



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

# **DIAGNÓSTICO DE DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN CUENCAS ALTO-ANDINAS DE LA REGIÓN DE ATACAMA, FASE 2**

**RESUMEN EJECUTIVO**

**REALIZADO POR:**

ARCADIS

**S.I.T. N° 380**

**Santiago, Diciembre 2015**

## **MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS**

Ministro de Obras Públicas  
**Sr. Alberto Undurraga Vicuña**

Director General de Aguas  
Sr. Carlos Estévez Valencia

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

Inspector Fiscal  
Sr. Miguel Ángel Caro

### ARCADIS

Jefe de Proyecto  
Ingeniero Civil Sr. Pablo Rengifo

Especialista Sénior  
Ingeniero Civil Sr. Eduardo Varas  
Ingeniero Civil Sr. José Francisco Muñoz  
Ingeniero Civil Sr. Juan Carlos Parra

Coordinador de Proyecto  
Ingeniero Civil Sr. Ignacio Despouy

Profesionales  
Geólogo Sr. Marcelo Solari  
Cartógrafo Sr. Ricardo Vilaró  
Ingeniero Civil Sr. Javier Uribe  
Geólogo Sra. Isidora Arriagada  
Geólogo Sr. Felipe Avilés  
Cartógrafo Sr. Leonardo Bravo

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2 TRABAJOS DE TERRENO .....</b>	<b>6</b>
<b>3 MODELO HIDROGEOLOGÍCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>13</b>
3.1 GEOLOGÍA.....	13
3.1.1 Cuenca Salar de Pedernales .....	13
3.1.2 Cuenca Salar de Maricunga .....	13
3.1.3 Cuenca Laguna del Negro Francisco.....	13
3.2 HIDROLOGÍA .....	14
3.3 HIDROQUÍMICA .....	18
3.4 HIDROGEOLOGÍA .....	22
3.5 CUANTIFICACIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO.....	26
3.6 MODELO CONCEPTUAL.....	28
<b>4 DISEÑO CONCEPTUAL, FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONOMÍA DE TRASVASE.....</b>	<b>32</b>
<b>5 CONCLUSIONES .....</b>	<b>35</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Ubicación geográfica del área de estudio.....	4
Figura 2-1: Ubicación final de los lisímetros en las tres cuencas de estudio .....	7
Figura 2-2: Ubicación de las prospecciones geofísicas en la zona de estudio.....	8
Figura 2-3: Ubicación de los pozos a catastrados .....	10
Figura 2-4: Ubicación de los puntos para el muestreo y análisis químico.....	11
Figura 2-5: Ubicación de los puntos para el muestreo y análisis isotópico .....	12
Figura 3-1: Sectores seleccionados para cálculo de gradiente de altura .....	15
Figura 3-2: Gradiente de precipitaciones medias anuales (mm) .....	16
Figura 3-3: Rangos de CE y pH por cuenca para tipos de punto de muestreo .....	18
Figura 3-4: Diagrama de Piper .....	19
Figura 3-5. Composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las 50 muestras tomadas, .....	20
Figura 3-6. Diagrama de altitud geográfica en función de la composición $\delta^2\text{H}$ .....	21
Figura 3-7. Piezometría de la cuenca Salar de Pedernales .....	23
Figura 3-8. Piezometría de la cuenca Salar de Maricunga .....	24
Figura 3-9: Piezometría cuenca laguna del Negro Francisco (Aquaterra 2013) .....	25
Figura 3-10. Distribución espacial de las Secciones de Darcy .....	27
Figura 3-11. Esquema simplificado del Modelo Conceptual general.....	29
Figura 3-12. Modelo conceptual de la cuenca Salar de Pedernales.....	30
Figura 3-13. Modelo conceptual Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco .....	31
Figura 4-1. Disposición de alternativas de trazados de impulsión .....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Balance hídrico para las cuencas Alto-Andinas analizadas.....	17
Tabla 3-2. Datos utilizados y caudal calculado en las Secciones de Darcy.....	26
Tabla 4-1. Costos de inversión del sistema de trasvase para bombeo de 200 L/s .....	34

## 1 INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA), dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP), está estudiando los sistemas hídricos de las cuencas Alto-Andinas en la Región de Atacama, y en particular evaluando la disponibilidad de los recursos.

En este contexto la DGA adjudicó a Arcadis Chile (Arcadis) el proyecto de "Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 2", la cual es la segunda fase de un estudio que comenzó Aquaterra Ingenieros Limitada (2013). La presente etapa se orientó en la generación información de carácter hidrológico e hidrogeológico, que aporten en el conocimiento del comportamiento del agua en las cuencas, y además sirva de base para la siguiente fase.

Estas cuencas limitan al norte con la Región de Antofagasta, al sur con la cuenca del río Copiapó, al oriente con la República de Argentina y al poniente con las cuencas exorreicas del río Salado, Quebrada de Pan de Azúcar y Quebrada de Tal-Tal. La ubicación del área de estudio se presenta en la Figura 1-1.

La condición árida de la zona, donde la evaporación potencial es mayor que la pluviosidad, y el carácter endorreico de las cuencas, favorece el desarrollo de lagunas y salares en los depocentros de ellas. En las que además no existen salidas subterráneas a otras cuencas, la evaporación desde lagunas o salares es la única salida del sistema.

Desde un punto de vista geomorfológico, estas cuencas se emplazan en la gran fosa de los salares prealtiplánicos y están limitados por el oeste por los cordones prealtiplánicos y por el este por la precordillera (en esta área Cordillera de Domeyko). También destaca por la altitud y el carácter volcánico que presentan en este tramo los cordones prealtiplánicos, destacando el cerro Tres Cruces en el límite con Argentina (6.749 m.s.n.m.). En la zona se distinguen tres dominios morfoestructurales.

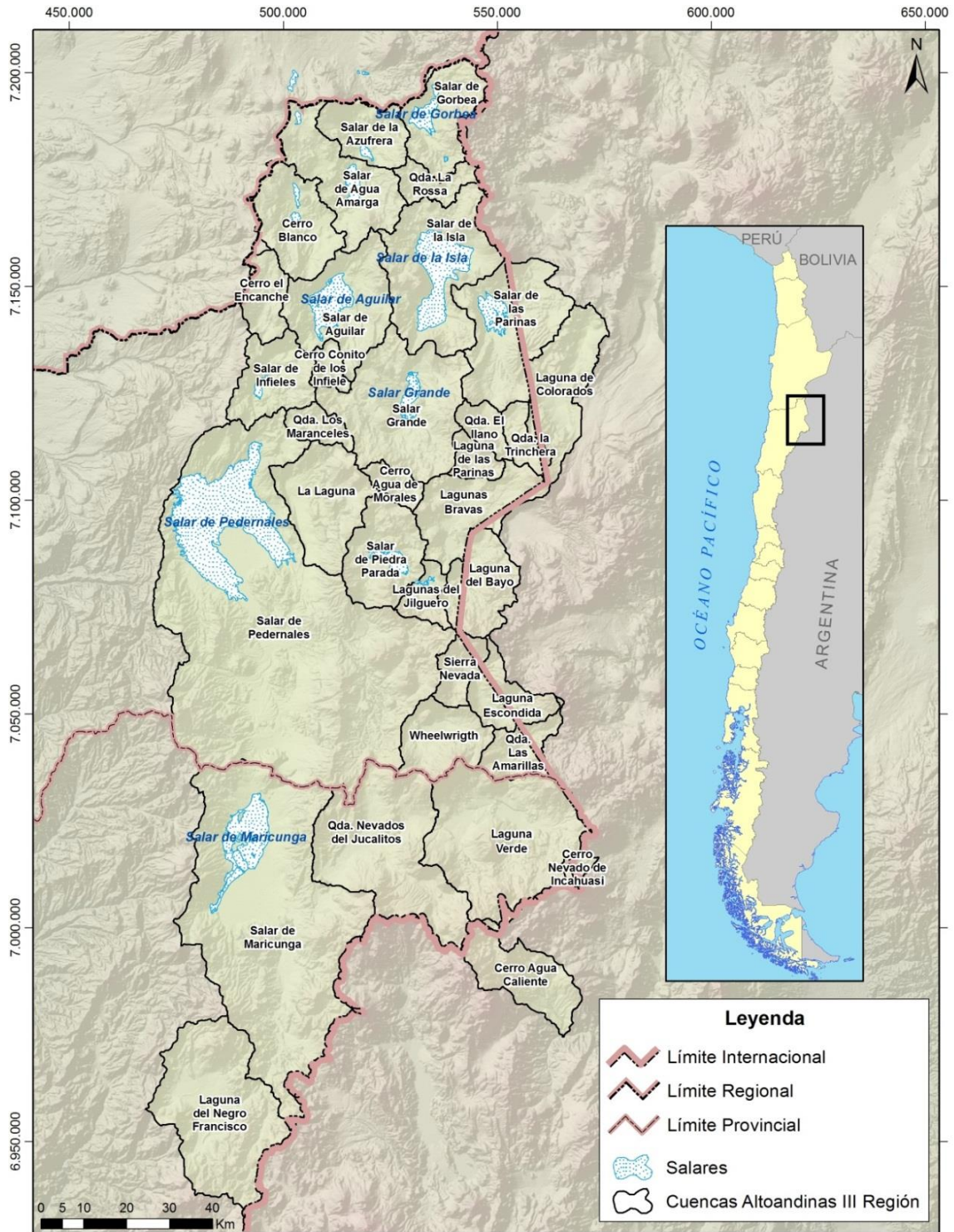
1. Sector norte: presenta un grupo de subcuencas cuya área en la mayoría de los casos bordea los 500 km<sup>2</sup> con presencia de pequeños salares y lagunas.
2. Sector sureste: similar a las del sector norte pero se ubican a una mayor altitud. Es frecuente la presencia de lagunas en estas subcuencas (lagunas Escondida y Verde).
3. Sector suroeste: destacan tres grandes cuencas que corresponden a los salares de Pedernales (3.588 km<sup>2</sup>) y Maricunga (2.195 km<sup>2</sup>) y a la laguna del Negro Francisco (905 km<sup>2</sup>). La cuenca Laguna del Negro Francisco corresponde al límite austral de la gran fosa de los salares prealtiplánicos. Este sector es objeto de un análisis detallado en el presente informe.

En la zona se encuentra el Parque Nacional Nevado de Tres Cruces que incorpora la Laguna Santa Rosa y curso del río Lamas (cuenca salar de Maricunga), además de la Laguna del Negro Francisco.

La precipitación se caracteriza por ser principalmente de carácter nival, de origen frontal y la principal responsable de la alimentación de los cursos superficiales que se desarrollan a esta altura durante todo el año. Ésta se produce mayoritariamente entre los meses de mayo y agosto. Las nieves se concentran de forma permanente sobre los 6.000 m.s.n.m.

Por su parte las precipitaciones líquidas son escasas a casi nulas y se producen en verano, provenientes del Atlántico y desde la cuenca del Amazonas, lo que es el remanente de lo que se conoce como "Invierno Boliviano" que llega debilitado a estas latitudes. La humedad relativa es baja, con cielos mayormente despejados y limpios.

Figura 1-1: Ubicación geográfica del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El objetivo general del estudio fue realizar un levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica para la profundización de la evaluación de recursos hídricos disponibles en cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, con énfasis en el sector suroeste (cuencas del Salar de Pedernales, Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco). De esta manera, generar mejor información sobre las descargas y los flujos subterráneos, y así estimar con más precisión la recarga y oferta hídrica de estas cuencas.

De acuerdo a lo anterior, los objetivos específicos principales son los siguientes:

- Recopilación y revisión de antecedentes.
- Levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica.
- Instalación de sensores hidrometeorológicos para la medición de la precipitación sólida y líquida, evaporación y evapotranspiración.
- Muestreo y análisis isotópico.
- Prospección geofísica (50 TEM y 25 magnetotélúrico o similar)
- Catastro de pozos y niveles.
- Análisis de precipitaciones y evaporaciones considerando la nueva información generada.
- Estimación más precisa de las descargas de las cuencas.
- Estimación más precisa de los flujos subterráneos en base a niveles de agua de pozos catastrados y de los datos recabados a través de las prospecciones geofísicas.
- Estimación de recarga en base a las estimaciones de descarga y flujo pasante, y análisis de la relación entre precipitación, recarga y escorrentía.
- Actualización de la geometría acuífera y el volumen almacenado.
- Análisis de las conexiones entre cuencas Alto-Andinas en base a isótopos e hidroquímica.

Específicamente, el estudio consideró el levantamiento y análisis de información hidrológica e hidrogeológica para las 34 subcuencas en la zona de estudio considerando el diagnóstico realizado el año 2013 y profundizó la información donde era necesario.

En la primera etapa del estudio, se realizó una revisión bibliográfica tomando como base 50 antecedentes. Luego de una revisión crítica de éstos, se consideraron los estudios que presentan los aportes más importantes al presente trabajo.

Se recomendó de esta primera etapa enfocar el estudio en las cuencas de Pedernales, cuenca de Maricunga y la cuenca de la Laguna del Negro Francisco debido a una potencial mayor disponibilidad hídrica en este sector, además que es relevante para los objetivos del estudio analizar la posible interacción entre ellas.

