

PROVINCIA DE CATAMARCA

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (CFI)

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO CUENCA RÍO DE LOS PATOS - SALAR  
DEL HOMBRE MUERTO

**INFORME FINAL**

TOMO I

DICIEMBRE DE 2019

CONHIDRO S.R.L. – Coordinador Geól. Esteban Tálamo

## INDICE

I.	RESUMEN EJECUTIVO.....	8
II.	INTRODUCCIÓN.....	9
II. 1 -	Justificación.....	9
III.	OBJETIVOS.....	12
IV.	METODOLOGÍA.....	13
V.	PRINCIPALES ANTECEDENTES RELEVADOS.....	17
VI.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	20
V.1 -	GEOLOGÍA.....	21
V.1.1 -	Estratigrafía.....	23
V.1.2. -	Estructuras.....	38
V.1.3. -	Geomorfología.....	42
V.2 -	HIDROGEOLOGÍA.....	48
V.2.1 –	Consideraciones generales.....	48
V.2.2 -	Características climáticas.....	48
V.2.3 -	Hidrología superficial.....	50
V.2.4 -	Hidrología subterránea.....	53
V.2.5 –	Hidroquímica.....	77
VII.	RELEVAMIENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO.....	81
V.1-	Relevamiento de formas y geoformas de interés hidrogeológico...	81
V.2 -	Relevamiento de manantiales y humedales.....	86
Humedales.....		86
Manantiales.....		90
V.3 -	Relevamiento, identificación y geoposicionamiento de perforaciones existentes.....	93
V.4 -	Medición de niveles piezométricos.....	99
V.5 -	Medición de caudales superficiales.....	102
VIII.	PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....	106
VI.1	Descripción del método del SEV.....	106
VI.2	Introducción.....	109

VI.3 Dispositivos e instrumental empleados.....	110
VI.4 Tareas realizadas.....	113
VI.5 Interpretación de resultados.....	115
VI.6 Confección de perfiles geofísicos.....	121
Perfil Geoeléctrico A-A'.....	126
Perfil Geoeléctrico B-B'.....	128
Perfil Geoeléctrico C-C'.....	130
Perfil Geoeléctrico D-D'.....	132
Perfil Geoeléctrico E-E'.....	134
Perfil Geoeléctrico F-F'.....	136
Perfil Geoeléctrico G-G'.....	138
Perfil Geoeléctrico H-H'.....	140
Perfil Geoeléctrico I-I'.....	142
Perfil Geoeléctrico J-J'.....	144
Perfil Geoeléctrico K-K'.....	146
Perfil Geoeléctrico L-L'.....	148
Perfil Geoeléctrico M-M'.....	150
Perfil Geoeléctrico N-N'.....	152
IX. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	154
X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	157
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	163
XII. EQUIPO DE TRABAJO.....	167
XIII. ANEXOS.....	168

## Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación general de la zona de estudio .....	10
Figura 2: Mapa geológico regional (en Conhidro, 2016). .....	22
Figura 3: Mapa geológico de la cuenca del río Los Patos, modificado en este trabajo, de Hoja Geológica Cachi (2566-III) y Vinante, 2003. ....	47
Figura 4: Precipitaciones medias mensuales en el Campamento Fénix (Conhidro, 2016). .....	49
Figura 5: Temperaturas medias mensuales en el Campamento Fénix (Conhidro, 2016). .....	50
Figura 6: Hidrograma del río Los Patos (Minera del Altiplano, 1992 – 1998). (Conhidro, 2016). .....	52
Figura 7: Comparación de áreas entre la cuenca hidrográfica y el Sistema Acuífero Los Patos (SALP). .....	56
Figura 8: Plataformas de Pozos y Piezómetros construidos en el año 2017 (rojo) y las Plataformas de Pozos y Piezómetros efectuados durante el 2018 (amarillo). .....	58
Figura 9: Registros eléctricos y litología pozo piezométrico Pz-LP-03 (Conhidro, 2019). .....	61
Figura 10: Características constructivas Pz-LP-03 (Conhidro, 2019). ...	62
Figura 11: Registros eléctricos y litología pozo de bombeo PB-LP-03 (Conhidro, 2019). .....	63
Figura 12: Características constructivas PB-LP-03 (Conhidro, 2019). ..	64
Figura 13: Registros eléctricos y litología pozo de bombeo SVWF12-19 (Conhidro, 2012). .....	69
Figura 14: Características constructivas del pozo de bombeo SVWF12-19 (Conhidro, 2012). .....	70
Figura 15: Registros eléctricos y litología pozo de bombeo SVWF12-20 (Conhidro, 2012). .....	71
Figura 16: Características constructivas del pozo de bombeo SVWF12-20 (Conhidro, 2012). .....	72
Figura 17: Registros eléctricos y litología pozo de SVWW18-25 (Conhidro, 2018). .....	74
Figura 18: Características constructivas del pozo SVWW18-25 (Conhidro, 2018). .....	75
Figura 19: Características constructivas del pozo SVWW18-26 (Hidroper, 2018). .....	76
Figura 20: Ubicación de puntos de mediciones de conductividad eléctrica, temperatura y aforo en el río Los Patos. (Conhidro, 2016). .....	78
Figura 21: Diagrama ternario de Piper. ....	79
Figura 22: Diagrama comparativo de Stiff. ....	80
Figura 23: Cono y delta de la desembocadura del río Los Patos. ....	82



Figura 24: Mapa geológico de detalle, en el entorno del Sistema Acuífero Los Patos, modificado en este trabajo, de Hoja Geológica Cachi (2566-III) y Vinante, 2003. ....	85
Figura 25: Teledetección de Humedales para el mes de Mayo realizado por EC&Asociados, (2018). ....	89
Figura 26: Teledetección de Humedales para el mes de Diciembre realizado por EC&Asociados, (2018). ....	90
Figura 27: Ubicación de las perforaciones relevadas durante los trabajos de campo. ....	96
Figura 28: Mapa piezométrico en sector de Batería de pozos de Livent. ....	101
Figura 29: Mapa de ubicación de las 5 estaciones de Aforo. ....	102
Figura 30: Circuito de emisión y recepción. ....	107
Figura 31: Líneas de corriente y equipotenciales en una vista en planta, generadas por dos electrodos conectados en superficie. ....	107
Figura 32: Dispositivo Schlumberger (visto en planta) ....	109
Figura 33: : Representación en gráfico bilogarítmico de la curva de campo empalmada (en negro) y la curva de interpretación optimizada que responde al modelo físico – matemático mas ajustado (en rojo). En azul se representa el modelo geoelectrico con las resistividades verdaderas y las profundidades. ....	113
Figura 34: Mapa de ubicación de SEV antecedentes y los realizados en este proyecto. ....	114
Figura 35: Mapa de ubicación de trazas de perfiles geoelectricos. ....	122
Figura 36: Mapa de ubicación de trazas y SEV en Zona Norte. ....	123
Figura 37: Mapa de ubicación de trazas y SEV en Zona Centro. ....	124
Figura 38: Mapa de ubicación de trazas y SEV en Zona Sur. ....	125
Figura 39: Perfil Geoelectrico A-A' ....	127
Figura 40: Perfil Geoelectrico B-B' ....	129
Figura 41: Perfil Geoelectrico C-C' ....	131
Figura 42: Perfil Geoelectrico D-D' ....	133
Figura 43: Perfil Geoelectrico E-E' ....	135
Figura 44: Perfil Geoelectrico F-F' ....	137
Figura 45: Perfil Geoelectrico G-G' ....	139
Figura 46: Perfil Geoelectrico H-H' ....	141
Figura 47: Perfil Geoelectrico I-I' ....	143
Figura 48: Perfil Geoelectrico J-J' ....	145
Figura 49: Perfil Geoelectrico K-K' ....	147
Figura 50: Perfil Geoelectrico L-L' ....	149
Figura 51: Perfil Geoelectrico M-M' ....	151
Figura 52: Perfil Geoelectrico N-N' ....	153

## Índice de Tablas

Tabla 1: Espesores de facies modernas en proyecto Candelas.....	67
Tabla 2: Rendimientos específicos y calidad del agua obtenidos en los pozos SVWF12-19 y SVWF12-20.....	68
Tabla 3: Puntos de mediciones de conductividad eléctrica y temperatura del río Los Patos (Conhidro, 2016).....	77
Tabla 4: Enumeración e identificación de las perforaciones censadas.	97
Tabla 5: Niveles estáticos y cotas piezométricas de perforaciones.....	99
Tabla 6: Resultados obtenidos en los puntos de Aforo. ....	104
Tabla 7: Parámetros físico-químicos del agua medidos en cada punto de aforo.....	104

## Índice de Cuadros

Cuadro 1: Ejemplo de Interpretación geológica de de un Sondeo Eléctrico Vertical. ....	115
Cuadro 2: Interpretación de los 42 Sondeos Eléctricos Verticales realizados en el marco de este proyecto, identificados como CFI. ....	116
Cuadro 3: Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro SRL (2016) en Servidumbre 1, utilizados en este trabajo e identificados como SEV. ....	118
Cuadro 4: Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro SRL (2016) en Servidumbre 2, utilizados en este trabajo e identificados como FMC.....	118
Cuadro 5: Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro SRL (2012), utilizados en este trabajo e identificados como SG. ....	120

## Índice de Fotografías

Foto 1: Aspecto de afloramientos de una terraza fluvial en margen derecha del río Los Patos. ....	81
Foto 2: Muestras de cutting de una perforación exploratoria de 100 metros en zona de Batería de Livent.....	82
Foto 3: Izq: Vista del volcán Cerro Redondo, conformado por dacitas y andesitas de la Formación Tebenquicho. Derecha: pequeño afloramiento de la Fm. Tebenquicho en el valle fluvial del río Los Patos.....	83
Foto 4: Aspecto de afloramientos de ignimbritas (surges basales) muy fracturadas en margen izquierda del río Los Patos. Sobreyacen facies de coladas piroclásticas soldadas. ....	83
Foto 5: Detalle de afloramientos de ignimbritas (surges basales) muy fracturadas, en margen izquierda del río Los Patos. ....	84

Foto 6: Detalle de afloramientos de ignimbritas (facies de coladas piroclásticas soldadas), en ambas márgenes del río Los Patos Aguas Calientes.	84
.....	
Foto 7: Zona de lagunas en margen izquierda del río Los Patos. ....	91
Foto 8: “Laguna del Potasio”, ubicada en margen izquierda del río Los Patos.....	91
Foto 9: Lodos termales con escape de gases.....	92
Foto 10: Determinación de cotas en el entorno de una perforación. ....	94
Foto 11: Determinación de cotas en el entorno del río Los Patos. ....	95
Foto 12: Relevamiento de perforaciones en proyecto Livent.....	97
Foto 13: Relevamiento de perforaciones en proyecto Candelas. ....	98
Foto 14: Relevamiento de perforaciones en proyecto Sal de Vida. ....	98
Foto 15: Relevamiento de perforaciones en proyecto Livent.....	98
Foto 16: medición de nivel estático durante el censo de perforaciones.	
.....	100
Foto 17: Aforo (A2) en Río Aguas Calientes. ....	103
Foto 18: Aforo (A1) en Río Los Patos. ....	103
Foto 19: Aforo (A3) en Río Los Patos, zona batería pozos Livent.....	104
Foto 20: Medición de parámetros físico-químicos del agua. ....	105
Foto 21: Aforo Medición de parámetros físico-químicos del agua en laguna Potasio (izq) y río Los Patos (der). ....	105
Foto 22: Equipo resistivímetro (izq,) y carreteles de cable de corriente (der.).....	110
Foto 23: Equipo resistivímetro, grupo electrógeno y conversor de corriente.....	111
Foto 24: Electrodo de corriente (izq,) y electrodo de potencial (der.)... ..	111
Foto 25: Instalación de electrodos en dispositivo tertapolar Schlumberger.....	112
Foto 26: Realización de un SEV próximo a perforación proyecto Candelas.....	112

## I. RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe ha logrado recopilar los principales antecedentes técnicos e información de interés hidrogeológico, existentes en el ámbito de la cuenca del Río Los Patos, permitiendo obtener algunos datos claves de los diferentes medios de circulación del agua subterránea, que conforman el Sistema Acuífero Los Patos (SALP).

Esta información de subsuelo, sumada a los antecedentes de estudios geofísicos realizados tanto para exploración minera como hidrogeológica, permitió diagramar una campaña de prospección geofísica (geoeléctrica) complementaria, añadiendo datos en aquellos sitios donde la cantidad era insuficiente.

La realización de un censo integral de perforaciones en el ámbito de la cuenca, permitió la real identificación y geoposicionamiento de los pozos que, por antecedentes, existían en la zona de estudio. La obtención de cotas piezométricas y datos de calidad del agua obtenida en cada caso, permitió elaborar algunas hipótesis del modelo hidrogeológico conceptual de la zona.

La caracterización hidrogeológica preliminar del área y la información geológica de subsuelo lograda tras la interpretación integrada de los datos de perforaciones y perfiles geofísicos, permitieron recomendar acciones tendientes a develar algunos aspectos claves de los medios de circulación del agua subterránea, en pos del objetivo general del proyecto, que es el de establecer un modelo conceptual y numérico del SALP.

Una gran contribución de esta Primera Etapa en el marco de la problemática general y objetivos mayores del proyecto, fue la integración de los datos antecedentes y de aquellos obtenidos en el presente proyecto, en un Sistema de Información Geográfica, que forma parte del presente informe y que estará a disposición de las autoridades de la Provincia de Catamarca.

## II. INTRODUCCIÓN

### II. 1 - Justificación

La cuenca del río de Los Patos, se desarrolla en la Puna Argentina drenando territorios pertenecientes a las provincias de Catamarca y Salta, descargando sus aguas en el imponente salar del Hombre Muerto, desarrollado casi en su totalidad en territorio catamarqueño (Figura 1). Este sistema fluvial, cuya red hidrográfica se extiende por una superficie de casi 2000 km<sup>2</sup>, constituye un importante componente paisajístico – ambiental de la región, siendo soporte y sustento de ecosistemas frágiles y constituyendo una de las principales fuentes de agua dulce de la Puna Austral Argentina.

El salar del Hombre Muerto, constituye una cuenca endorreica, surcada por rocas de origen variado, pero con una importante historia de vulcanismo, desarrollado en un “plateau” de más de 3500 msnm. Esta particularidad, impone un clima árido a muy árido, con una extraordinaria tasa de evaporación, lo que sumado al endorreísmo, genera sistemas de acumulación y evaporación de las aguas, logrando en el tiempo geológico la formación de salares. El quimismo de las aguas y los aportes hidrotermales introdujeron en estos sistemas concentraciones importantes de algunos elementos tales como el Boro, Litio, Potasio, etc., los cuales se explotan en varios salares de la Puna Argentina. El Salar del Hombre Muerto, posee proyectos que explotan el mineral ulexita (borato de calcio y sodio hidratado) y también el litio, obtenido a través de sus salmueras. La industria de este último elemento, se desarrolla en el mismo salar, requiriendo una dotación de agua dulce o “fresca” para los procesos de obtención de carbonato de litio.



Figura 1: Ubicación general de la zona de estudio

La actualidad y relevancia estratégica mundial que tiene el Litio, ha generado una importante etapa de exploración por parte de otras empresas que pretenden también explotar las salmueras enriquecidas. Esta actividad potencial, introduce también un “potencial” requerimiento de agua dulce, siendo el río de Los Patos y su sistema, la principal fuente apuntada por todos los proyectos.

El Estado Provincial, por mandato constitucional, debe velar por sus recursos hídricos y necesita contar con la información técnica suficiente que justifique la concesión de uso de agua pública (superficial o subterránea), la modalidad y régimen de explotación y que le permita desarrollar las estrategias de control y monitoreo de las fuentes.

Este esquema de control estatal, en una cuenca que se emplaza en un ambiente árido, que soporta ecosistemas frágiles y ante una demanda actual y potencial de agua dulce por parte de los proyectos mineros, dieron origen a el presente estudio que apunta a lograr la información necesaria para entender su funcionamiento (modelo conceptual), su variabilidad anual e interanual, su balance hídrico, etc.

El proyecto integral del estudio Hidrogeológico planteado a la provincia, aborda aspectos claves como: geología y geomorfología, climatología, información hidrológica básica, relación agua superficial - agua subterránea, calidad de las aguas, recarga de acuíferos, zona de mezcla de agua dulce con la salmuera en el salar, escenarios posibles de explotación y respuesta posible de los sistemas hídricos y ecológicos.

En esta primera etapa, se avanza sobre la recopilación, análisis y sistematización de la información de interés, reconocimiento de campo con censo e inventario de las perforaciones existentes, aforos en sitios claves de la cuenca y la realización de una exploración geofísica complementaria a la existente, que permitirá definir la geometría del acuífero de agua dulce para futuros modelos numéricos hidrogeológicos. Toda la información recopilada y/o generada, se sintetiza en un Sistema de Información Geográfica (GIS), para una mejor administración y uso.

### III. OBJETIVOS

Los principales objetivos del Estudio Hidrogeológico Cuenca Rio de Los Patos – Salar Del Hombre Muerto, en su versión Integral, son:

- Realizar un modelo conceptual de funcionamiento (regional y local) del sistema acuífero,
- Determinar la recarga del mismo con la menor incertidumbre posible (reservas de agua y potencial de uso),
- Elaborar un balance de masas
- Elaborar modelos numéricos de simulación de usos que serán una herramienta de gestión del recurso hídrico para las autoridades provinciales.
- Establecer una red estratégica de pozos y puntos de muestreo que sirva para el monitoreo de los niveles piezométricos y de la calidad del agua
- Capacitar y fortalecer el desempeño técnico de la Dirección de Hidrología y Evaluación de los Recursos Hídricos Provincial en materia de Gestión de Acuíferos.

Los objetivos particulares de esta primera etapa del Estudio Hidrogeológico son:

- Conocer en detalle la zona a partir de la recopilación, organización e interpretación de la información antecedente.
- Caracterizar geológicamente el subsuelo en el área de la futura modelación, sobre la base de un relevamiento geológico e hidrogeológico del área de estudio, y de la realización de una campaña de prospección geofísica.
- Censar y relevar las perforaciones existentes dentro de la cuenca.
- Determinar la ubicación y alcance de futuras perforaciones de exploración.
- Elaborar un Sistema de Información Geográfica para que las autoridades provinciales puedan acceder y administrar la información recopilada y generada en el presente trabajo.



## IV. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este informe es la que se encuentra incluida dentro de los términos de referencia del contrato.

### 1. Recopilación, organización e interpretación de información antecedente

Se llevó a cabo una recopilación, organización e interpretación de la información antecedente de los aspectos geológicos, hidrogeológicos, hidrológicos, hidroquímicos y meteorológicos. Como resultado de esta tarea se logró una caracterización bibliográfica del área de estudio enfocada en los aspectos relevados. Esta información además fué procesada y cargada en una base de datos digital y cartográfica en formato SIG libre (ej.: QGIS) y compatible con formatos digitales que actualmente utiliza la provincia y que podrá ser actualizada por la misma con su propia información.

La información fue recopilada de los organismos provinciales como Secretaría de Estado de Minería (SEM) y la Subsecretaría de Planificación del Ministerio de Obras Públicas (MOP), como así también de las empresas que explotan o exploran recursos mineros en el área de influencia del presente proyecto.

En la SEM se encuentran los estudios de base ambiental de todos los proyectos mineros que han explorado el entorno del salar del Hombre Muerto y de Minera del Altiplano, única empresa que actualmente produce sales de Litio en la provincia.

En estas reparticiones se pudo adquirir información general de la climatología e hidrología del sector, como así también información geológica de superficie y de subsuelo (prospecciones geofísicas y perforaciones). También se relevó la información existente en los archivos de nuestra empresa (CONHIDRO SRL) y toda aquella de acceso público (hojas Geológicas, topográficas, etc.).

### 2. Tareas de gabinete

En gabinete se realizó el procesamiento de toda la información generada en la Tarea 1 y en las actividades de Relevamiento Geológico e Hidrogeológico, Censo de Perforaciones y Prospección Geofísica. Se generó la cartografía básica y la específica, todo en el marco del SIG. También se

elaboraron los perfiles geofísicos, luego de la interpretación de cada SEV con softwares específicos.

### 3. Tareas de campo

#### A. Relevamiento geológico e hidrogeológico

Se llevó a cabo un censo de los pozos perforados existentes en la zona de estudio, como así también de manantiales o humedales y de todo antecedente que se consideró con interés o valor hidrogeológico. Para esta tarea se utilizó un sistema de Posicionamiento Satelital portátil, censándose las características constructivas visibles (material de la cañería, diámetro, altura sobre el terreno, acceso a mediciones de niveles piezométricos, etc.).

Se relevaron los afloramientos de rocas que dan contorno o borde a los materiales aluviales del sistema Los Patos. Esta información se realizó sobre una interpretación previa de la geología basada en datos antecedentes y en la Hoja Geológica 2566-III, CACHI del Servicio Geológico Minero Argentino – SEGEMAR.

La Provincia, a través del MOP, realizó un relevamiento plani-altimétrico de los pozos y de algunos puntos de control del pelo de agua libre del río Los Patos y de algunas referencias geomorfológicas que resultaban de interés para la confección de mapas temáticos.

En esta etapa se realizaron 5 aforos, para estimar algunos balances de agua superficial al momento del relevamiento de campo. Para ello se utilizó molinete hidrométrico para el cálculo de velocidades y se tomaron secciones medias para el cálculo del caudal. En cada sitio de aforo se realizó una medición in situ de parámetros físico-químicos del agua, tales como pH, EH, Conductividad Eléctrica y Temperatura del agua del curso fluvial.

#### B. Prospección geofísica

Se realizó una prospección geoeléctrica con el método del SEV (Sondeos Eléctricos Verticales) para investigar los primeros 300 m.b.n.s (metros bajo nivel de superficie), según la respuesta eléctrica de cada sitio.

Se ejecutaron 42 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), cada uno con una extensión de alas promedio de 800 metros, distribuidos de manera tal de complementar los SEV pre-existentes realizados por nuestra empresa en trabajos anteriores.

Luego de interpretar cada SEV se trazaron 14 perfiles transversales con orientación oeste – este, distanciados convenientemente, para mostrar las variaciones del subsuelo a lo largo del valle fluvial.

La descripción del método geofísico empleado y del instrumental utilizado se realiza en un apartado especial del presente informe.

#### 4. Generación de base de datos SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) o GIS en la denominación inglesa (Geographic Information Systems) constituyen una herramienta tecnológica de extraordinaria utilidad en la gestión territorial, sobre todo cuando se conocen en profundidad y se utilizan tal como se puede manejar un procesador de texto o una hoja de cálculo. Estos sistemas son el resultado de múltiples desarrollos metodológicos e informáticos procedentes de muy diversas disciplinas, tales como los modelos ecológicos, sistema de cartografía automática, bases de datos, modelos urbanos y territoriales, etc., con la idea común de crear una herramienta pluridisciplinaria que posibilite una gestión de los datos geográficos con sistemas informáticos sin perder las particulares relaciones espaciales entre los datos geográficos.

Éste tiene la capacidad de efectuar una gestión completa de datos referenciados geográficamente. Por datos referenciados se indica a los datos geográficos o mapas que constan de coordenadas geográficas reales asociadas, así como de datos alfanuméricos descriptivos que se asocian a esos mapas para formar a una base de datos integrada con este concepto de S.I.G.

##### Componentes de un S.I.G.

Para garantizar el éxito en la implementación de un Sistema de Información Geográfica, debemos considerar que en su diseño intervienen cinco componentes que, para simplificar denominaremos: HARDWARE, SOFTWARE, DATOS, PROCEDIMIENTOS y RECURSOS HUMANOS.

