-1 Zonas salar

6.1 Sector norte

Se identifican cuatro unidades hidrogeológicas (RioChilex, 1999): un acuífero superior de tipo libre de entre 4 a 30 [m] de espesor y niveles freáticos de 0,2 a 3 [m], un acuífero principal de tipo confinado y un tercer nivel compuesto por flujos ignimbríticos tobáceos que se desarrolla bajo los 110 [m] y con espesores de 150 [m]. Lateralmente en la zona marginal se desarrolla una unidad principalmente arcillosa.

En el acuífero superior se observa un flujo en sentido N-S con gradiente hidráulico que varía entre 0,2 y 0,5% y un caudal de 405 [l/s]. A través de pruebas de bombeo se estimó una transmisividad media del acuífero principal de 1450 [m²/d], almacenamiento de 10⁻³ y un flujo de 1678 [l/s] (RioChilex, 1999).

6.2 Sector oriental

Se reconoce una secuencia formada por sedimentos clásticos (gravas, arenas, limos y arcillas), secuencias de ceniza e ignimbritas, que alcanzan una potencia reconocida del orden de 500 m. De acuerdo a la información disponible, se han reconocido 2 acuíferos en el borde este, separados por un acuitardo. El acuífero superior es de tipo libre, se distribuye a lo largo y ancho del sector oriental con un espesor saturado que varía entre los 40 y 100 [m] y está conformado de gravas, arenas gruesas y en algunos sectores de arena mediana. La conductividad hidráulica varía entre 12 y 66 [m/d] (Dalannais, 1979). El acuitardo corresponde a una toba de color gris, muy densa y compacta, de unos 10 [m] de espesor, que lateralmente varía a una arcilla gris compacta y plástica. Finalmente un acuífero confinado que subyace al acuitardo, se compone de sedimentos finos y de un espesor promedio de 100 [m].

En esta zona se cuenta con una gran cantidad de información de niveles de agua subterránea gracias al monitoreo realizado por SQM y CONAF, quienes monitorean lagunas de importancia ecológica (Sistema Soncor y Aguas de Quelana). En la Figura 6-2 se presenta la piezometría del borde oriental (Salas et al., 2010) generada a partir de los pozos de monitoreo de SQM, donde se observa que las líneas equipotenciales son aproximadamente paralelas a la topografía.

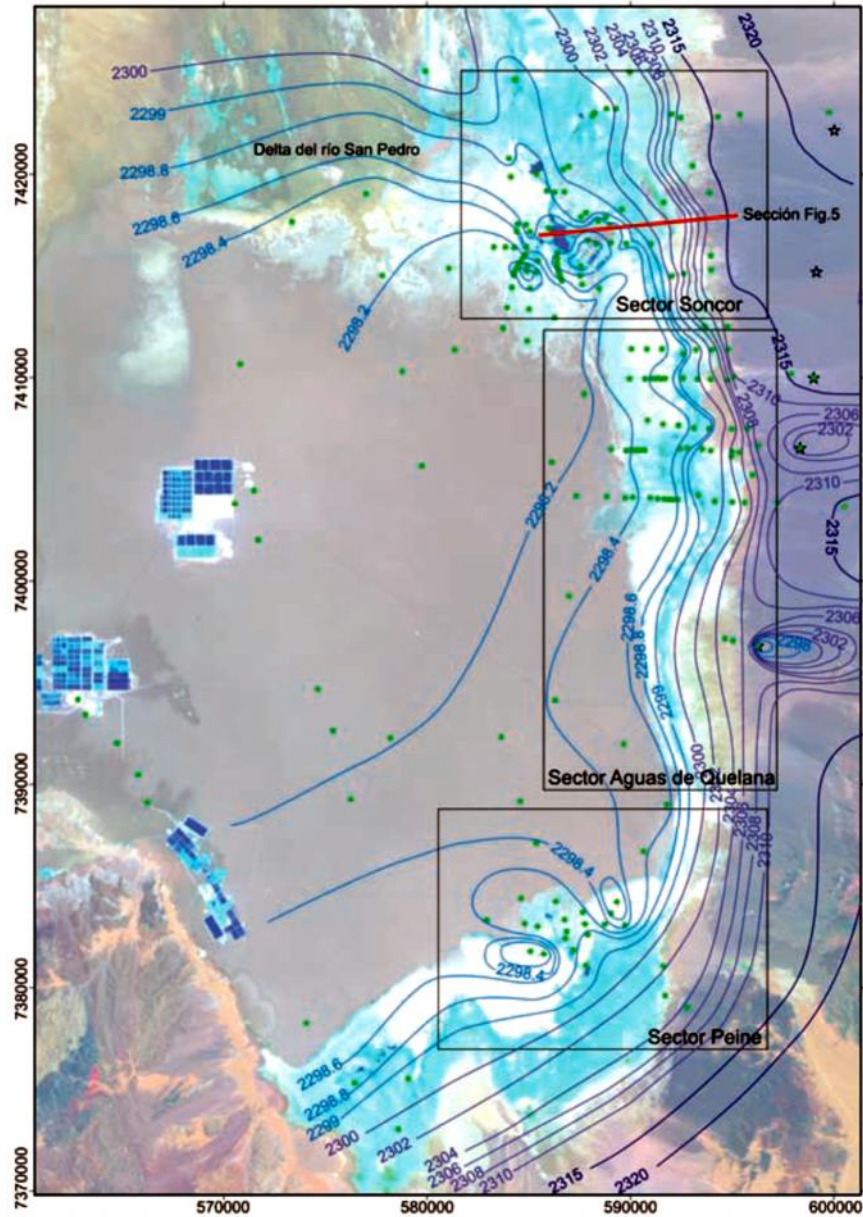


Figura 6-2 Piezometría borde oriental (Salas et al., 2010)

Los pozos ubicados en la zona marginal (zona de baja permeabilidad) se caracterizan por tener un comportamiento estacional dado principalmente por el efecto de la evaporación y por el aumento de flujos subsuperficiales y subterráneos en época invernal.

En el margen oriental se identifican dos sistemas lacustres principales: el Sistema Soncor y Aguas de Quelana.

6.2.1.1 Sistema Soncor

El sistema Soncor, que es alimentado superficial y subterráneamente (Salas et al., 2010), se ubica en el margen oriental al sur oeste de Toconao, y lo conforman el Canal del Burro Muerto, Laguna Puilar, Laguna Chaxa y Laguna Barros Negro.