## 2 TRABAJOS DE TERRENO

Se presenta en este capítulo, la descripción de los trabajos de terreno que se realizaron en cuatro campañas comprendidas entre diciembre de 2014 y marzo de 2015, como parte de esta fase del estudio. La descripción de los trabajos de terreno se divide en:

- Instalación de sensores hidrométricos
- Prospecciones geofísicas
- Catastro de pozos y monitoreo de niveles
- Muestreo hidroquímico e isotópico
- Levantamiento topográfico con GPS diferencial

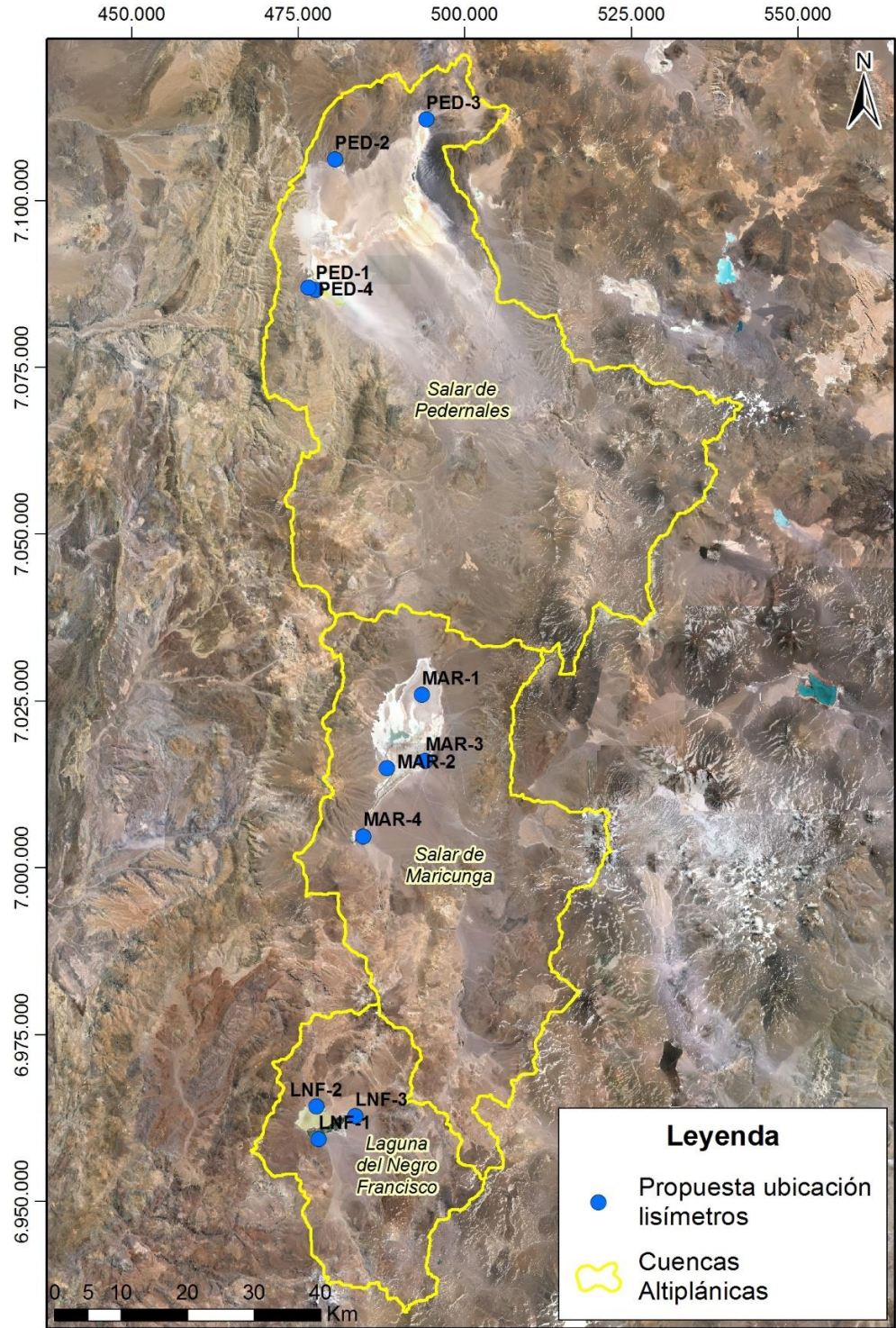
Los sensores hidrométricos instalados fueron una estación meteorológica y once (11) lisímetros para la medición de la evapotranspiración del suelo. Los lisímetros tienen instalados sensores que permiten medir precipitación, temperatura del aire, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea, nivel del agua subterránea y nivel del agua dentro del estanque del lisímetro.

La ubicación de la estación meteorológica es al costado poniente de la laguna Santa Rosa, en el extremo sur del salar de Maricunga, y sus coordenadas son 482.328 m Este, 7.004.336 m Norte, y a 3.784 m.s.n.m. correspondientes al Datum WGS84 y Huso S 19J. Además, en los 11 lisímetros se realizó un levantamiento topográfico con GPS diferencial con el objetivo de obtener las cotas absolutas de los diferentes equipos y de sus componentes para convertir los datos de presión registrados por los transductores a nivel de agua en metros sobre el nivel del mar. En la Figura 2-1 se presenta la ubicación de los lisímetros instalados durante la esta fase del estudio.

Respecto a las prospecciones geofísicas, de las tres cuencas donde se concentra el presente estudio, la Laguna del Negro Francisco es donde hay menor cantidad de información. Por este motivo la mayor cantidad de perfiles se situó en esta cuenca.

Dentro de la cuenca Laguna del Negro Francisco, se repartieron las estaciones TEM en 11 perfiles a modo de caracterizar las unidades geoelectricas en subsuperficie y una posible interpretación hidrogeológica para ellos. Los perfiles se ubicaron en las zonas en que las distintas quebradas llegan al llano sedimentario más amplio y profundo, donde se encuentra la laguna. En la cuenca del Salar de Maricunga, se realizaron cinco perfiles TEM repartidos en dos grupos; dos perfiles en el límite noroeste de la cuenca para estimar la posible conexión subterránea de agua con la cuenca del Salar de Pedernales. Los tres perfiles restantes se ubicaron en la salida de una quebrada situada al suroeste con el objeto de estudiar el aporte hídrico. En la Figura 2-2 se presenta el mapa con la ubicación de las prospecciones geofísicas llevadas a cabo en la cuenca del salar de Maricunga y la cuenca de la laguna del Negro Francisco.

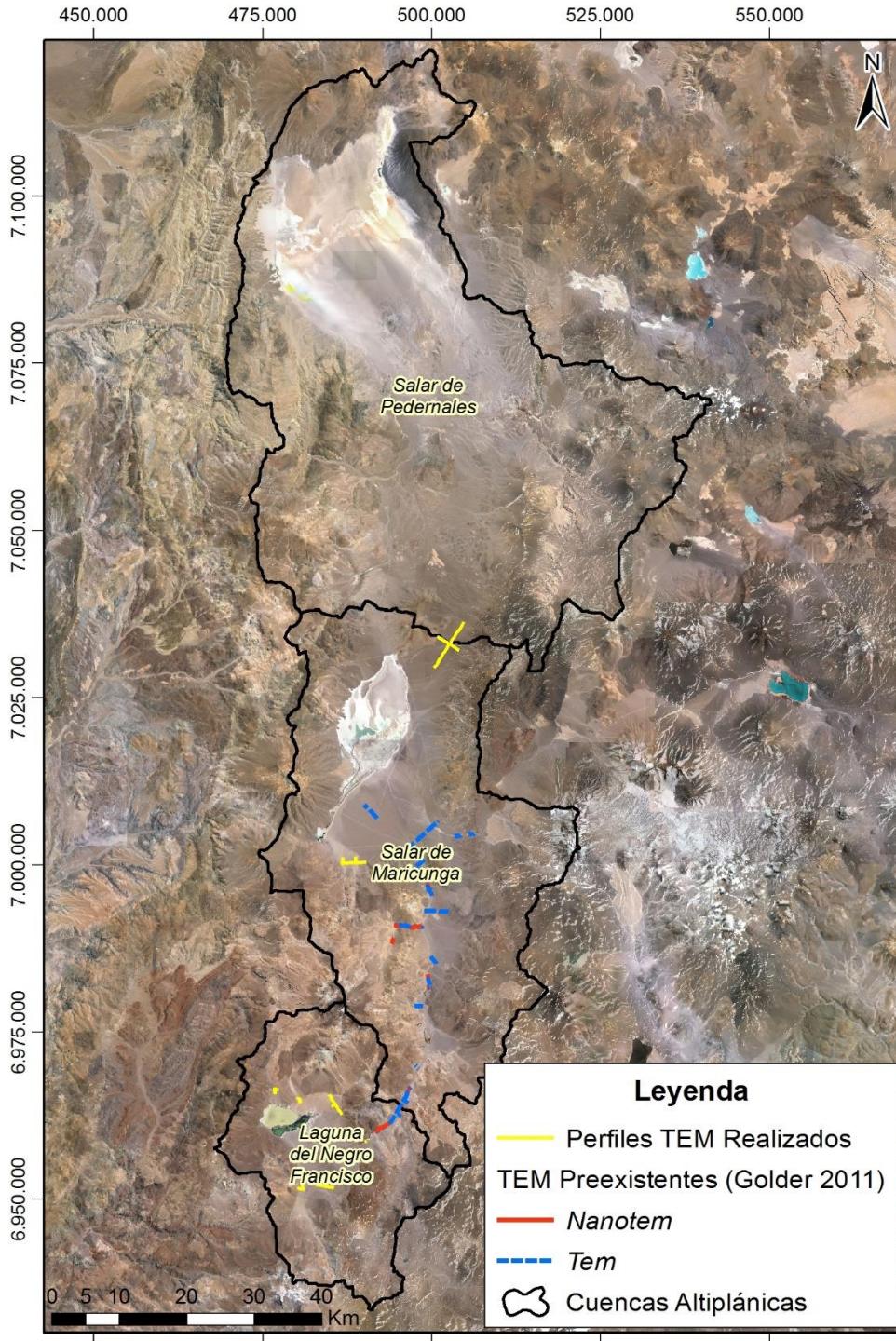
Figura 2-1: Ubicación final de los lisímetros en las tres cuencas de estudio



Fuente: Elaboración propia



Figura 2-2: Ubicación de las prospecciones geofísicas en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, para la selección de los pozos a catastrar y monitorear, se revisaron los derechos de agua subterránea en los expedientes de la DGA, junto con otras referencias que permitieran identificar los pozos en la zona de estudio y sus correspondientes propietarios.

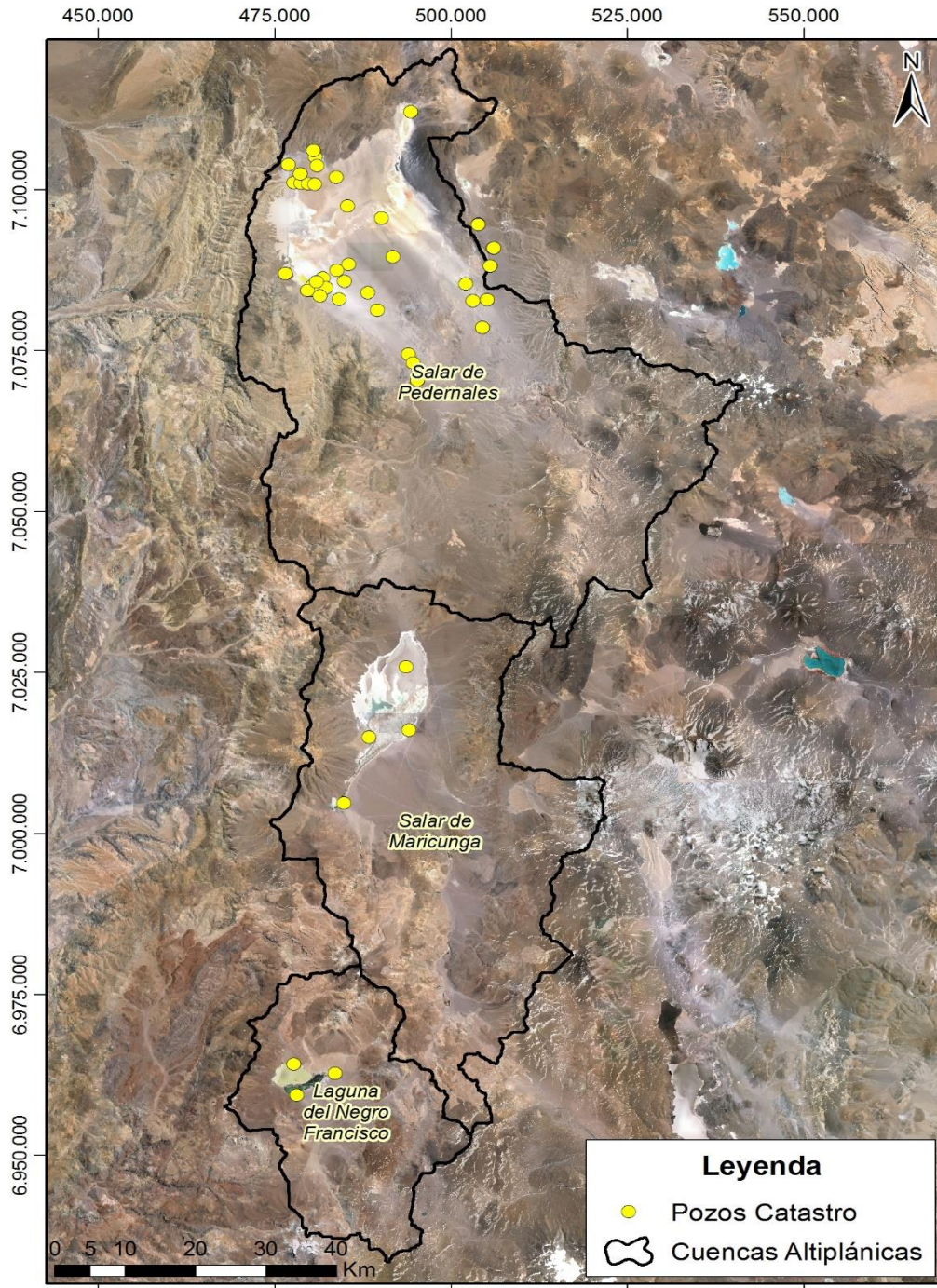
La mayor cantidad de pozos existentes de los que se tiene conocimiento de su existencia son propiedad de empresas mineras, en concreto de Codelco DSaI y Compañía Minera Kinross. De ellas, sólo Codelco DSaI permitió el acceso a sus pozos, mientras que Kinross, propietarios de prácticamente la totalidad de pozos existentes en Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco, no los facilitó, limitando así la campaña de catastro de pozos, monitoreo de niveles y muestreo hidroquímico e isotópico. En total se catastraron un total de 53 pozos, de los cuales se obtuvieron 42 mediciones de nivel. En la Figura 2-3 se presenta la ubicación de los pozos catastrados.

Para el muestreo hidroquímico e isotópico se consideraron pozos (24), manantiales (21), flujos superficiales (10), lagunas (2) y un dren. En todos los puntos se registraron los parámetros de Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT), potencial de hidrogeniones (pH) y Oxígeno Disuelto (OD). Se obtuvo un total de 58 muestras para análisis químico y 50 muestras para análisis isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . Del total de muestras, 25 corresponden a la cuenca del salar de Pedernales (PED), 14 a la cuenca del salar de Maricunga (MAR) y 19 a la cuenca de la laguna del Negro Francisco (LNF).

El análisis hidroquímico e isotópico consideró un catastro de la información existente en el área de estudio a la que se incorporarán los datos de los análisis obtenidos en las campañas de muestreo realizadas en este estudio.