Por lo expuesto, toda la información disponible y aquella generada durante la ejecución del presente proyecto se organizará por medio de S.I.G. (Sistema de Información Geográfica), siendo los principales objetivos de:

- Presentar los datos antecedentes sistematizados a través del empleo de una herramienta de software tipo S.I.G. de manera tal que permita realizar observaciones de tipo geológica e hidrogeológica.

- Presentar la actualización del S.I.G. de la Cuenca de Los Patos con los datos generados por la Consultora Hidrogeológica CONHIDRO S.R.L. en sus aspectos geológicos, geofísicos e hidroquímicos, sumados a todos los datos que se adquieran durante la etapa correspondiente.

- Presentar las cartas temáticas elaboradas con QGIS, que representen los distintos componentes del medio físico y elementos de ubicación, a través de las distintas capas que componen el S.I.G.

## V. PRINCIPALES ANTECEDENTES RELEVADOS

Se lista a continuación los principales antecedentes de informes técnicos recopilados hasta el presente:

- VES Survey Salar del Hombre Muerto, Realizado por GEC en el 2010 para el proyecto Sal de Vida. Se presentan resultados de un programa de prospección geoelectrica con el método del SEV (Sondeo Eléctrico Vertical) en distintos sectores del Salar del Hombre Muerto, señalando sectores y facies con posibilidades de almacenar agua apta para procesos industriales.
- Geología Y Recursos Hídricos Del Proyecto Sal de Vida, Salar Del Hombre Muerto, Provincia De Catamarca y Salta, 2012. Efectuado por CONHIDRO S.R.L. para Lithium 1 S.R.L. El objetivo fue el de caracterizar los recursos hídricos y poder estimar la potencialidad del reservorio en el entorno de la empresa. El trabajo se realizó analizando una gran cantidad de antecedentes relacionados a la hidrología, geología, hidroquímica. Se emplearon métodos geofísicos como estudios complementarios para una caracterización hidrogeológica integral de la zona de estudio.
- Informe Final Pozo Del SVWF12-19 Salar Del Hombre Muerto, Provincia de Catamarca, Realizado por CONHIDRO SRL en el año 2012 para Galaxy – Lithium 1. El informe presenta la información de registros litológicos, de cronometrajes y perfilajes geofísicos, comportamiento hidráulico con el análisis de un ensayo escalonado, y muestreo hidroquímico del pozo.
- Informe Final Pozo Del SVWF12-20 Salar Del Hombre Muerto, Provincia de Catamarca, Realizado por CONHIDRO SRL en el año 2012 para Galaxy – Lithium 1. El informe presenta la información de registros litológicos, de cronometrajes y perfilajes geofísicos, comportamiento hidráulico con el análisis de un ensayo escalonado, y muestreo hidroquímico del pozo.
- Estudio hidrogeológico río Los Patos, Salar del Hombre Muerto, Provincia de Catamarca, diciembre de 2016, realizado por CONHIDRO para minera el Altiplano - FMC. El objetivo de este estudio fue caracterizar el ambiente geológico y los recursos hídricos superficiales y subterráneos existentes en la zona de

influencia del área de servidumbre de agua que cuenta minera del Altiplano en el valle fluvial del río Los Patos (dos zonas posibles). Para cumplir el objetivo se realizaron estudios hidrológicos e hidrogeológicos tales como toma de muestras superficiales, aforos de cursos superficiales, estudios geofísicos (método del SEV), hidroquímicos, etc.

- Informe Final Batería De Pozos Río Los Patos, Salar del Hombre Muerto, Departamento Antofagasta de La Sierra, Provincia de Catamarca, enero de 2017. Se presenta la información técnica referida a la batería de pozos en el sector del valle fluvial del río Los Patos realizada por CONHIDRO en el 2017 para Livent – Minera del Altiplano S.A.. Se construyeron 3 pozos de bombeos (PBLP01, PBLP02, PBLP03) y 8 pozos piezométricos. El objetivo fue la evaluación de la cantidad y calidad del agua subterránea. En este trabajo se hace mención que el sector estudiado presenta un elevado potencial para el aprovechamiento del agua subterránea.
- Informe de Impacto Ambiental Etapa De Exploración, Proyecto Candelas, 2018. Responsable Técnico Francisco René López. Se declara que en el año 2018 Quantec Geoscience Argentinan S.A. realizó una prospección geofísica por el método CSAMT en las pertenencias mineras del proyecto. Se propone la realización de 5 sondeos exploratorios de diamantina en una primera etapa, y si estos tienen resultados positivos, se realizarán 6 sondeos más.
- Estudio de Impacto Ambiental y Social “Aprovechamiento de agua subterránea y conducción a Planta Fenix. Acueducto los Patos. Dpto. Antofagasta de la Sierra. Pcia. Catamarca”, efectuado por EC&ASOCIADOS Consultora Jurídico Ambiental S.R.L. a pedido de la empresa LIVENT – Minera del Altiplano SA, Setiembre del 2018. El objetivo del proyecto es la provisión de agua desde una fuente adicional para la expansión de las operaciones del Proyecto Fénix en el Salar del Hombre Muerto. Para ello se elaboró una línea de base ambiental de la cuenca de río Los Patos para la futura construcción de un acueducto.
- Informe Ampliación Batería de Pozos Río Los Patos, Salar del Hombre Muerto, Departamento Antofagasta de La Sierra, Provincia de Catamarca, Noviembre del 2018. Se presenta la información técnica referida a la batería de pozos en el sector del

valle fluvial del río Los Patos realizada por CONHIDRO en 2018 para Livent – Minera del Altiplano S.A.. Se construyeron 3 pozos de bombeos (PBLP04, PBLP05 y PBLP06). El objetivo fue la evaluación de la cantidad y calidad del agua subterránea. En este trabajo se hace mención que el sector estudiado presenta un elevado potencial para el aprovechamiento del agua subterránea.

- Informe Técnico Del Pozo SVWW 18-25, Salar Del Hombre Muerto, Departamento Antofagasta De La Sierra, Provincia De Catamarca, Realizado por CONHIDRO 2019 para Galaxy Resources Limited – Proyecto Sal de Vida. El informe presenta la información de registros litológicos, de cronometrajes y perfilajes geofísicos, comportamiento hidráulico con el análisis de ensayos de bombeo escalonado y ensayo prolongado de caudal constante, y muestreo hidroquímico del pozo
- Informe Final Del Pozo SVWW18\_26 Proyecto Sal De Vida Salar Del Hombre Muerto Antofagasta De La Sierra – Catamarca, Realizado por Hidroper SRL, 2019 para Galaxy Resources Limited – Proyecto Sal de Vida. Se presenta información del control geológico, registros de perfilajes eléctricos y datos del ensayo de bombeo a caudal constante.
- Informe de Ampliación de Actividades, Proyecto Candelas. Galán Lithium. Etapa De Exploración Fase II, 2019. Responsable Técnico Francisco René López. Realizado con el objetivo de determinar la continuidad de las unidades litológicas presentes a lo largo de la subcuenca en las pertenencias del proyecto, se pretende realizar 6 sondeos (perforaciones de diamantina) correspondientes a una segunda etapa de exploración.
- Informe Final Batería De Pozos Río Los Patos, Salar del Hombre Muerto Departamento Antofagasta de la Sierra, Provincia de Catamarca, enero del 2019. Se presenta la información técnica referida a toda la batería de pozos en el sector del valle fluvial del río Los Patos realizada por CONHIDRO SRL entre el 2017 y 2018 para Livent – Minera del Altiplano S.A.. Se construyeron 2 pozos piezométricos (PzLP06 y PzLP07). El objetivo fué la evaluación de la cantidad y calidad del agua subterránea. En este trabajo se hace mención que el sector estudiado presenta un elevado potencial para el aprovechamiento del agua subterránea.

## **VI. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Sobre la base de entender que este tipo de trabajos busca establecer o definir el Ambiente o Dominio hidrogeológico, es que se debe contar con el análisis geológico, geomorfológico y climático del área analizada.

Un “ambiente hidrogeológico” es un modelo conceptual de los parámetros morfológicos, geológicos y climáticos que determinan los atributos principales de un régimen del agua subterránea en un área determinada (Tóth, 1970 in Tóth, 2000).

Los seis atributos o parámetros principales que definen un régimen del agua subterránea son:

1. el contenido de agua de las rocas,
2. la geometría del sistema de flujo,
3. la descarga específica,
4. la composición química del agua,
5. la temperatura y,
6. la variación temporal de todos los anteriores.

Los parámetros de un régimen del agua subterránea están controlados por tres componentes del ambiente hidrogeológico: topografía, geología y clima. Estas tres componentes están conformadas su vez, por varios parámetros: para la topografía: el tamaño y forma de los relieves topográficos y la orientación y frecuencia de los relieves geológicos; para la geología: el contenido en material soluble, la configuración de heterogeneidades (estratificación, lenticularidad, fallado, fracturación, karstificación y grado de anisotropía); y para el clima: la temperatura y el valor, tipo y variación estacional de la precipitación y la evapotranspiración potencial (Tóth, 2000).

El efecto controlador del ambiente hidrogeológico sobre el régimen del agua subterránea se manifiesta claramente cuando se consideran los papeles de los componentes individualmente.

Los factores climáticos determinan la magnitud y la distribución espacial del agua suministrada a cada región. La topografía determina la cantidad de energía y su distribución zonal de que dispone el agua para su movimiento en una cuenca determinada y conforma los contornos del sistema de flujo. Finalmente, la geología proporciona las zonas en las que puede circular el agua, controlando las magnitudes y el esquema del flujo, así como el volumen



y la distribución del agua almacenada. La geología también determina la hidroquímica de las aguas (Tóth, 2000).

Un ambiente hidrogeológico puede definirse como el resultado de la interacción de componentes biológicos, geológicos, geomorfológicos y climáticos que condicionan variables físico-químicas que interrelacionan entre sí en una forma característica, lo que otorga a una determinada región un comportamiento hidrogeológico particular.

## **V.1 - GEOLOGÍA**

El ambiente geológico del Salar del Hombre Muerto se encuentra en la Puna Austral, a los 25° 20' Sur, 67° 00' Oeste y a unos 4.000 metros sobre el nivel medio del mar. El salar ocupa unos 590 Km<sup>2</sup>, dentro de una cuenca hídrica de aproximadamente 3.906 km<sup>2</sup>.

La Puna forma parte del orógeno andino (Turner, 1972; Isacks, 1988 in Vinante, 2003). Esta unidad es una depresión en altura, con serranías interiores que alcanzan una altura media de 4.000 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y está limitada al oeste por la Cordillera Volcánica Occidental que la separa de Chile y al este por la Cordillera Oriental. La morfología más característica es que en el interior existen cuencas hídricas cerradas donde, en muchos casos, se forman salares, conformando los límites cordones montañosos de rocas paleozoicas y/o terciarias, de orientación general submeridiana y cadenas volcánicas transversales al rumbo andino. El fallamiento en bloques, de orientación submeridiana, suele estar basculado e inclinado al norte y sur, al igual que los cerramientos volcánicos, definiendo así cuencas de sedimentación endorreicas de intra-arco/intra-plateau (Alonso, 1991 y 1992 in Vinante, 2003). Las aguas subterráneas y superficiales alcanzan estas cuencas cerradas a través de un drenaje centrípeto y la única forma en que se reintegran al ciclo hidrológico es a través del proceso de evaporación, dejando de esta manera la carga de sales solubles en el fondo de estas fosas.

El Salar del Hombre Muerto constituye un típico depósito evaporítico de la Puna, emplazado en basamento de rocas prepaleozoicas, paleozoicas y cenozoicas (Vinante, 2003). En el interior del salar se encuentran diferentes relieves conformados por rocas neógenas, portadoras de litofacies evaporíticas, tal como Península de Tincalayu, Farallón Catal y Península Hombre Muerto que son considerados como parte de la cuenca neógena, desmembrada por la tectónica del terciario superior (Alonso, 1986 in Vinante, 2003).

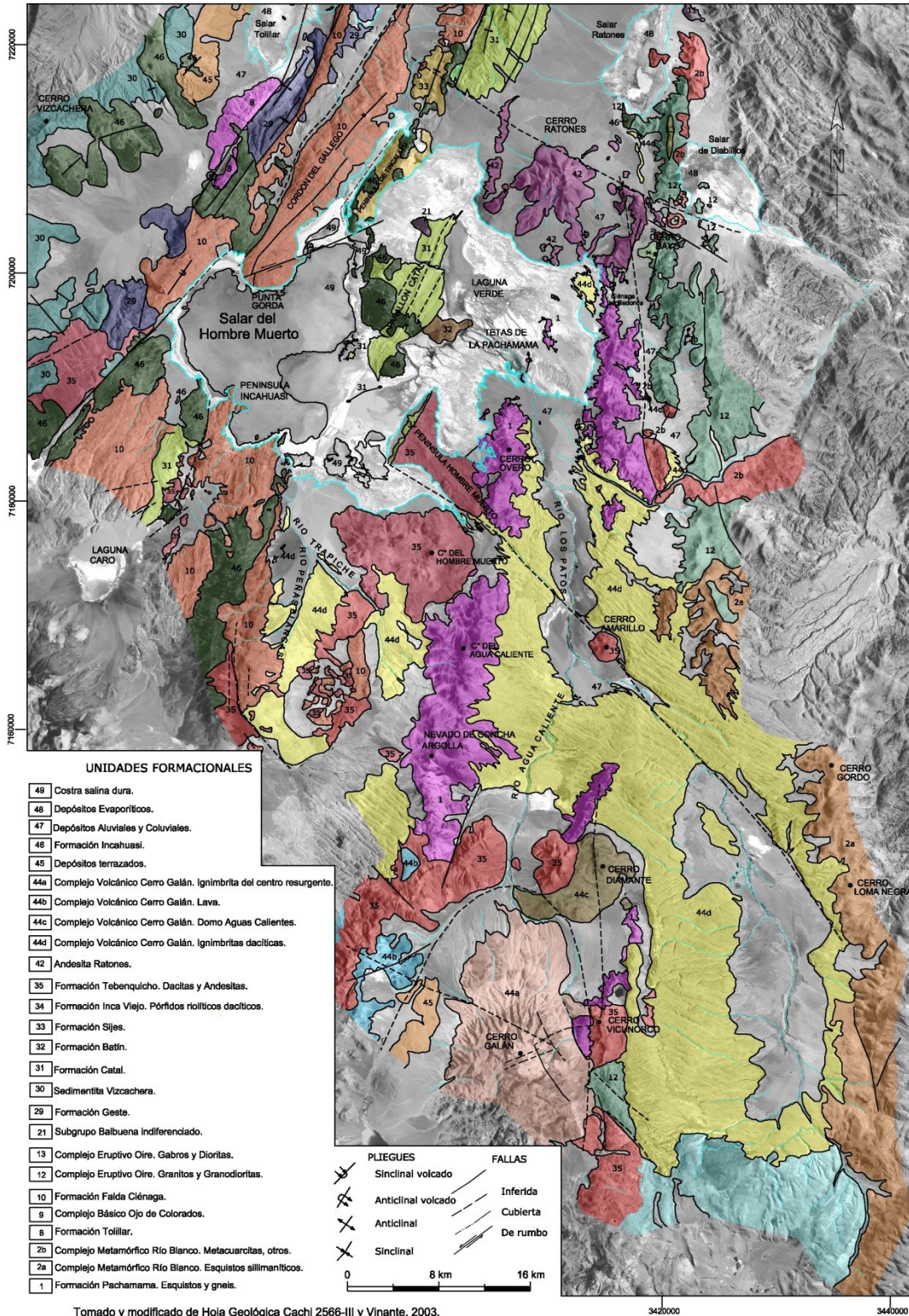


Figura 2: Mapa geológico regional (en Conhidro, 2016).

### **V.1.1 - Estratigrafía**

En la región se encuentran secuencias de rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas de diferentes edades. A continuación se presenta un resumen de trabajos realizados por otros autores; principalmente Vinante (2003) que ha efectuado el trabajo de mayor detalle en la Subcuenca Oriental del Salar del Hombre Muerto y algunas observaciones propias llevadas a cabo en los últimos años por nuestro equipo de profesionales.

#### **Neoproterozoico**

Formación Pachamama: Aramayo (1986 in Vinante, 2003) designa con este nombre a rocas aflorantes en la sierra de Ciénega Redonda y los contrafuertes orientales del Salar del Hombre Muerto y también en varios remanentes rocosos que se asoman dentro del propio salar, en el sector oriental. Esta unidad en los alrededores de Ciénega Redonda muestra metamorfismo regional dinamotérmico de mediano a alto grado con presencia de esquistos, granulitas, granitoides migmatíticos y migmatitas anatexíticas. Los afloramientos del interior del salar están constituidos casi exclusivamente por migmatitas estromatolíticas, entre las que intercalan niveles oscuros de anfibolitas. También se encuentran rocas derivadas de sedimentos de paragénesis calcáreas que se distribuyen irregularmente en bancos delgados entre las migmatitas. Todo el conjunto se encuentra atravesado por finas venillas de cuarzo y feldespatos y presentan deformación con desarrollo de foliación (Vinante, 2003). La edad Sm/Nd de 508 Ma, obtenida por Luccasen et al., (1996 in Vinante, 2003) en los contrafuertes orientales del Salar del Hombre Muerto y la edad K/Ar de 599 +/- 3 Ma, determinada por Sparks et al., (1985 in Vinante, 2003) confirman una edad pre ordovícica de la Formación Pachamama.

Complejo Metamórfico Río Blanco: Las rocas incluidas en esta unidad fueron diferenciadas por Hayase y Prozzi (1996 in Vinante, 2003) y asignadas al basamento precámbrico. El complejo está constituido principalmente por esquistos y gneises sillimaníticos y en menor proporción por esquistos cuarzo micáceos, filitas y metacuarcitas. Los esquistos cuarzo micáceos, filitas y metacuarcitas afloran en el sector oriental del Salar de Ratones, en el occidente del Salar de Diablillos, en la falda occidental del cerro Colorado y en la zona comprendida entre la Laguna Verde y el río Agua Caliente. Los esquistos suelen ser de color verde y las filitas grises; la estratificación se preserva con cierta regularidad y permite reconocer la alternancia original de pelitas y grauvacas. Los esquistos y gneises sillimaníticos afloran ampliamente al este de la quebrada de Barranquillas (desde las cumbres de Luracatao hacia el sur), allí los esquistos son de colores oscuros, con esquistosidad bien definida y están compuestos por cuarzo, biotita, muscovita y sillimanita y,

secundariamente granate, cordierita y andalucita. Los gneises se intercalan con los esquistos y se diferencian de ellos por el grano más grueso, colores más claros, mayor contenido de feldespatos y escasa sillimanita en comparación con los esquistos. Las pegmatitas y venas de cuarzo son frecuentes en los esquistos, tienen espesores de pocos centímetros a varios metros (Vinante, 2003). Si bien la información actual no permite precisar la edad de esta unidad, varios autores lo atribuyen al basamento Neoproterozoico y pre ordovícico.

### **Paleozoico Inferior**

Formación Tolillar: Esta unidad fue definida por Zappettini et al., (1994 in Vinante, 2003). Está constituida por una alternancia de vaques dominantes, gris verdosas, tenaces, de grano fino a mediano, formadas de cuarzo, feldespato y una matriz de agregados félsicos acompañados por sericita y biotita; las areniscas, subordinadas, son de grano fino, gris oscuro a verdosas, están constituidas por granos de cuarzo, plagioclasa, escaso anfíbol, opacos, sericita y apatita. Los afloramientos muestran intercalaciones de una roca verdosa con feldespato, muy posiblemente se trate de una arenisca volcánicla. Se le asigna como perteneciente al Ordovícico inferior de acuerdo con relaciones estratigráficas y sobre la base al hallazgo de *Araneograptus murrayi*, al Tremadociano superior.

Formación Falda Ciénaga: Fue definida por Aceñolaza et al., (1975 in Vinante, 2003) para incluir a afloramientos con fósiles ordovícicos. Afloran principalmente en los contrafuertes noroccidental, occidental y austral del Salar del Hombre Muerto, donde conforman relieves como el cordón del Gallego y Península Incahuasi. Está constituida por depósitos marinos de grauvacas y pelitas estratificadas rítmicamente, con intercalaciones menores de arenisca cuarzosa, conglomerados, tobas y areniscas volcánicla, todo el conjunto está afectado por un metamorfismo de muy bajo grado y, ocasionalmente, de bajo grado (Hongn, 1998 in Vinante, 2003). Bancos de conglomerados de hasta 2 metros de espesor intercalan entre las grauvacas y pelitas. Se trata de conglomerados oligomícticos, constituidos principalmente por clastos de cuarzo. La formación muestra modificaciones metamórficas de muy bajo a bajo grado, de acuerdo con la cristalinidad de la illita que ubica el proceso metamórfico entre el anquimetamorfismo y el epimetamorfismo (Toselli, 1982 in Vinante, 2003). El espesor mínimo de esta unidad formacional se considera en 3.000 metros. La edad sería ordovícica (Llanvirniano alto – Llandeilliano), de acuerdo a la presencia de graptolitos. No se conocen relaciones de base aunque se infiere que es tectónica con la Formación Tolillar. La deformación asociada a la fase Oclóyica imprimió un intenso plegamiento y fallamiento. Sobre estos niveles deformados se asientan sedimentitas y volcanitas neógenas.

Complejo Eruptivo Oire: Estas rocas fueron definidas al este del Salar Centenario por Turner (1961, 1964, in Vinante, 2003) como Formación Oire y, posteriormente por Méndez et al., (1973) con el nombre de Faja Eruptiva de la Puna Oriental. Recientemente, el Complejo Eruptivo Oire fue definido por Blasco y Zappettini (1995 in Vinante, 2003) con el objeto de integrar el conjunto de rocas magmáticas paleozoicas que afloran en el borde oriental de la Puna, entre los paralelos 24° y 25° latitud sur y que se disponen en una faja de rumbo meridiano aproximadamente entre los 66° 20' y 66° 45' de longitud oeste. Los terrenos que lo conforman presentan variadas expresiones litológicas y tectónicas que señalan procesos y edades diferentes. Hongn, (1998, in Vinante, 2003) ha distinguido facies dentro de la unidad en función de rasgos observables a escala macroscópica; estas se disponen en forma subparalela al rumbo general de la faja de afloramientos. Entre los rasgos más sobresalientes de las rocas que conforman el complejo son las de milonitas, los fenocristales de feldespatos potásicos y los cristales de cuarzo de tonalidades azules. Los granitos y granodioritas son las facies de mayor distribución areal dentro del complejo y afloran en la sierra de Inca Viejo, sierra Agua de las Palomas, al este del Salar de Ratones, al este y sur del Salar de Diablillos y en el cerro Blanco. Los granitos y granodioritas son de grano grueso con fenocristales de feldespatos potásicos de hasta 12 cm de longitud. Son rocas biotíticas, en menor grado muscovíticas, de color gris y rosado. Los granitos y granodioritas de grano grueso con megacristales metamorfizados aparecen en otros sectores y señalan fajas afectadas por metamorfismo; allí los ortogneises son de color gris y muestran una foliación bien definida debido a una concentración de biotita que engloba a los fenocristales de feldespatos y a diferentes grados de milonitización. Los granitos y granodioritas de grano fino a mediano afloran en dos extensas áreas elongadas en sentido norte – sur, la primera ocupa la parte superior del faldeo occidental de las cumbres de Luracatao y los contrafuertes orientales del Salar de Diablillos; la segunda se extiende desde la sierra de Vázquez hacia el norte. Están constituidos por granodioritas y en menor medida granitos de grano mediano, ocasionalmente porfíricos con fenocristales de microclino, el conjunto de rocas presenta un color gris claro. Los granitos y granodioritas de grano fino a mediano metamorfizados son las mismas facies anteriores que pasan gradualmente a ortogneises que muestran diferentes grados de milonitización. Los contactos observados con la roca de caja son concordantes por efecto de la deformación. Se ha establecido una edad de aproximadamente 500 Ma para el evento principal del metamorfismo según edades Sm/Nd y U/Pb. Los gneises y ortogneises miloníticos con indicadores de metamorfismo de alto grado comprenden un sector aflorante en el borde sudeste del Salar de Diablillos. Se trata de gneises de grano fino (intruido por anfíbolitas, esquistos y pegmatitas) y ortogneises de grano grueso con fajas milonitizadas. Los gabros y dioritas aparecen en un pequeño afloramiento en el



sector norte de la faja de afloramientos del complejo, localizado en las inmediaciones del sector occidental del Salar de Diablillos. Son rocas verde oscuro, de grano mediano, constituidas por anfíbol, plagioclasa y cuarzo. Las pegmatitas, aplitas y lamprófiro se presentan como rocas filonianas; la mayoría se presenta con rumbo meridiano, subparalelo a la foliación de las rocas del complejo y muestran diferentes grados de deformación. Consisten en diques de hasta 100 metros de potencia y 850 metros de longitud. La edad del Complejo Eruptivo Oire es aun discutida y la mayoría de las dataciones absolutas señalan edad ordovícica.