La presencia de la cuña salina provoca desbordamientos de agua subterránea al oeste de ella, que alimentan la laguna Puilar y contribuyen al Canal del Burro Muerto. El agua escurre superficial y subsuperficialmente hacia el sur-oeste. La laguna Chaxa es alimentada por el canal del Burro Muerto y su salida se ubica en el sur donde continúa el canal del Burro Muerto. La laguna Barros Negros depende de una alimentación mixta, recibe un aporte superficial proveniente del Canal del Burro Muerto y un aporte subterráneo por medio del canal Sur de Barros Negros de aguas que afloran en el sector. Por último, existe una zona de desbordamiento de la laguna Barros Negros llamado sector "Cola de Pez" que corresponde a una zona de infiltración.

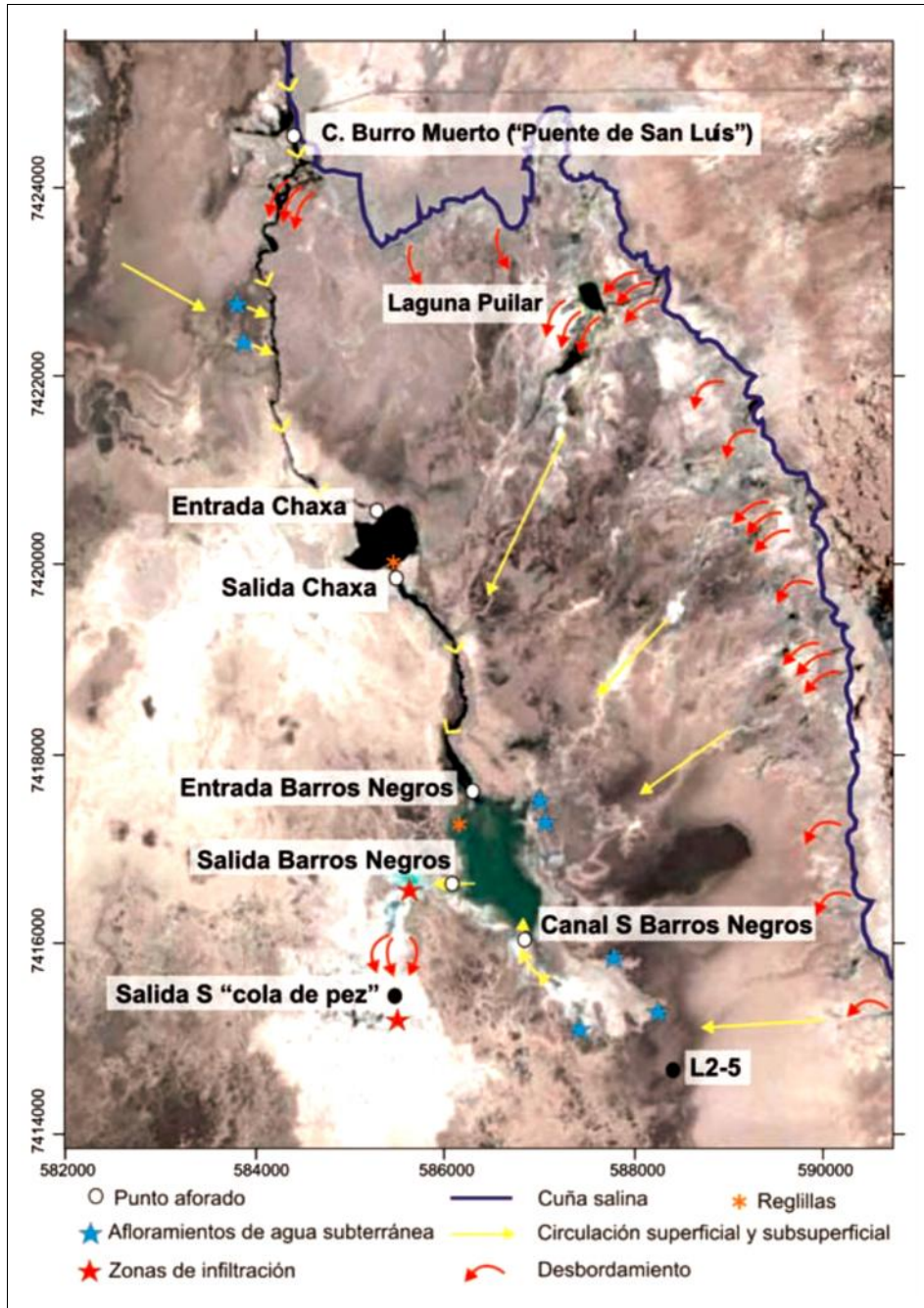


Figura 6-3 Sistema Soncor (Salas et al., 2010)

6.2.1.2 Aguas de Quelana

Aguas de Quelana corresponde a una franja de 10 km de largo en sentido N-S por 1 km de ancho donde se presentan pequeñas lagunas y zonas de inundación estacional.

Este sector indica un flujo subterráneo E-W, perpendicular a los alineamientos marcados por las zonas inundadas presentes a lo largo de la traza superficial de la cuña salina. En la zona central y sur de este sector, la forma de las equipotenciales está controlada por la topografía, de manera que las líneas de flujo divergen ligeramente en dirección hacia el centro del Salar.

6.3 Sector sur

En este sector se ponen en contacto dos acuíferos: el acuífero del núcleo y el acuífero salobre Negrillar-Monturaqui. La diferencia entre las densidades de estos acuíferos define una zona de interfaz entre ellos, lugar donde aflora el agua salobre formando lagunas. En el borde sur predominan unidades sedimentarias, que dan lugar a unidades hidrogeológicas menores de tipo semiconfinado o confinado.

Las transmisividades son más altas en Negrillar (hasta 3.600 m²/día) que en el cauce principal de Monturaqui (800 a 2.000 m²/día) y a lo largo del Callejón de Tilopozo (hasta 1.200 m²/día). Esto concuerda en términos generales con el patrón observado en los valores obtenidos a partir de los análisis de las pruebas de bombeo.

En la Figura 6-4, se muestra un esquema de la hidrogeología del sector. Es posible observar la presencia de la cuña salina (color verde) corresponde a la interfaz entre el acuífero del núcleo y el acuífero Negrillar-Monturaqui. El flujo en este sector se presenta con dirección NW y en los niveles registrados en pozos de observación muestran un claro comportamiento estacional.