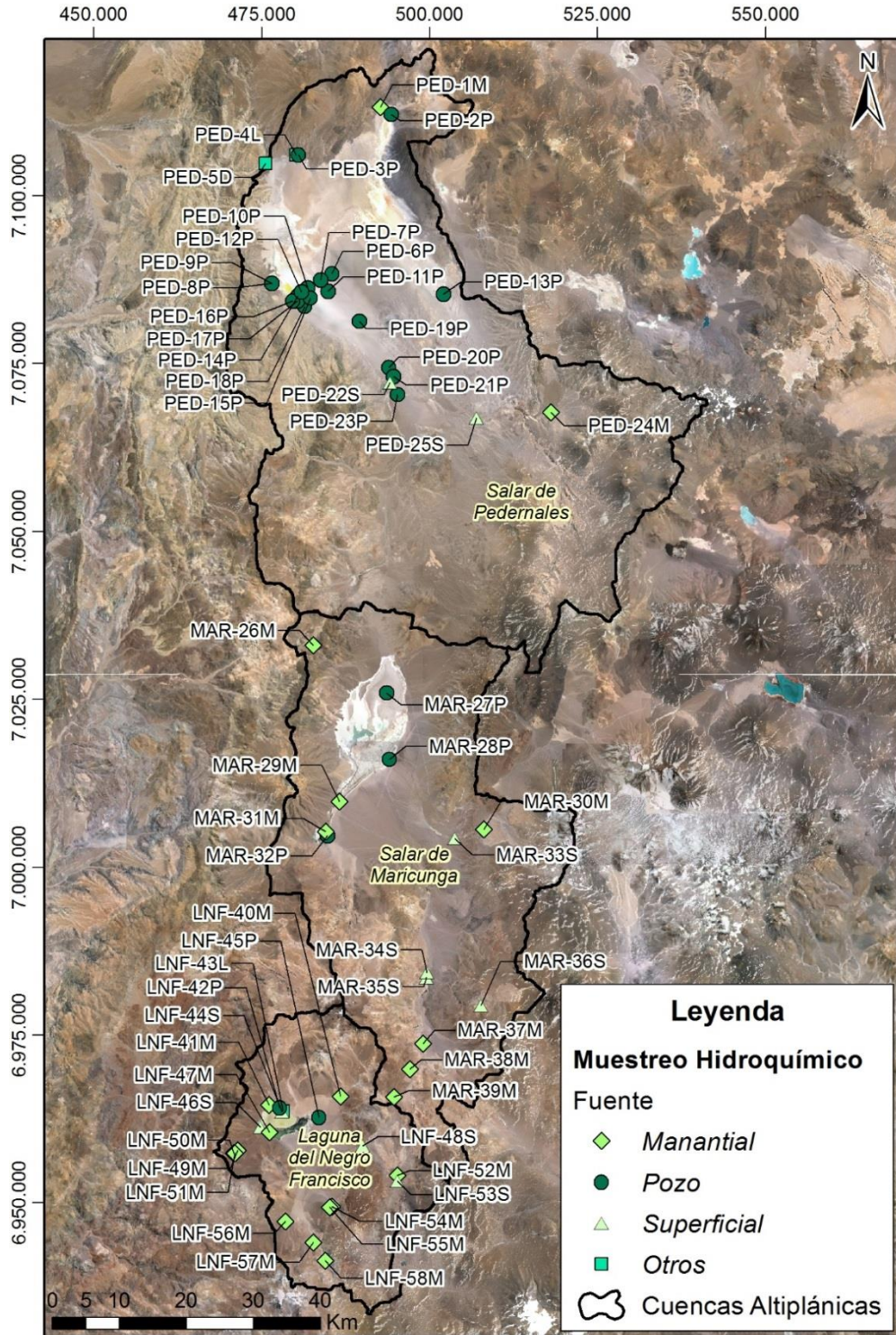
En la Figura 2-4 y Figura 2-5 se presentan los mapas de ubicación referencial de los puntos de agua donde se realizó el muestreo y posterior análisis químico e isotópico.

Figura 2-3: Ubicación de los pozos a catastrados



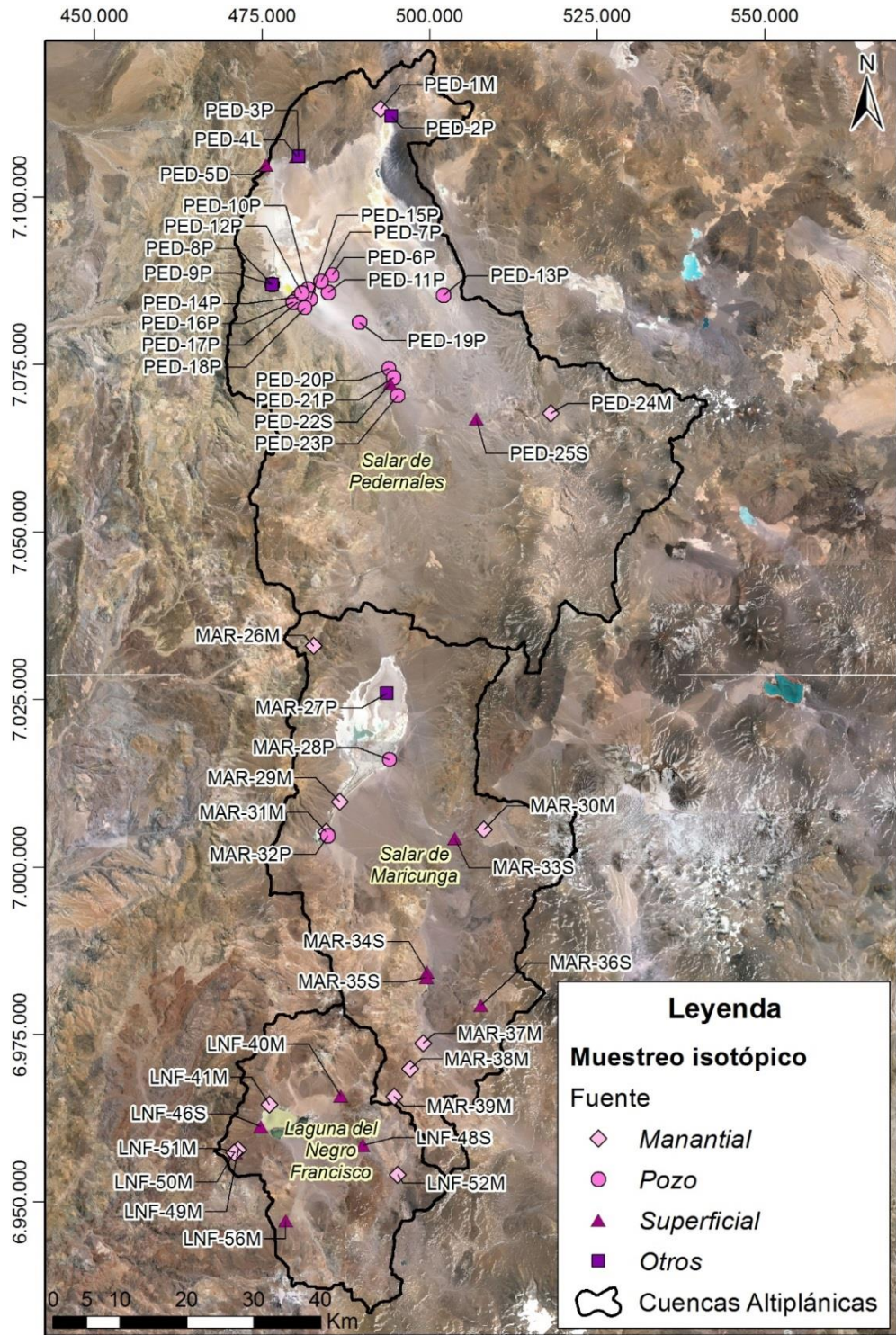
Fuente: Elaboración propia

Figura 2-4: Ubicación de los puntos para el muestreo y análisis químico



Fuente: Elaboración propia

Figura 2-5: Ubicación de los puntos para el muestreo y análisis isotópico



Fuente: Elaboración propia

---

## 3 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El presente capítulo presenta el modelo hidrogeológico conceptual de las cuencas estudiadas, en particular las del sector suroeste. Se presenta la geología, hidrología, hidroquímica, hidrogeología, y la cuantificación de flujos subterráneos, que en conjunto permiten determinar el modelo conceptual.

---

### 3.1 GEOLOGÍA

La caracterización geológica de las cuencas Salar de Pedernales, Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco, se basó en el trabajo de Aquaterra (2013) durante la Fase 1 de este estudio.

#### 3.1.1 Cuenca Salar de Pedernales

En la cuenca del Salar de Pedernales afloran, por el norte y este, lavas andesítico-basálticas (Mmv, Psv) y flujos riolíticos del volcanismo cenozoico superior (Msiw). Hacia el sur se observan principalmente rocas sedimentarias continentales miocenas (MsPa). Hacia el oeste se observa principalmente rocas intrusivas paleozoicas (Pzgp) y remanentes de aparatos volcánicos del Oligoceno (TOMv y TOMde).

Las unidades anteriormente nombradas son sobreyacidas por sedimentos depositados principalmente hacia la zona norte de la cuenca: depósitos de salar del Mioceno (MsPls) y Cuaternario (Qs) y sedimentos clásticos aluviales (Qala).

#### 3.1.2 Cuenca Salar de Maricunga

En la cuenca del Salar de Maricunga afloran por el sureste principalmente rocas volcánicas del Mioceno (Miv, Msv, Mmv y Plioceno (Plsv, Pliv) e ignimbritas miocenas (Mmiva). Hacia el noreste se observan principalmente rocas volcánicas paleozoicas (Pep) y volcanoclásticas oligocenas (OMcg(a)). En el suroeste de la cuenca del Salar de Maricunga predominan las rocas volcánicas del Mioceno (TMv (e), TMO(a), TMv(a), TMv(c), Tvcc(a)) y Oligoceno (TLC (b)). Hacia el noroeste predominan rocas más antiguas, principalmente rocas sedimentarias triásico-jurásicas y jurásicas (TrJem, Jm), rocas volcanoclásticas paleozoicas y volcánicas cretácicas (PzIt, Kcc).

Sobre los centros volcánicos miocenos, hacia el norte de la cuenca del Salar de Maricunga yacen los depósitos aluviales antiguos del Mioceno (MsPa) y depósitos aluviales modernos (Qa). Estos depósitos se disponen rodeando los depósitos de salar antiguo del Mioceno (MsPls) y depósitos de salar recientes (Qs(a, b y c)).

#### 3.1.3 Cuenca Laguna del Negro Francisco

En la cuenca Laguna del Negro Francisco se depositan principalmente rocas volcánicas y volcanoclásticas miocenas (TMdh, TMld, TMnf, TMv(c) Tvcc, Tvca, entre otras). En el sector oriental afloran las rocas más antiguas que corresponden a secuencias volcánicas paleozoicas (Pzp). Hacia el centro de la cuenca se observan depósitos aluviales y coluviales tanto miocenos (Tga) como recientes (Qc, Qa).

## 3.2 HIDROLOGÍA

La caracterización hidrológica consideró un análisis de la precipitación media anual mediante un análisis regional estimando un gradiente con respecto a la altitud. De esta forma se logró estimar precipitaciones medias en las subcuencas en estudio, y así cuantificar la proporción que infiltra al sistema subterráneo.

Dado que las precipitaciones son el único aporte al sistema, una buena estimación de su ocurrencia es necesaria para evaluar el balance hídrico de cada cuenca. De la revisión de antecedentes se observa que existen diversos estudios, de entidades privadas y públicas, que han estimado la oferta hídrica para la Región de Atacama y en particular para la zona de estudio.

En las cuencas Alto-Andinas analizadas se producen precipitaciones orográficas, donde las tormentas de invierno son la principal fuente hídrica, y la influencia de tormentas estivales es menor con la ocurrencia de tormentas remanentes del denominado "Invierno Altiplánico" (DGA-PUC, 2009).

Se han utilizado distintas metodologías para estimar esta variable, como estimación de isoyetas para la zona de estudio o extrapolación a partir de registros meteorológicos existentes, con resultados variables. La variabilidad radica en que para esta zona no existen registros de larga data y sólo se dispone de información acotada, para estudios locales y puntuales, que no permiten generar una estimación regional de las precipitaciones. Además, para esta zona el aporte de agua sólida sería un volumen mayor que el líquido (Golder, 2011), variable que aún resulta más incierta de definir por la escasez de información.

Dada la falta de información meteorológica en la zona de estudio, se decidió analizar una región más extensa, con el objetivo de disminuir la incertidumbre de la estimación local. Se seleccionaron estaciones de la II, III y IV región con más de 30 años completos de registro. En la Figura 3-1 se presentan espacialmente las estaciones seleccionadas junto a las subcuencas en estudio, dividiendo los registros en tres grupos: estaciones de la II Región, el sector de Copiapó y el sector de Huasco.

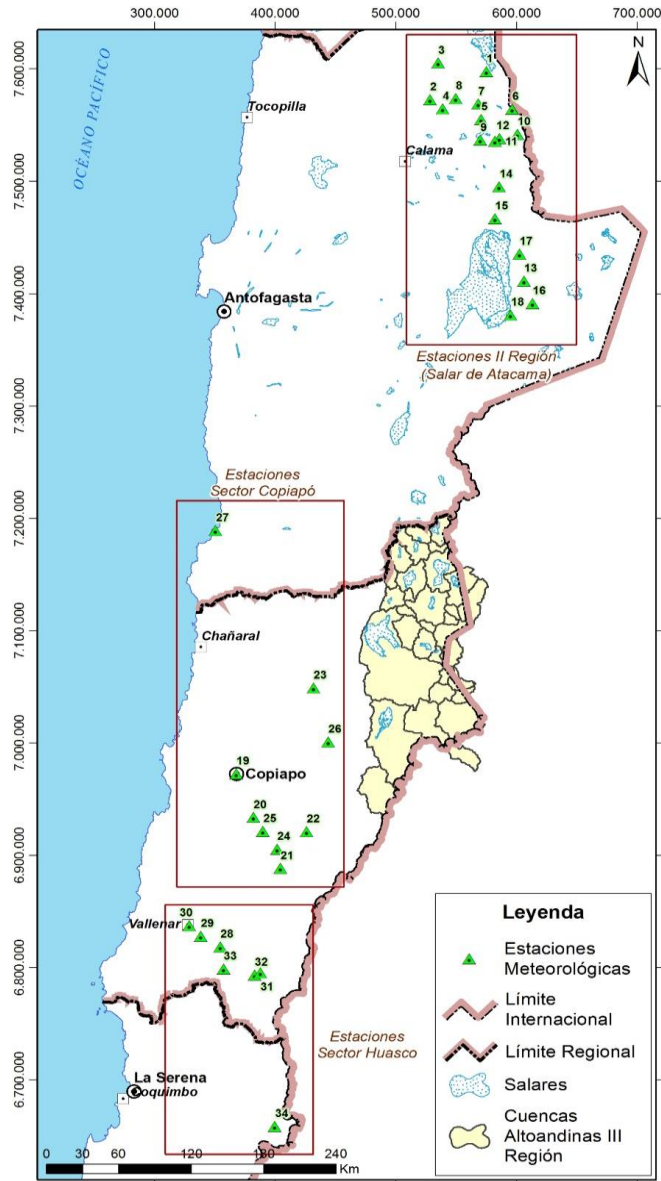
En base a la información anterior, se estimaron las precipitaciones para las subcuencas estudiadas usando un gradiente con respecto a la elevación. En la Figura 3-2 se presenta la estimación realizada y su ajuste lineal con una extrapolación para alturas entorno a los 4.000 y 5.000 m.s.n.m. Esta extrapolación se basa principalmente en dos supuestos:

- existe una relación lineal entre las precipitaciones anuales y la altitud, y
- toda la precipitación de nieve caída durante el año se derrite de manera que no existe almacenamiento hídrico interanual.