Complejo Básico Ojo de Colorados: Corresponde a manifestaciones básicas y ultrabásicas conformadas por gabros de grano mediano a grueso, de forma tabular intercalados en las sedimentitas a epimetamorfitas de la Formación Tolillar. Se considera que este complejo pertenece al Tremadociano, contemporáneo con la Formación Tolillar.

### **Mesozoico**

Estos depósitos están representados por el Subgrupo Balbuena Indiferenciado en un pequeño afloramiento localizado en el extremo noroeste de Farallón Catal. Las formaciones que la integran tienen características litológicas que indican depositación en cercanías de borde de cuenca, razón por la cual es extremadamente difícil de distinguirlas.

### **Cenozoico**

El Cenozoico de la región de estudio está representado fundamentalmente por rocas volcánicas, que son las de mayor distribución areal (coladas, flujos piroclásticos, mantos de cenizas), rocas sedimentarias (capas rojas con o sin evaporitas) y una participación menor de intrusivos que afloran en el bloque tectónico que limita a los salares de Diablillos y Ratones. (Alonso, 1998 in Vinante, 2003). Las rocas sedimentarias representan el registro de una evolución iniciada en el Eoceno medio y que, con algunas interrupciones, se mantiene hasta el Plioceno tardío (Alonso, 1986 in Vinante, 2003). Están representados por secuencias de sedimentos clásticos que componen el Grupo Pastos Grandes que está compuesto por las Formaciones Geste, Pozuelos y Sijes, donde se encuentran importantes yacimientos de evaporitas (boratos principalmente).

El Grupo Pastos Grandes está compuesto por sedimentos de granometría decreciente del piso al techo de la columna sedimentaria. Es conglomerádica en la base (Formación Geste), arenosa en el centro (Formación Pozuelos) y pelítica en el techo (Formación Sijes). De éstas tres unidades, en la zona de influencia del Salar del Hombre Muerto se presentan la

Formación Pozuelos en forma restringida y la Formación Sijes que compone la mayor parte de los afloramientos del Grupo Pastos Grandes. La Formación Pozuelos se presenta con colores marrón rojizo en inmediaciones de Farallón Catal donde se aprecian arcillas, arcilitas, lutitas y areniscas sueltas. La Formación Sijes se encuentra aflorante principalmente en la zona noroccidental del salar en la Península Tincalayu donde se encuentra el yacimiento de boratos de la empresa Borax Argentina S.A., como así también en el borde norte de la Península Hombre Muerto en el sector suroriental del salar. La Formación Sijes presenta en su conjunto un color grisáceo a pardo verdoso; se caracteriza por la presencia de facies pelíticas con abundantes intercalaciones de tobas de color verde y pardo rojizas con participación de abundantes evaporitas, principalmente boratos y yeso. Se destacan también las intercalaciones de depósitos geotermales de travertinos carbonáticos en toda la columna sedimentaria de Formación Sijes.

### **Paleógeno**

Formación Geste: Fue definida por Turner (1961, 1964) en la cuenca de Pastos Grandes. Su edad paleógena fue establecida sobre la base de presencia de vertebrados fósiles continentales hallados por Alonso et al., (1982). En Pastos Grandes los citados autores hallaron marsupiales fósiles. También se encuentran presentes restos de notoungulados. En la zona del Salar Hombre Muerto, Alonso et al., (1982) identificaron litofacies correspondientes a la Formación Geste en una faja comprendida entre el cordón del Gallego y el Salar de Tolillar, aunque no se han encontrado aún fósiles en esos afloramientos. Las rocas están compuestas mayormente por sedimentitas areno - conglomerádicas de color pardo rojizo, con intercalaciones de areniscas cuarzosas gris amarillentas que descansan en discordancia angular sobre sedimentitas marinas ordovícicas. En la base se presenta un conglomerado con clastos de basamento ordovícico. En las inmediaciones de Antofagasta de la Sierra, Alonso (1998) describió unos afloramientos de facies fluviales compuestas por areniscas arcósicas, fangolitas y conglomerados gruesos de canales, que asignó a esta formación por sus características paleontológicas. Este depósito de las capas clásticas correspondería a cauces fluviales de ríos anastomosados que se desplazaban de oeste a este, en una amplia planicie aluvial, continental, de bajo relieve, en un clima cálido y húmedo que permitía el desarrollo faunístico de diversos mamíferos, junto con tortugas y cocodrilos (Alonso, 1998 in Vinante, 2003).

### **Paleógeno- Neógeno**

Sedimentita Vizcachera: Entre los salares de Tolillar y Antofalla aflora una espesa secuencia clástica con intercalaciones evaporíticas. Donato y Vergani (1985) llevaron a cabo un perfil regional y una descripción estratigráfica

de estas secuencias en las que diferenciaron las Formaciones Geste y Pozuelos, cubiertas discordantemente por la Formación Batín. Posteriormente, Vandervoort (1993) y Vandervoort et al., (1995) dataron las tobas intercaladas en la Formación Batín, las que entregaron edades equivalentes al miembro salino de la Formación Pozuelos en su perfil tipo, por lo que las secuencias dispuestas por debajo de la Formación Batín serían más viejas que la Formación Pozuelos. Donato y Vergani (1985) describen relaciones concordantes entre las sefitas que atribuyen a la Formación Geste y las areniscas y pelitas con evaporitas que incluyen en la Formación Pozuelos, relación que indica que los conglomerados no pertenecerían a la Formación Geste. Las sedimentitas extendidas entre los salares de Tolillar y Pozuelos tienen un espesor de por lo menos 3.500 metros y están integradas por conglomerados rojos en su parte inferior y por areniscas rojas con niveles de pelitas y evaporitas (yeso) en la porción superior, donde también intercala un nivel de eolianitas. Esta unidad estaría comprendida entre el Oligoceno inferior-Mioceno medio. La parte superior de la secuencia contendría el límite Oligoceno-Mioceno. Una datación en el techo del paquete de areniscas y pelitas rojas con abundante yeso epigenético brindó 10,8 +/- 2,0 Ma (Alonso et al., 1991) y otra, en el tramo medio de los niveles rojos con eolianitas arrojó, 23,8 +/- 0,4 Ma (Vandervoort, 1993 in Vinante, 2003).

### **Neógeno**

El Neógeno está representado por sedimentitas clásticas, piroclásticas y evaporíticas. Las rocas mejor controladas desde un punto de vista cronológico son aquellas que afloran en el interior del Salar Hombre Muerto. Conforman allí tres relieves conocidos como península de Tincalayu, isla de Farallón Catal y península del Hombre Muerto. La actividad del arco magmático y el acortamiento tectónico controlaron la naturaleza de las unidades neógenas en la Puna. Los sedimentos fueron depositados en cuencas orogénicas de antepaís cuyo relleno muestra la participación de material proveniente del arco magmático. Conglomerados y areniscas con intercalaciones ignimbríticas (Formación Catal), conglomerados, areniscas y escasas tobas (Formación Batín) y pelitas y areniscas con intercalaciones evaporíticas y volcaniclásticas (Formación Sijes) fueron depositados en esas cuencas (Hongn, 1998 in Vinante, 2003).

Formación Catal: Se conoce con este nombre a los depósitos de conglomerados y areniscas con intercalaciones ignimbríticas y volcaniclásticas que constituyen la secuencia que aflora en Farallón Catal. Allí se encuentra una potente secuencia de casi 5.000 metros de espesor compuesta por capas rojas que culminan en piroclástitas y conglomerados. También presenta niveles de areniscas, calcarenitas y tobas. Suprayacen en discordancia angular coladas



fenobasálticas pleistocenas de 754.000 años, viejas terrazas lacustres y depósitos evaporíticos actuales. En la base de esta secuencia se ha datado una ceniza volcánica en 15,0 +/- 2,4 Ma y en el techo otra ceniza en 7,2 +/- 1,4 Ma (Alonso et al., 1991 in Vinante, 2003) pudiéndose englobarla dentro del Neógeno. Los únicos fósiles descubiertos corresponden a pistas de vermes y huellas tridáctilas de aves, en capas rojas cerca de la base de la secuencia. Alonso y Gutiérrez (1986) determinaron que la Formación Catal, se depositó en un ambiente continental de alta energía, mientras reinaban condiciones de aridez en la región, destacando la proximidad de las áreas de aporte y su relación con abanicos pedemontanos. La unidad donde fueron halladas las icnitas de aves evidencia un momento de tranquilidad en la cuenca con facies fluviales a típicamente lacustres. La formación tiene rumbo general NE-SO y una inclinación al este, que varía entre 25° y 40°. La isla de Farallón Catal constituye una estructura homoclinal normal, basculada al este. En el tramo superior, se han encontrado abundantes rodados de cuarzo pegmatítico, provenientes de la destrucción de rocas hipabisales, que atraviesan el basamento cristalino. En el extremo norte, la destrucción de las tobas cristalinas, asociada al relieve de escarpa, generó un depósito de duna móvil, formada por una sabulita de cuarzo, muy seleccionado y redondeado. En la Península del Hombre Muerto, aflora una parte de la secuencia expuesta en la isla de Farallón Catal, principalmente los niveles superiores. También al Neógeno pertenecen los afloramientos clásticos y piroclásticos que se ubican sobre la falda oriental de la sierra de los Ratones (o sierra de Bequeville). El contacto de base es por falla con rocas del Ordovícico (Formación Falda Ciénaga). Hacia el techo la sección se cubre por los depósitos de pie de monte que descienden hacia el salar Ratones. En la quebrada de Puesto Fabián se ha reconocido una secuencia verde, que corresponde a una toba soldada, conglomerádica, con rodados de dacitas con una edad de 16,7 +/- 0,1 Ma, a la cual se superponen conglomerados que tienen intercaladas cenizas y un manto de ignimbritas. Una datación en esta última sección brindó 13,2 +/- 0,09 Ma, lo que indicaría una edad Mioceno Medio.

Formación Batín: Fue definida por Donato y Vergani (1985, in Hoja Cachi, 2001) y sus afloramientos corresponde a un pequeño asomo en la ladera este de Farallón Catal. Corresponde a conglomerados polimícticos, gruesos, grises y rosados, que hacia el techo pasan a areniscas con intercalaciones de tobas. Donato y Vergani (1985) le asignaron edad pliocena; sin embargo, dataciones radimétricas realizadas por Vandervoort (1993 in Hoja Cachi, 2001) y Vandervoort et al., (1993 in Hoja Cachi, 2001) arrojaron edades de 8 +/- 0,5 y 7,3 +/- 0,7 Ma, o sea Mioceno Superior. Las relaciones de base y techo son discordantes; está apoyada sobre sedimentos rojos con intercalaciones evaporíticas y cubierta por sedimentos cuaternarios.

Formación Sijes: Fue definida originalmente por Turner (1961, 1964 in Vinante, 2003) como la unidad superior del Grupo Pastos Grandes. En Mina Tincalayu, ubicada al sur de la península del mismo nombre, la Formación Sijes está constituida por una secuencia compuesta por sal de roca (Miembro Halítico) sin base conocida, con un espesor superior a 150 metros, sobre la que se apoya un cuerpo de tincal de 30 metros de espesor (Miembro Boratífero), al que se sobreponen capas rojas limo arcillosas (Miembro Pelítico). Todo el conjunto está cubierto por coladas basálticas cuaternarias de la Formación Incahuasi de 0,754 +/- 0,02 Ma (Aceñolaza et al., 1976; Alonso et al., 1984 b, in Vinante 2003). El Tincal se presenta en capas macizas, vítreas, con presencia de cuerpos de Kernita y otras especies minerales de boro. La datación de una toba intercalada en la parte superior del Miembro Boratífero arrojó un valor de 5,86 +/- 0,14 Ma (Watson in Alonso et al., 1984) lo que indica una edad Mioceno Superior para la secuencia sedimentaria clástica - evaporítica de Tincalayu. La datación de dos tobas del Miembro Monte Amarillo, aflorante en la sierra de Sijes (cuenca de Pastos Grandes), arrojaron edades de 6,81 y 6,25 Ma, para la base y el techo del miembro respectivamente, lo que le permitió a Alonso (1986) ubicar la base de la Formación Sijes en el Mioceno tardío.

Formación Inca Viejo: Fue definida por González (1984) en el cerro del mismo nombre, ubicado en el extremo norte de la sierra de Inca Viejo. Integran esta unidad una serie de pórfiros dacíticos alineados denominados: Inca Viejo, Cerro Blanco de Diablillos, Cerro Bayo y Vicuña Muerta. Estos cuerpos subvolcánicos intruyen al basamento metamórfico e ígneo a lo largo de fracturas de orientación norte-sur (Hongn, 1998 in Vinante, 2003). Son rocas dacíticas de color gris, que cambian a blanquecino en las zonas afectadas por alteración hidrotermal intensa. La textura es porfírica, con fenocristales translúcidos de cuarzo, feldespatos (plagioclasas), mafitos (anfíbol) y biotita inmersos en una pasta afanítica (González, 1984). Los colores claros son debido a la presencia de minerales de remplazo como sericita, arcillas, epidota y asociaciones de jarosita - alunita. En el faldeo occidental y norte del cerro Bayo se cita la presencia de diques de brechas de 0,6 metros de ancho (González, 1985 a in Vinante, 2003). El afloramiento de mayor dimensión se localiza en el cerro Inca Viejo, el cual posee mineralización cuprífera y es considerado un pórfido de cobre y molibdeno de interés económico. Hacia el sur aflora en el cerro Blanco y en el sector Diablillos Sur como una serie de pequeños cuerpos que intruyen a las ectinitas pre ordovícicas y al Complejo Eruptivo Oire, respectivamente. Estas rocas también se observan en el cerro Bayo en donde presentan colores amarillentos y castaños y una importante alteración hidrotermal silíceo de alta sulfuración. Una datación radimétrica efectuada por el método K/Ar de 15 +/- 0,2 Ma, confiere pórfido cuprífero de Inca Viejo una edad absoluta equivalente al Mioceno medio.

Formación Tebenquicho: Las dacitas y andesitas que integran la formación (González, 1983) serían equivalentes a la Formación Beltrán. Los cerros Tebenquicho, Mojones o Beltrán, Hombre Muerto, Colorado, Mirihuaca y Bola, que forman parte de esta unidad, están constituidos por aparatos volcánicos compuestos por lavas dacíticas y andesíticas de colores castaño oscuros, rojizos a violáceos, de textura porfírica con fenocristales de cuarzo, feldespato y mafitos, donde el tamaño de los fenocristales no superan los 5 mm, siendo los de mayor desarrollo los de feldespato. El más grande de estos centros es el cerro Mojones o Beltrán, constituido por lavas dacíticas - andesíticas y reutilizado por el volcanismo basáltico. La edad de estas vulcanitas en el cerro Tebenquicho mediante dataciones radiométricas de K/ Ar es de 14 +/- 5 a 11 +/- 1 Ma, lo que indica Mioceno Medio. La península de Hombre Muerto está integrada por un conjunto de depósitos piroclásticos y lávicos en su mayor parte de composición dacítica, que son incluidos por Seggiaro (1998) en la Formación Tebenquicho. Las dacitas están compuestas por fenocristales idiomorfos de plagioclasa, biotita y abundante cuarzo levemente rosado inmersos en una matriz vítrea que presenta una incipiente desvitrificación.

Andesita Ratones: Estas rocas fueron denominadas informalmente por Catalano (1964) como "Rocas Volcánicas", constituyen parte principal del cerro Ratones, un estratovolcán de 5.552 m s.n.m., que se localiza en el borde nordeste del Salar Hombre Muerto y que constituye una barrera orográfica que separa la cuenca constituida por los salares Centenario-Ratones, de la depresión del Salar Hombre Muerto, y también se observan cubriendo el basamento en un pequeño cordón ubicado entre el volcán y el sector noroeste de la sierra Agua de las Palomas. Consisten principalmente de andesitas anfibólicas y andesitas piroxénicas y dacitas de colores grises a castaños rojizos, con textura porfírica formada por fenocristales (de hasta 5 mm) de plagioclasa y minerales máficos inmersos en una pasta afanítica. Estas rocas fueron correlacionadas por González (1984 in Vinante, 2003) con la Formación Beltrán y con parte de la Formación Tebenquicho (González, 1983), por lo que el mencionado autor le otorgó una edad incierta entre el Mioceno y el Plioceno. Actualmente, la edad absoluta de 7,1 +/- 0,2 Ma (Ar40/Ar39 obtenida por Vandervoort (1993), ubica a esta formación en el Mioceno Superior.

Complejo Volcánico Cerro Galán: Es un conjunto de rocas generadas por la gran Caldera (35 km de largo x 20 km de ancho) del cerro Galán, ubicada aproximadamente 70 km al sur del volcán Ratones. Se desarrolló a lo largo de dos fracturas principales de rumbo norte-sur. Asociado a este centro se originó un voluminoso complejo volcánico que tuvo sus orígenes a partir de los 7 Ma. La estructuración de la caldera con la morfología actual se produjo a

los 2,2 Ma (Hildyard, 1999) con la erupción de 1.000 km<sup>3</sup> de material emitido en su mayor parte en forma de flujos piroclásticos que integran la ignimbrita Cerro Galán (Francis et al., 1983; Sparks et al., 1985; Hildyard, 1999). De las rocas que integran el complejo la Ignimbrita dacítica es la que se observa en la zona de estudio. Los depósitos se disponen en extensos mantos distribuidos radialmente hasta distancias que alcanzan los 100 km desde el borde de la caldera, llegando a tener en algunos lugares espesores de hasta 180 metros (Seggiaro, 1998, in Vinante, 2003). Se la observa en el sector noreste de la Subcuenca Oriental del Salar del Hombre Muerto, al norte y al este del cerro Ratones (como una franja elongada y discontinua que incluye el afloramiento de la vega Ojo de Ratones), en la quebrada del río de los Patos y al sur del cerro Hombre Muerto. Estos afloramientos constituyen la expresión más septentrional de los flujos ignimbríticos provenientes de la caldera volcánica del cerro Galán (González, 1984). En el sector noreste de la subcuenca oriental del Salar Hombre Muerto las ignimbritas se destacan por su morfología, ya que tienen forma tabular, alargados, unidos entre sí por su base y dispuestos horizontalmente sobre el piso del salar con sentido NO-SE. Constituyen verdaderos acantilados de paredes abruptas, separados entre sí por superficies de drenaje marcadamente paralelas. Estas ignimbritas son de color gris blanquecino y textura porfírica con fenocristales (no mayores de 2 mm) de cuarzo translúcido, andesina, sanidina, abundante biotita y óxidos de hierro y titanio inmersos en una pasta afanítica. También se observan escasos litoclastos de pumicita, andesitas y dacitas, que se reconocen principalmente por su aspecto de rocas volcánicas porfírica, diaclasamiento tipo columnar y disposición horizontal a subhorizontal en el terreno. Sobre la base de dataciones radimétricas por el método de K/Ar de 2,56 +/- 0,14 Ma y una isócrona Rb/Sr de donde se obtuvo el valor de 2,03 +/- 0,07 Ma la edad de estos flujos piroclásticos corresponde al Plioceno Superior (Francis et al., 1983; Sparks et al., 1985, in Vinante, 2003).

### **Cuaternario**

Está representado por aluviones, derrames detríticos sobre los faldeos montañosos y sedimentos sublacustres y lacustres. También pertenecen a este período las abundantes acumulaciones de lavas, originados por el intenso vulcanismo que afectó a la región desde el terciario hasta edad reciente. Las rocas efusivas son principalmente andesitas y basaltos, producto de varios conos monogénicos y flujos lávicos (0.75 +/- 0.03 Ma) (Alonso et al., 1984). Los productos volcánicos cuaternarios afloran fundamentalmente al norte y centro del salar, en la Península Tincalayu y en Farallón Catal (Península de Los Negros). Se encuentran además una densa masa de escombros de basaltos que recubren casi toda la región, poniendo de manifiesto la importancia de los eventos volcánicos cuaternarios. De los sedimentos detríticos, los aluviones

cubren amplios sectores y están modelados como conos aluviales y glacis, cuyas partes distales alcanzan los bordes del salar, e incluso progradan hacia el interior. Salvo los cuerpos sedimentarios actuales, la gran mayoría se presentan ligeramente aterrazados. Entre los más sobresalientes se encuentran los conos aluviales de los ríos Los Patos y Trapiche. El primero, se extiende hacia el salar hasta tomar contacto con la línea de paleoribera de un amplio cuerpo lacustre contemporáneo originado en este sector un depósito sublacustre que, con el progresivo retraimiento del lago, hasta su actual mínima expresión en la laguna Catal, se sitúa ligeramente en sobrerrelieve, surcado por múltiples canales elaborados por los derrames del río Los Patos (Igarzábal y Poppi, 1984). El cono aluvial del río Trapiche alcanza el borde del salar y se interdigita con él en un sector caracterizado por la presencia de materiales arenosos finos a limosos y escasas arcillas, con las facies evaporíticas propias del ambiente salino. Por último se destaca la presencia de manifestaciones termales en la cuenca hidrológica del río Los Patos, fuera del perímetro del salar del Hombre Muerto.

A partir de la fase diastrófica Diaguita, nuevas cuencas de sedimentación se generaron en la Puna. En gran parte de la región, estas nuevas cuencas se desarrollan directamente sobre las sedimentitas terciarias y en algunos casos son nuevas como el bolsón tectónico donde se encuentra el Salar de Diablillos, pero manteniéndose el mismo estilo tectónico que imperó durante el Terciario (Alonso, 1986). El volcanismo continuó a lo largo del borde occidental de la Puna, pero decreció en las cadenas volcánicas transversales. En cambio se inició en todo el ambiente de la Puna Austral un importante volcanismo básico que está representado por pequeños centros monogénicos y numerosas coladas basálticas que ocurren en los alrededores de los salares de Arizaro, Hombre Muerto, Antofalla, entre otros (Viramonte et al., 1984). El relleno sedimentario de las cubetas se hizo más variado que durante el período anterior ya que además de los materiales provenientes de la destrucción del basamento paleozoico, se incorporaron también materiales provenientes de la erosión de los edificios estratovolcánicos y de los terrenos terciarios emergidos durante la fase diastrófica Diaguita. Durante el resto del período Cuaternario continuó una sedimentación del tipo abanicos aluviales coalescentes, con playas y salares terminales, en los cuales se acumularon evaporitas (Alonso, 1986 in Vinante, 2003).

Depósitos Terrazados: Están constituidos por sedimentos gruesos (gravas y arenas) con intercalaciones delgadas de limos y arcillas, y ocasionales niveles de cenizas volcánicas. Estos niveles serían pleistocenos. Se distinguen de los depósitos aluviales y coluviales por su mayor grado de erosión y por su posición topográfica más elevada. En la zona de estudio

existen sedimentos lacustres limo arcilloso, de coloración pardo amarillenta, que incluyen abundantes restos de diatomeas. Estos afloramientos se disponen como remanentes terrazados en ciertos sectores de las márgenes del salar y en el extremo sur de Farallón Catal (Igarzábal et al., 1980).