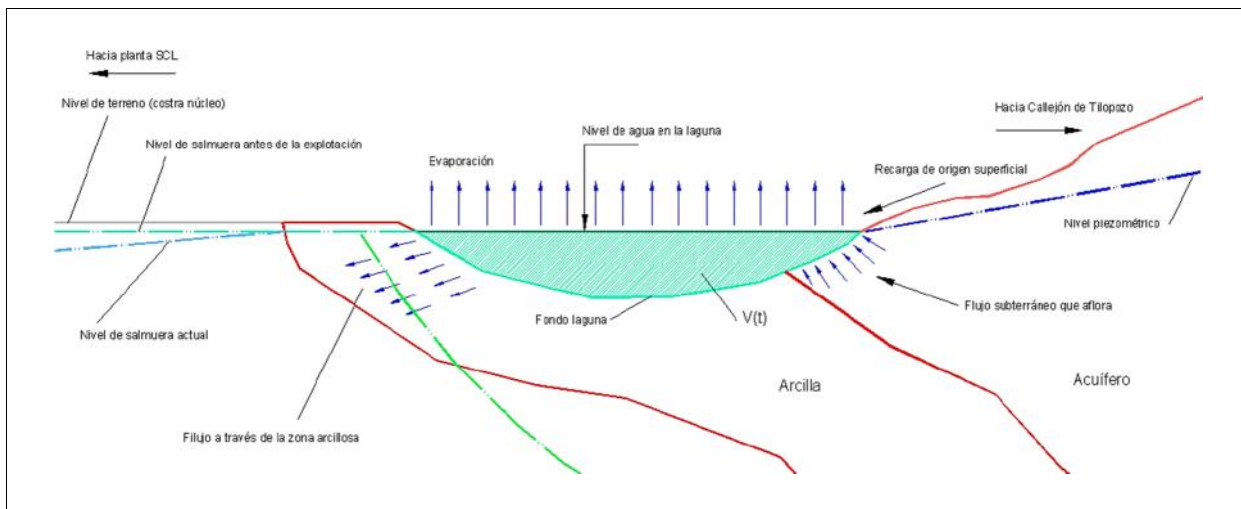


Figura 6-4 Diagrama hidrogeología sector sur (modificado de EIA RWL)

En el sistema lacustre de Peine y Tilopozo la principal dirección del flujo subterráneo es SE-NW hacia el centro del Salar. En el entorno de las lagunas Interna y Saladita se notan los efectos de la presencia de un acuífero multicapa sobre la piezometría local (Salas et al., 2010). Identifica un sector con niveles piezométricos relativamente elevados, asociado a la existencia de un nivel acuífero colgado.

6.4 Núcleo

El acuífero del núcleo del salar de atacama se emplaza al oeste de los acuíferos reconocidos en el sector oriental del salar, separado por una zona de baja permeabilidad asociada a los depósitos de sulfatos y carbonatos reconocidos en la zona marginal del Salar. Este acuífero se desarrolla principalmente en el espacio entre los cristales de halita del Núcleo y estaría desconectado hidráulicamente del acuífero aluvial (DICTUC, 2004).

Descripciones de sondajes (Lowenstein et al., 2003) indican profundidades de entre 40 y 100 [m] consistentes en extensos paquetes de halita con variaciones texturales dependientes de las condiciones paleoclimáticas, donde se destacan intercalaciones menores de capas de yeso y arcillas.

La piezometría del núcleo se ve afectada por los bombeos de SQM y RWL que generan conos de depresión locales por lo que no es posible generar una piezometría de detalle. En las zonas de explotación se observan descensos sostenidos, mientras que en las lejanías se los niveles aumentan durante los periodos de recarga.

La conductividad hidráulica del núcleo del Salar en los primeros 10 m de profundidad es del orden de 10 veces mayor que los siguientes 40 metros y 50 veces mayor que los siguientes 50 m. Se observa una gran dispersión en los valores de conductividad hidráulica medidos, variando entre 5×10^{-5} [m/día] y 5×10^3 [m/día]. Con respecto a la porosidad, esta tiende a disminuir exponencialmente con la profundidad. Existe una zona superior de 10 a 20 [m] de espesor con una porosidad efectiva de alrededor de 6,3%. La zona inferior, bajo los 20 m, tiene una porosidad promedio de 3,4%. Especialmente, la porosidad efectiva en los 40 m superiores tiene un promedio de 4,4%, con valores más altos en el centro, y una disminución hacia la periferia.

7. Hidroquímica

En el presente capítulo se analiza la información hidroquímica de la cuenca, a fin de realizar una caracterización de las aguas e identificar la zona de interfaz Cuña Salina.

7.1 Fuentes de información

La información utilizada para elaborar la hidroquímica se recogió de seis fuentes bibliográficas en las cuales se han utilizado muestras para análisis químicos con distintos objetivos (desarrollo de modelos, caracterización de cuencas, evaluación de recursos, entre otros). En resumen, se tienen 463 análisis químicos en 125 puntos de muestreo, los que se encuentran distribuidos principalmente en las cuencas de los ríos San Pedro y Vilama, y hacia el este y sureste del salar.

7.2 Parámetros

Los cloruros constituyen una buena fuente para indicar el grado de evaporación del agua, debido a que la concentración de saturación es alta. Se observa que en general, las aguas que llegan al salar desde el sureste tienen una alta concentración de cloruros, lo que podría indicar que la cuña de intrusión salina en este sector se ha alejado mucho del salar, mientras que las muestras ubicadas hacia el norte y el este presentan un contenido de cloruros más bajo. Con respecto a las muestras ubicadas en la parte norte, se puede observar como aumenta el contenido de cloruros en la medida que el agua va avanzando por el salar, lo que da muestra de la evaporación.

El litio se asocia a un origen magmático, mientras que el cloruro se puede asociar a una fuente meteórica o magmática. Por lo tanto, una alta relación Li/Cl indicará que el agua presenta mezcla con una fuente magmática, mientras que una baja relación indicará que el agua es de origen meteórico, sin que los resultados estén afectados por la evaporación. Esta relación ha permitido diferenciar las aguas del río Vilama, con una importante componente magmática, de las del río San Pedro, de origen principalmente meteórico.

En el borde este del salar, se reconocen dos zonas donde la relación Li/Cl es relativamente más alta. La primera se encuentra cerca del volcán Lascar y en la quebrada Aguas Blancas, y se asocia por tanto a la presencia de dicho volcán. La segunda se encuentra más al sur, y es más difícil de atribuir directamente a algún volcán. Finalmente, al sureste del salar las aguas presentan una relación Li/Cl relativamente baja, aunque en el borde oeste del Cordón de Lila existen algunos afloramientos de agua donde esta relación es más alta.

7.3 Análisis Diagramas de Piper y Schöeller

De acuerdo a los resultados del Diagrama de Piper, las muestras utilizadas en es la caracterización presentan un bajo grado de variabilidad y son principalmente cloruradas sódicas, lo que es resultado de tener aguas altamente evaporadas. La excepción a esta situación son las muestras ubicadas en la parte este, que presentan una alta variabilidad en su composición.

En el caso de los diagramas de Schöeller, el análisis se realiza según la ubicación geográfica para muestras identificadas en distintos sectores de la cuenca.