Estos supuestos son necesarios debido a que la información en la zona y a altitudes similares a la subcuencas de estudio es escasa. Se observa que el gradiente estimado con el grupo de estaciones en el sector de Copiapó, es menor que el estimado en la parte norte y sur de la zona de estudio, por lo que este gradiente se descartó ya que no representa el comportamiento de la precipitación en alturas superiores a los 3.000 m.s.n.m.

Por lo anterior se estima que el gradiente debe estar en un rango entre los estimados con información de la II región y el sector de Huasco. Adicionalmente, conforme a lo indicado por DGA-PUC 2009, existe un cambio en los gradientes a contar de alturas en torno a los 2.500-3.000 m.s.n.m. en las cuencas altiplánicas del norte de Chile.

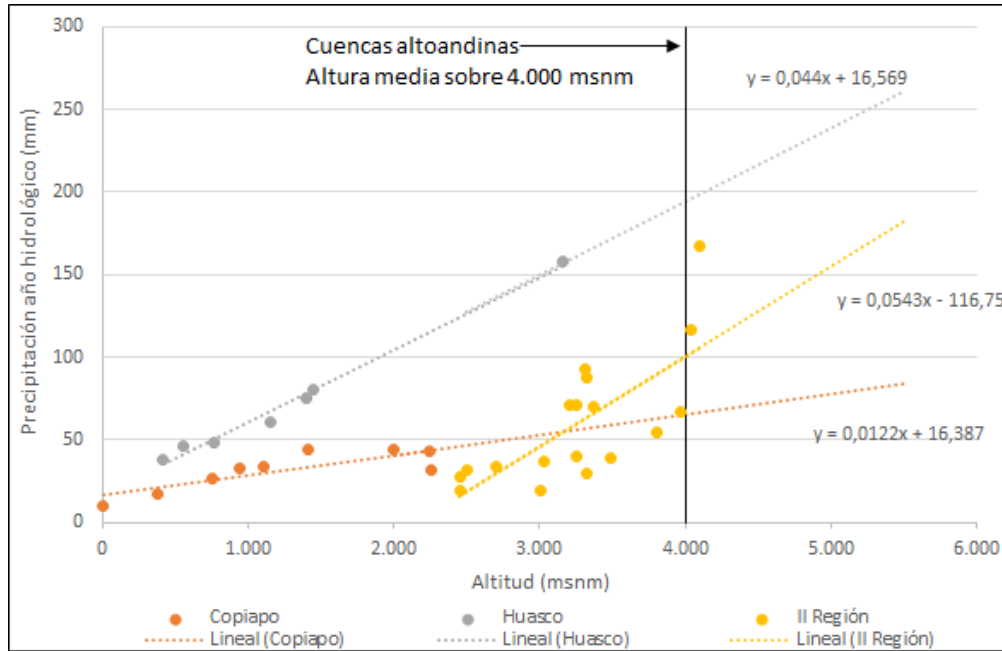
Figura 3-1: Sectores seleccionados para cálculo de gradiente de altura



Fuente: Elaboración propia



Figura 3-2: Gradiente de precipitaciones medias anuales (mm)



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-1 se presenta la precipitación media anual estimada en las cuencas en estudio con los gradientes de altura para la II región y Huasco. Se observan diferencias de un 70% en promedio.

Para estimar la recarga por precipitaciones al acuífero se utilizó la metodología desarrollada para la DGA el año 2011 (DGA, Rojas y Salazar, 2011), modificada de la metodología presentada en el estudio de JICA (1995), incorporando una corrección de tipo hidrológica que intervienen en la estacionalidad (invierno y verano) de la respuesta hidrológica del sistema ante eventos de precipitación. Esta metodología, propone relaciones lineales que transforman los registros de precipitación en escorrentía total y base, siendo esta última la respuesta del sistema subterráneo a las precipitaciones infiltradas, y supuesta igual a los mínimos decadales promedio. Según DGA (2011), y por el nivel de información existente y la bondad de ajuste determinada, se puede indicar con propiedad que aproximadamente un 40% de la escorrentía total de salida de una cuenca altiplánica corresponde a flujo base o recarga neta de ésta.

De esta manera en la Tabla 3-1 se presenta el Balance Hídrico estimado para cada una de las cuencas, donde se presentan las precipitaciones estimadas con los gradientes con respecto a la elevación definidos con información en la II Región (II R) y el sector de Huasco, el caudal saliente ( $Q_s$ ), y la recarga neta (R) como el 40% de este caudal.

Si bien existe una incertidumbre muy alta en la estimación de la precipitación, la utilización de un rango para la estimación de recarga se traduce en un resultado acorde a una zona árida, con recarga menor al 5% de los recursos precipitados.

Tabla 3-1: Balance hídrico para las cuencas Alto-Andinas analizadas

Nombre cuenca	PP (mm/año)		Q <sub>s</sub> (L/s)		R (L/s)		R/PP (%)	
	II R	Huasco	II R	Huasco	II R	Huasco	II R	Huasco
Laguna del Negro Francisco	130	218	82	719	33	288	0,9	4,6
Salar de Pedernales	100	194	0	1.457	0	583	0,0	2,6
Salar de Infieles	103	196	1	88	0	35	0,0	1,9
Cerro el Encanche	115	206	2	55	1	22	0,1	1,9
Cerro Blanco	102	195	4	83	2	33	0,1	1,4
La Laguna	112	203	1	181	0	72	0,0	2,5
Qda. Los Maranceles	122	211	1	44	0	18	0,1	2,5
Cerro Conito de los Infieles	116	207	1	27	0	11	0,1	2,2
Sierra Nevada	161	244	26	121	10	48	1,4	4,4
Salar de Aguilar	96	191	3	116	1	46	0,1	1,5
Qda. La Rossa	125	214	2	42	1	17	0,2	1,9
Wheelwrioth	137	224	24	207	10	83	0,8	4,0
Laguna Escondida	146	232	26	165	10	66	1,0	4,1
Laguna Verde	150	235	163	866	65	346	1,4	4,6
Qda. Las Amarillas	149	234	26	148	10	59	1,2	4,3
Cerro Agua Caliente	161	243	87	354	35	142	2,0	5,3
Cerro Nevado de Incahuasi	158	241	8	35	3	14	1,7	4,9
Salar de Piedra Parada	128	217	4	198	2	79	0,1	3,0
Cerro Agua de Morales	143	229	6	54	2	22	0,6	3,3
Lagunas del Jilguero	140	227	7	71	3	28	0,6	3,5
Laguna del Bayo	148	233	31	218	12	87	0,8	3,7
Qda. El Llano	142	228	4	55	2	22	0,3	2,9
Salar Grande	122	212	5	324	2	130	0,1	2,5
Qda. la Trinchera	144	230	6	64	2	26	0,5	3,1
Laguna de las Parinas	137	224	3	50	1	20	0,3	2,9
Laguna de Colorados	123	213	3	166	1	66	0,1	2,4
Lagunas Bravas	134	221	13	229	5	92	0,3	3,2
Salar de Maricunga	115	206	21	1335	8	534	0,1	3,7
Qda. Nevados del Jucalitos	150	235	149	792	60	317	1,4	4,6
Salar de las Parinas	121	211	6	222	2	89	0,1	2,2
Salar de la Isla	118	209	8	242	3	97	0,1	2,0
Salar de Gorbea	125	214	9	104	4	42	0,3	1,7
Salar de la Azufrera	100	194	3	50	1	20	0,2	1,3
Salar de Agua Amarga	102	196	6	96	2	38	0,2	1,3

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 HIDROQUÍMICA

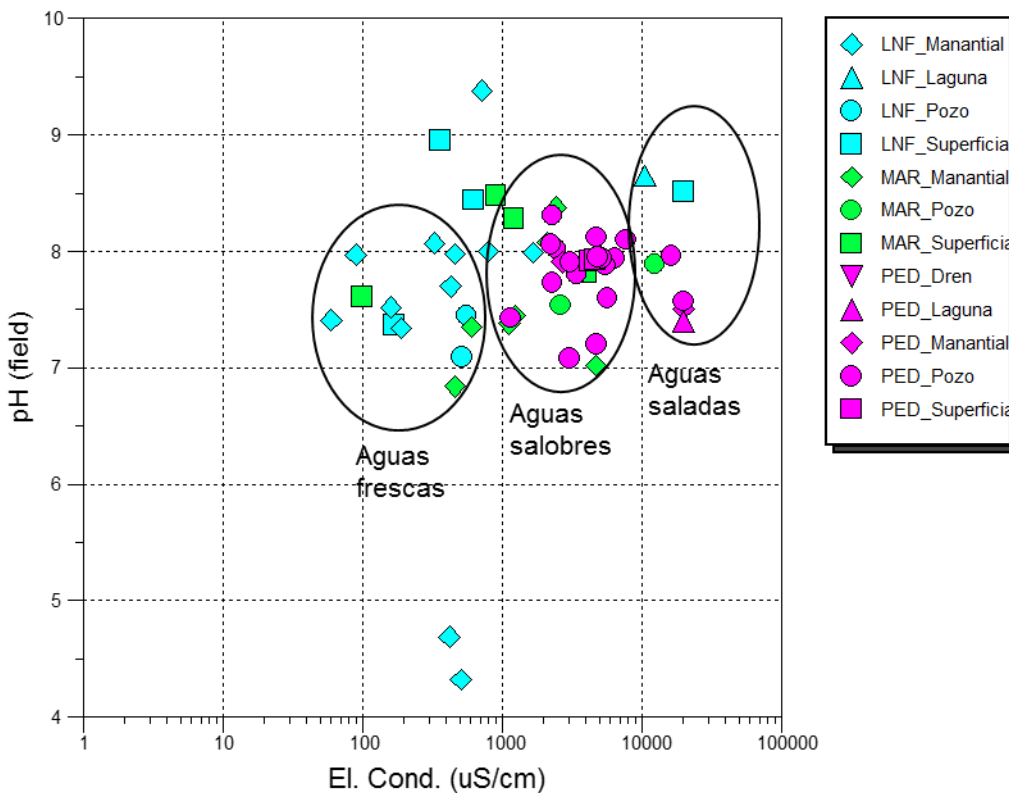
Este capítulo presenta una descripción local de la hidroquímica de las tres cuencas seleccionadas (cuencas Salar de Pedernales, Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco), y una descripción isotópica regional.

Se dispone de 58 muestras de aguas provenientes de distintos tipos de puntos de muestreo (Figura 2-4) como cauces superficiales (10), lagunas (2), dren (1), manantiales (21) y pozos (24). De ellas, 25 corresponden a la cuenca del salar de Pedernales (PED), 14 a la cuenca del salar de Maricunga (MAR) y 19 a la cuenca de la laguna del Negro Francisco (LNF). En 50 de los 58 puntos de muestreo se tomaron muestras para análisis de isótopos de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 2-5).

#### Hidroquímica

El rango de pH medido in situ varía ampliamente entre 4,0 y 9,6 con la mayor parte de las muestras en el rango de pH 7,0- 8,5 (Figura 3-3) por lo que se trata de aguas neutras a ligeramente alcalinas. Las dos muestras con pH ácido provienen de manantiales de la cuenca de la laguna del Negro Francisco.

Figura 3-3: Rangos de CE y pH por cuenca para tipos de punto de muestreo

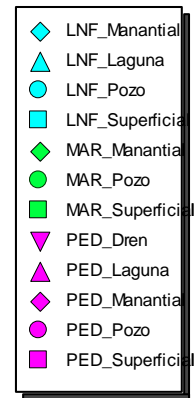
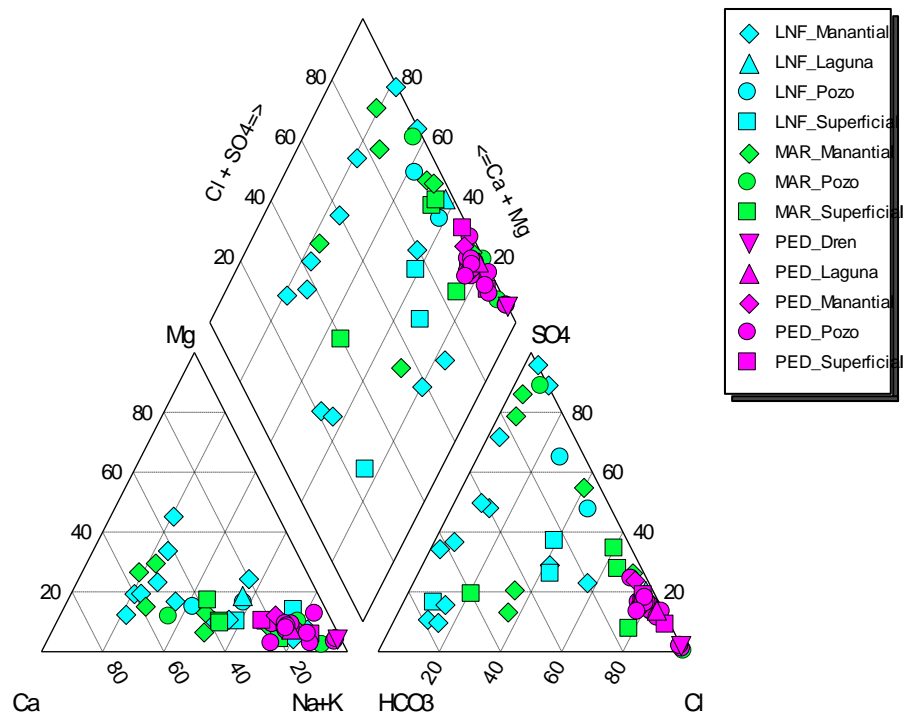


Fuente: Elaboración propia

Según la CE se han clasificado en tres grupos, como aguas frescas (hasta  $\sim 750 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), salobres ( $1.000-10.000 \mu\text{S}/\text{cm}$  aproximadamente) y saladas ( $>10.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Aparentemente hay una tendencia a una mayor salinidad en las aguas que presentan un pH más básico. Las aguas frescas corresponden mayormente a manantiales de las cuencas de la laguna del Negro Francisco y del salar de Maricunga. Entre las aguas salobres se encuentran principalmente pozos de la cuenca del salar de Pedernales, mientras que entre las aguas más saladas se encuentran distintos tipos de punto de muestreo de la cuenca del salar de Pedernales, un pozo de la cuenca del salar de Maricunga y dos puntos de agua superficial de la cuenca de la laguna del Negro Francisco.