Formación Incahuasi: La Formación Incahuasi. (Aceñolaza et al., 1976) consiste de coladas y conos de escorias basálticos y andesíticos - basálticos, de colores negro y pardo oscuro. La unidad está bien representada en la sierra de Incahuasi bordeando el Salar Hombre Muerto, en la península de Tincalayu, en Farallón Catal, en Punta Gorda y sus alrededores en el extremo austral del cordón del Gallego y en un pequeño afloramiento ubicado al sur del salar de Ratonés. Estos derrames básicos se han generado después de la fase Diaguita formando parte de dos o más pulsos eruptivos durante el cuaternario. Se trata de basaltos olivínicos macizos, de textura afánítica y de color negro, morado oscuro o pardo rojizo. Están constituidos por fenocristales de olivino y augita, en una pasta vítrea con abundantes tablillas de labradorita y pequeños cristales de augita, magnetita, apatita y rutilo (Aceñolaza et al., 1976). Los basaltos de esta unidad cubren en el flanco oriental de la isla de Catal (península de Los Negros) a unas sedimentitas rojas salinas, yesíferas, fuertemente deformadas, cuya base estratigráfica son las ignimbritas del cerro Galán datadas en 2,03 +/- 0,07 Ma (Sparks et al., 1985 in Vinante, 2003). Esta secuencia, de unos 30 metros de potencia, es Pleistoceno. Por debajo de la ignimbrita continúa una sección de sal de roca, muy mezclada con arena y cenizas volcánicas, que en algunas perforaciones alcanzó 90 metros de espesor (Alonso et al., 1984; Alonso, 1986 in Vinante, 2003). Este volcanismo tardío está relacionado con una etapa tectónica distensiva. Se observa en varios lugares la relación del fallamiento directo activo durante el cuaternario a lo largo de zonas de fallas N-S, NNO-SSE y NE-SO, con extrusiones basálticas fisurales, aparatos monogénicos y conos de escorias (Kayet al., 1990; Coira et al., 1993; Kay et al., 1994; Viramonte y Coira, 1999). El fallamiento normal y de rumbo al que está asociado este volcanismo se produjo en respuesta a modificaciones regionales de las direcciones de esfuerzo iniciadas hace 2 Ma durante la fase diastrófica Diaguita. Seggiaro (1998) considera que la edad de esta formación podría ser extrapolable de una datación de 0,754 +/- 0,02 Ma, obtenida por Watson en el borde oeste de la península de Tincalayu asignándola al Pleistoceno.

Depósitos Evaporíticos: Estos depósitos comprenden el área más baja de la depresión del Salar del Hombre Muerto. Se trata de los depósitos químicos que forman los salares y las lagunas internas periódicas. Vinante (2003) diferencia dentro del ámbito del Salar del Hombre Muerto a las evapofacies carbonáticas, sulfatífera, boratífera y halítica.

La evapofacies carbonática está representada por travertinos y la conspicua presencia de yaretila, una planta almohadillada halófila típica de bordes de salares. Se reconocen travertinos de paleofuentes termales y de depositación lacustre, ambos, formando afloramientos saltuarios principalmente sobre las márgenes del salar. En contraposición se reconoció una faja de yaretila de unos 25 km de longitud pero muy angosta sobre todo en el borde norte y noreste del salar. Los travertinos del borde occidental de Farallón Catal son de origen termal y se asocian a un sistema de fallas de orientación aproximada norte-sur, y se observan a nivel del piso salino, mostrándose muy erosionados; presentan una típica configuración subcircular a circular. Por otro lado, en el sector noreste del salar, al oeste del cerro Ratones, se presentan islotes sobre elevados de 1 a 3 metros con respecto al nivel del salar, cubiertos por una capa de travertinos, de 10 a 30 cm de espesor, de clara depositación lacustre. En el extremo norte de la sierra de Ciénaga Redonda se encontró adosado a rocas de la Formación Pachamama un pequeño afloramiento de travertinos muy arenosos con pátinas de limonitas y manganeso. Los travertinos indican la fase menos soluble. Ambos tipos, lacustres y termales, están compuestos por calcita y aragonita.

La evapofacies sulfatífera presenta un mejor desarrollo y distribución que la evapofacies anterior. Se encuentra a manera de faja continua que bordea prácticamente todo el salar, excepto el borde que se extiende desde la península de Incahuasi hasta la latitud de Burruyacu y el borde occidental de Farallón Catal que no tienen representada a esta evapofacies. Esto es debido a que en esta zona (Subcuenca Occidental del salar) se encuentra el depocentro de la cuenca, lugar que no es el adecuado para la depositación de esta evapofacies. La evapofacies está muy desarrollada en el sector sudeste del salar es decir, por donde ingresa el río de los Patos a la Subcuenca Oriental y en la zona ubicada al este de la península de Incahuasi en coincidencia con el ingreso de los principales aportes hídricos a la subcuenca occidental. En todo el perímetro de la península de Hombre Muerto presenta su menor expresión. Mineralógicamente se encuentra compuesta por yeso, el que se presenta principalmente como arenas yesíferas (gipsarenita), cristales seleníticos y rosetas.

La evapofacies boratífera se distribuye principalmente al norte y este de Farallón Catal y en los alrededores de la península de Hombre Muerto. En las regiones del norte (boralpa) y este de Farallón Catal se encuentra rodeada, en su casi totalidad, por la evapofacies yesífera y sólo sus bordes más occidentales se interdigitan con la evapofacies halítica del depocentro de la cuenca. Esta interdigitación se produce luego de atravesar los angostos pasos

entre la península de Tincalayu y Farallón Catal al norte, y entre Farallón Catal y la península de Hombre Muerto al sur. Los remanentes de ásperos salinos en la región mineralizada del este indicarían depresiones locales de mayor profundidad que posibilitaron la depositación de halita. La región mineralizada al este de la península de Hombre Muerto, en la entrada que hace el salar, presenta un mayor desarrollo de la facies yesífera y clástica hacia su borde oriental. Esta asimetría en sentido este-oeste indica una mayor profundización de esta zona hacia el oeste y un aporte antiguo de agua hacia el este en coincidencia con el río de los Patos enfrente de la península Hombre Muerto se presenta una angosta faja con evapofacies boratífera que hacia el oeste pasa rápidamente al depocentro de acumulación de halita y hacia el este una franja muy estrecha de evapofacies yesífera la separa de las facies clásticas de la península de Hombre Muerto. La mineralogía de esta evapofacies está representada por ulexita y sólo se han encontrado reducidas manifestaciones de tincal en el extremo austral de la península de Tincalayu. La ulexita se presenta en sus clásicas estructuras nodular ("papas") y maciza ("barras"). También se encontraron pequeños nódulos de ulexita en Ciénaga Redonda. Resulta llamativo como la evapofacies boratífera se distribuye a ambos lados del río de los Patos y a partir de la entrada del río en el salar. Asimismo esta zona es la que presenta el mayor desarrollo de la facies clástica y yesífera, dando evidencia de que el principal aporte hídrico a la cuenca dependió casi siempre del río de los Patos.

La evapofacies halítica se encuentra en la mitad occidental del salar (Subcuenca Occidental), ocupándola en casi su totalidad. Está representada por halita maciza. En superficie se reconocen dos tipos morfológicos: "ásperos salinos antiguos" y "costra poligonada activa". Los "ásperos salinos" ocupan una posición central y se caracterizan por crestas salinas, duras, agudas, filosas y resistentes, con impurezas clásticas que le confieren un color pardo claro, muy difíciles de transitar. La costra poligonada, lisa, bordea marginalmente a los ásperos, y se renueva anualmente, mostrando una superficie especular blanca. La costra poligonada está en contacto con la evapofacies boratífera al sur de la península de Tincalayu y en la zona de Laguna Catal y cerro Oscuro. En el borde que se extiende desde la península de Incahuasi hasta un poco al sur de Burruyacu y también en el borde occidental de Farallón Catal la evapofacies halítica se encuentra en contacto con el marco rocoso o con zonas clásticas de escaso desarrollo, esto puede deberse a que no existían ni existen hoy en esta zona cursos importantes de agua que pudieron diluir la salmuera evitando la depositación de halita. Las evapofacies halítica representan las sales de mayor solubilidad que cristalizan al final en las salmueras y se concentran en las depresiones más profundas de la cuenca. Según esto el gran desarrollo de esta evapofacies en la Subcuenca



Occidental indica que este es el depocentro de la cuenca. La empresa FMC-Minera del Altiplano S.A., realizó varios perfiles gravimétricos en la subcuenca occidental del salar que brindaron espesores de halita que van desde 700 a 900 metros. (Godfrey et al., 1997), estimaron que los 700 a 900 metros de halita interpretados por los perfiles gravimétricos se acumularon durante 1,5 a 2 Ma. El análisis, de Godfrey et al., (1997) de la litología de un testigo de 40,7 metros de longitud, extraído de la Subcuenca Occidental por Minera del Altiplano S.A., constituido por halita, con yeso, arena y limos subordinados indica que en esa zona, no existieron lagos de agua dulce durante los últimos 85.000 años. En los alrededores de la pista de aterrizaje (extremo norte del salar) y en el extremo sur de Farallón Catal, se observan depósitos que indican antiguas líneas de costa. Estos representarían cambios en el nivel de base, o más bien situaciones previas de mayor contenido de agua en la cuenca de Hombre Muerto posibilitando la existencia de cuerpos lacustres. Se desprende de la observación de la distribución de las evapofacies en el Salar Hombre Muerto que su zonación es grosera y no alcanza las características clásicas del modelo "Bull - Eye" tal como fuera reconocido en otros salares de la Puna (ej. salar del Rincón, Igarzábal, 1988). Sin embargo, puede establecerse el siguiente modelo tentativo de distribución de facies desde los bordes hacia el centro: facies clásticas, evapofacies carbonáticas, evapofacies yesífera, evapofacies boratífera y evapofacies halítica. De este modo la evapofacies boratífera ocuparía una posición aproximadamente intermedia entre la evapofacies yesífera y halítica. El predominio de halita en la Subcuenca Occidental del salar indica que aquí se encuentra el depocentro de la cuenca. La Subcuenca Oriental se encuentra dominada por las evapofacies boratífera y yesífera. Las evapofacies aumentan de espesor en sentido este-oeste (Alonso, 1987). La interposición de relieves como Farallón Catal impide el desarrollo normal en la zonación lateral de las evapofacies.

Depósitos aluviales y coluviales: Cubren amplios sectores y están restringidos a las zonas deprimidas y a las laderas de los cordones montañosos; consisten en sedimentos inconsolidados a ligeramente consolidados. Se extienden desde las laderas montañosas donde se encuentran formando depósitos de pie de monte coalescentes ya sea como conos, abanicos aluviales y rampas detríticas de escasa pendiente, hasta alcanzar las márgenes del salar e incluso invadirlo, donde es posible observar facies clásticas finas a muy finas (limo-arcillosas) asociadas a suelos almohadillados por fenómenos de geliturbación (Igarzábal, 1981, 1984, in Vinante, 2003). Los depósitos de pie de monte, tanto aluviales como coluviales, están muy distribuidos a partir de alguno de los relieves mayores y tienen una buena representación en el sector norte y noreste del salar donde están asociados a la sierra de Bequeville y al cerro Ratones, en el sector sudeste

asociados al río de los Patos y al sur del salar relacionados al río Trapiche. Excepto los materiales asociados al cono del río Trapiche en el sector sur de la Subcuenca Occidental los depósitos aluviales están restringidos prácticamente a la Subcuenca Oriental del salar. Es muy frecuente la acumulación de arenas eólicas en el ambiente salino y en el marco rocoso, tal como las dunas trepadoras sobre los bordes orientales de Farallón Catal y Tetas de la Pachamama, fuera del salar también fueron observadas en la sierra de Agua de las Palomas.

### **V.1.2. - Estructuras**

Las principales unidades de relieve de la Puna fueron originadas por una tectónica de deformación y dislocamiento de bloques de rocas a lo largo de extensas e importantes fallas regionales que presentan rumbo NO-ESE y controlan la inclinación hacia el norte o hacia el sur. El fracturamiento submeridiano está cruzado por otro de rumbo NO-ESE en muchos casos regmático. Ambos fracturamientos han segmentado el basamento puneño en bloques paralelepípedos que tuvieron gran influencia en el control de las cuencas terciarias y cuaternarias.

La estructura de la Puna en la zona de estudio muestra la superposición de eventos deformativos, de naturaleza dúctil, que han tenido lugar a partir del Neoproterozoico y que han afectado a las rocas del basamento (Hongn 1992; Hongn et al., 1996 in Vinante, 2003). El diseño estructural actual está relacionado con la tectónica Andina, desarrollada durante el Cenozoico. Este ciclo de deformación originó láminas de corrimiento por fallas, con vergencia orientadas tanto al este como al oeste, en parte por reactivación de estructuras previas, las que ejercieron un fuerte control. El moldeado del relieve existente se ha desarrollado en función de estos fracturamientos.

Alonso et al., (1984 in Vinante, 2003) consideraron diferente la rigidez del basamento de las cuencas terciarias de la Puna Austral y Septentrional, que sería consecuencia de la distinta evolución geológica. La Puna Austral fue una comarca positiva durante todo el Mesozoico y el Eoterciario mientras que la Puna Septentrional fue una comarca receptora de sedimentos como lo prueban los potentes depósitos del Grupo Salta. De esta manera la Puna Austral sufrió una erosión prolongada que puso al descubierto un basamento más profundo y de mayor rigidez. La respuesta a los esfuerzos actuantes fue asimilada de diferente manera por los basamentos austral y septentrional, tanto por su rigidez como por su contexto regional. El basamento rígido austral está asimismo en contacto, por el oriente, con el extremo septentrional del Cratógeno Central Argentino (Bracaccini, 1960 in Vinante, 2003) conocido actualmente como Sierras Pampeanas Septentrionales. Al actuar los esfuerzos

deformantes incaicos, el piso "peneplanizado" austral, afirmando a la masa cratogénica oriental, reflectora de esfuerzos, se fracturó profundamente. Esto originó posteriormente cuencas con alto índice de subsidencia que se rellenaron de sedimentos continentales que albergan los importantes cuerpos evaporíticos mio-pliocenos con halita, yeso y boratos. La Puna Septentrional tiene como contrafuerte a los terrenos de la Cordillera Oriental y ha sufrido un fracturamiento somero mostrando depocentros terciarios reducidos sin presencia de grandes masas evaporíticas.

En tiempos Cuaternarios la tectónica reactivó el fracturamiento, generando en la Puna Austral nuevas y profundas depresiones, en partes coincidentes con las cubetas terciarias y en partes nuevas, donde a partir del Pleistoceno se han acumulado depósitos clásticos y evaporíticos con delgadas intercalaciones piroclásticas. En la Puna Austral, la intensidad del fracturamiento está además reflejada en derrames fisurales y centros monogénicos de volcanitas básicas, fuertemente contaminados, que están indicando el acceso a cámaras magmáticas en niveles corticales más profundos, a diferencia de la Puna Septentrional que muestra cubetas superficiales y ausencia y/o limitada presencia de volcanismo básico reciente (Alonso, 1986). Varios autores han analizado desde diferentes puntos de vista el papel del fracturamiento y el volcanismo en la Puna destacando los aspectos en los que han influido: fenómenos metalogénicos y ubicación de las principales mineralizaciones, control paleogeográfico de la sedimentación, efusividad de las cuencas cenozoicas puneñas y construcción de cadenas volcánicas transversales. El marco estructural del área de trabajo muestra la superposición de deformaciones. El registro estratigráfico permite diferenciar estructuras de las siguientes edades: Pre ordovícico (principalmente Neoproterozoico-Eocámbrico), Ordovícico y Cenozoico (Vinante, 2003).

#### a) Estructuras neoproterozoico-eocámbricas

Las deformaciones neoproterozoico-eocámbricas originan gran parte de la compleja estructura que muestra el basamento cristalino. La fase Tilcárca (Turner y Méndez, 1975) con la que finalizó el Ciclo Panamericano (Harrington, 1972 y 1975) o Ciclo Pampeano (Aceñolaza y Toselli, 1976) constituye la deformación principal de este ciclo (Hongn y Seggiaro, 1998 in Vinante, 2003). El basamento fue removilizado durante las orogénias paleozoicas (Guandacólica y Oclóyica del Ciclo Famatiniano, las que produjeron fajas localizadas de deformación. La escasez de datos radimétricos no permite una cronología adecuada de las deformaciones superpuestas que caracterizan a gran parte de los afloramientos del basamento, como tampoco correlacionar las estructuras que muestran unidades geográficamente desconectadas entre sí. Las estructuras de la Formación Pachamama muestran tres fases de

deformación superpuestas: El Complejo Metamórfico Río Blanco también muestra una estructura neoproterozoico-eocámbrica compleja que se advierte en aquellos lugares donde la deformación guandacólico-oclóyica no fue intensa.

#### b) Estructuras ordovícicas

Fueron impresas por las fases Guandacol de fines del Arenigiano y Oclóyica ubicada en las inmediaciones del límite Ordovícico-Silúrico. Ambas fases de deformación forman parte del Ciclo Famatiniano. La estructura de las sedimentitas y leptometamorfitas (formaciones Tolillar y Falda Ciénaga) serían debidas principalmente a la fase Oclóyica dado que niveles postguandacólicos están deformados, dando lugar a un plegamiento intenso (Vinante, 2003). Las estructuras guandacólicas mejor representadas corresponderían a las fajas de cizalla dúctil que muestra el Complejo Eruptivo Oire, en parte sintectónico y con edades guandacólicas. Las fallas paleozoicas son de bajo ángulo. Algunas fueron reactivadas durante la deformación neógena, hecho que dificulta su reconocimiento directo. La falla paleozoica de mayor significado tectónico regional es la que marca el contacto entre las metamorfitas del basamento y las sedimentitas y leptometamorfitas ordovícicas (corrimiento Jote-Hombre Muerto). La edad de la deformación de las unidades sedimentarias y leptometamorfitas del Ordovícico es Ashgilliana, dado que más al norte afectó a niveles tremadocianos cubiertos en discordancia por sedimentitas ashgilliano-silúricas. Las fajas de alta deformación dúctil constituyen un rasgo tectónico principal del basamento cristalino del borde oriental de la Puna y de los Valles Calchaquíes. Estas muestran diferentes orientaciones, cinemáticas y condiciones metamórficas de foliación (Hongn, 1994 in Vinante, 2003). Las fajas miloníticas de mayor temperatura predominan en el borde oriental de la Puna mientras que las desarrolladas en ambiente metamórfico de bajo grado son habituales en el basamento de los Valles Calchaquíes. Se aprecia como tendencia general que las fajas de deformación dúctil desarrolladas en condiciones de mediano a alto grado de metamorfismo, son de menor inclinación que las originadas en facies de esquistos verdes. Estas zonas de bajo ángulo estarían relacionadas con el levantamiento y cabalgamiento hacia el oeste del basamento del borde oriental de la Puna (Vinante, 2003).

#### c) Estructuras cenozoicas

Desde el punto de vista geodinámico, el sector andino de la zona de estudio corresponde a una zona de transición entre un área situada al norte de los 24° S con inclinación del plano de Wadatti - Benioff de 30°, y otra situada al sur de los 28° S con dicho plano inclinado con valores bajos, cercanos a los 5° (Isacks et al., 1982; Jordan et al., 1983 in Vinante, 2003). A estas variaciones en la geometría y velocidad de la placa de Nazca que generaron

modificaciones cinemáticas y en la tasa de deformación asociadas (con compresión y extensión subhorizontal) se atribuyen los cambios en las estructuras cenozoicas que se aprecian en la región. Algunos autores describen una migración temporal de las estructuras, las que son progresivamente más modernas hacia el este y hacia el sur. Las diferentes fases diastóricas del Cenozoico que se han distinguido en los movimientos andinos están representadas con diferentes grados de definición: La fase diastórica Incaica generó el relieve a partir del cual se producen en la Puna los depósitos de la Formación Geste. Esta fase condujo a la inversión de la cuenca del Grupo Salta y a partir de ella comenzó el depósito de las secuencias del Terciario. Los registros de la fase Pehuenche son escasos. El episodio magmático que la acompañó tiene escasos representantes. Quizás a ésta se relacionen las ignimbritas de 17 Ma de la Formación Catal y los cuerpos subvolcánicos de la Formación Inca Viejo. La deformación cenozoica más importante está relacionada con la fase Quechua del Mioceno. Los principales efectos de esta fase fueron el acortamiento y levantamiento de la Puna y el levantamiento de la Cordillera Oriental sur (Jordan y Alonso, 1987 in Vinante, 2003). Durante ese tiempo el volcánismo tenía una intensa actividad, representado por las dacitas y andesitas de la Formación Tebenquicho y las ignimbritas de 13 Ma de la Formación Catal. Las estructuras relacionadas con la fase Diaguita (Plioceno Superior) muestran una distribución areal irregular. A este evento se relacionaría parte del plegamiento de las unidades paleógenas y neógenas en la Puna. A ella también se relacionaría el volcanismo al final del Plioceno, cuyo principal exponente es la caldera del Cerro Galán y depósitos asociados. Durante la fase Diaguita, además, se reactivan estructuras previas y se definen los principales cordones montañosos que caracterizan el relieve actual (Hongn, 1998 in Vinante, 2003). En algún momento durante el Cuaternario, cuando se produjo el cambio en la cinemática de la deformación, se comenzaron a mostrar direcciones de acortamiento y extensión subhorizontales. Este cambio produjo estructuras que muestran una fuerte componente de desplazamiento de rumbo. Las efusiones de basaltos cuaternarios de la Puna están relacionadas con esta cinemática, especialmente a quiebres o variaciones en el rumbo que generan situaciones locales de tanstensión. La falla de Acazoque constituye el ejemplo más ilustrativo de esta relación, dado que corresponde a una falla dextral de rumbo general norte-sur con efusiones basálticas en zonas donde la estructura tuerce hacia el NE.

Según Jordan et al., (1999), en el contorno del salar se reconocen tres juegos de fallas. El flanco occidental del Salar del Hombre Muerto, estaría controlado por cuatro fallas del sistema de la Falla de Acazoque de orientación NE-SE, correspondiendo la geometría de este juego a una transferencia de deformación desde la Falla Acazoque hacia las otras tres que se localizan al

Noreste y hacia el interior del salar. En el centro del salar se observan dos fallas de orientación N-S del flanco occidental de la Isla de Catal y una falla N-S al sur del salar que controlan los rasgos topográficos principales. En el flanco oriental del Salar del Hombre Muerto se encuentra otra falla de orientación N-S que controla el flanco oriental. Por último a través de interpretaciones de imágenes satelitales se detectó un cuarto juego de fallas de rumbo con orientación ENE-OSO, cuya geometría corresponde a la componente conjugada del sistema de la Falla Acazoque, según el elipsoide de deformación de Marrett et al., (1994). Este juego es claramente observado al Sur de Península Tincalayu, afectando sedimentitas ordovícicas del Cordón del Gallego al Oeste, y es concordante con la alineación ENE-OSO de conos monogénicos de efusiones basálticas cuaternarias dentro del salar entre Península Tincalayu y Farallón Catal.

En el entorno de la cuenca imbrífera del río Los Patos, se destaca una falla regional de rumbo norte sur, que se aprecia desde la ladera oriental del volcán Ratones, demarcando el faldeo occidental de la sierra Ciénaga Redonda y delimitando el valle o planicie aluvial del río Los Patos en su margen derecha. Otra notable estructura consiste en una falla de rumbo NO-SE, que controla la península del Hombre Muerto, la vega homónima y el volcán Cerro Amarillo. Posteriormente se aprecian una serie de lineamientos, submeridionales, que afectan a las ignimbritas del Complejo Volcánico Cerro Galán, que podrían indicar la presencia de fallas, algunas de ellas probablemente reflejo de procesos de neotectónica.