Las muestras de la cuenca del río San Pedro siguen un mismo patrón de comportamiento, con algunas diferencias en los casos en que algunas muestras de agua se encuentran más evaporadas que otras. Estas aguas tienen como iones mayoritarios dominantes el cloruro y el sodio, y en segundo lugar el sulfato y el calcio. En las muestras del río Vilama también son el cloruro y el sodio los iones dominantes, sin embargo se observan variaciones mayores en la importancia relativa de los otros iones mayoritarios, lo que indicaría que estas aguas han estado expuestas a procesos de mezcla.

Dentro del salar se han diferenciado aquellas muestras correspondientes al núcleo de aquellas ubicadas al norte de éste. Las muestras de la parte norte del salar son muy parecidas a las de los ríos San Pedro y Vilama, pero más evaporadas, mientras que las muestras del núcleo son aguas altamente evaporadas, en donde se observa cómo se va saturando el agua en los diferentes cationes en la medida que se evapora.

Por el este del salar, las muestras de agua identificadas presentan un alto grado de variabilidad. Esta situación es natural, considerando que el área aportante para estas muestras tiene una extensión del orden de 100 km, donde se encuentran sectores con y sin volcanes. En el sector sureste las muestras de agua presentan dos composiciones diferentes. La primera de estas composiciones es muy similar a las muestras del núcleo y se asocia a aquellas ubicadas más hacia el norte. La segunda agrupa a las muestras de agua ubicadas más lejos del salar, y son muestras con una concentración mayor de cloruro y sodio, pero que en segundo lugar tienen una alta concentración de sulfato calcio y magnesio.

7.4 Identificación de zona de interfaz Cuña Salina

El estudio CHI-535 Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande de CORFO 1977, realizó un mapeo de la cuña salina a escala regional. Para una escala local, Salas et al., 2010 muestra la ubicación de la cuña en el sector del Sistema Soncor y EIA de SCL presenta la ubicación para el sector de Peine y Tilopozo. Por último Fock 2009, provee información acerca de la posición de la cuña en el sector de Aguas de Quelana. A partir de los antecedentes anteriores se realizó un mapeo de la cuña que se presenta en la Figura 7-1.



Figura 7-1 Cuña Salina

8. Evaluación recursos hídricos

En este capítulo se analizan los factores determinantes para la evaluación de recursos hídricos en el Salar de Atacama. Se presentan los resultados de los principales estudios que contribuyen con información relevante de balance hídrico realizados entre los años 1986 al 2013 y/o estudios que realizan aportes en la estimación del recurso hídrico en Salar de Atacama. Se describen las componentes principales del balance hídrico y los enfoques considerados en cada trabajo.

El balance hídrico consiste en realizar un balance de masas entre las entradas y salidas del sistema hídrico. Para esto es necesario identificar las componentes de recarga y descarga. La identificación e interacción de estas componentes depende de las definiciones de área de estudio y el sistema, extensión y límites hidrológicos e hidrogeológicos y se explica a través de un modelo conceptual, las que son descritas en esta sección.

De acuerdo a los antecedentes presentados y los resultados del presente estudio se presenta el modelo conceptual de la Cuenca del Salar de Atacama, modificado de DICTUC, 2004.

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca cerrada donde en el depocentro de ésta se encuentran los depósitos salinos del Salar de Atacama. El Salar de Atacama recibe los aportes tanto subterráneamente como superficialmente de las subcuencas hidrogeológicas e hidrológicas respectivamente.

En las partes altas de la cuenca ocurren precipitaciones sólidas y líquidas las que en parte se infiltran alimentando los acuíferos que recargan lateralmente al salar y en forma menor contribuyen a pequeños cauces superficiales que llegan al Salar. Además existe precipitación directa sobre el salar que una parte de esta recarga el acuífero. Existe una descarga menor por medio de captaciones de agua mediante pozos y desvío de cauces superficiales en la zona aluvial previa a que esta llegue al salar.

El acuífero del núcleo del Salar de Atacama es de aguas salobres con una densidad mayor a la de los acuíferos que lo rodean provenientes de las partes altas de la cuenca. Lo anterior define una zona de interfaz donde debido a la diferencia de densidad de las aguas del núcleo con las provenientes de las cuencas aportantes. Las aguas no se

mezclan, formando una cuña salina donde las aguas de las partes altas de la cuenca afloran formando lagunas superficiales y estableciendo el nivel freático cerca de la superficie. Además existe una zona de baja permeabilidad en el área de las lagunas, por lo que se postula que el acuífero aluvial se encuentra desconectado hidráulicamente del acuífero del núcleo. Debido a que el agua se encuentra somera, este sector contribuye con la mayoría de la descarga por evaporación del sistema.

El sector de afloramientos de agua subterránea en la interfaz de la cuña salina actúa como una barrera reguladora de los aportes al acuífero del núcleo. En años húmedos los niveles ascienden someros y el área de las lagunas aumenta, por lo tanto existe una mayor descarga por evaporación. Por otro lado, en años secos, una baja en el nivel freático del área y menor superficie lacustre implica una menor pérdida por evaporación.

Debido a lo anterior, una pequeña parte del flujo ingresa al acuífero del núcleo del Salar, donde se ha registrado escasa evaporación desde el agua subterránea. Por otro lado, compañías mineras extraen la salmuera por medio de pozos de bombeo que serían responsables del decaimiento de los niveles del acuífero del núcleo.

Del escurrimiento subterráneo, la mayor parte puede considerarse como un aporte efectivo en el borde del Salar, debido a que ese traspaso podría ocurrir en los conos aluviales los ríos, justo al borde del Salar y antes que se genere una descarga a través de las capas superiores del suelo o de zonas vadasas y lagunas.

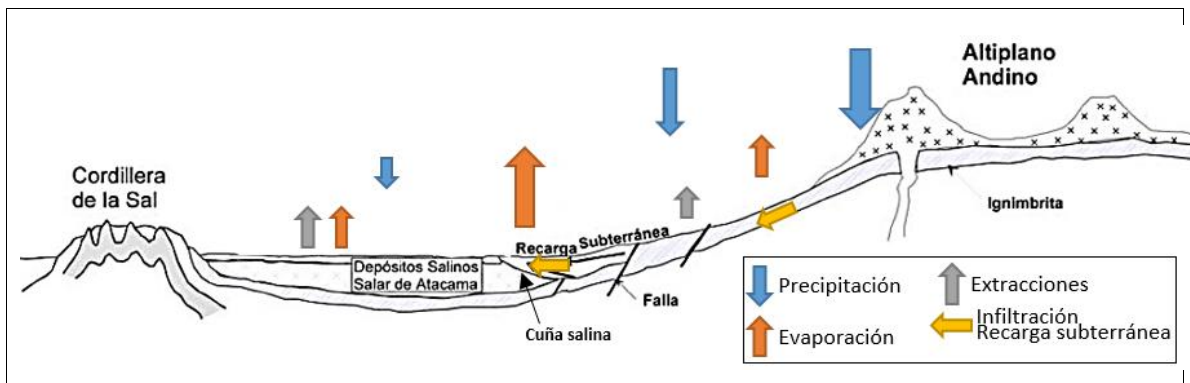


Figura 8-1: Modelo conceptual (modificado de DICTUC, 2004)