La composición general de las aguas analizadas se presenta en el diagrama de Piper (Figura 3-4), donde se observa que una fracción importante de las muestras superficiales y principalmente subterráneas corresponde a aguas cloruradas sódicas, pero también hay otros grupos de aguas superficiales que corresponden a aguas bicarbonatadas, sulfatadas e intermedias. Al contrario que las dos restantes, la composición hidroquímica de la cuenca de Pedernales tiene en todas sus muestras una composición clorurada sódica. Las muestras de las cuencas de Maricunga y Laguna del Negro Francisco tienen una composición más variada, como se puede observar en el diagrama de la Figura 3-4 y en especial en la concentración de aniones.

Figura 3-4: Diagrama de Piper



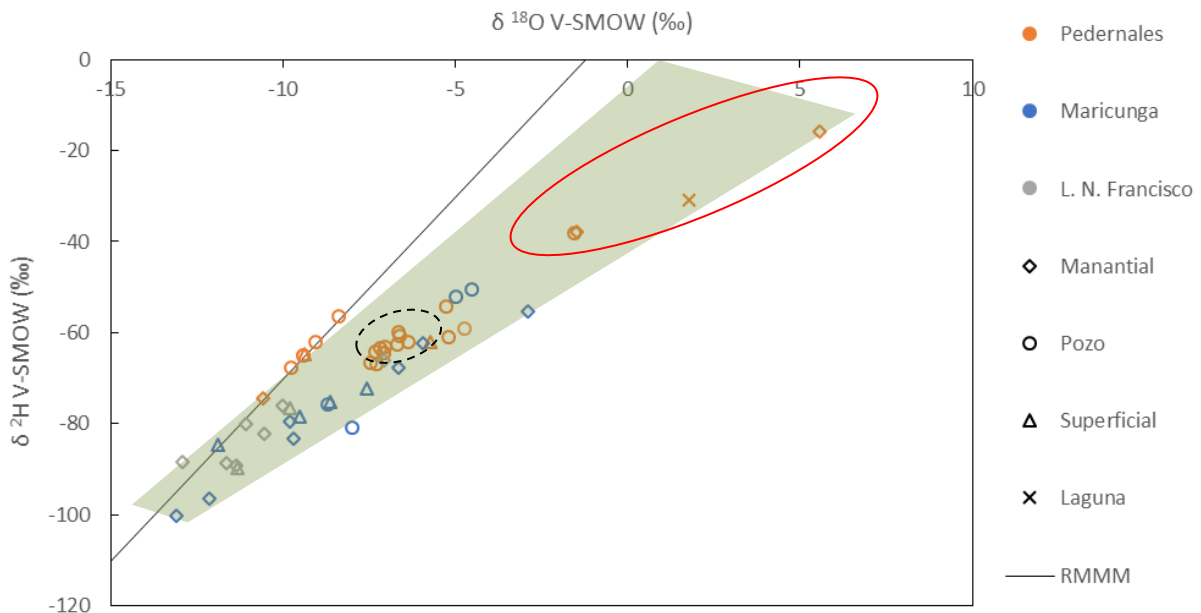
## Isotopos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$

En las campañas de terreno se tomaron un total de 50 muestras para el análisis de su composición isotópica en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . De las 50 muestras 18 fueron tomadas de manantiales o drenes, 9 de aguas superficiales como ríos o lagunas y 23 de pozos mediante bailer.

En la Figura 3-5 se presenta el diagrama de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , donde se observa que las muestras se sitúan por debajo de la línea de aguas meteóricas mundial media (LAMM) de pendiente 8 y exceso de deuterio (d) igual a 10 ‰, con la excepción de la muestra LNF-50M correspondiente a un manantial situado al suroeste de la Laguna del Negro Francisco que se ubica ligeramente por encima de la recta. Gran parte de las muestras se sitúan sobre una línea de pendiente que tiene valores entre 4 y 5 (resaltados en área verde), valores típicos de fraccionamiento por evaporación.

Las muestras de la Figura 3-5 situadas dentro del círculo rojo son las que presentan un mayor fraccionamiento respecto del resto. Estas muestras pertenecen al dren Agua Helada que da origen al río Salado desde la cuenca del Salar de Pedernales, una Laguna y manantial de agua Salada en la zona norte del Salar de Pedernales.

Figura 3-5. Composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de las 50 muestras tomadas,

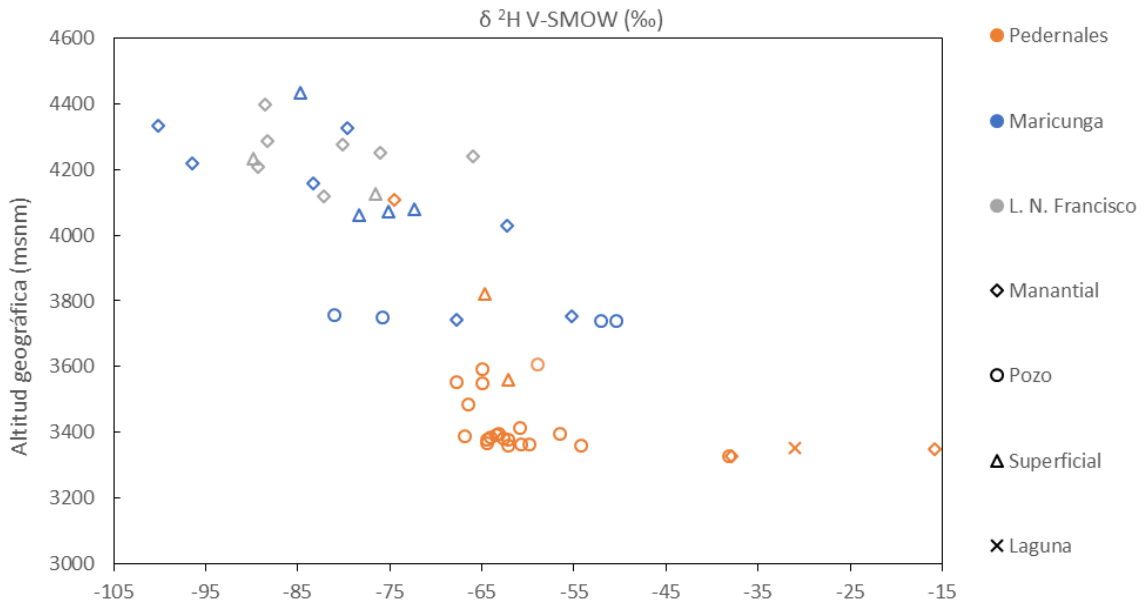


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-6 se muestra la relación entre la altitud geográfica y la desviación isotópica en deuterio donde se observa una relación donde a mayor altitud la composición isotópica se hace más ligera (Cerros del Juncalito, Nevado Tres Cruces o Volcán Copiapó). Las muestras más livianas en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  tienden a situarse al oeste de las cuencas, más cercanas a las formaciones montañosas más altas, con la excepción de las que se sitúan más cercanas al volcán Copiapó.

De las muestras de Pedernales cabe destacar que se sitúan en un rango muy estrecho en su composición de deuterio, a excepción de los datos con valores superiores  $-40$  ‰ fraccionados por procesos de evaporación.

Figura 3-6. Diagrama de altitud geográfica en función de la composición  $\delta^2\text{H}$



Fuente: Elaboración propia

### 3.4 HIDROGEOLOGÍA

La caracterización hidrogeológica se realizó en base a antecedentes de estudios anteriores y trabajos de terreno ejecutados por el presente diagnóstico. La descripción se realizó para las tres subcuencas Alto-Andinas seleccionadas. A continuación se detallan las unidades hidrogeológicas principales junto los flujos subterráneos inferidos para el sistema.

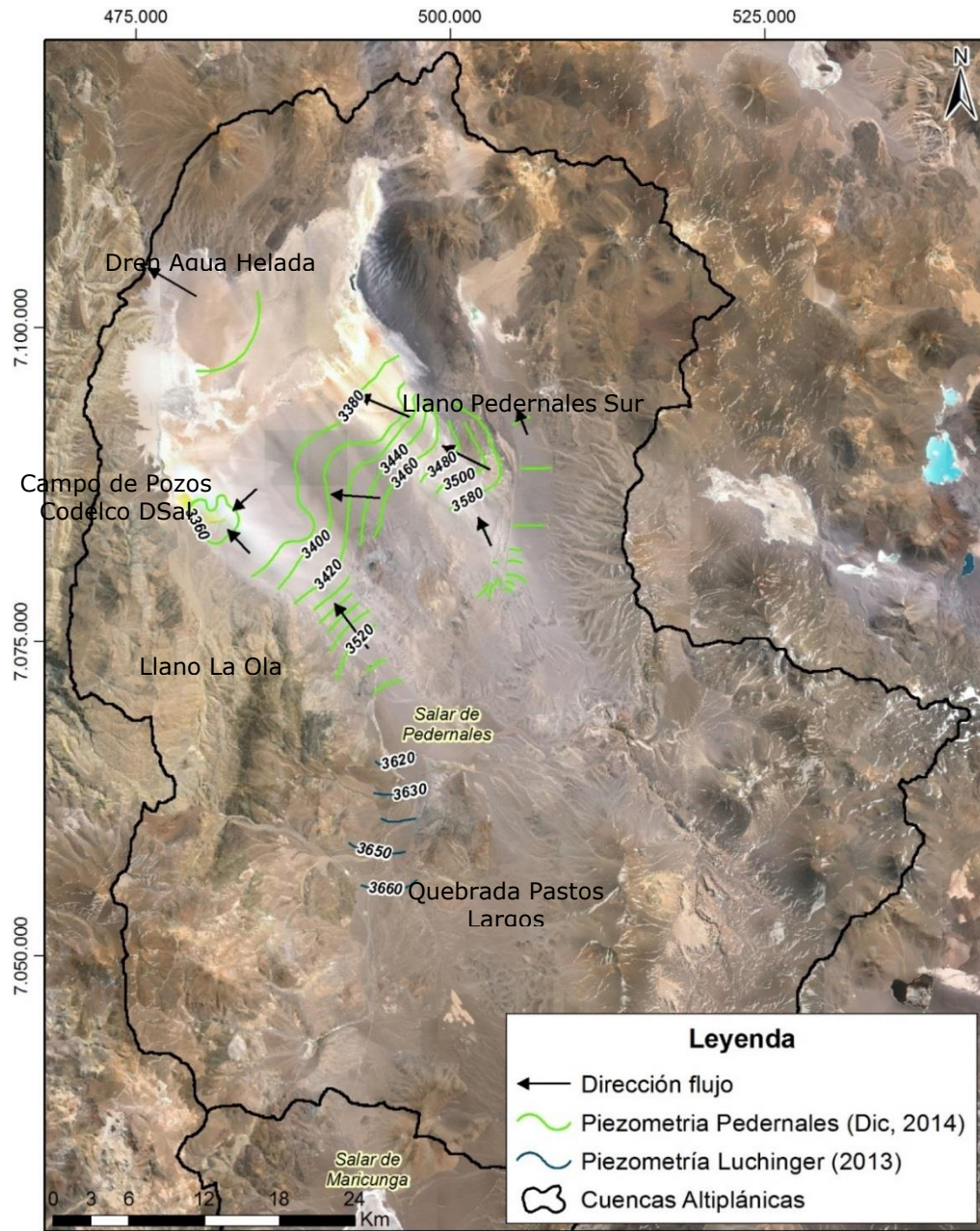
En la cuenca de Salar de Pedernales, el mapa hidrogeológico de SERNAGEOMIN (2005) identifica a la unidad de mayor importancia como los acuíferos libres a semiconfinados compuestos por sedimentos aluviales y fluviales depositados entre el Mioceno y el presente. Estos corresponden principalmente a gravas y arenas, y se ubica principalmente al sur del salar, en un eje norte sur.

Como se observa del mapa piezométrico de la Figura 3-7, la dirección general del flujo subterráneo es de SE a NO hacia el salar. Las entradas principales de agua subterránea hacia el salar se producen por el Llano de La Ola y el Llano de Pedernales Sur. La piezometría muestra un gradiente en el límite este de la cuenca en la divisoria de aguas con la cuenca La Laguna. Este gradiente podría inducir un flujo subterráneo desde la cuenca Salar de Pedernales hacia la cuenca La Laguna.

Para la cuenca del Salar de Maricunga, Golder (2011) identifica un acuífero aluvial y un basamento rocoso. Como unidad hidrogeológica principal, el acuífero aluvial corresponde a depósitos aluviales del Mioceno y recientes, depositados en los alrededores del salar de Maricunga y en el sector de Ciénaga Redonda. Está compuesto por dos unidades principales que de superficie a mayor profundidad son: unidad de gravas y unidad de arenas.

En la Figura 3-8 se presentan las isopiezas realizadas por Golder (2011) y por Venegas *et al.* (2000) en el Mapa Hidrogeológico del Sector Ciénaga Redonda. En estos mapas se observa un flujo de sur a norte en el sector de Valle Ancho y de sureste a noroeste en el sector de río Lama (al sur del Salar de Maricunga). En el recorrido del agua subterránea por el Valle Ancho se incorporan al flujo los aportes provenientes de las formaciones montañosas situadas a ambos lados. El nivel piezométrico en esta zona se sitúa muy próximo a la superficie del terreno, lo que da origen a la existencia de varias vegas y humedales observados en terreno. En el límite sur de la cuenca se puede observar un gradiente hidráulico entre la cuenca de la Laguna del Negro Francisco y la del Salar de Maricunga, en la zona del río Astaburuaga, provocando un flujo subterráneo en sentido S-N. En la zona situada más al norte, cerca al Salar de Maricunga, se junta el agua subterránea de la subcuenca del Valle Ancho con la subcuenca del Río Lama donde el flujo tiene dirección SE-NO hacia la Laguna Santa Rosa. En la zona de solapamiento de ambos mapas se observa que Golder (2011) reporta niveles piezométricos menores que lo observado en el mapa de Venegas *et al.* (2000), de lo que se desprende un posible descenso entre los años 2000 y 2011.