### **V.1.3. - Geomorfología**

Un aspecto sobresaliente de todo el ámbito del Salar del Hombre Muerto son las escasas precipitaciones, fuerte amplitud térmica, vientos constantes y elevada componente de evaporación, que de acuerdo a cálculos estimativos superarían los 2.500 mm anuales. Estos aspectos climáticos tan singulares se reflejan directamente en el relieve y el paisaje del lugar.

Los contornos del Salar del Hombre Muerto están asociados a una variada gama paisajística que contrasta entre amplios y extensos conos aluviales como los de los ríos Los Patos y Trapiche, con el aparato volcánico de Ratones, que se eleva unos 1.200 metros sobre el piso del salar. Como ocurre en la casi totalidad de los salares de la Puna, el Salar del Hombre Muerto está emplazado en un amplio bolsón topográfico integrado por un estrecho, alargado y bajo relieve residual (Farallón Catal), a partir del cual, a uno y otro lado del mismo, el ambiente salino posee características distintivas (Igarzábal y Poppi, 1980). El sector oriental ocupa aproximadamente 1/3 de la superficie total del salar, está asociado a un relieve donde predominan

geoformas volcánicas e intrusivas, importantes conos aluviales y varios cursos fluviales de régimen permanente y temporario. Se trata de una subcuenca yesífera – boratífera (Vinante, 2003) con bajo contenido en cloruros y presenta una resolución superficial de limos y arcillas dominante, cubierta en la mayoría de los casos por una capa salina de espesor milimétrico a centimétrico. El sector occidental presenta un relieve generalmente con suaves lomadas, donde se asienta una densa red de drenaje de arroyos y arroyuelos de régimen temporal, sin la presencia de ningún curso fluvial importante y se diferencia claramente de la anterior por que presentan tanto en superficie como en profundidad potentes acumulaciones de halita y escasa presencia de boratos.

Igarzábal y Poppi (1980) indican que aun cuando el Salar del Hombre Muerto se comporta como una cuenca cerrada única, la configuración y rasgos morfogénicos asociados permiten inferir que a uno y otro lado de Farallón Catal, el relieve evolucionó independientemente. Estos autores afirman que el sector oriental fue influenciado directamente por aportes volcánicos sólidos y líquidos y por acarreo detríticos provenientes del desmantelamiento de los depósitos de tobas y rocas graníticas; mientras que la depresión occidental está influenciada por el predominio de terrenos ordovícicos que conforman su perímetro, inclusive el de varios afloramientos internos al mismo señalan la homogeneidad petrográfica.

El Salar del Hombre Muerto es una cuenca cerrada con drenaje interno, donde el ingreso de agua al sistema se produce principalmente por el aporte de agua superficial de los ríos Los Patos y Trapiche, aportes subterráneos y precipitaciones directas. El área del Salar del Hombre Muerto incluye rasgos morfológicos sobresalientes como la Laguna Verde, Laguna Catal, río Los Patos y su delta y el río Trapiche con su cono aluvial. La Laguna Verde es un cuerpo de agua de salmuera, extensa y poco profunda que se desarrolla en el sector noreste del salar. Los márgenes consisten en un litoral plano con pendientes moderadas a escarpadas hacia el oeste y norte. La Laguna Catal se localiza en el sector sur del salar y conforma un cuerpo extenso y poco profundo de agua salada limitada al norte por las laderas del Farallón Catal y hacia el sur por planicies de sal y pequeños asomos de vegetación de pantanos asociadas con el agua dulce proveniente del río Trapiche y la vega del Hombre Muerto.

El río Trapiche, luego de abandonar su alta cuenca, conforma un cono aluvial de una longitud aproximada de 7,5 kilómetros entre su ápice y la parte distal, en inmediaciones de la paleoribera con el salar y un ancho máximo de aproximadamente 5,5 kilómetros en la parte distal. La característica más singular del río Trapiche es que sus caudales superficiales se infiltran en el cono aluvial casi en forma inmediata, unos 3 kilómetros aguas abajo de la zona

de efluencia. De esta manera, se puede afirmar con cierto grado de certeza que las aguas superficiales de esta fuente no alcanzan nunca el borde del salar.

El valle fluvial del río Los Patos conforma una morfología sobresaliente en el ambiente del Salar del Hombre Muerto, siendo la característica más conspicua la formación de un delta cuando se produce el ingreso del curso fluvial al salar. En este sector, el escurrimiento superficial se dirige una parte hacia el noroeste vertiendo sus caudales a la Laguna Verde y otra, hacia el sudoeste, entregando agua a la Laguna Catal. En las cabeceras recibe el aporte de manantiales termales (Igarzábal y Poppi, 1980). El ambiente lacustre de Catal se pone en evidencia por la presencia de sedimentos limosos y arcillosos de color amarillento, con diatomeas que se disponen como terrazas en algunos sectores de las márgenes del salar, tal como se puede observar en las inmediaciones de la pista de aterrizaje y en el extremo sur de Farallón Catal. Teniendo en cuenta las dimensiones del cono fluvial del río Los Patos y la enorme cantidad de material clástico depositado, se puede inferir que esta geoforma se habría formado en épocas donde existía un mayor aporte de caudal superficial que el actualmente observado.

Jordan et al., (1999) plantean la hipótesis de que la mayoría de los materiales clásticos aportados por el río Los Patos se acumularon en la cubeta oriental. La existencia de evaporitas con escasa participación clástica en la cubeta occidental es consecuencia de la falta de coincidencia entre la zona donde desemboca el río más importante y la zona con subsidencia tectónica. La cubeta oriental ha servido como un filtro para la masa detrítica aportada al salar. Mientras tanto el agua del mismo río tiene la posibilidad de infiltrarse o quedar encauzada para llegar hasta la cubeta occidental.

La configuración superficial del Salar del Hombre Muerto, como la gran mayoría de los salares de la Puna, aparenta ser un plano casi horizontal, pero observado en detalle, se puede evidenciar una ligera pero manifiesta superficie convexa; es decir que el centro del salar suele ser más alto que los márgenes. El origen de esta suave curvatura (Igarzábal y Poppi, 1980) suele ser secundaria, es decir que se origina a partir de la disolución de las sales en los sectores marginales, allí donde el escurrimiento superficial esporádico puede disolver las sales, a diferencia de la masa salina central que casi nunca es alcanzada por el escurrimiento superficial de los bordes.

Una de las características sobresalientes de los salares es la presencia de costras salinas que le brindan a la superficie del salar aspectos diferentes. La formación de los distintos tipos de costras salinas se deben a dos factores



esenciales; uno debido a la naturaleza petrográfica y mineralógica de los materiales que la componen y por el otro lado, a la influencia climática.

En el Salar del Hombre Muerto (como así también en casi todos los otros salares de la Puna) es posible distinguir dos tipos fundamentales de costras: las costras rugosas y las costras lisas. Las primeras suelen caracterizarse por ser las que más ampliamente están distribuidas en la superficie del salar; suelen ser muy duras a extremadamente duras, densas, cristalinas y poseen material terroso de diferente granulometría (arenas, limos y/o arcillas). Las segundas son duras, cristalinas y sin material terroso.

Entre las costras rugosas, predominan las de halita poligonada. Este tipo de costra constituye masas de sal primaria con una marcada diagénesis (también llamada costra fósil). En algunos sectores del salar, la rugosidad es tan intensa que le proporciona una configuración escorácea que hace dificultosa la movilidad (sea caminando o en vehículos).

Si bien la masa principal está compuesta de Cloruro de Sodio (halita), también se encuentran otros minerales accesorios como yeso y boratos. Estas costras suelen presentar una tonalidad parda rojiza debido a la presencia de material terroso (como arenas finas y limos) que los suele recubrir con una delgada capa (inferior al centímetro en algunos casos).

La costra poligonada se manifiesta en algunos sectores muy deformada debido a la movilidad compresiva del salar. Las grietas que separan los polígonos constituyen líneas específicas que orientan la disolución en profundidad (Igarzábal, 1980). Las costras rugosas son la expresión de lentos pero prolongados efectos de disolución a cargo de las precipitaciones líquidas y sólidas, siendo el efecto más marcado cuando se producen nevadas. Las costras rugosas evolucionan favorablemente en aquellos sectores del salar donde no es común el escurrimiento superficial.

El otro tipo característico de costra que se observa en el Salar del Hombre Muerto son las costras lisas poligonizadas. Este tipo de costra representa un estado avanzado del allanamiento por escurrimiento superficial de la halita expuesta a dicha actividad (Igarzábal, 1980). Este tipo de costra es típica de salares con presencia de nivel freático cercano a superficie y anegamientos temporarios de agua superficial. Las figuras geométricas resultantes suelen ser pentagonales o hexagonales y poseen diámetros decimétricos hasta un metro, o un poco más. Este tipo de costra suele ser interrumpida solamente por algunos intercrecimientos de sales en las grietas

que separan las células poligonadas o por los denominados “ojos de agua”, generalmente asociados a este tipo de costra.

Los “ojos de agua” son respiraderos por donde se produce escape de gas, aparentemente de origen orgánico, procedente de la descomposición del material turboso (arcillas verdes y negras, orgánicas) que se localizan en los primeros metros del salar. Estas morfologías se producen únicamente en la zona de costras lisas poligonizadas y en especial en aquellos lugares donde el agua subterránea se encuentra muy cercana a la superficie, a escasa profundidad (menos de 20 centímetros).

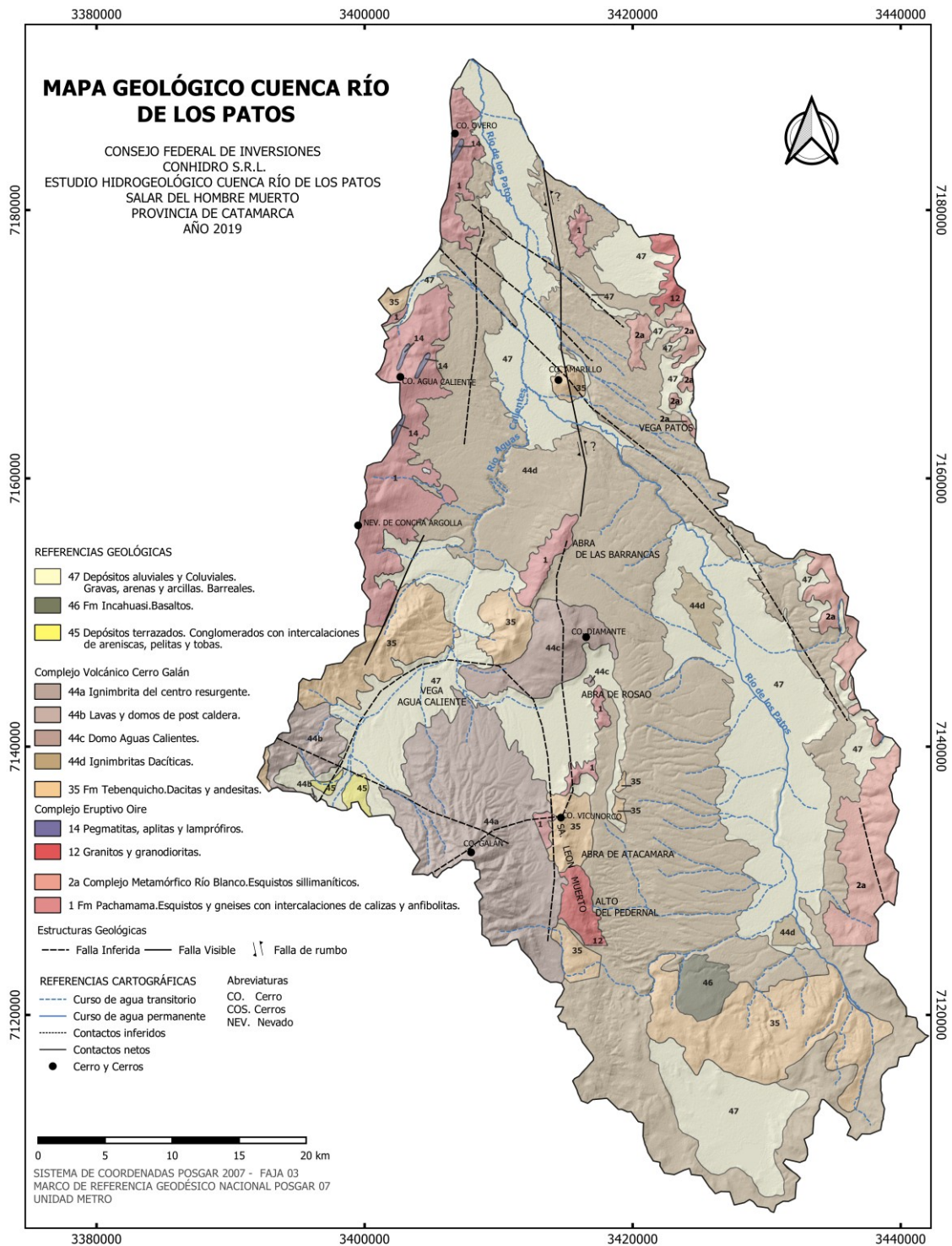


Figura 3: Mapa geológico de la cuenca del río Los Patos, modificado en este trabajo, de Hoja Geológica Cachi (2566-III) y Vinante, 2003.

## **V.2 - HIDROGEOLOGÍA**

### **V.2.1 – Consideraciones generales**

El Salar del Hombre Muerto, el valle fluvial y cono aluvial del río Los Patos y el cono aluvial del río Trapiche, desde el punto de vista regional, han sido incluidos en la región "Puna", de acuerdo a la caracterización hidrogeológica del Noroeste Argentino efectuada por Fuertes et al., (1990). Desde el punto de vista de la génesis del agua subterránea, pertenece a la Provincia Hidrogeológica de Frente Montañoso, siguiendo el criterio de Issar y Passchier (1990), ya que los acuíferos que caracterizan esta provincia se encuentran en ambientes aluviales modernos a subactuales, situados al pie de un relieve montañoso y la superficie del área de aporte a la recarga es mucho más importante que la del reservorio y se encuentra fuera de los límites del mismo.

### **V.2.2 - Características climáticas**

El ambiente en el cual se desarrolla el presente estudio, posee un clima de tipo Continental Andino intenso, alcanzando a poseer condiciones de clima desértico. El área se caracteriza por presentar escasas precipitaciones líquidas, originadas en la gran mayoría de los casos, en las masas de aire atlántica que provienen del este. Desde el punto de vista climático, la Puna se comporta como un "superficie aislada de considerable calentamiento en gran altura que desarrolla un fuerte ascenso de aire caliente en la atmósfera" (Bianchi y Yáñez, 1992). Por otra parte, y debido a su elevada altura media (3.900 m s.n.m.) y magnitud del bloque oriental (que alcanza y supera los 6.000 metros en la sierra de Santa Victoria y en los nevados de Chañi, Palermo y Cachi) impide la producción de altas precipitaciones; dando lugar así a un desierto de altura (Bianchi y Yáñez, 1992).

En el dominio andino, la extrema sequedad del aire, las bajas temperaturas y los pronunciados cambios de ésta última entre el día y la noche, hacen de esta región un lugar extremadamente difícil para el desarrollo de la vida y de las actividades del hombre. En el sector más occidental de la región, sólo en los picos más altos de los macizos rocosos, que pueden alcanzar la zona de circulación atmosférica del Pacífico, presentan sus cumbres nevadas; en ellos el límite inferior de las nieves se encuentra por encima de los 6.000 m. s.n.m. Las condiciones son tan extremas en algunos lugares de la Puna, que autores como Knoche y Borzacov (1946 in Conhidro, 2002) han indicado que el área de salares, barreales y borateras son tal vez las más secas de la tierra,

con una humedad absoluta prácticamente igual a cero y con valores de sequedad que superan ampliamente a los obtenidos en el desierto de Sahara.

Poco se conoce con respecto a las precipitaciones sólidas (granizo y nevadas), que sin lugar a dudas deben tener una significativa relevancia en el ciclo hidrológico de la región. La existencia de nevadas entre los meses de junio a agosto y granizadas en los meses de abril – mayo y septiembre – octubre, es común en casi todo el ámbito de la Puna. El clima de la Puna Austral se caracteriza por la marcada aridez, significativa amplitud térmica diaria, la diafanidad del cielo y las constantes ráfagas de viento que suelen iniciarse durante las primeras horas de la tarde y finalizan al anochecer. En la corta época estival, se producen lluvias que normalmente no superan los 100 milímetros anuales; la temperatura media anual es de 5,3 °C y la humedad relativa, extremadamente baja. Durante los meses de invierno se producen fuertes nevadas en los sistemas serranos del entorno.

No existen datos hidrometeorológicos en el entorno de la Cuenca del río Los Patos, siendo el sitio con información más cercano, la Estación Campamento Fénix, perteneciente a Minera del Altiplano S.A, ubicada en el extremo SO del Salar del Hombre Muerto. El tratamiento estadístico de los datos hidrometeorológicos muestra una precipitación media anual de 82,1 mm/año. En el ambiente del Salar del Hombre Muerto, los registros de precipitaciones para el período comprendido entre 1992 – 2016 indica que las lluvias ocurren entre los meses de diciembre a marzo, donde precipita aproximadamente el 90 % del total anual.

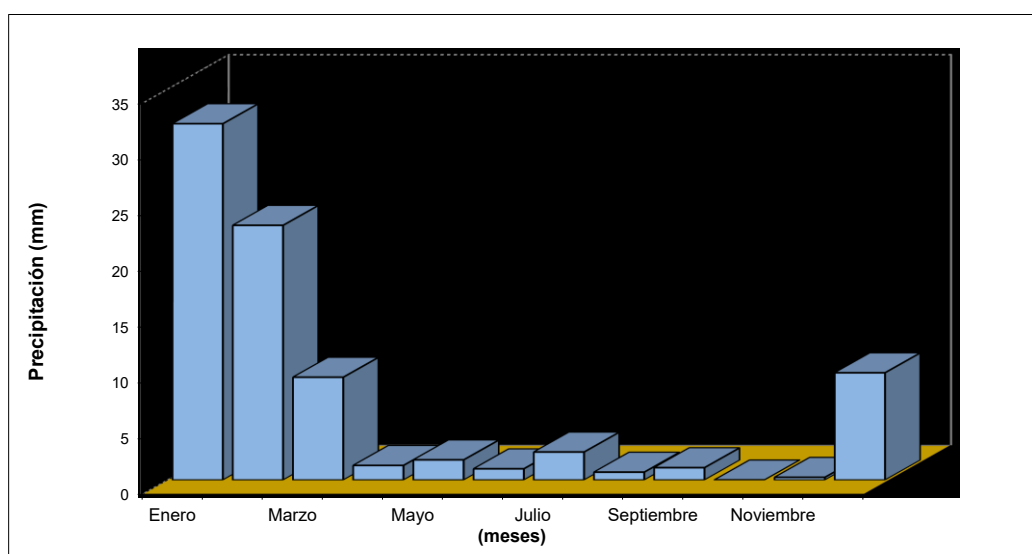


Figura 4: Precipitaciones medias mensuales en el Campamento Fénix (Conhidro, 2016).

Las temperaturas medias mensuales medidas en el Campamento Fénix se muestran en la Figura 5.

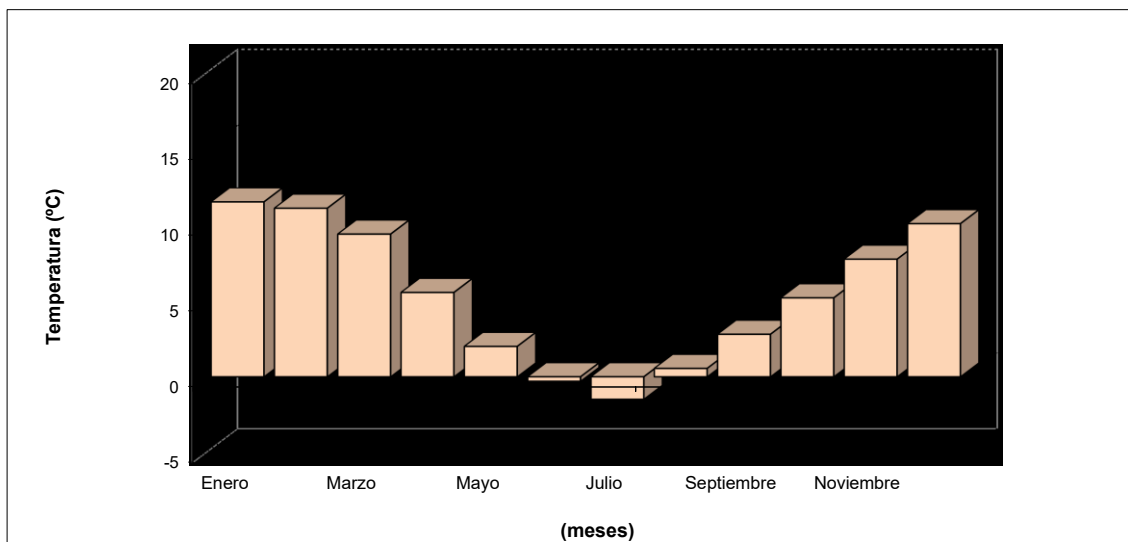


Figura 5: Temperaturas medias mensuales en el Campamento Fénix (Conhidro, 2016).

### **V.2.3 - Hidrología superficial**

El río Los Patos es un curso fluvial de régimen permanente con caudales medios mensuales muy contrastantes y fluctuantes según las diferentes épocas del año. Nace en los flancos norte y este del cerro Galán y recorre un trayecto de aproximadamente 99 km hasta descargar en la margen oriental del Salar del Hombre Muerto. La altura del cerro Galán aún le permite receptor las casi agotadas corrientes de vientos húmedos que logran flanquear los contrafuertes orientales de la Puna, a esa latitud, resultando ser sino la única, la más importante fuente de alimentación del curso fluvial. Otro curso de agua, de régimen temporario, que nace en el flanco norte del cerro Galán es el río Agua Caliente que vierte sus aguas al río Los Patos a la latitud del cerro Agua Caliente. Ambos ríos escurren totalmente sobre rocas volcánicas terciarias (principalmente sobre la Ignimbrita del cerro Galán). El río Los Patos es la fuente más importante de aguas superficiales que aporta a la cubeta que conforma el salar y ocupa una superficie aproximada de 1.974 km<sup>2</sup>; aproximadamente unas siete veces más que la del río Trapiche, lo que señala su importancia y magnitud.

El relieve de la cuenca viene definido por la curva hipsométrica, que representa en ordenadas la altitud y en abscisas el porcentaje de área de la cuenca situada por encima de dicha altitud. De acuerdo a este gráfico, la altura media de la cuenca es de 4.529 m s.n.m.

Los parámetros morfométricos obtenidos por Conhidro (2016), dan cuenta de una cuenca alargada (Índice de Gravelius calculado es 0,2005 y un Índice de Compacidad de 5,69).

Nuestro grupo de trabajo en Conhidro (2016) advierte que, lamentablemente, no existen datos estadísticos continuos de registro de caudales del río Los Patos, lo que impide efectuar una correcta caracterización del curso fluvial. Mediciones realizadas por Minera del Altiplano S.A., entre los años 1992 – 1998 permiten realizar algunas consideraciones. Excluyendo un mes sin registro (julio de 1995) y dos meses donde el curso fluvial se encontraba totalmente congelado (julio de 1996 y junio de 1997), la serie de datos para el período mencionado está completa y constituye el antecedente más importante en cuanto al registro de caudales en la cuenca del río Los Patos.