El balance hídrico está dado por los valores calculados en estudios anteriores, que proporcionan un rango de referencia:

Tabla 8-1 Balance hídrico estudios Salar de Atacama

Estudio	Recarga (m ³ /s)	Descarga (evaporación) (m ³ /s)	Método estimación descarga
Mardones 1986	4,7	5,44	Determina por medio de lisímetros la tasa de evaporación a distintas zonas del salar las que fueron definidas a partir del tipo de costra superficial y profundidad de la napa.
DGA 1986	4,7	¹ 4,7 ² 5,0	¹ Igual a la recarga ² A partir de curvas profundidad/evaporación basada en las mediciones de Mardones 1986.
Hydrotechnica 1988 (en Kampf, 2002)	-	-	Instala lisímetros, evaporímetros de bandeja, instrumentos para cálculo de la razón de Bowen. No se cuenta con resultados descarga del salar.
Kampf, 2002	-	¹ 27,1 (10,0) ² 26,1 (22,7) ³ 2,9 (1,6-4,2)	Determina por medio del método de correlaciones de Eddy tasas de evaporación, las que son asignadas a distintas zonas que fueron definidas a partir de imágenes ASTER. 1. Cálculo del flujos de energía por teledetección con parámetros constantes 2. Cálculo de flujos de energía por teledetección asignados a la clasificación de suelos. 3. Mejor estimación de las tasas de evaporación asignadas según tipo de suelo. () Los números entre paréntesis corresponde a la asignación de una tasa de evaporación de 0 mm/día a la zona del núcleo del salar.
EIA SQM, (DICTUC, 2004)	¹ 4,77 ² 4,992 ³ 5,114	⁴ 4,67 + ⁵ 0,1	Se basa en resultados de Mardones 1986, donde corrige la zonación de Mardones 1986 con la definida por Kampf 2002. Además incluye la curva Philip 1957 según la piezometría de la fecha. ⁴ Tasa promedio descarga por evaporación zona marginal del salar ⁵ Tasa promedio descarga evaporación núcleo del salar
DGA/GCF 2010	Igual a la descarga	¹ 5,6 ² 5,84	¹ Basado en Mardones 1986, corrige áreas de zonación a partir de imagen satelital. ² Inicialmente estima una descarga de 5,84, pero promedia este valor con 5,44 de Mardones 1986.
DGA 2013	Igual a la descarga	¹ 5,6 ² 5,17	¹ Basado en el cálculo de DGA/GCF 2010, que se basa en Mardones 1986. ² Valor de la recarga lateral al salar estimada a partir de la sustracción de la precipitación directa sobre el salar.

9. Mecanismos de evaporación desde el salar

La evaporación en el Salar de Atacama se produce desde el agua, cuerpos superficiales (lagunas) y por evapotranspiración.

9.1 Evaporación desde el agua subterránea

El proceso de evaporación en suelos depende de varios factores entre los que se destacan:

- Profundidad del agua subterránea
- Características hidrodinámicas del perfil de suelo no saturado (curva de succión y curva de conductividad hidráulica no saturada)
- Distribución de la temperatura en el perfil de suelo no saturado
- Condiciones atmosféricas en la superficie
- Condiciones de salinidad del agua y del suelo.

Considerando lo anterior lo que se busca es asignar curvas evaporación v/s profundidad a distintas zonas o áreas del salar. La Figura 9-1 muestra dos curvas de evaporación v/s profundidad para dos tipos de minerales evaporíticos (halita y yeso), del estudio DGA 1986. Es posible observar que la evaporación en la halita disminuye a una menor profundidad que para el yeso. La profundidad donde la evaporación es nula para la halita y el yeso es 0,7 m y 2 m aproximadamente, dando cuenta de la relevancia que toma la composición del suelo las propiedades físicas de este para cuantificar la evaporación.

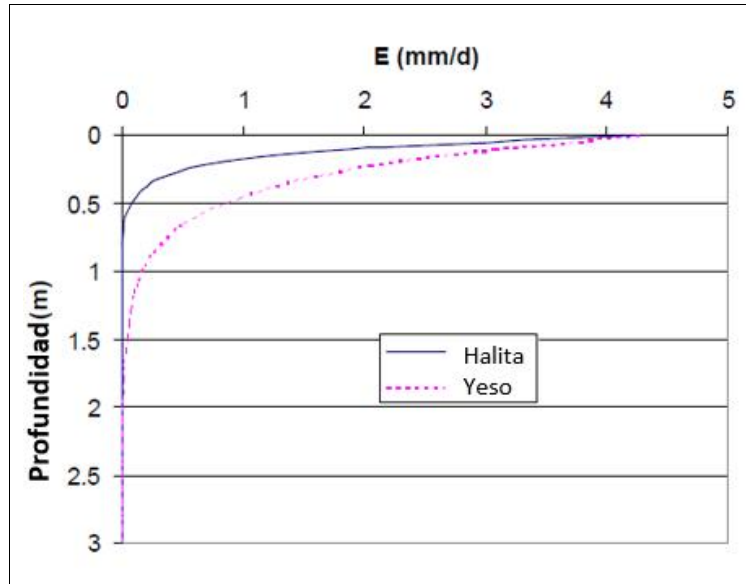


Figura 9-1 Evaporación v/s profundidad. Modificado de Kampf, 2002

Resulta fundamental realizar una buena elección de las zonas de evaporación. Es por ello que se instalaron 10 lisímetros en zonas representativas con el fin de obtener la curva profundidad v/s evaporación. La definición de estas zonas se realizó en base a la geología y características de los depósitos superficiales del salar de Atacama. Además se incorporan las observaciones y resultados de Mardones (1986), Kampf (2002), y DICTUC (2004).

9.2 Evaporación cuerpos superficiales

La estimación de la evaporación proveniente de los cuerpos de agua superficiales es importante porque esta podría ser de órdenes de magnitud mayor a la tasa de evaporación desde el agua subterránea.

El trabajo de Mardones (1986) estima la evaporación a partir de la siguiente fórmula,

$$E_o = K_e \cdot K_s \cdot E_t$$

9-1

Donde K_e es un coeficiente de estanque (adimensional), igual a 0,7 de acuerdo al estudio de Harza (1978). Este coeficiente fue estimado en Estados Unidos y fue adoptado debido a las semejanzas en el clima con el Salar de Atacama. K_s es un coeficiente de reducción por salinidad (adimensional), que para una densidad de 1.045 kg l (densidad promedio del agua en las lagunas) es igual a 0,95 (Ide, 1978) y E_t es la evaporación medida en el tanque evaporímetro clase A (L/T).