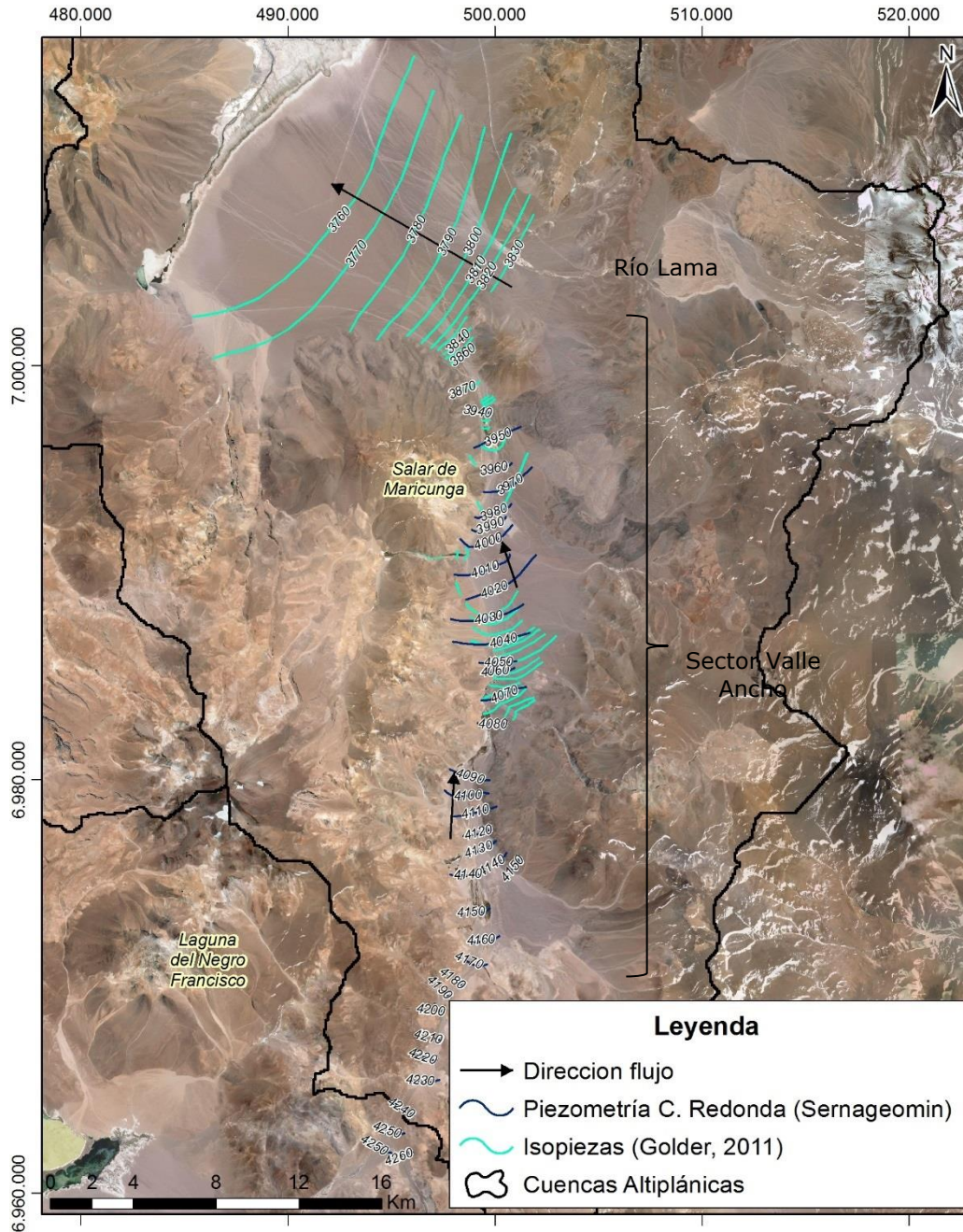
Figura 3-7. Piezometría de la cuenca Salar de Pedernales



Fuente: Elaboración propia



Figura 3-8. Piezometría de la cuenca Salar de Maricunga



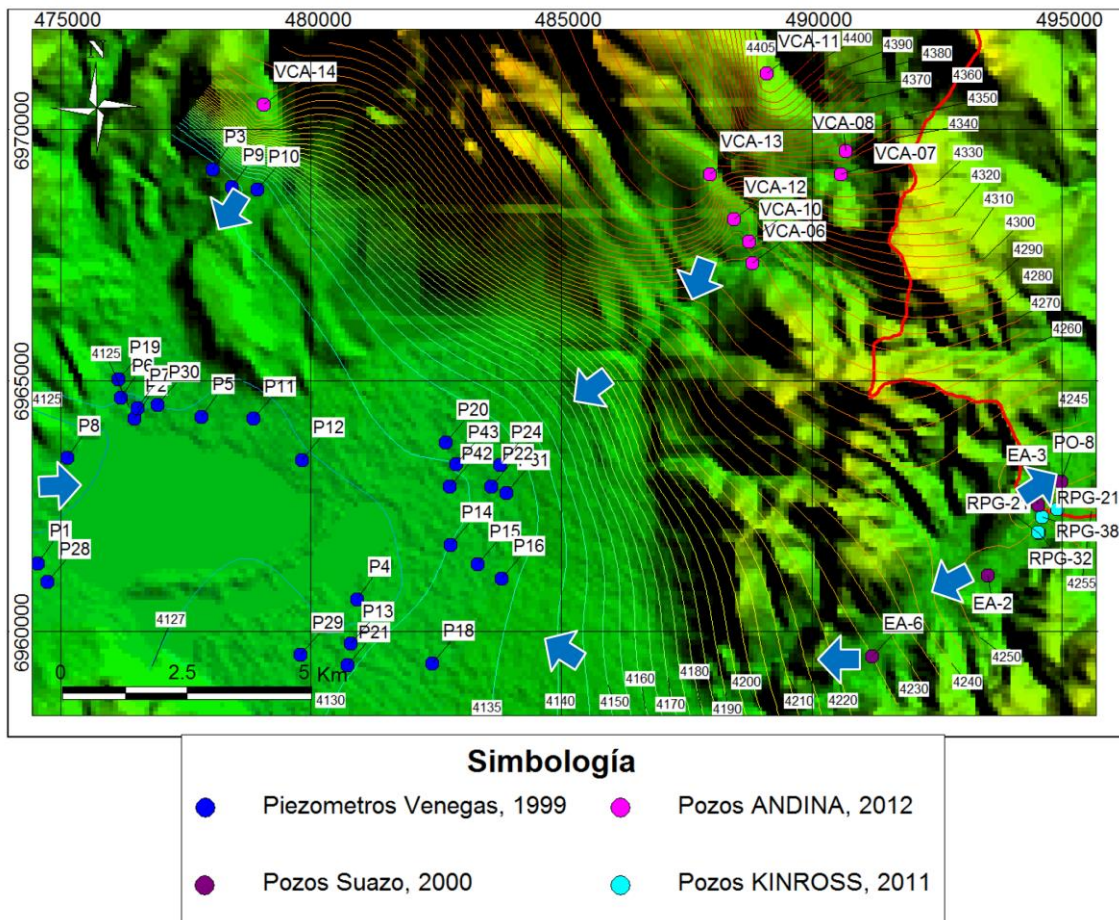
Fuente: Elaboración propia

Para la cuenca Laguna del Negro Francisco, Venegas (1999) identifica tres unidades hidrogeológicas: acuífero intergranular, acuífero fisurado y acuíferos menores/acuícludos. La principal es el acuífero intergranular que corresponde a depósitos aluviales, fluviales y de remoción en masa. Este acuífero está compuesto por gravas, areniscas y limos, y es

encuentra en torno a la laguna del Negro Francisco y quebradas aportantes a ésta. El acuífero fisurado está formado principalmente por lavas con potencial hidrogeológico moderado, ubicados al sur del río de La Gallina (suroeste de la laguna), mientras que los acuíferos menores están formados principalmente por rocas volcánicas y volcanoclásticas miocenas, de bajo potencial hidrogeológico.

Para definir la piezometría de esta cuenca, Aquaterra (2013) utilizó la información de niveles de Venegas (1999), Suazo (2000), Kinross (2011) y Andina (2012), que se presenta en la Figura 3-9. En el mapa de isopiezas se observa un flujo generalizado desde las partes más altas de la cuenca hacia la laguna, donde las direcciones de flujo superficial y subterráneo coinciden. Cerca del límite con la cuenca del salar de Maricunga, el río Astaburuaga cambia de dirección desde noreste a sureste. Según el EIA de Kinross, el flujo subterráneo también se dirige a la laguna junto con el río, mientras que la interpretación de los pozos de Suazo (2000) indicaría que una parte fluye hacia la Ciénega Redonda y otra parte hacia la cuenca de la laguna del Negro Francisco.

Figura 3-9: Piezometría cuenca laguna del Negro Francisco (Aquaterra 2013)



Fuente: Aquaterra, 2013.

### 3.5 CUANTIFICACIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

En este apartado se realiza una estimación del flujo de agua subterránea en las zonas de mayor interés, con información suficiente para llevar a cabo esta tarea.

El cálculo de los flujos subterráneos (caudal) se realizó mediante secciones de Darcy, a partir de los siguientes datos de entrada: (1) espesor medio del acuífero, (2) longitud del perfil, (3) gradiente hidráulico y (4) permeabilidad  $k$ .

Para la estimación de espesor medio del acuífero y longitud del perfil se utilizaron en general perfiles geológicos/hidrogeológicos anteriores, basados principalmente en datos geofísicos y la interpretación de los perfiles TEM levantados para el presente estudio (Anexo K). Para cálculo del gradiente hidráulico se utilizaron las piezometrías presentadas en este trabajo. Finalmente, los valores de permeabilidad se tomaron de pruebas de bombeo, y de no existir una representativa, de la bibliografía.

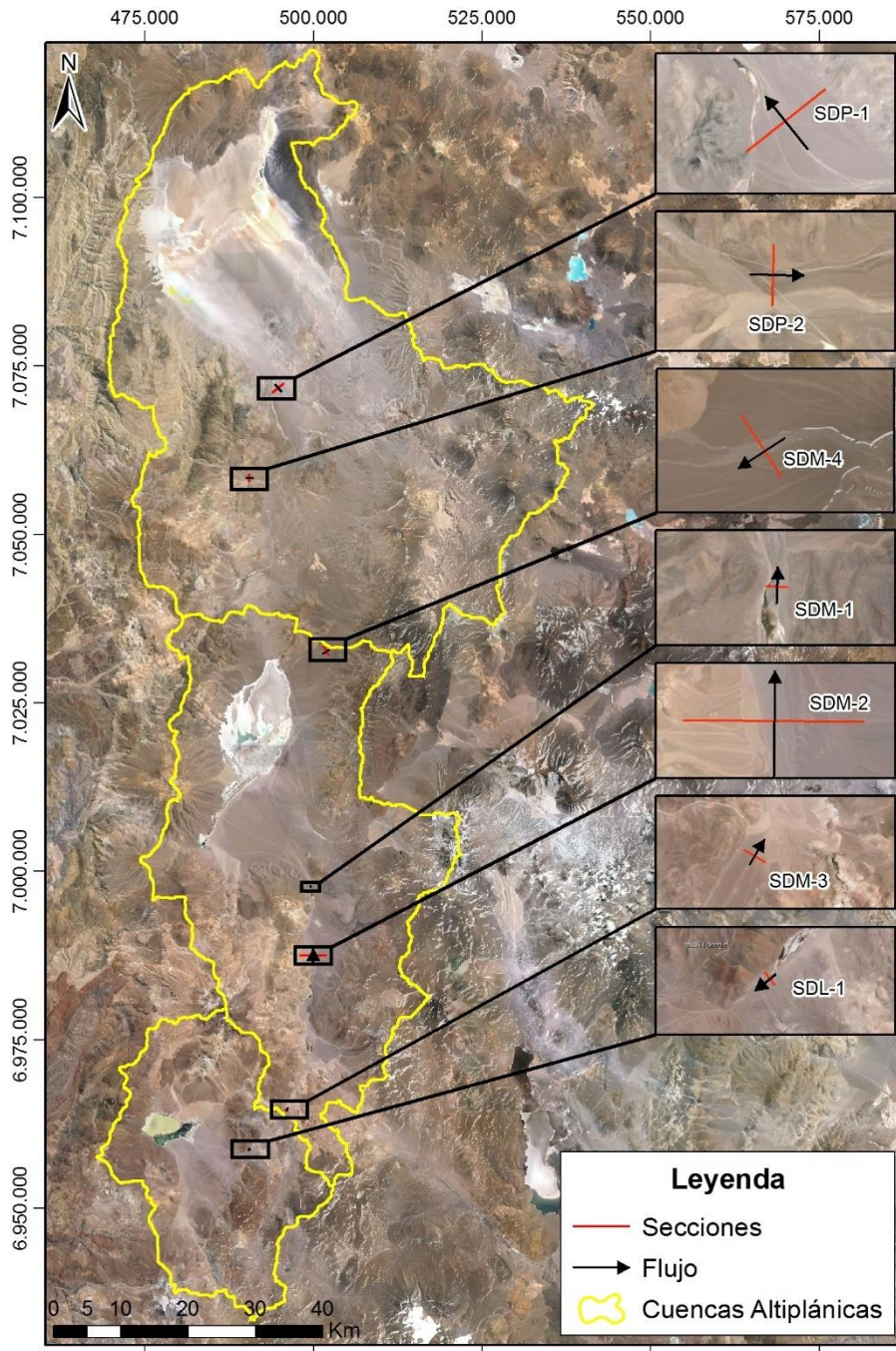
La ubicación de las secciones de Darcy realizadas se presentan en la Figura 3-10. Los caudales calculados y los parámetros utilizados se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Datos utilizados y caudal calculado en las Secciones de Darcy

Nombre	Espesor medio (m)	Long. perfil (m)	Grad. hidráulico	K (m/d)	Caudal (L/s)	Fuentes utilizadas
SDL-1	50	120	0,013	40	40±10%	Venegas <i>et al</i> (2000)
SDM-1	40	250	0,03	100	350±10%	Golder (2011)
SDM-2	15	2.000	0,02	30	200±10%	Golder (2011)
SDM-3	50	600	0,006	40	80±10%	Golder (2011), Venegas <i>et al</i> (2000)
SDM-4	80	1.500	0,002	10	30±10%	Elaboración propia (perfil TEM LM-1A)
SDP-1	50	2.300	0,011	20	300±10%	Aguirre y Venegas (2005)
SDP-2	60	1.400	0,002	32	60±10%	Luchinger (2013)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-10. Distribución espacial de las Secciones de Darcy



Fuente: Elaboración propia

### 3.6 MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual hidrogeológico general en las cuencas estudiadas se observa en la Figura 3-11.