En efecto, observando el hidrograma parcial se advierte que el río Los Patos presenta, en el ciclo de mediciones, un caudal mínimo de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y un máximo de  $3,8 \text{ m}^3/\text{s}$  y un caudal medio de  $1,81 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 6). Del análisis, se advierte que los máximos caudales se registran en el mes de agosto; mientras que el mínimo parece ser errático entre los meses de diciembre y febrero.

Durante los trabajos de campo realizados en el presente proyecto, se realizaron 5 aforos, cuatro de ellos en el río Los Patos y el quinto en el Aguas Calientes. Los detalles y resultados de estas mediciones se muestran en la sección V.5 - Medición de caudales superficiales.

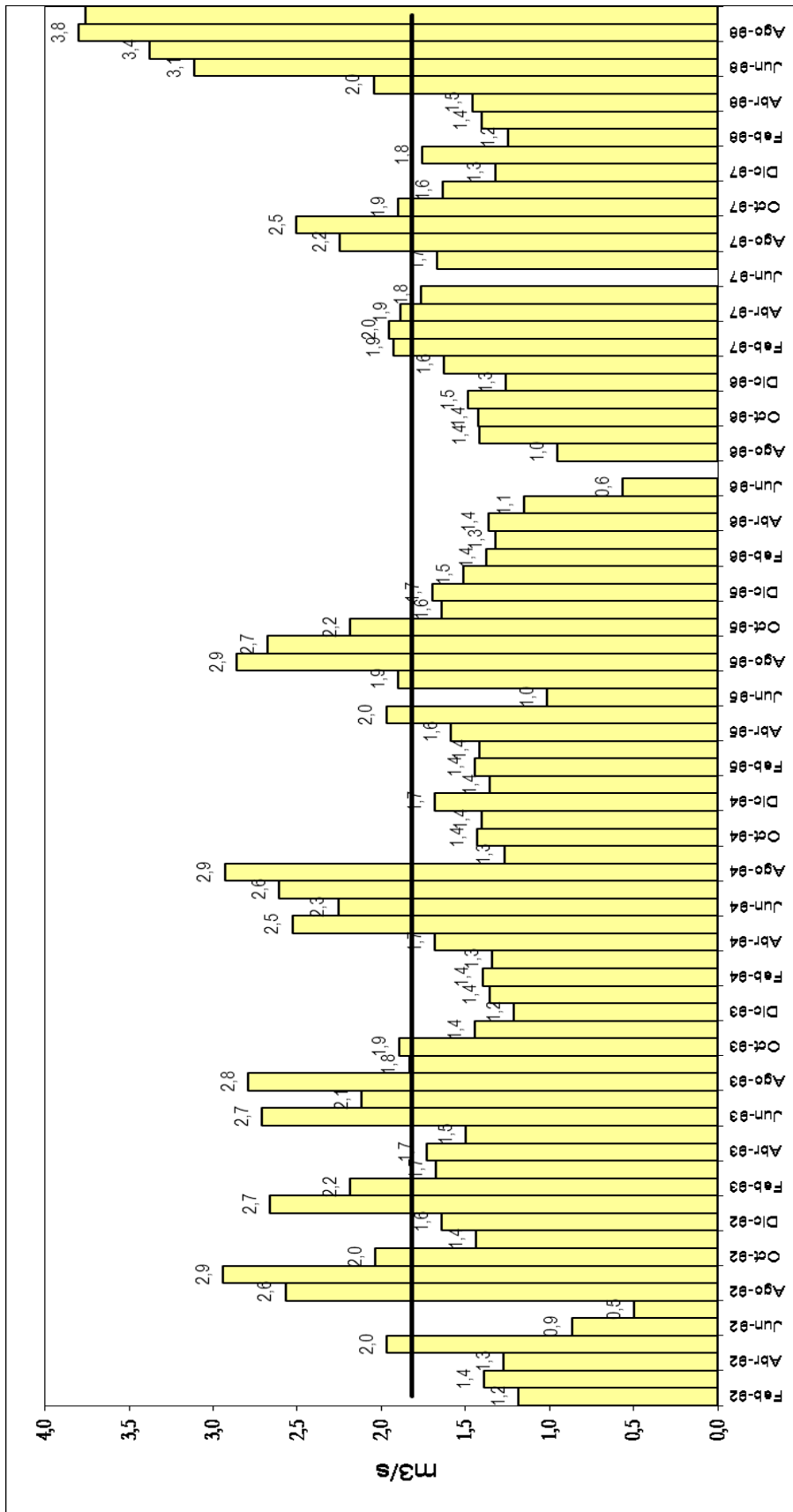


Figura 6: Hidrograma del río Los Patos (Minera del Altiplano, 1992 – 1998). (Conhidro, 2016).



#### **V.2.4 - Hidrología subterránea**

En el Salar del Hombre Muerto se desarrolla un sistema acuífero caracterizado por la presencia de agua salada y salmueras en facies clásticas y evaporíticas; mientras que en los conos aluviales de los ríos Los Patos y Trapiche los reservorios, de origen clástico principalmente, almacenan agua dulce, salobre y salada.

Los reservorios de agua subterránea de la región están representados por tres grandes unidades que interactúan entre sí de distintas formas, en función de la dinámica global del ambiente hidrogeológico. Estas tres grandes unidades son el Sistema Acuífero del Salar del Hombre Muerto, el Sistema Acuífero del Río Los Patos y el Sistema Acuífero del Río Trapiche (Conhidro, 2002).

El sistema Acuífero Río Los Patos (SALP), se encuentra en plena etapa de estudio, en procura de lograr un adecuado modelo conceptual. Afortunadamente existen una serie de estudios que han permitido de manera parcial, caracterizar la composición del subsuelo y especular sobre las características hidrogeológicas de las unidades que lo componen.

El presente informe complementa y aglutina información que facilitará la elaboración de un modelo geológico de subsuelo que, en etapas posteriores, dará soporte a modelaciones numéricas que reproduzcan el flujo del agua subterránea.

Del análisis de los antecedentes recopilados, surge que el mayor déficit de información, está relacionado a la hidrometeorología. Los escasos datos de aforos del escurrimiento superficial y la inexistencia de datos hidrometeorológicos de la propia cuenca, imponen el principal desafío para los estudios posteriores y para lograr una correcta calibración y validación de los modelos matemáticos que puedan proponerse.

Los estudios realizados por nuestro grupo de trabajo para la evaluación hidrogeológica del sitio donde la empresa LIVENT extraerá agua subterránea para la ampliación del proceso industrial de obtención de carbonato de litio, brindaron un gran salto en el conocimiento de las características del reservorio en ese sector. La realización de perforaciones exploratorias permitió, no solo la confirmación de los modelos geofísicos que se habían propuesto, sino que también sirvió para caracterizar aspectos hidráulicos e hidroquímicos del sistema. Las variaciones geológicas existentes en el ámbito o dominio del sistema acuífero, muestran una heterogeneidad en los medios de circulación

del agua subterránea, que inevitablemente advierte sobre las variaciones de los parámetros fundamentales de cada unidad acuífera (permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento). A este escenario se le suma la compleja relación con el dominio del salar del Hombre Muerto, el cual resulta ser el receptor del flujo de agua superficial y subterráneo del SALP. Este salar contiene salmueras, que subyacen al sistema de agua fresca a modo de cuña salina y que genera un basamento hidrogeológico técnico local.

### **Descripción general del SALP**

Conhidro SRL en el año 2016 describe que: El cono y valle fluvial del río Los Patos es la unidad morfológica que conforma el reservorio de agua dulce más importante de la cuenca del Salar del Hombre Muerto, con una superficie de aproximadamente 133 km<sup>2</sup> y con un espesor saturado medio (determinado a partir de datos geofísicos) de 50 metros (Figura 7). Dentro de esta área, el reservorio de agua subterránea más importante que almacenaría agua dulce o aprovechable desde el punto de vista industrial está conformado por esta unidad de estudio. Normalmente, en este tipo de cuerpo sedimentario (valle fluvial y cono aluvial) se origina un reservorio natural muy favorable para el almacenamiento de agua subterránea. Teniendo presente su morfología y aspectos tales como litología y comportamiento del agua subterránea almacenada, los conos aluviales pueden ser divididos en tres sectores principales que se denominan: Zona de Recarga, Zona de Conducción y Zona de Descarga.

La Zona de Recarga corresponde a la alta cuenca y la misma se efectúa a lo largo del cauce de los cursos fluviales y fuera de éstos, por infiltración directa a partir de las precipitaciones líquidas y sólidas. De esta forma se incorpora agua al acuífero libre.

La Zona de Conducción de este reservorio se encuentra geográficamente coincidiendo con el valle fluvial del río Los Patos, principalmente a partir de aquel lugar donde comienza a existir el relleno sedimentario moderno. En esta región, a pesar de no contar con datos de piezometría se interpreta que el flujo subterráneo es del tipo cilíndrico planar ya que el acuífero desarrollado en el valle fluvial está controlado por la presencia de afloramientos semipermeables a impermeables (principalmente rocas terciarias, volcánicas).

La Zona de Descarga, como su nombre lo indica corresponde a aquel sector donde el agua subterránea se manifiesta en superficie a través de bañados, zonas anegadizas y manantiales. En la región, este sector está

representado por una franja paralela al borde del salar y presenta una forma irregular. En este ambiente hidrogeológico con características tan singulares, se produce un fenómeno igualmente particular ya que se origina una zona de mezcla de agua dulce, proveniente del Sistema Acuífero del Río Los Patos y de agua salada y salmueras proveniente del salar (Sistema Acuífero del Salar del Hombre Muerto).

Cuando se quiere caracterizar el reservorio de agua subterránea, primeramente se debe estudiar el ambiente geológico analizando la litología y la estructura del lugar; simultáneamente se tiene que establecer la capacidad de almacenar y de transmitir agua subterránea de ese reservorio. Puesto que el valle y cono aluvial del río Los Patos es la unidad morfológica que conforma el reservorio más importante de la región en el entorno del proyecto, entre otros aspectos, se determinó su superficie (a través de imágenes satelitales) y se realizó prospección geoeléctrica con la finalidad de determinar el espesor medio del reservorio y las propiedades litológicas de los sedimentos y del fluido.

La superficie de la cuenca del río Los Patos es de 1.974 Km<sup>2</sup>; mientras que el cono y valle fluvial cubre un área de aproximadamente 133 km<sup>2</sup> contabilizando exclusivamente las zonas donde existe relleno sedimentario (confluencia de los ríos Los Patos y Agua Caliente hasta el borde más boreal del cono aluvial ya dentro del ambiente del salar). De esta manera se puede observar claramente que el área de aporte a la recarga en este sistema acuífero es unas 15 veces superior a la superficie del reservorio.

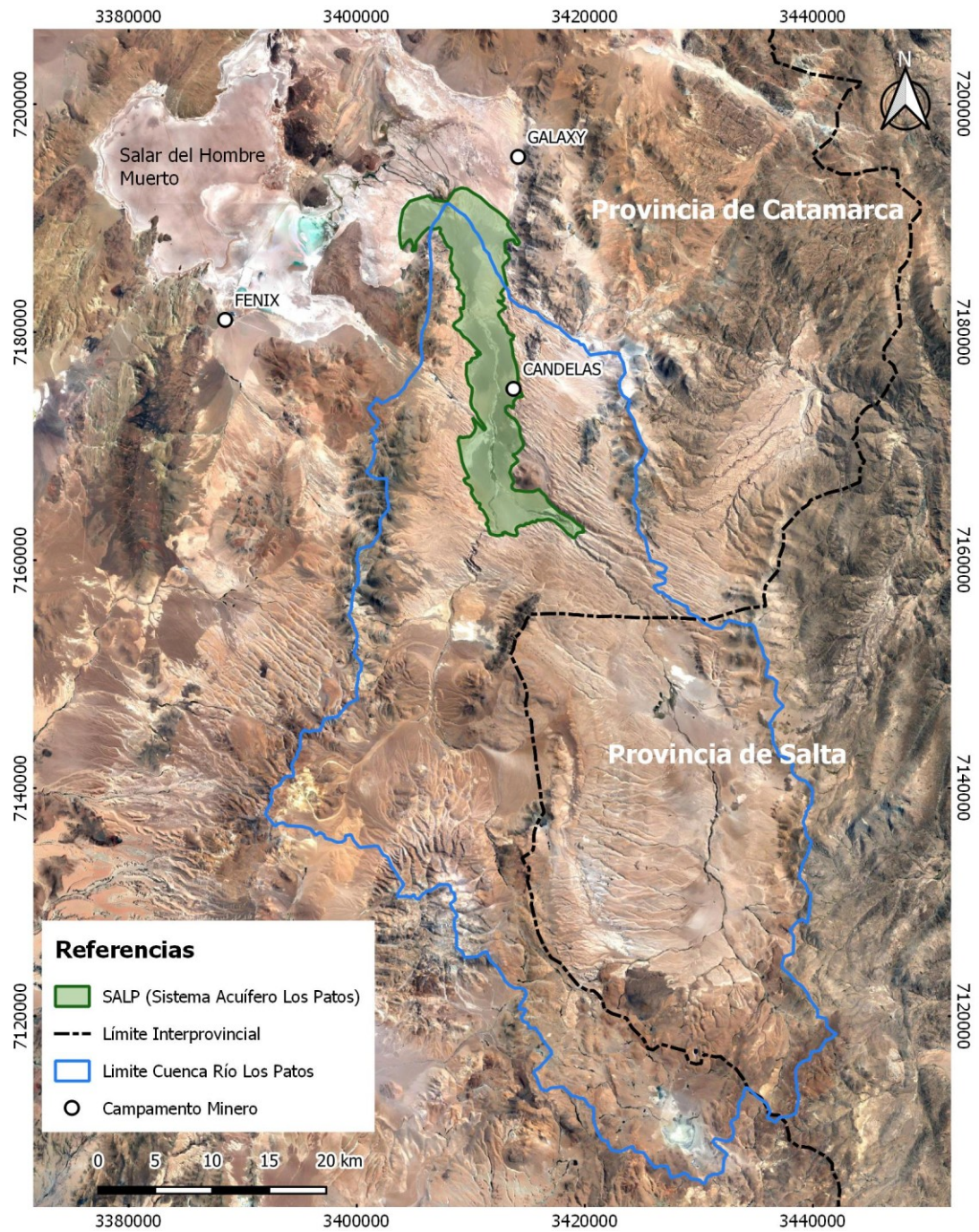


Figura 7: Comparación de áreas entre la cuenca hidrográfica y el Sistema Acuífero Los Patos (SALP).

En referencia al conocimiento de la respuesta hidráulica de los depósitos aluviales y sobre la base de los antecedentes evaluados, se destacan algunos estudios que se sintetizan y agrupan de la siguiente manera:

**Zona Sur**, margen izquierda del río Los Patos (Servidumbre de LIVENT) (Figura 27). En este sitio, existen tres pozos construidos en el año 2012 por Conhidro SRL, realizados con retroexcavadora hasta una profundidad de 3 metros, que fueron entubados con caños de pvc de 5" de diámetro, sirviendo uno de pozo de bombeo y los restantes de observación piezométrica. Sobre este sistema de bombeo se realizó una prueba hidráulica, con motobomba, a un caudal constante de 7,5 m<sup>3</sup>/h, obteniéndose un agua con una conductividad eléctrica de 1.569 uS/cm. Con los datos del test de bombeo, se calculó el valor de Transmisividad en 102 m<sup>2</sup>/día y el Coeficiente de Almacenamiento en 0,135 (aproximado), con un radio de influencia de 18 metros.

En esta misma zona sur, se construyó la batería de perforaciones de estudio, para el nuevo sistema de extracción de agua fresca en la etapa de ampliación industrial de LIVENT (Figura 8). En el año 2017, Livent – Minera del Altiplano S.A., proyectó la construcción de tres (3) pozos de bombeo (PB) y seis (6) piezómetros de observación (Pz). De esta manera, cada pozo de bombeo cuenta con dos piezómetros de observación; uno al sur y el otro al este. Además, fuera de la zona donde se encuentran los pozos de bombeo y sus respectivos piezómetros, se construyeron dos (2) piezómetros adicionales. En el año 2018, Livent – Minera del Altiplano S.A., completó la investigación del álveo del río Los Patos, con la construcción de tres (3) pozos de bombeo (PB) y dos (2) piezómetros de observación (Pz). Todas las captaciones fueron perforadas con sistema rotary, con uso de lodo de perforación.

De esta manera, la batería de pozos del río Los Patos quedó diseñada de la siguiente manera (ver Figura 8):

La **Plataforma 01** está conformada por el pozo de Bombeo (PBLP01), el piezómetro PzLP01A (localizado a 20 metros al sur del pozo de bombeo) y el piezómetro PzLP01B (ubicado a 40 metros al este del pozo de bombeo).

La **Plataforma 02** está conformada por el pozo de Bombeo (PBLP02), el piezómetro PzLP02A (localizado a 20 metros al sur del pozo de bombeo) y el piezómetro PzLP02B (ubicado a 40 metros al este del pozo de bombeo).

La **Plataforma 03** está conformada por el pozo de Bombeo (PBLP03), el piezómetro PzLP03A (localizado a 20 metros al sur del pozo de bombeo) y el piezómetro PzLP03B (ubicado a 40 metros al este del pozo de bombeo).



La **Plataforma 04** está conformada por el pozo de Bombeo (PBLP04) y el piezómetro PzLP04 (localizado a 20 metros al este del pozo de bombeo).

La **Plataforma 05** está conformada por el pozo de Bombeo (PBLP05) y el piezómetro PzLP05 (localizado a 20 metros al noreste del pozo de bombeo).

La **Plataforma 06** está conformada por el pozo de Bombeo (PBLP06) y el piezómetro PzLP06 (localizado a 30 metros al oeste del pozo de bombeo).

La **Plataforma 07** está conformada únicamente por el piezómetro PzLP07 (localizado en el sector centro este de la batería y en inmediaciones de la margen izquierda del río Los Patos).

El detalle de la ubicación de cada pozo de bombeo y los piezómetros, se muestra en Figura 27.

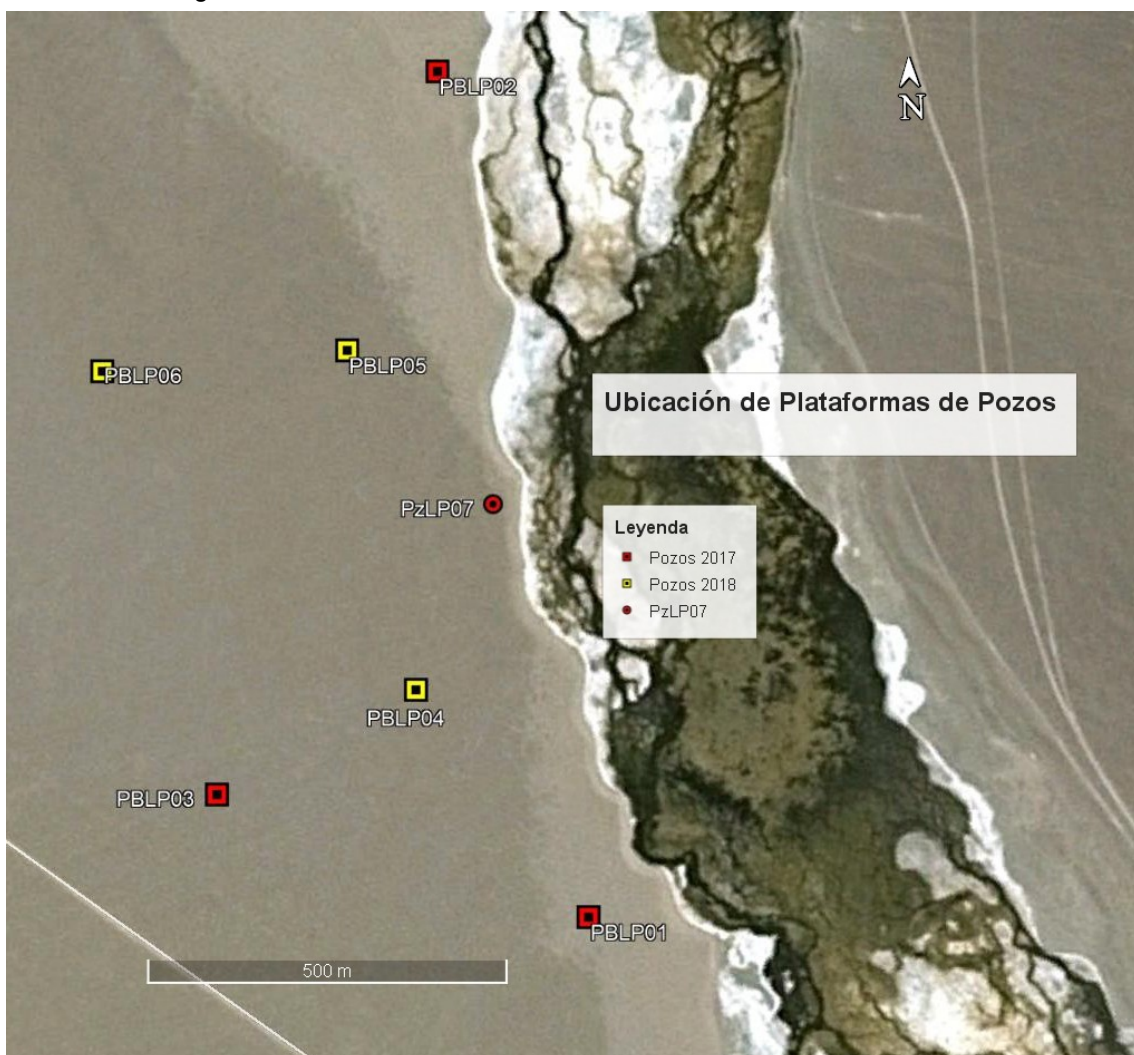


Figura 8: Plataformas de Pozos y Piezómetros construidos en el año 2017 (rojo) y las Plataformas de Pozos y Piezómetros efectuados durante el 2018 (amarillo).

Las características constructivas de estas perforaciones se incluyen en el **ANEXO I**.

Los pozos fueron construidos con el principal objetivo de corroborar los modelos geofísicos que daban cuenta de un relleno sedimentario de más de 100 metros de espesor. Por este motivo, algunos pozos piezométricos fueron los elegidos para las exploraciones profundas, con un muestreo sistemático del cutting obtenido. Sobre estos pozos exploratorios se realizaron los perfilajes geofísicos de interior de pozo, con registro de Resistividades Normales (Corta y Larga), Potencial Natural y Resistencia Puntual. A los perfilajes geofísicos, se incorporó luego el perfil litológico y de cronometraje para una interpretación integral de la secuencia litológica atravesada.

Los 6 pozos de bombeo se construyeron posteriormente, aprovechando solamente los primeros 40 metros del acuífero, como estrategia de evitar explotar facies más cercanas al basamento técnico que tendría aguas de mayor contenido salino.

Se efectuaron un total de cinco (5) piezómetros que alcanzaron una profundidad de investigación de 100 metros, destinados a observar y analizar la litología del álveo del río Los Patos y, mediante la interpretación de los electroperfilajes, establecer si existen variaciones en la salinidad del agua de formación en profundidad. Estos piezómetros son: PzLP01B, PzLP02B, PzLP03B, PzLP06 y PzLP07. Posteriormente, se efectuaron con la misma técnica, los piezómetros someros (hasta 40 metros de profundidad), denominados: PzLP01A, PzLP02A, PzLP03A, PzLP04 y PzLP05.