Las mediciones de Mardones (1986) arrojaron valores de evaporación para salmueras de 5,8 [mm/día] para verano y de 4,38 [mm/día] para el invierno, en tanto que RWL ha calculado valores medios mensuales de 6,2 [mm/día]

9.3 Evapotranspiración vegas, bofedales y áreas cultivadas

La evapotranspiración es posible estimarla a partir de medidas directas (lisímetro, correlaciones de Eddy, domo, entre otros) como a partir de estimaciones utilizando variables meteorológicas y del tipo de vegetación presente. Otra alternativa es la evaporación medida en un evaporímetro de bandeja por coeficientes de cultivo que dependen del tipo de vegetación y del ciclo de la planta. Según Mardones (1986) el valor sería de 0,3 [mm/día] solamente en el Salar.

10. Diseño de red de monitoreo

Se diseñó una red de monitoreo consistente en 10 estaciones las cuales contemplan un lisímetro, un pluviómetro, un sensor de temperatura y un piezómetro cada una.

El lisímetro consta de dos piezas principales. La primera es un tubo de PVC de 1,2 m por 400 mm de diámetro que contiene el suelo inalterado y una cámara inferior de 0,2 m de altura por donde entra el agua proveniente del estanque. Ambas piezas están unidas mediante bridas (Figura 10-1 y Figura 10-2).

El estanque de agua corresponde a un tubo de PVC de 400mm de diámetro por 1,2 m de alto, cerrado con tapas en la parte inferior y superior. La tapa inferior a un costado tiene una salida que conecta con la manguera que une al lisímetro. En la parte superior del estanque se instaló un tubo de observación de PVC con tapa. Este conducto permite llenar el estanque, introducir el sensor y medir el nivel de agua al interior del estanque con un pozómetro. Los estanques fueron equipados con sensores de presión marca Seba modelo Dipper APT.

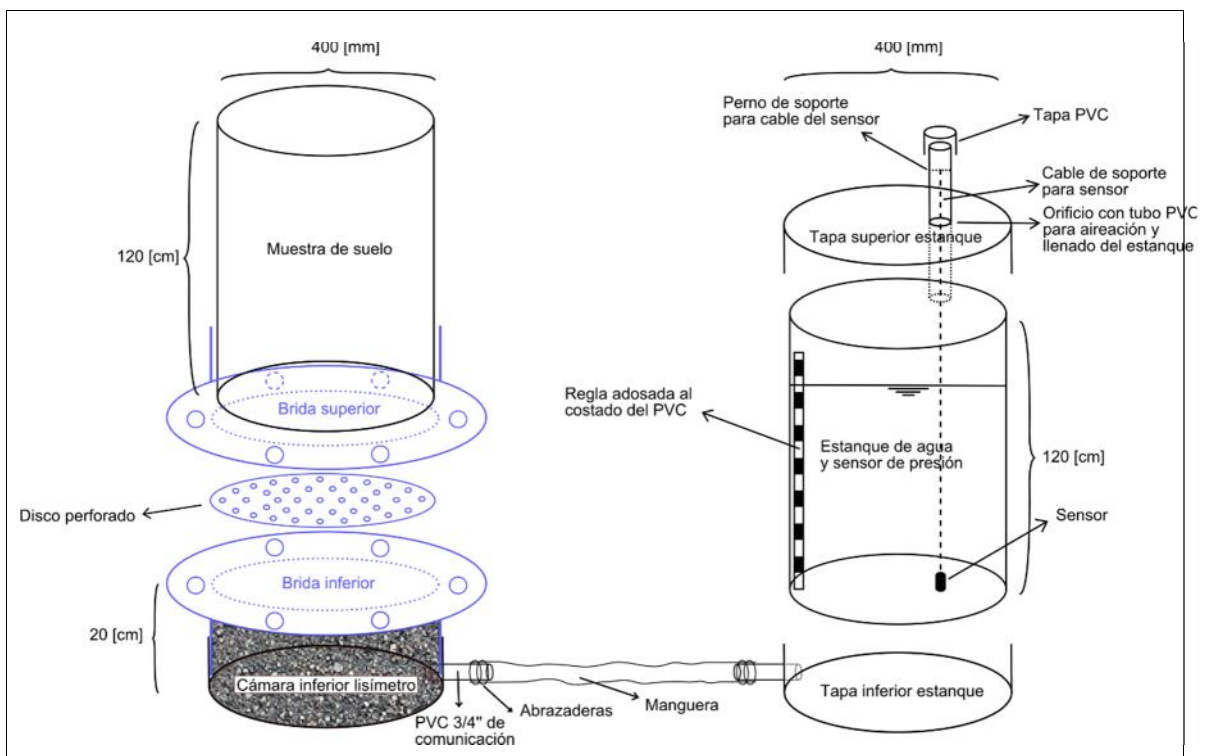


Figura 10-1: Diseño lisímetro



Figura 10-2 Fotografía lisímetro

Los pluviómetros instalados son del tipo tipping bucket, marca HOBO modelo RG3-M, equipados con sensor de temperatura. Por otro lado los piezómetros fueron instalados con tubos de PVC a profundidades de 2 [m] y diámetro de 3". Se instalaron adicionalmente 13 piezómetros para complementar la red de monitoreo de la DGA.

En la Tabla 10-1 se indica la ubicación de las estaciones de monitoreo y una descripción del tipo de suelo que se espera representar.

Durante los trabajos de terreno se elaboraron fichas para cada uno de los lisímetros, piezómetros y pluviómetros, donde se registraron aspectos como el tipo de suelo encontrado, profundidad del nivel freático y código de serie de los instrumentos, entre otros. Se registraron cuidadosamente las medidas del estaque del lisímetro y del piezómetro, de tal forma de facilitar posteriormente el trabajo con los datos medidos por el sensor. Así, el nivel freático en cada lisímetro se calculará según la ecuación 10-1 y según la ecuación 10-2 en el caso de los piezómetros.