El ciclo hídrico comienza con la precipitación, que al estar en una zona con clima Desértico Marginal de Altura y/o Estepa de Altura, ocurren con valores anuales inferiores a los 200 mm, de gran variabilidad interanual y espacial.

La precipitación es mayor en las partes altas de la cuenca, originando acumulaciones de nieve siendo parte de ellas incorporadas a los cursos superficiales y subterráneos en su fusión. En las partes más bajas de la cuenca la fracción de la precipitación que entra en el ciclo hídrico de la cuenca es en forma líquida.

En los eventos de precipitación parte del agua retorna a la atmósfera en forma gaseosa por evaporación; la fracción del agua de precipitación que se incorpora a los cursos subterráneos y la escorrentía generada que posteriormente se infiltra es considerada como recarga. La mayoría de autores considera que la recarga en las zonas áridas como en las que se centra este estudio comprende valores entre el 5 y el 10% de la precipitación.

Isotópicamente el agua de recarga se diferencia entre las partes más altas y el resto de la cuenca. En las partes más altas los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se sitúan encima de la LAMM con un exceso de deuterio de 10‰, mientras que en las partes más bajas la composición isotópica se sitúa por debajo de la LAMM con exceso de deuterio inferior a 10 ‰. Esta diferencia podría reflejar que el agua de precipitación sufre fraccionamiento por evaporación durante la precipitación y/o desde el suelo en el momento de infiltración en las partes bajas de la cuenca, donde la evaporación potencial es mayor que en las partes altas.

Una vez la recarga pasa a ser flujo subterráneo este fluye a través de los materiales no consolidados que conforman los acuíferos sedimentarios superficiales desde las zonas con mayor elevación hasta las zonas más bajas de la cuenca. En este recorrido el agua subterránea vuelve a aflorar cuando el nivel piezométrico se intersecta con la superficie del terreno dando origen a vertientes, vegas y/o cursos superficiales de agua. En estos afloramientos superficiales parte del agua es evapotranspirada, el resto vuelve a infiltrarse cuando el nivel piezométrico se profundiza con respecto de la superficie del terreno.

Al ser las cuencas objeto de estudio de tipo endorreicas, el agua se concentra en las depresiones donde se encuentran los salares o lagunas saladas como es el caso de la laguna del Negro Francisco. El flujo de agua subterráneo al llegar al salar se encuentra con el domo de agua salada o salmuera del salar con mayor densidad. Como consecuencia de este encuentro el agua proveniente y de menor salinidad aflora a la superficie por flotación formando las vertientes, bofedales y lagunas características en las orillas de los salares.

El agua una vez que ha llegado a los salares se evapora por el gran déficit de humedad que hay en la atmósfera aumentando de forma progresiva su salinidad hasta precipitar sus sales disueltas. Contribuyendo de esta forma a la formación de los salares o laguna salada en su expresión anterior.

En las Figura 3-12 y Figura 3-13 se presentan los modelos hidrogeológicos conceptuales para la cuenca del Salar de Pedernales, y Salar del Maricunga y Laguna del Negro Francisco, respectivamente. En ellas se muestran la dirección de flujos subterráneos, conexiones subterráneas, salidas subterráneas, cuyo detalle se presentan en el informe principal.

Figura 3-11. Esquema simplificado del Modelo Conceptual general

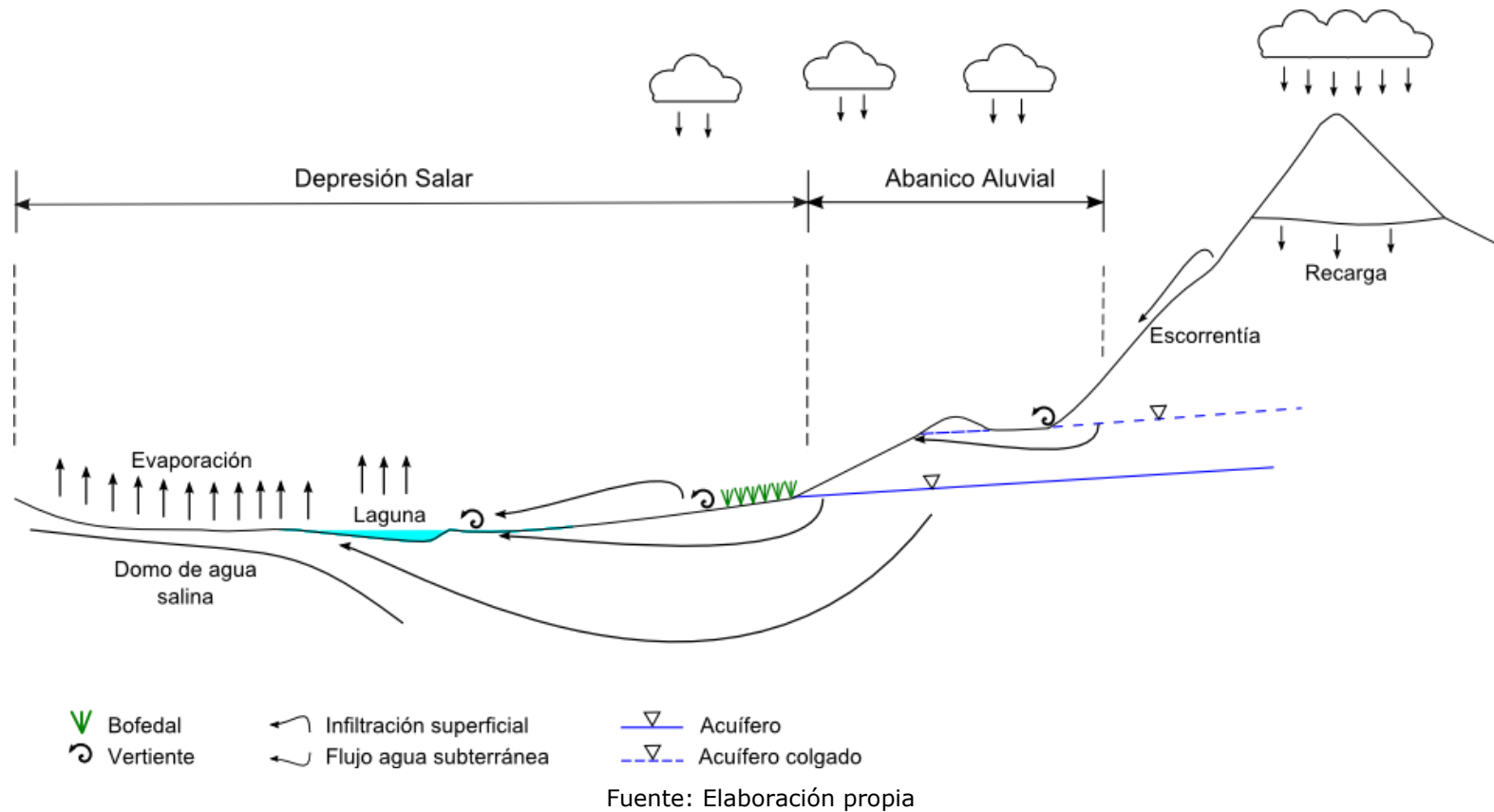
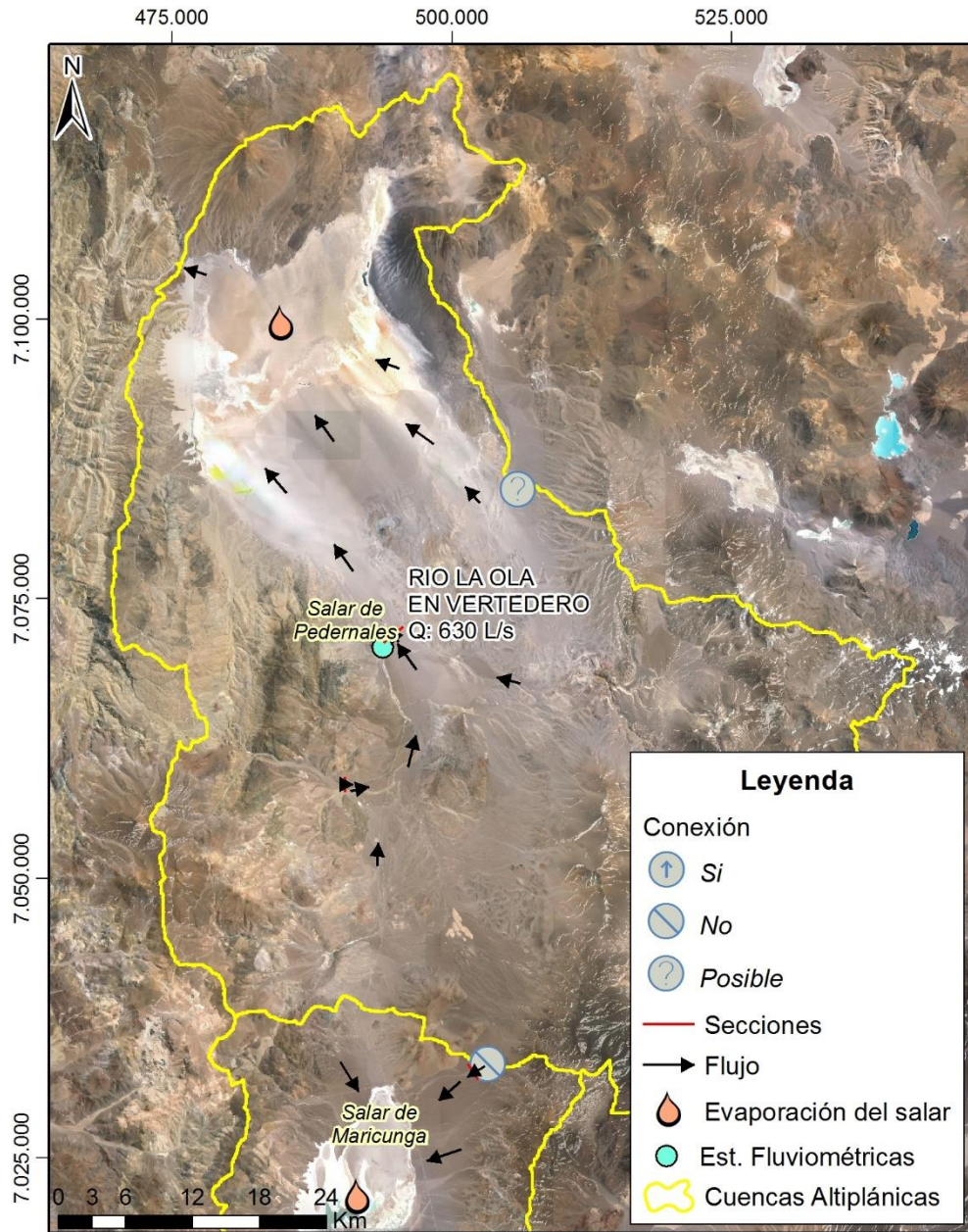
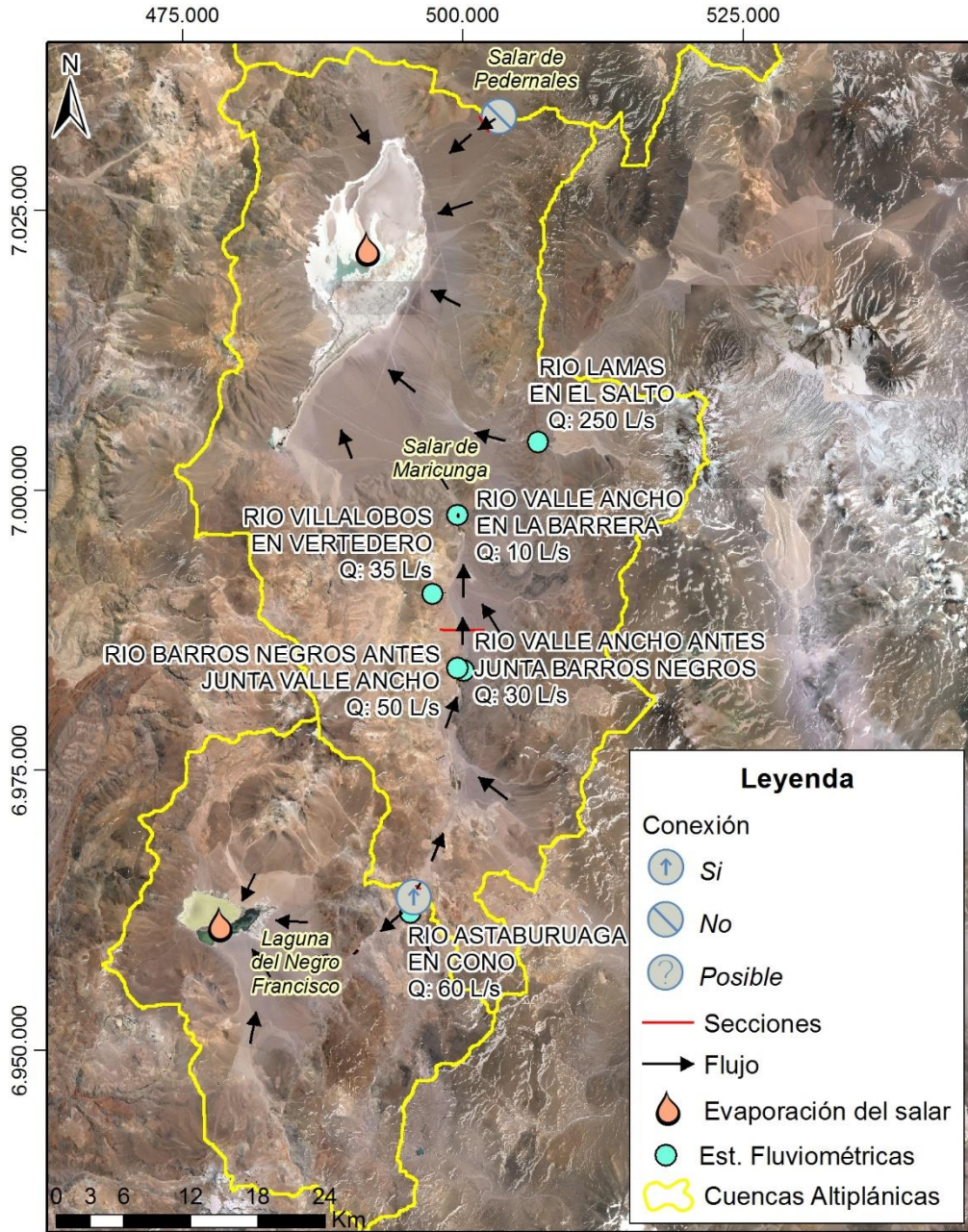


Figura 3-12. Modelo conceptual de la cuenca Salar de Pedernales



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-13. Modelo conceptual Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco



Fuente: Elaboración propia



---

## 4 DISEÑO CONCEPTUAL, FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONOMÍA DE TRASVASE

En el siguiente capítulo se presenta el diseño conceptual preliminar de trasvase desde las cuencas Alto Andinas estudiadas en mayor detalle en este estudio, es decir las cuencas de Pedernales, Maricunga y Laguna del Negro Francisco, hacia la cuenca del río Copiapó.