En todos los casos, finalizado el pozo exploratorio y los estudios geofísicos y/o litológicos, se realizó el entubado con cañería ciega y filtros de PVC de 4" de diámetro. En el caso de los piezómetros profundos (PzLP01B, PzLP02B, PzLP03B, PzLP06 y PzLP07), primeramente se rellenó con cutting desde fondo de pozo hasta los 40 metros bajo boca de pozo, para luego efectuar recién el entubado, engravado y terminación de cada uno de ellos. En el caso de los piezómetros someros (PzLP01A, PzLP02A, PzLP03A, PzLP04 y PzLP05), finalizado la perforación exploratoria, se procedió a efectuar directamente con el entubado. Todos los piezómetros construidos (profundos y someros), presentan un diseño de entubado similar, con la misma secuencia de cañería ciega y caños filtros. Las características constructivas de estas perforaciones se incluyen en el **ANEXO I**.

Las perforaciones exploratorias para la construcción de los pozos de bombeo (PBLP01, PBLP02, PBLP03, PBLP04, PBLP05 y PBLP06), se realizaron con el método de rotación directa con trépanos triconos de 8 ½" de diámetro, hasta una profundidad de 48 metros. En todos los casos se utilizó como lodo de perforación bentonita natural. Alcanzada la profundidad de investigación, se inició una secuencia de ensanches a 12", 15" y, finalmente 17" de diámetro, para realizar el entubado con cañería de acero y filtros de acero galvanizado de 10" de diámetro. Finalizado el entubado, se bajaron las barras de perforación hasta el fondo del pozo y se alivió la inyección. En boca de pozo se instaló una platina sello, para lograr una circulación inversa a través de los filtros y por el espacio anular, con el fin de comenzar con la colocación del prefiltro, el que quedó comprendido entre el fondo y los 9 metros bajo boca de pozo (m.b.b.p). Entre los 9 m.b.b.p y los 2 m.b.b.p se colocó pellet de arcillas. Finalmente, entre los 2 m.b.b.p y la superficie, se construyó un anillo de cemento como sello sanitario y la plataforma. La limpieza del pozo se realizó con barra lisa hasta lograr agua limpia en boca de pozo. Luego, se procedió a utilizar un jet de alta presión que inyectando agua limpia, remueve y agita los restos de bentonita que podrían haber quedado dentro del pozo y en el entorno del prefiltro. No fue necesario utilizar ningún otro método de limpieza, debido a que los pozos fueron construidos, ensanchados y, finalmente entubados, en un plazo de 3 días, por lo que el envejecimiento del pozo fue mínimo. Las características constructivas de estas perforaciones se incluyen en el **ANEXO I**.

A modo de ejemplo se muestran los registros litológicos, de perfilajes eléctricos y detalles constructivos de un pozo piezométrico y de un pozo de bombeo, según informe Conhidro (2019).



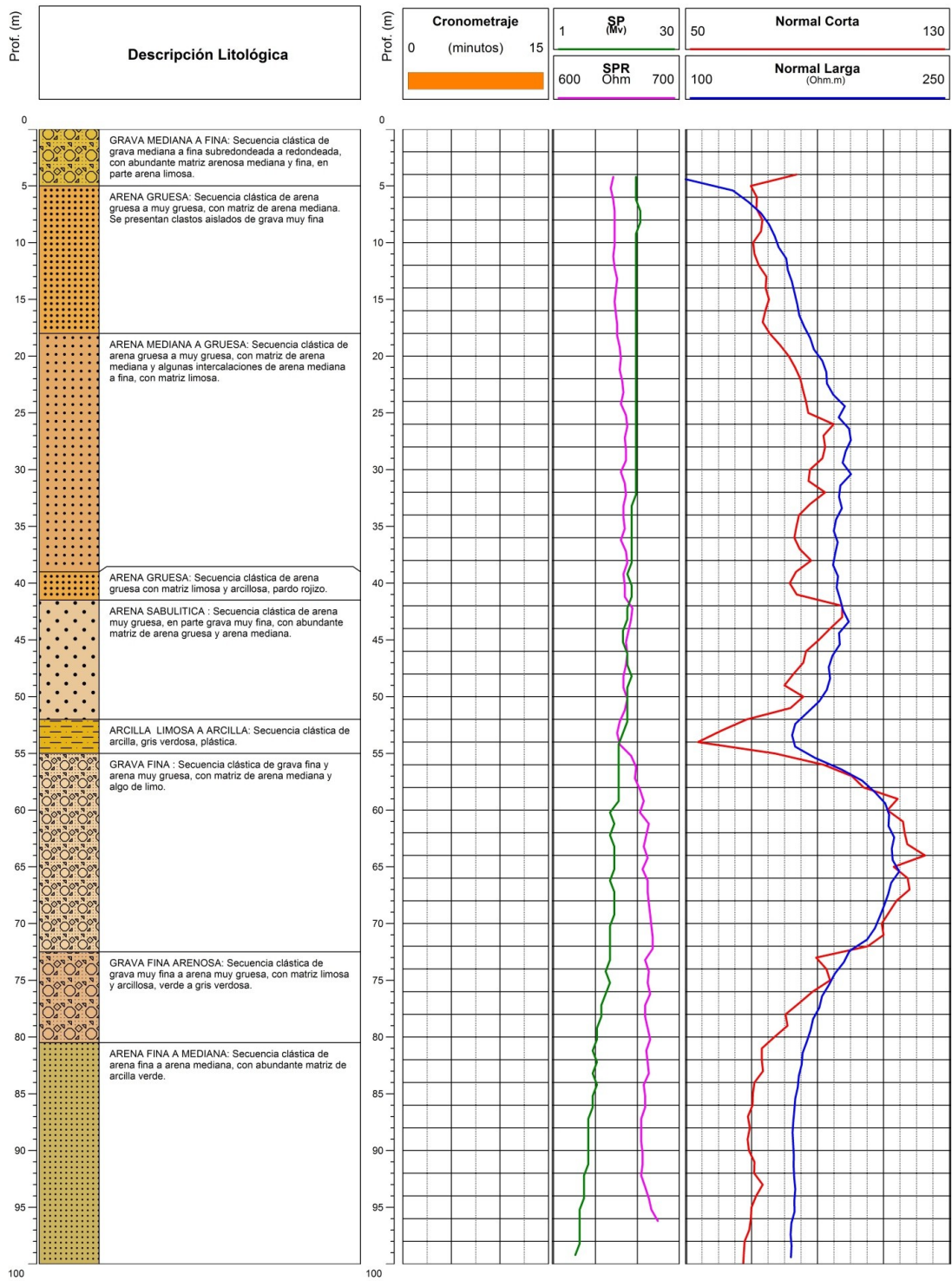


Figura 9: Registros eléctricos y litología pozo piezométrico Pz-LP-03 (Conhidro, 2019).

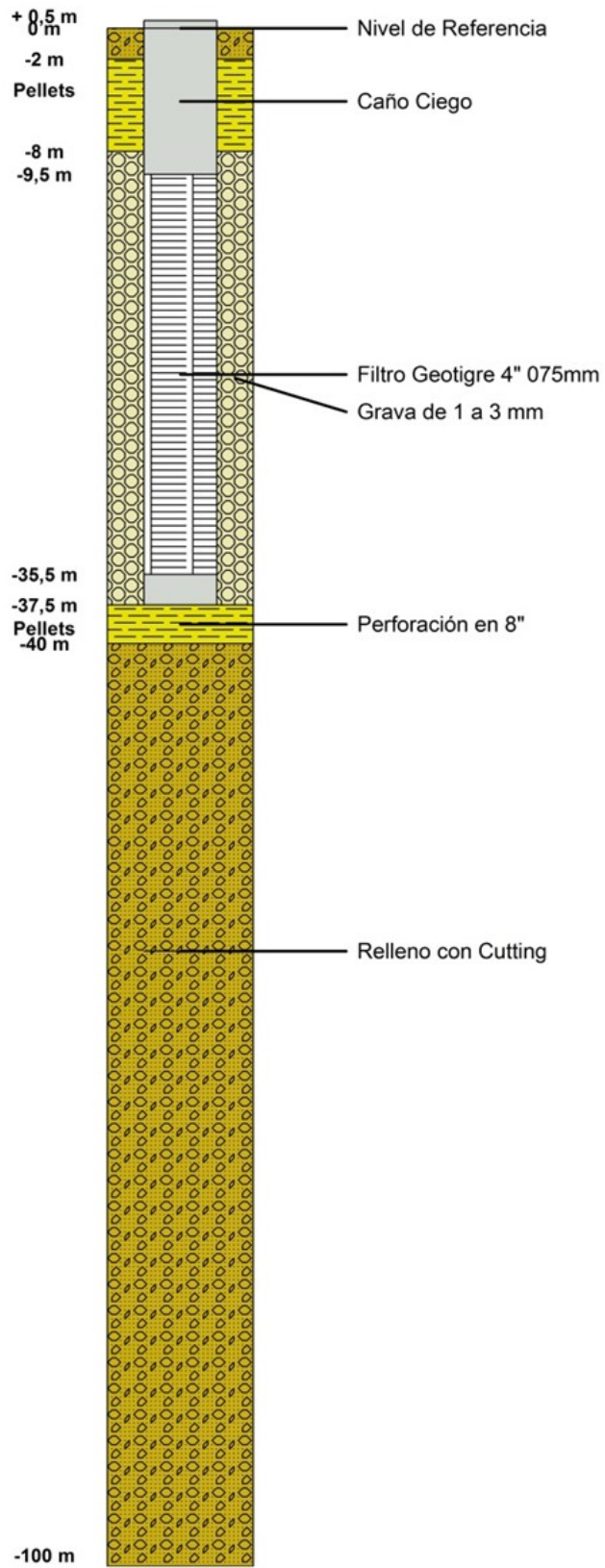


Figura 10: Características constructivas Pz-LP-03 (Conhidro, 2019).

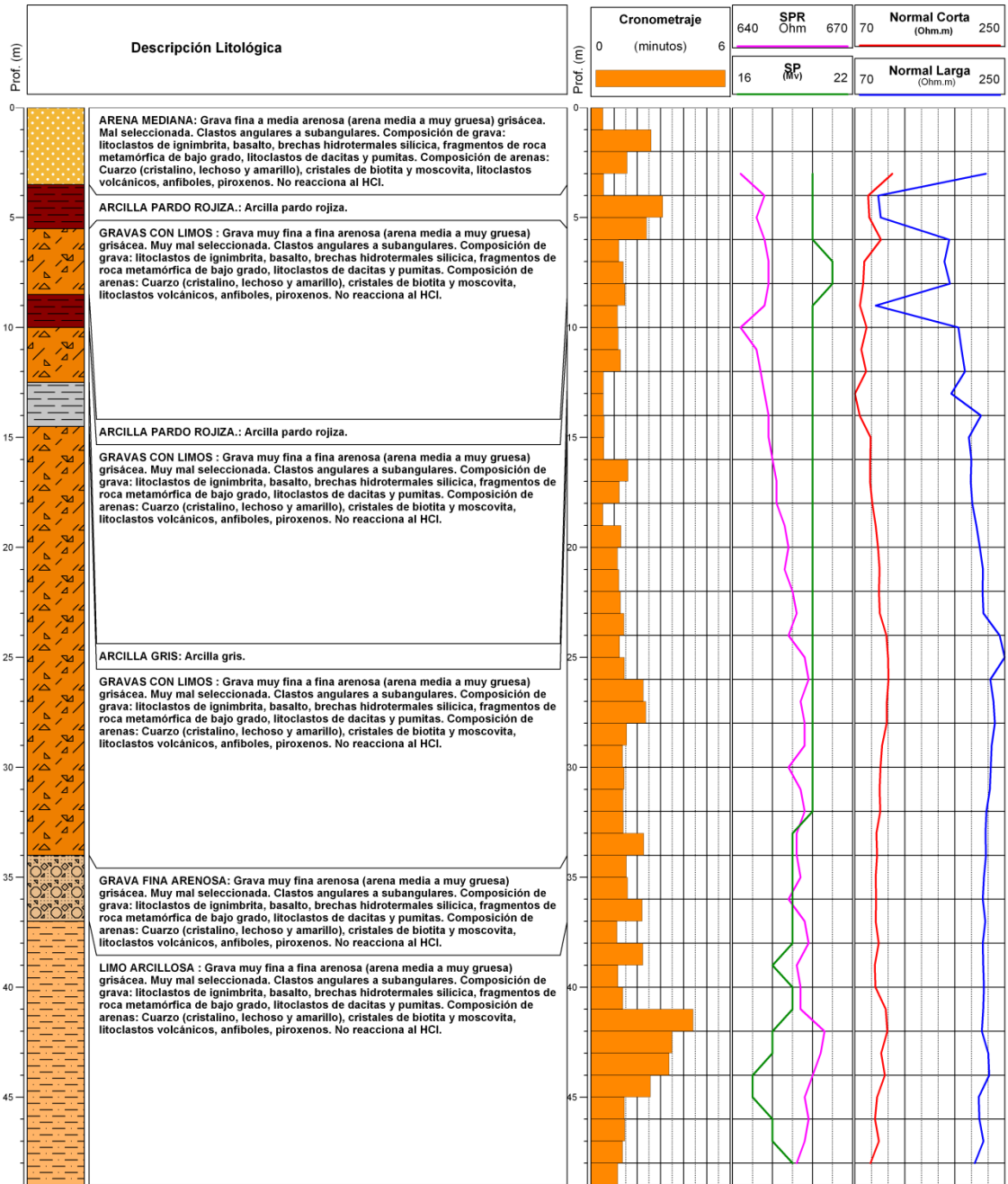


Figura 11: Registros eléctricos y litología pozo de bombeo PB-LP-03 (Conhidro, 2019).

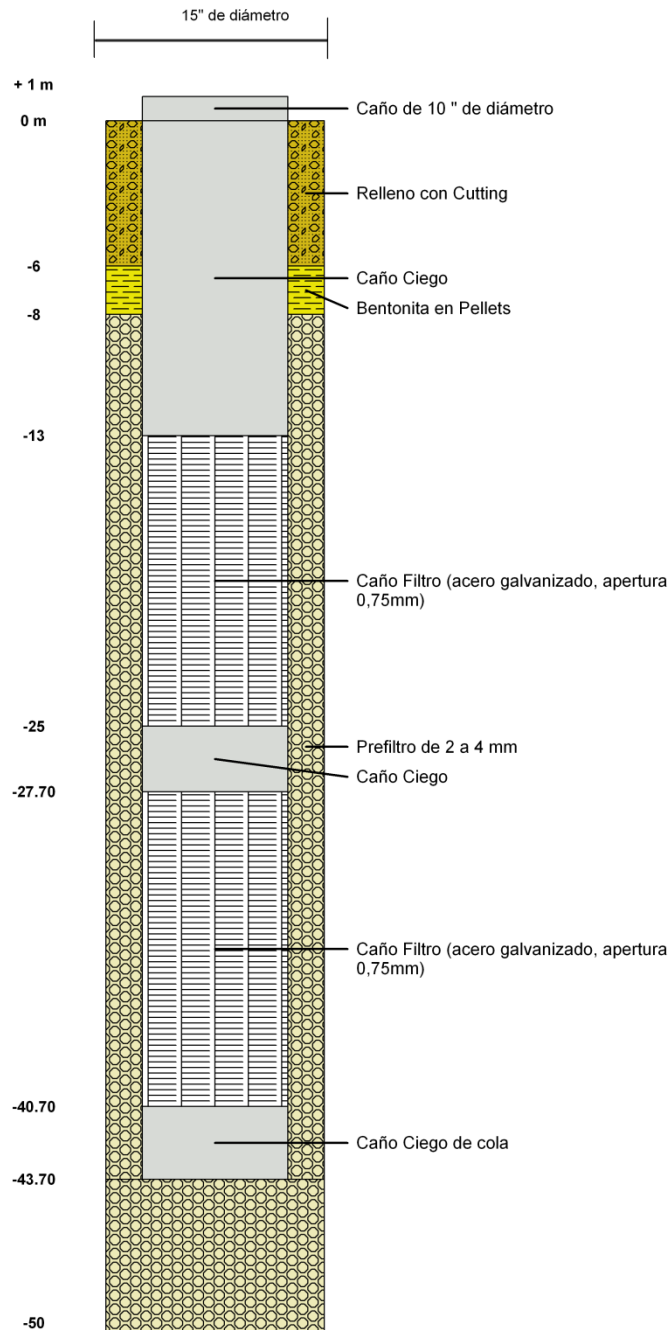


Figura 12: Características constructivas PB-LP-03 (Conhidro, 2019).

El desarrollo se realizó con electrobomba localizada a una profundidad de 29 metros. Se comenzó con el desarrollo a caudales crecientes hasta que el agua fue aclarando. Este proceso fue acompañado por paradas instantáneas de la bomba a fin de realizar una acción de refluo en la zona de filtros. El desarrollo por bombeo se realizó durante aproximadamente 48 horas en cada pozo, hasta comprobar que los niveles dinámicos del pozo se mantenían en profundidad similar para los mismos tiempos de bombeo y caudales de explotación.

En todos los piezómetros (someros y profundos), el desarrollo y limpieza se realizó con bombeo intermitente, hasta que se obtenía agua clara. Los piezómetros, debido al diámetro de entubado, fueron explotados con una electrobomba de bajo caudal y, en dos ocasiones (debido a que los niveles se encontraban a escasa profundidad), se utilizó una motobomba para esta operación. En todos los casos, los datos hidráulicos de los piezómetros tal como niveles estáticos, niveles dinámicos, descensos, caudales de explotación y caudales específicos, se obtuvieron luego de 48 horas de limpieza y desarrollo. En el caso de los seis pozos de bombeo (PBLP01, PBLP02, PBLP03, PBLP04, PBLP05 y PBLP06), se realizaron primeramente ensayos de bombeo escalonados, a caudales crecientes. El objetivo del ensayo fue determinar las características hidráulicas de los pozos, determinando la ecuación de descensos y su caudal máximo de explotación. Las depresiones en el pozo fueron registradas con una sonda manual y con datalogger digital. Finalizado el ensayo de bombeo escalonado y, luego de observar la estabilización de los niveles estáticos, se realizaron ensayos de bombeo a caudal constante, durante 72 horas, destinados a obtener los parámetros hidráulicos del acuífero (Transmisividad y Coeficiente de Almacenamiento). Los caudales de bombeo fueron determinados por el método volumétrico, midiendo el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido.

Conhidro SRL (2019), en su informe final concluye que la secuencia clástica que conforma esta unidad geológica son gravas finas a arenas muy gruesas, con matriz de arena mediana a fina y, en ocasiones, matriz limosa e incluso limo arcillosas. En la parte superior del reservorio (entre 3 y 19 metros de profundidad) se encuentran pequeñas intercalaciones de niveles de arcillas, pardo rojizas a gris claro, que en algunos sectores pasan a arenas limos arcillosos, que se intercalan con niveles más potentes de gravas y arenas. Un nivel de arcilla verde a gris verdoso se encuentra entre los 61 a 64 metros en la zona del Piezómetro PzLP01B; entre los 77 a 80 metros en el Piezómetro PzLP02B, entre los 52 a 55 metros de profundidad en el Piezómetro PzLP03B, 53 a 55 en el Piezómetro PzLP06 y entre 42 a 44 metros en el Piezómetro PzLP07. Por debajo de estos niveles de arcillas y hasta la profundidad de investigación (100 metros), continúan las secuencias clásticas, preferentemente de arenas finas a medianas, con matriz limosa y arcillosa.

Los seis pozos de bombeo que se construyeron (PBLP01, PBLP02, PBLP03, PBLP04, PBLP05 y PBLP06) ponen en producción niveles que se extienden hasta los 41 metros de profundidad, con caudales de producción de 181 m<sup>3</sup>/h y un caudal específico de 41 m<sup>3</sup>/h/m en el Pozo PBLP01; 165 m<sup>3</sup>/h y un caudal específico de 26 m<sup>3</sup>/h/m en el Pozo PBLP02, 137 m<sup>3</sup>/h y un caudal

específico de 38 m<sup>3</sup>/h/m en el Pozo PBLP03, 159 m<sup>3</sup>/h y un caudal específico de 26 m<sup>3</sup>/h/m en el Pozo PBLP04; 162 m<sup>3</sup>/h y un caudal específico de 31 m<sup>3</sup>/h/m en el Pozo PBLP05 y 160 m<sup>3</sup>/h y un caudal específico de 41 m<sup>3</sup>/h/m en el Pozo PBLP06. La ecuación de descensos en cada pozo indica que es posible obtener caudales de explotación de hasta 200 m<sup>3</sup>/h en cada una de estas obras.

Con respecto a la calidad física y química del agua de producción, los análisis efectuados en dos laboratorios (Laboratorio de FMC y Laboratorio Induser), son indicativos que el agua no es apta para el consumo humano debido a que presenta excesos en Arsénico y Boro. Desde el punto de vista del aprovechamiento industrial del agua subterránea, se debe señalar que además de los elementos mencionados anteriormente, el agua presenta concentraciones significativas de Sílice. La conductividad eléctrica del agua de producción varía de 1200 en Pozo PBLP06  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a unos 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en los pozos PBLP02 y PBLP01, no observándose variaciones significativas en los valores a lo largo de 72 horas de producción.

Con relación a la hidráulica del reservorio, se puede señalar que el acuífero que se desarrolla en el valle fluvial del río Los Patos, por lo menos hasta la profundidad que se han construido y puesto en explotación los pozos de bombeo, se comporta como un acuífero semiconfinado (leaky aquifer).

Los datos provenientes del bombeo del Pozo PBLP01 (descensos en los piezómetros PzLP01A y PzLP01B), fueron analizados como un acuífero semiconfinado en donde el acuitardo permite el paso del agua a su través procedente de un acuífero fuente. Es decir que el acuitardo solo actúa como un trasmisor de la recarga proveniente de otro acuífero superior, por lo que, conceptualmente, no se considera el agua almacenada en el propio acuitardo. De esta manera, el tratamiento de los datos se hizo con el método de Walton, entregando valores de Transmisividad media de 1232 m<sup>2</sup>/día y un Coeficiente de Almacenamiento medio de 0,0008789.

Los datos del Pozo PBLP04 y su piezómetro (PzLP04), se analizó también con el método de Walton para acuíferos semiconfinados, debido a que se asume que existe un acuitardo (arenas con matriz limo arcilloso) entre los 10 y 12,5 metros de profundidad, obteniéndose un valor de Transmisividad de 1197 m<sup>2</sup>/día y un Coeficiente de Almacenamiento de 0,002091. Los datos del Pozo PBLP05 y su piezómetro (PzLP05), se trataron con el método de Walton para acuíferos semiconfinados, debido a que se asume que existe un acuitardo entre los 9 y 12 metros de profundidad (arenas con matriz limo arcilloso),

obteniéndose un valor de Transmisividad de 1031 m<sup>2</sup>/día y un Coeficiente de Almacenamiento de 0,002390.

Los datos del Pozo PBLP06 y su piezómetro (PzLP06), se trataron con el método de Walton para acuíferos semiconfinados, debido a que se asume que existe un acuitardo subsuperficial (arenas con matriz limo arcilloso), obteniéndose un valor de Transmisividad de 879 m<sup>2</sup>/día y un Coeficiente de Almacenamiento de 0,004832.

Los datos de los pozos de bombeo PBLP02 y PBLP03 (con los descensos de sus respectivos piezómetros), fueron analizados como un acuífero semiconfinado, en donde el acuitardo cede agua que él mismo tiene almacenada, es decir que entra en juego también el Coeficiente de Almacenamiento del Acuitardo (S'), aportando así agua adicional a la del acuífero semiconfinado. De esta manera, el tratamiento de los datos se hizo con el método de Hantush, entregando valores de Transmisividad media de 2087 m<sup>2</sup>/día y un Coeficiente de Almacenamiento medio de 0,00006478 en el sector del Pozo PBLP02 y una Transmisividad media de 2671 m<sup>2</sup>/día y un Coeficiente de Almacenamiento medio de 0,00007787 en el sector del Pozo PBLP03.