$$n.f. = c + d - pvc - t - \alpha(h - p)$$

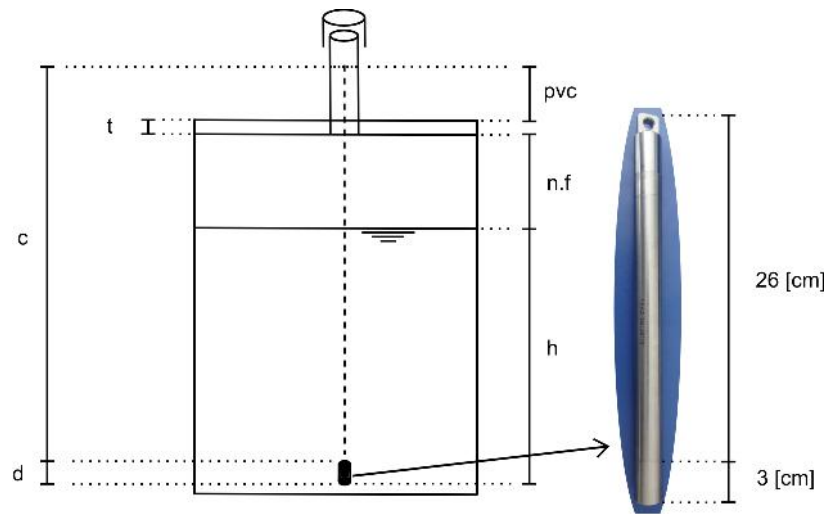


Figura 10-3: Medidas estanque.

donde,

$n.f.$	Nivel freático	[cm]
c	Largo de la cuerda	[cm]
29	Largo del dipper (29 [cm])	[cm]
c	Distancia entre la parte superior de la tapa del estanque y el cable de soporte del Dipper APT	[cm]
t	Espesor tapa del estanque (1 [cm])	[cm]
α	Factor que depende de la densidad del agua. Se debe calibrar para $n.f.$ y p conocidos.	
h	Altura de presión registrada por el Dipper APT	[cm]
p	Compensación por variaciones de la presión atmosférica (Barodipper)	[cm]

$$n.f. = c + d - s.u. - \alpha(h - p)$$

donde

- $n.f.$ Nivel freático
- c Largo de la cuerda
- d Largo del dipper (29 [cm])
- $s.u.$ Stick up: distancia entre el nivel de referencia del suelo y el punto desde donde cuelga el Dipper APT
- α Factor que depende de la viscosidad del agua. Se puede calibrar para $n.f.$, h y p conocidos.
- h Altura de presión registrada por el Dipper APT
- p Compensación por variaciones de la presión atmosférica (Barodipper)

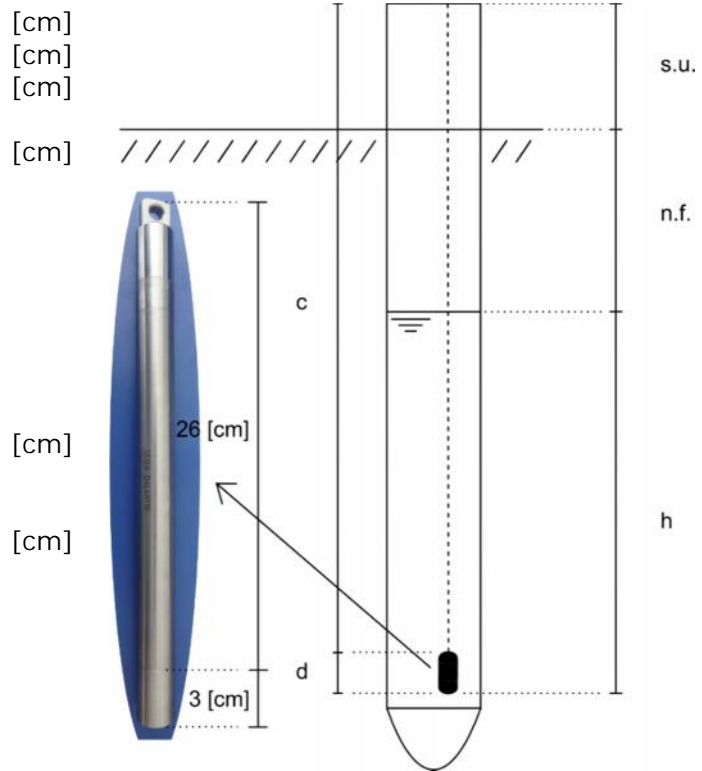


Figura 10-4 Dimensiones características piezómetro

Tabla 10-1 Ubicación estación de monitoreo (WGS84 / UTM zona 19S)

COD	Coordenadas (WGS84 / UTM 19S)		Unidad			Objetivo (tipo de suelo esperado)
	Norte (m)	Este (m)	Fock, 2009	Ramírez y Gardeweg, 1982	Mardones en DGA/GCF, 2010	
Lis-1	7372845	578419	Hcas (Carb-sulf)	Qs(sulfato)	A9-2 (limo salino)	Depósitos sulfato y carbonatos. Zona sur este del salar.
Lis-2	7384353	590459	H Sulfatos	Qs (sulfato)	A9-2 (limo salino)	Depósitos sulfato. Zona sur este del salar.
Lis-3	7394074	591764	Hsul2 (Sulfatos)	Qcls (cloruro-sulfato)	A7(costra salino limosa de yeso y halita)	En terreno se identificó esta costra como suelo de carbonato con características granulométricas y nivel freático diferentes al Lis-4
Lis-4	7393992	591612	H sulfatos	Qs (sulfato)	A3 (costra delgada sal granulada)	Depósitos de sulfatos
Lis-5	7375739	590716	Hacacl (Arcilla carbonato sulfato)	Qcls (cloruro-sulfato)	A9-2, A12(limo salino, vegas)	Caracterizar costra de carbonato en la zona sur del Salar y con características granulométricas diferentes a las encontradas en el Lis-1 y Lis-2
Lis-6	7424606	591475	Hacacl (aluvial, carb. a cloruros)	Qal (dep. aluvial)	A12 (vegas)	Zona marginal aluvial. Cercanía ubicación lisímetro LC-45 de Mardones.
Lis-7	7439456	581605	Hcas (carbonatos-sulfatos)	Qs (sulfato)	A5 (yeso limoso blando)	Depósitos de carbonatos y sulfatos
Lis-8	7417731	591656	Hamo (Vegas)	QI	A12(vegas)	Caracterizar el margen este del Salar, zona de elevada evaporación por la presencia de vegas.
Lis-9	7452197	587058	H Sulfatos	Qal (dep. aluvial)	A8-2 (limo salino)	Depósitos de sulfatos
Lis-10	7443461	573502	Hasp2 (Abanico SanPedro)	Qs (sulfato)	A4(yeso limoso blando)	Depósitos del delta del río San Pedro

11. Conclusiones y Recomendaciones

Se revisaron los antecedentes de estudios anteriores en el Salar de Atacama. Se analizó las metodologías empleadas para la estimación de recursos hídricos por los distintos estudios.

Se realizó un análisis de los mecanismos de recarga y descarga del salar, poniendo énfasis en los mecanismos de evaporación, destacando la evaporación desde el agua subterránea, desde cuerpos superficiales y la evapotranspiración.