Debido a la presencia de la cordillera de Domeyko, la cual actúa como elemento divisorio entre las cuencas del salar de Pedernales y la del río Copiapó, se requirió diseñar un sistema de bombeo que permitiera elevar el agua por sobre estas cumbres para luego descargar a la cuenca del río Copiapó.

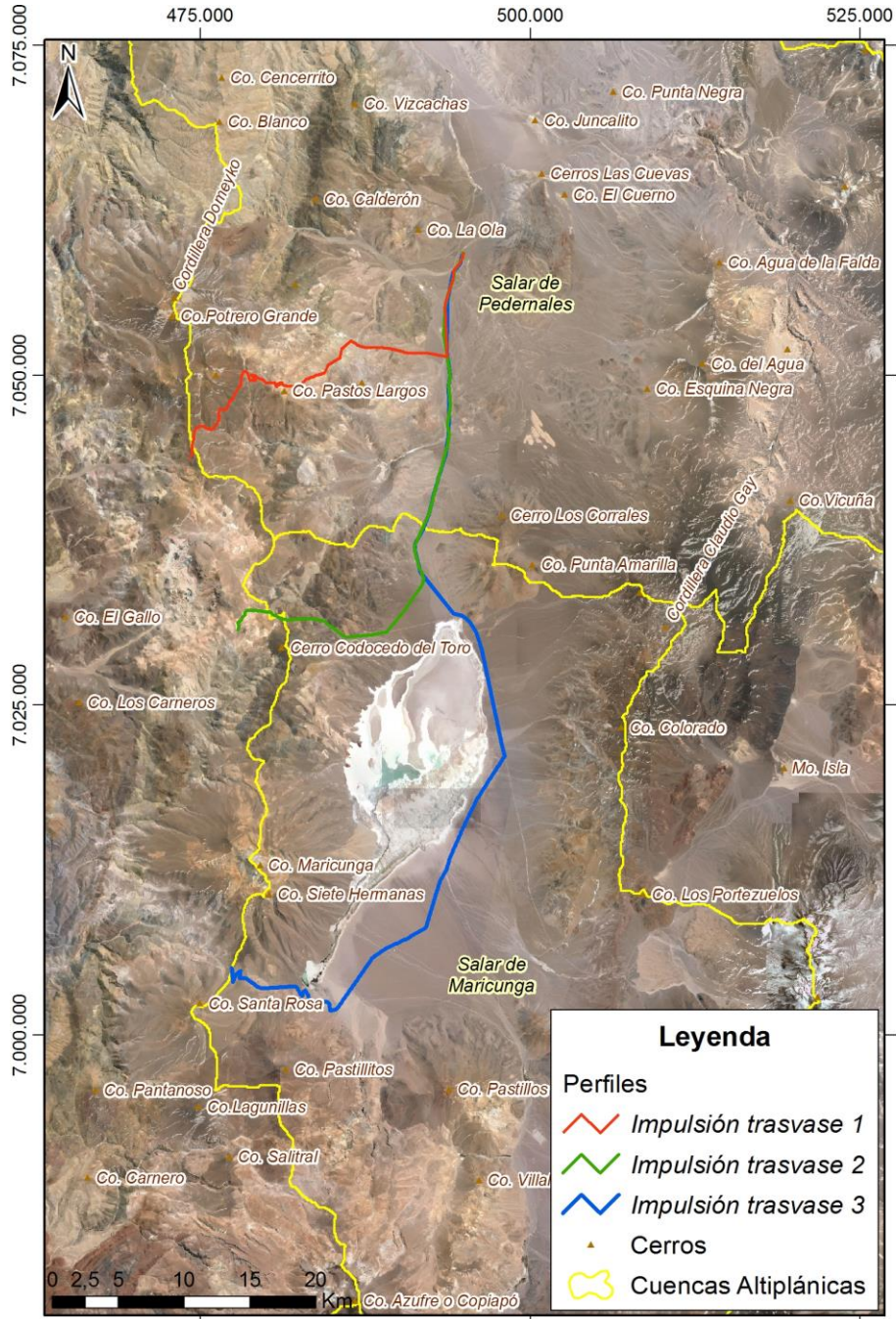
En el presente capítulo se presentan los criterios que se utilizaron para el diseño de trasvase, y las posibles alternativas. El análisis económico en detalle de éstas, se presenta en el informe principal.

Para el diseño de trasvase se siguieron tres criterios:

- Selección de sitio de trasvase, que no intervengan con áreas protegidas, de conservación o sistemas vulnerables. El sitio escogido fue la quebrada Potrero Grande al sur del cerro La Ola y a tres kilómetros al norte de la bifurcación de la ruta C-173 con la ruta C-177, en la cuenca del Salar del Pedernales, donde además se cuenta con simulaciones hidrogeológicas para determinar el potencial de explotación de su acuífero (Luchinger, 2013).
- Disponibilidad hídrica para el trasvase.
- Emplazamiento de las alternativas de trasvase. Se utilizaron los caminos existentes para el emplazamiento sobre terreno de las tuberías de impulsión, de manera de aprovechar sus plataformas para así reducir los costos de instalación y además detectar con mayor facilidad posibles roturas o fugas. De esta manera se identificaron tres alternativas de trasvase

El análisis que se buscó al definir las tres alternativas de trasvase fue un *trade-off* entre una menor longitud de trazado versus un mayor bombeo dada la mayor diferencia de cota. En este sentido la alternativa 1 tiene la menor longitud de trazado, sin embargo tiene la mayor diferencia de cota entre las tres alternativas. El caso opuesto es la alternativa 3 la cual tiene la mayor longitud de trazado pero la menor diferencia de cota. La disposición de las tres alternativas de trasvase se presentan en la Figura 4-1.

Figura 4-1. Disposición de alternativas de trazados de impulsión



Fuente: Elaboración propia

A continuación se describe el trazado de las tres alternativas de trasvase, sus características más relevantes y la potencia requerida para los tres escenarios de bombeo, considerando dos diámetros de tuberías.

- Alternativa de trasvase 1. Considera captar el agua en el sector al sur del cerro La Ola y conducirla ocho kilómetros al sur por la ruta C-173, que conecta el salar de Pedernales con el salar de Maricunga, y luego continuar hacia el poniente por sobre un camino secundario.
- Alternativa de trasvase 2. Contempla captar el agua en el sector de la quebrada Potrero Grande, impulsarla por el borde del camino C-173 hacia el sur por 25 kilómetros, empalmar con el camino internacional 31 Ch, antes de llegar al complejo fronterizo San Francisco, y continuar hacia el poniente hasta cruzar la cordillera de Domeyko.
- Alternativa de trasvase 3. Considera la captación de agua en la quebrada Potrero Grande, para luego conducirla hacia el sur por el costado del camino C-173, empalmar continuar por el camino internacional 31 Ch hasta el cruce con el camino C-601 por donde se dirige hacia el sur poniente bordeando el salar de Maricunga y donde finalmente se direcciona hacia el poniente por el sur de la Laguna Santa Rosa por donde se pasa la cordillera Domeyko

La evaluación económica para comparar las tres alternativas considera varios supuestos que podrían estar sujetos a cambios, en la medida que se tenga mayores antecedentes e información de terreno que se pueda procesar. Tampoco se consideraron en los costos muchas obras las cuales para efectos de este análisis no correspondía, pero que podrían tener alguna repercusión en los resultados finales de rentabilidad. Es por esta razón que se aconseja considerar los resultados de rentabilidad como referenciales solamente y precisar la evaluación con mayores datos.

Dado que se trata de un diseño conceptual preliminar, se consideraron las partidas más relevantes en términos de costos para el análisis económico. Dado lo anterior se estimó como costo de inversión el suministro, construcción y montaje del sistema de bombeo y de la tubería de impulsión. Por otro lado, se consideraron como costos anuales, los costos de operación y mantención del sistema de bombeo. Los costos se estiman para cuatro caudales de bombeo (50, 100, 200 y 300 L/s), y en la Tabla 4-1 se presentan los asociados a uno de 200 L/s.

Tabla 4-1. Costos de inversión del sistema de trasvase para bombeo de 200 L/s

Item	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Sistema de bombas 800 HP (5)	USD	2.721.600	2.268.000	2.268.000
Tubería de impulsión acero 16"	USD	15.902.055	36.194.632	70.955.676
Tubería de aducción HDPE ø355	USD	27.378.432	27.378.432	27.378.432
<b>Total Inversión</b>	<b>USD</b>	<b>46.002.087</b>	<b>65.841.064</b>	<b>100.602.108</b>
<b>Operación y mantención</b>	<b>USD/año</b>	<b>3.071.615</b>	<b>2.572.165</b>	<b>2.572.165</b>

Fuente: Elaboración propia

## 5 CONCLUSIONES

En las campañas de terreno vinculadas a este trabajo se instalaron un total de 11 lisímetros de carga variable para la medición de la evaporación en función de la profundidad del nivel freático. Asimismo, la ubicación de los lisímetros y los componentes relevantes que los conforman fue determinada mediante un levantamiento topográfico con GPS diferencial. Cada lisímetro aportará información de calidad para la determinación de la curva evaporación con respecto a la profundidad de la napa. Cada uno tiene asociado sensores que permiten el registro de la precipitación, temperatura del aire y profundidad del nivel freático.

En el Parque Nacional Nevado Tres Cruces se instaló una estación meteorológica con las características necesarias para que sea incorporada a la red hidrometeorológica de la DGA. La estación cuenta con un sistema de transmisión satelital de los parámetros registrados.

En la zona de estudio se levantó información de 100 estaciones TEM, las que se agruparon en 16 perfiles: 11 perfiles en la cuenca Laguna del Negro Francisco y 5 perfiles en la cuenca del Salar de Maricunga.

Se catastraron un total de 53 pozos de los cuales se obtuvieron 42 mediciones de nivel, prácticamente todos localizados en la cuenca del Salar de Pedernales. Asimismo se obtuvo un total de 58 muestras para análisis químico y 50 muestras para análisis isotópico de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ , en las tres cuencas de mayor interés. El origen de las muestras comprende pozos, vertientes y aguas superficiales

El gran nivel de incertidumbre en los conceptos básicos del balance hídrico tales como la precipitación, recarga y evapotranspiración hace que las estimaciones realizadas hasta la fecha tengan valor referencial. La instalación de los 11 lisímetros y la estación meteorológica serán de gran ayuda, para obtener datos valiosos para la cuantificación de estos parámetros, mejorando así las herramientas necesarias para una buena gestión hídrica.

Si bien para la estimación de la recarga se utilizó una metodología simplificada, complejizar el método no asegura una mayor precisión en la estimación de la recarga, dada la incertidumbres en la estimación de la oferta hídrica de las cuencas estudiadas, por la falta de información local. Resulta fundamental mejorar la estimación de las precipitaciones, tanto líquidas como sólidas, para mejorar la estimación del balance hídrico.

El análisis hidroquímico indica que las muestras de las tres cuencas estudiadas, corresponden en general a aguas neutras a ligeramente alcalinas. La composición general de las aguas analizadas corresponde, en gran parte, a muestras superficiales y principalmente subterráneas del tipo cloruradas sódicas, con participación de aguas superficiales que corresponden a aguas bicarbonatadas, sulfatadas e intermedias.

La cuenca Salar de Pedernales tiene un predominio clorurado sódico, mientras que en las cuencas Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco hay un repartimiento de aguas con baja salinidad de composición bicarbonatada y sulfatada que se salinizan cloruradamente al acercarse a las zonas de evaporación como salares y lagunas.

El análisis hidroquímico apoya la hipótesis de conexión entre las cuencas Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco en la zona más al norte del río Astaburuaga.

Los resultados isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  muestran la existencia de dos ambientes de recarga distintos, uno correspondiente a las zonas más altas de las cuencas con un ambiente mucho más frío y húmedo, y otro de menor altitud y mayor temperatura. El gran rango de altitudes dificulta la separación de las muestras por su composición isotópica de la molécula del agua, entre las cuencas de Salar de Pedernales y Laguna del Negro Francisco. No obstante sí se observa una diferencia en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en la cuenca Salar de Maricunga la cual queda isotópicamente entre las otras dos.

El análisis hidrogeológico realizado confirma que hay una conexión subterránea entre las cuencas Laguna del Negro Francisco y Salar de Maricunga en la zona de Pantanillo, con un flujo de norte a sur de entre 60 y 80 L/s. A partir de la información geofísica levantada en el norte de la cuenca Salar de Maricunga se ha desestimado la existencia de flujo subterráneo entre ésta y la cuenca Salar de Pedernales. A partir de la piezometría realizada en Salar de Pedernales se observa que hay un gradiente hidráulico hacia la cuenca de La Laguna; este hecho indicaría un posible flujo entre estas dos cuencas cuya magnitud se desconoce.

Para el diseño conceptual de trasvase se definió el mejor sitio que permitiera un trasvase de agua hacia la cuenca del río Copiapó, el cual no interfiriera con el Parque Nacional Nevado Tres Cruces ni con el sitio RAMSAR y su corredor biológico Ciénaga Redonda Pantanillo.

Se analizaron tres alternativas de trasvase, cada una para cuatro condiciones de bombeo, los cuales buscaron un *trade-off* entre una menor longitud de trazado versus un mayor bombeo dada la mayor diferencia de cota.

La rentabilidad económica del proyecto de trasvase se determinó estimando los costos de inversión, operación y mantención, en contraposición a los beneficios del sistema por la venta del agua. Los resultados de la evaluación económica son variados dependiendo de qué alternativa y escenario de bombeo se haya considerado. En términos generales, los resultados económicos indican que es más recomendable tener un mayor caudal de trasvase para que la venta del agua sea mayor a la inversión en la infraestructura de bombeo. Además también se concluyó que es mejor tener una impulsión con un trazado menor y una diferencia de altura mayor a que exista un trazado de longitud mayor y diferencia de cotas menor.