A partir del análisis de antecedentes, recopilación de información geológica e hidrogeológica del salar, se instalaron de 10 estaciones de monitoreo ubicadas en el Salar de Atacama. La ubicación de estas fue planteada con el fin de monitorear la evaporación proveniente del agua subterránea, buscando caracterizar los diferentes tipos de suelo y costras del salar. Cada estación de monitoreo cuenta con un lisímetro, un piezómetro, un pluviómetro y un sensor de temperatura.

Tanto lisímetros como piezómetros fueron equipados con sensores de presión Dipper APT de la marca SEBA Hydrometrie, los cuales registran el nivel de agua cada 6 horas. En el caso del pluviómetro se utilizó el modelo RG3-M de la marca HOBO, el cual cuenta además con un sensor de temperatura. El registro de la información para el pluviómetro se realiza sólo cuando ocurren eventos de precipitación con una precisión de 0,2 [mm], mientras que el sensor de temperatura registra a intervalos de 1 hora.

Adicionalmente se construyeron 13 piezómetros suplementarios. Cabe destacar que antes de la realización de este proyecto la DGA no contaba con monitoreo de las aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama.

Se realizó una prospección geofísica en el margen oriental del Salar de Atacama. La prospección contó de 100 estaciones geofísicas, 50 de ellas corresponden al método MT mientras que la otra mitad son TEM, situándose prácticamente coincidentes espacialmente, distribuyéndose en 5 perfiles, 4 transversales de aproximadamente 6 kilómetros (T1 a T3) y 8 kilómetros el T4, mientras que el perfil longitudinal (denominado L1) se extiende por más de 40 kilómetros., los que fueron interpretados en unidades hidrogeológicas con la información estratigráfica disponible de los pozos del sector.

A partir de lo anterior, es decir, la revisión de antecedentes, el análisis de las metodologías implementadas en otros trabajos y la revisión de estudios científicos, se presenta en la Tabla 11-1 un resumen de recomendaciones con el fin de mejorar y disminuir la incertidumbre en la estimación de recursos hídricos del salar.

Para la realización de un balance hídrico es necesario conocer los componentes del balance de forma independiente. Una de la mayor incertidumbre es estimar la recarga lateral al salar de Atacama. Esta ha sido calculada en los trabajos de Dalannais 1979.

Por otra parte, se recomienda probar alternativas de implementación de lisímetros y verificar las diferencias en evaporación según diseño y protocolo de instalación utilizado. Si se verifica que alternativas más económicas pueden ser igual de eficaces, esto puede significar ahorros considerables en tiempo y presupuesto que permitan la instalación de un mayor número de lisímetros.

Por último se recomienda, para una mejor estimación de la evaporación desde el agua subterránea utilizar lisímetros de carga constante. Esta modificación es posible realizarla a los lisímetros ya instalados en el Salar. Idealmente se debiese contar con un número de lisímetros de carga constante ubicados en un mismo lugar midiendo al mismo tiempo. Con esto es posible fijar la altura del nivel de agua dentro de los lisímetros de las mismas características y así determinar la curva de evaporación profundidad con mejor precisión. También se recomienda evaluar la factibilidad de implementar lisímetros de balanza, con los cuales se estima el volumen de agua evaporado en base a las variaciones tanto en el estanque como en la muestra de suelo. Esta metodología es de mayor precisión que la implementada en este proyecto donde el volumen evaporado se estima con sensores de presión.

Es necesario estudiar otros posibles mecanismos de recarga. "Ya que con los actuales el valor que se obtiene es cada vez más difícil de ser mejorado", por ejemplo se recomienda estudiar la influencia de la granulometría en la evaporación, ya que si bien el análisis se ha centrado en las unidades geológicas que se encuentran en el salar, una misma unidad puede presentar distintas granulometrías según dónde se desee medir la evaporación.

Un aspecto importante que incide en la sustentabilidad en el tiempo de un sistema de estaciones de monitoreo en el Salar de Atacama es el involucramiento de la comunidad, debido al alto nivel de organización de las comunidades atacameñas, en que la protección de los recursos hídricos es sin duda un tema de mayor importancia para ellas. Durante los

trabajos realizados como parte de este estudio se mantuvo contacto con dirigentes, pero se recomienda para nuevos proyectos un mayor énfasis en la participación efectiva de estas organizaciones. La presencia de las comunidades se debe considerar como un punto a favor para el funcionamiento en el largo plazo de las estaciones de monitoreo. Para aquello se recomienda entregar la mayor información posible, indicando la ubicación de cada una de las estaciones, para qué sirven y cómo funcionan. Adicionalmente se puede colaborar en actividades de vigilancia para la protección de los sensores.

Tabla 11-1 Resumen recomendaciones

Elemento del balance hídrico	Instrumentos / mediciones	Proveniencia de la información	Recomendaciones
Descarga			
Evaporación desde lagunas	Evaporímetro de bandeja, densidad agua lagunas, área lacustre	PSAH SQM, PSA MEL y PSA RWL.	Obtención de las series de tiempo de evaporación del PSAH de SQM en formato tabla.
Evaporación agua subterránea	Lisímetros, domos, nivel freático	Lisímetros presente informe.	Complementar información lisímetros con medición de domo en otros puntos. Incluir lisímetros de carga constante y/o de balanza (Anexo 5). Profundidad nivel freático proveniente de PSAH de SQM digitalizado, series temporales. Mejorar la descripción de la geología superficial. Caracterización y monitoreo de nivel de la zona SW del Salar. Realizar análisis de imagen satelital utilizando la metodología de Kampf et al., 2006, con el fin de identificar las zonas de evaporación en distintas estaciones.
Evapotranspiración	Superficie vegas, vegetación.	Imagen satelital	Realizar NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) a partir de imagen satelitales invierno/verano con el fin de determinar su variabilidad estacional.
Extracciones por bombeo	Caudal otorgado/disponible	Catastro	Digitalizar extracciones en pozos Mullay, Allana, Socaire, y otras extracciones.
Recarga			
Precipitación	Pluviómetros	PSAH	PSAH de SQM datos precipitación en tablas. Pluviómetros en parte alta de la cuenca para mejorar modelos precipitación-escurrentía.
Caudales	Aforos superficiales	PSAH	Datos en tabla, incluir otros
Recarga lateral	Parámetros hidráulicos, geometría acuífero	Danalais 1979, Estudios geofísica	Estudio geofísica margen norte, estudio margen norte. Pozos o punteras margen norte para cálculo de gradiente.
Recarga profunda			Realizar balance hídrico en sectores margen este, con recarga y descarga independiente con el fin de determinar diferencias.
Variación en volumen embalsado			
Volumen acuífero núcleo	Nivel freático, caudal bombeo	PSAH	Tablas, incluir más pozos de monitoreo. Datos de bombeo. Dada la heterogeneidad de los depósitos del salar, es muy difícil obtener una buena aproximación de la variación de volumen almacenado.