**Zona Central**, incluye ambas márgenes del Río Los Patos (Figura 27), dentro de la cual se relevaron seis perforaciones realizadas con diamantina, pertenecientes al proyecto de exploración minera “Candelas” ejecutado por Galan Lithium Limited. Lamentablemente las autoridades de la compañía, no brindaron la información constructiva de los mismos, como así tampoco, las descripciones litológicas de las muestras obtenidas (testigos), aunque en sus reportes de web, se informan profundidades de exploración que habrían alcanzado los 700 metros de profundidad en algunos casos. La única información brindada en referencia a la geología atravesada por cada perforación, fue el espesor del depósito moderno, previo al ingreso de facies de ignimbritas.

Tabla 1: Espesores de facies modernas en proyecto Candelas.

ID Pozos Candelas	Coordenadas		Espesor relleno Moderno (metros)
	x	y	
C-01-19	3410499	7182633	8
C-02-19	3411352	7173415	9.5
C-031-19	3411512	7180420	15.6
C-04-19	3410847	7177468	8
C-05-19	3409786	7180401	9
C-06-19	3410765	7179226	8
C-07-19	3412063	7179408	8
C-08-19	3411798	7181947	12

**Zona Norte**, Margen derecha río Los Patos, sitio en los que se han relevado cuatro perforaciones pertenecientes al proyecto Sal de Vida, de la compañía Galaxy Resources y dos perforaciones realizadas con diamantina, pertenecientes al proyecto de exploración minera “Candelas” ejecutado por Galan Lithium Limited (Figura 27). Como se explicó en párrafos anteriores, no se cuenta con información de subsuelo del proyecto Candelas.

En referencia a las perforaciones pertenecientes al proyecto Sal de Vida, debe informarse que dos de ellas, corresponden a programas de exploración de agua fresca o dulce, mientras que las dos restantes fueron construidas para exploración de salmueras profundas.

Los pozos de exploración de agua fresca, fueron construidos en el año 2012, encontrándose sus principales características constructivas e hidráulicas en el **ANEXO I**. No obstante se deja constancia de que en ambos casos, la perforación exploratoria se realizó con el método de rotación directa con triconos de 8 ½” de diámetro y uso de lodo a base de bentonita. Durante la perforación se efectuó el control litológico de las muestras de cutting cada metro, teniendo en cuenta el tiempo de retorno y se midió el tiempo de avance de la perforación cada metro. Una vez finalizado el pozo exploratorio, se realizaron perfilajes geofísicos, con registros de resistividad normal corta y larga (RNC y RNL) y potencial espontáneo (SP). Ambos pozos fueron evaluados hidráulicamente mediante ensayos de bombeo a caudal variable, obteniéndose rendimientos específicos interesantes y un agua con bajos a medios niveles de conductividad eléctrica.

Tabla 2: Rendimientos específicos y calidad del agua obtenidos en los pozos SVWF12-19 y SVWF12-20.

<b>Pozo</b>	<b>Nivel estático s/legajo (2012)</b> (mbbp)*	<b>Máx. Caudal de bombeo</b> (m <sup>3</sup> /h)	<b>Caudal específico</b> (m <sup>3</sup> /h/m)	<b>Conductividad Eléctrica</b> (uS/cm)
<b>SVWF12-19</b>	1.94	96	97.01	2290
<b>SVWF12-20</b>	2.41	86	75.13	2500

\* (metros bajo boca de pozo)



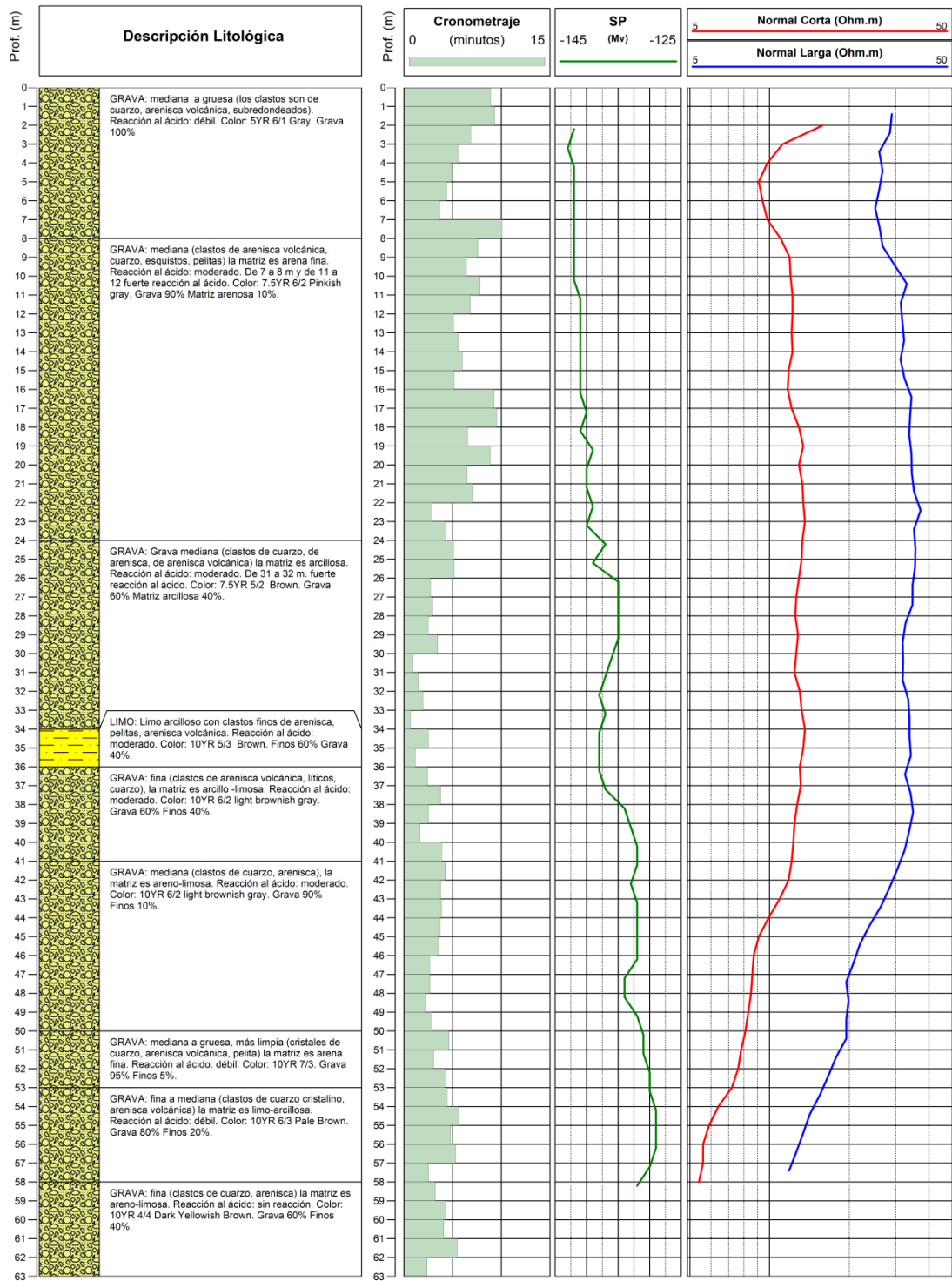


Figura 13: Registros eléctricos y litología pozo de bombeo SVWF12-19 (Conhidro, 2012).

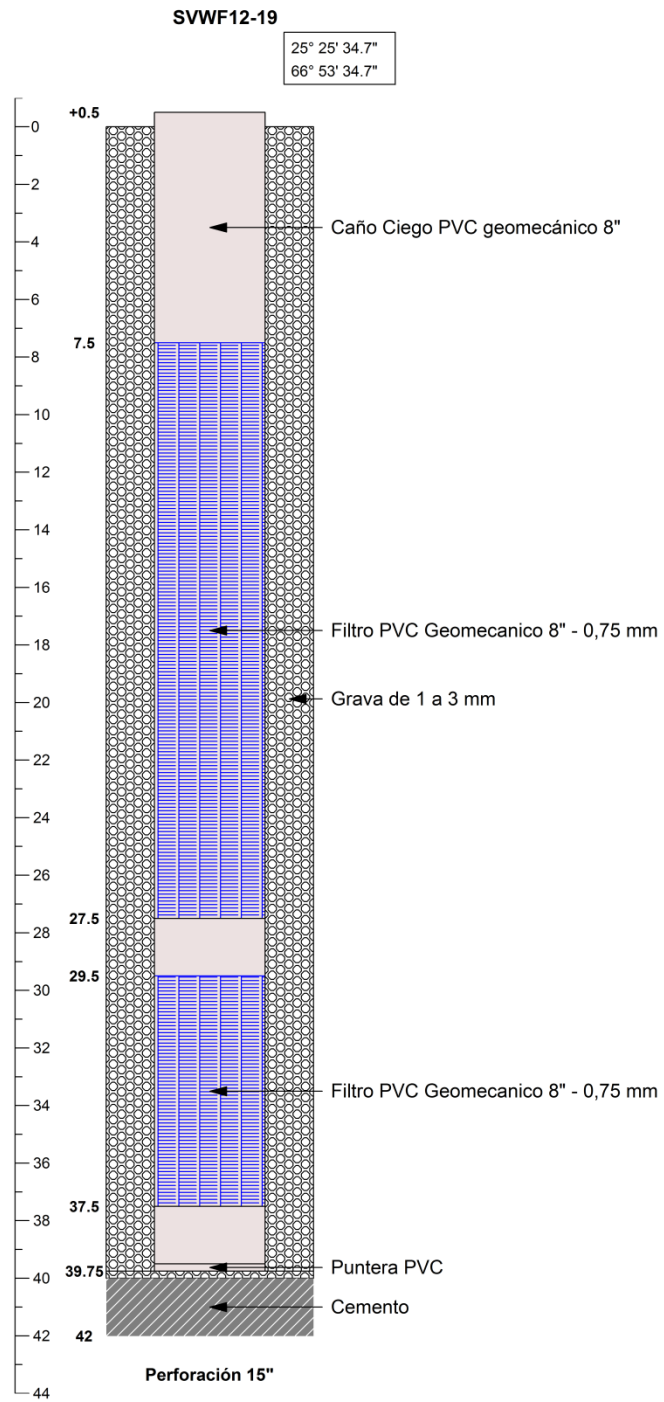


Figura 14: Características constructivas del pozo de bombeo SVWF12-19 (Conhidro, 2012).

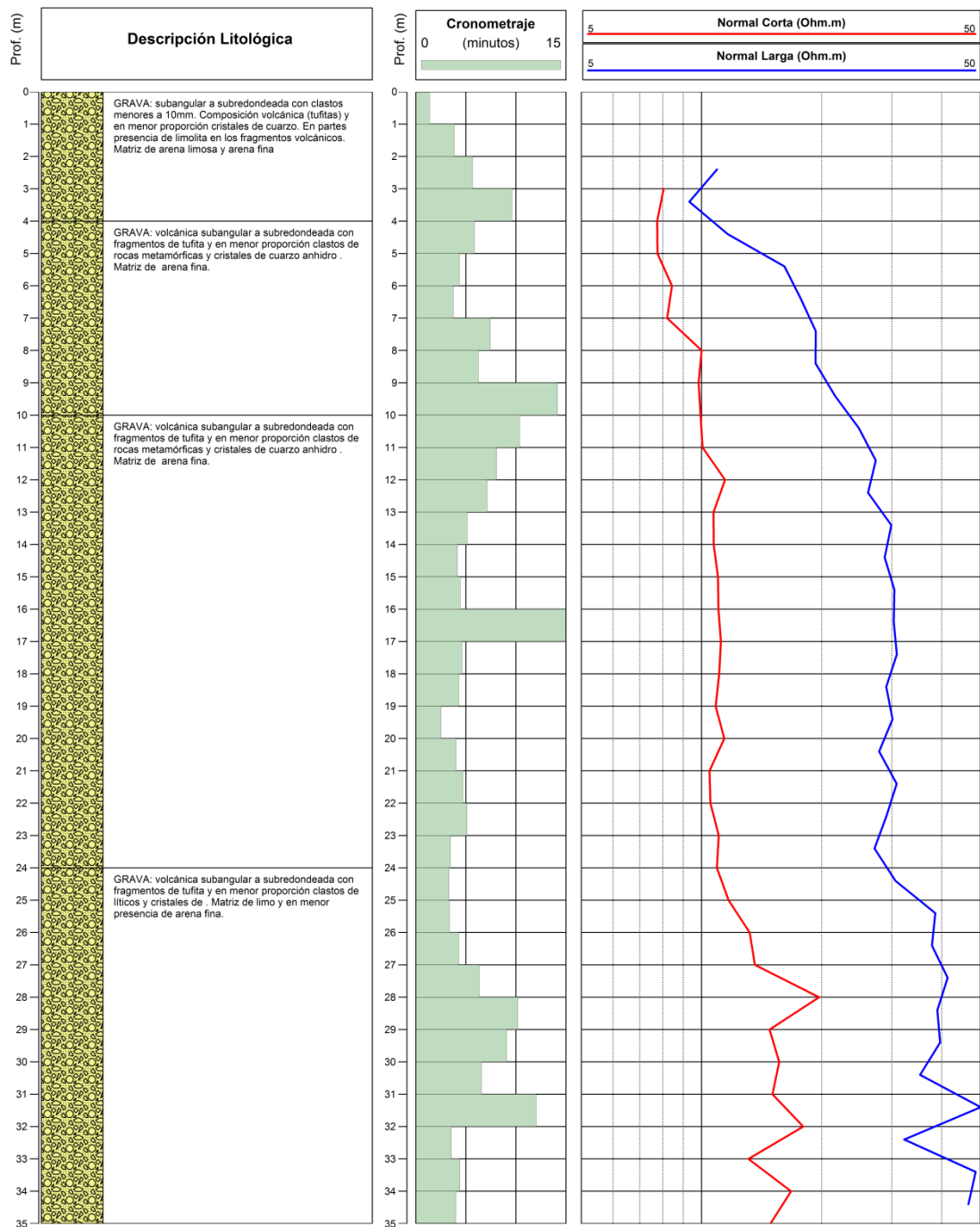


Figura 15: Registros eléctricos y litología pozo de bombeo SVWF12-20 (Conhidro, 2012).

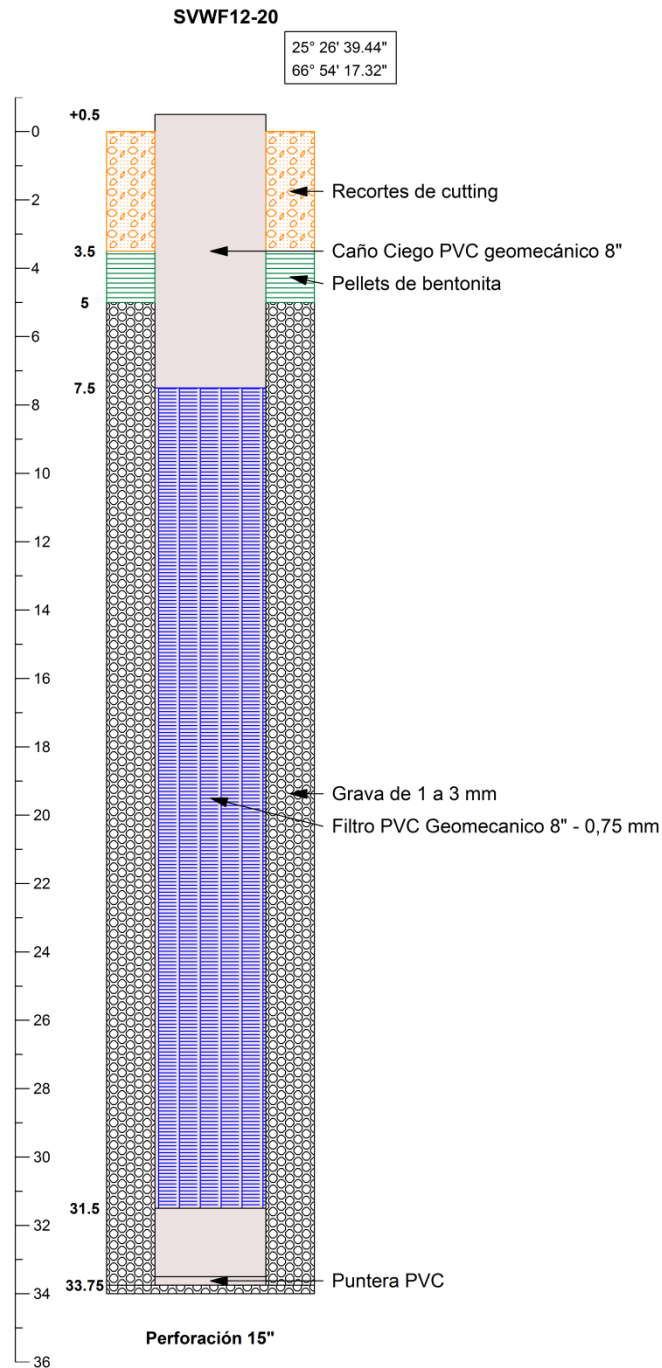


Figura 16: Características constructivas del pozo de bombeo SVWF12-20 (Conhidro, 2012).

Los pozos realizados en el mismo proyecto (Sal de Vida) pero con objetivos de exploración minera y basados en las interpretaciones geofísicas realizadas por nuestro grupo consultor, tuvieron profundidades de exploración de 300 metros y fueron entubadas en diámetros mayores, con el fin de realizar pruebas de bombeo que demuestren los rendimientos específicos de las unidades productivas. Las principales características constructivas e hidráulicas de ambas perforaciones, se muestran en el **ANEXO I**.

El Pozo SVWW18-25, fue perforado en el año 2018 hasta una profundidad de 300 metros, encontrándose facies clásticas hasta 70 metros de profundidad. Posteriormente y hasta los 145 metros, se desarrolla una secuencia volcánica, a la cual la subyacen facies arcillosas hasta los 182 metros. Luego se suceden una serie de facies sedimentarias finas, cuyo detalle se aprecia en la Figura 17.

El pozo fue muestreado cada metro y terminado el exploratorio, se llevó a cabo el perfilaje eléctrico con una sonda de dispositivo "normal", registrándose los valores de potencial espontáneo (SP), de resistividad corta (NC) y de resistividad larga (NL) a intervalo de un metro en forma simultánea. También se construyó su perfil de tiempo neto de perforación (cronometraje). Posteriormente se procedió a entubarlo con diámetro de 10" hasta los 119 metros y el resto en 6", encontrándose los filtros situados según se observa en Figura 18.

Se destaca según se observa en el perfilaje eléctrico, la presencia de agua con mayor contenido salino a partir de los 45 metros de profundidad, pudiéndose interpretar una facies de mezcla de aguas entre el sistema dulce superior y las salmueras inferiores. Este aspecto explica la cementación del espacio anular entre los 20 y 43 metros, sumado a la presencia de pellets de arcilla entre los 43 y 56.3 mbbp.

Posteriormente y luego de las etapas de limpieza y desarrollo el pozo fue evaluado hidráulicamente mediante un ensayo de bombeo a caudal variable, obteniéndose para el caudal mayor ( $49.72 \text{ m}^3/\text{h}$ ), un rendimiento específico de  $3.5514 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ . El nivel estático combinado se registró a 7.4 mbbp (metros bajo boca de pozo).

El Pozo SVWW18-26, fue perforado también en el año 2018 hasta una profundidad de 228 metros, encontrándose facies clásticas hasta 17 metros de profundidad. Posteriormente y hasta los 62 metros, se desarrolla una secuencia volcánica, a la cual la subyacen facies arcillosas hasta los 160 metros. Luego se suceden una serie de facies sedimentarias finas, con alternancias de arcillas rojas plásticas, con niveles de arenas y gravas con mucha matriz arcillosa (fanglomerados?). Dicha perforación tuvo muchos inconvenientes por fuga del lodo de perforación. El diseño final de la misma se observa en Figura 19. Luego de las etapas de desarrollo, se realizaron algunas pruebas hidráulicas, observándose un rendimiento específico muy bajo:  $0.25 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  para un caudal de bombeo de  $7.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , encontrándose el nivel estático a 28.35 mbbp.

# Pozo SVWW 18-25

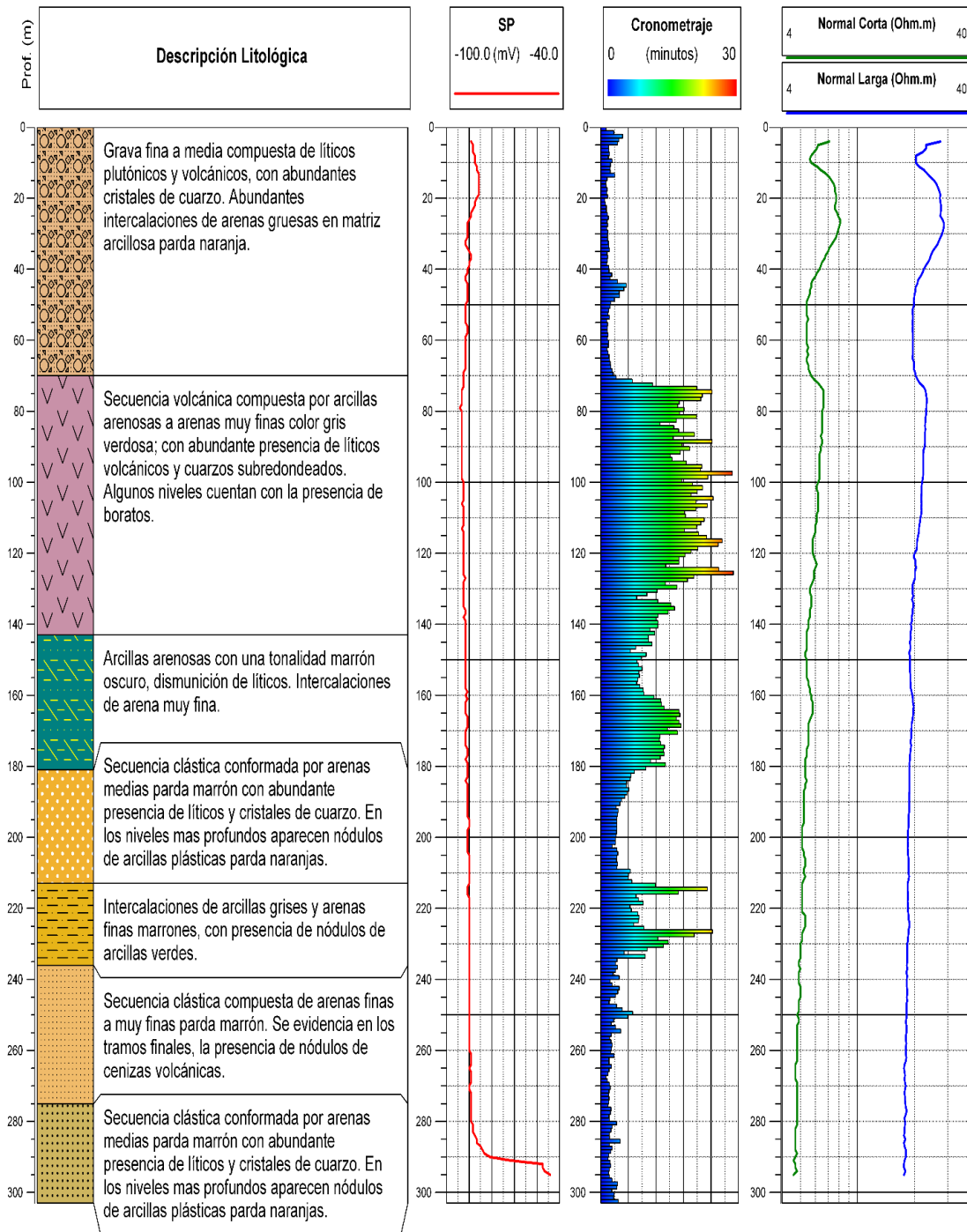


Figura 17: Registros eléctricos y litología pozo de SVWW18-25 (Conhidro, 2018).

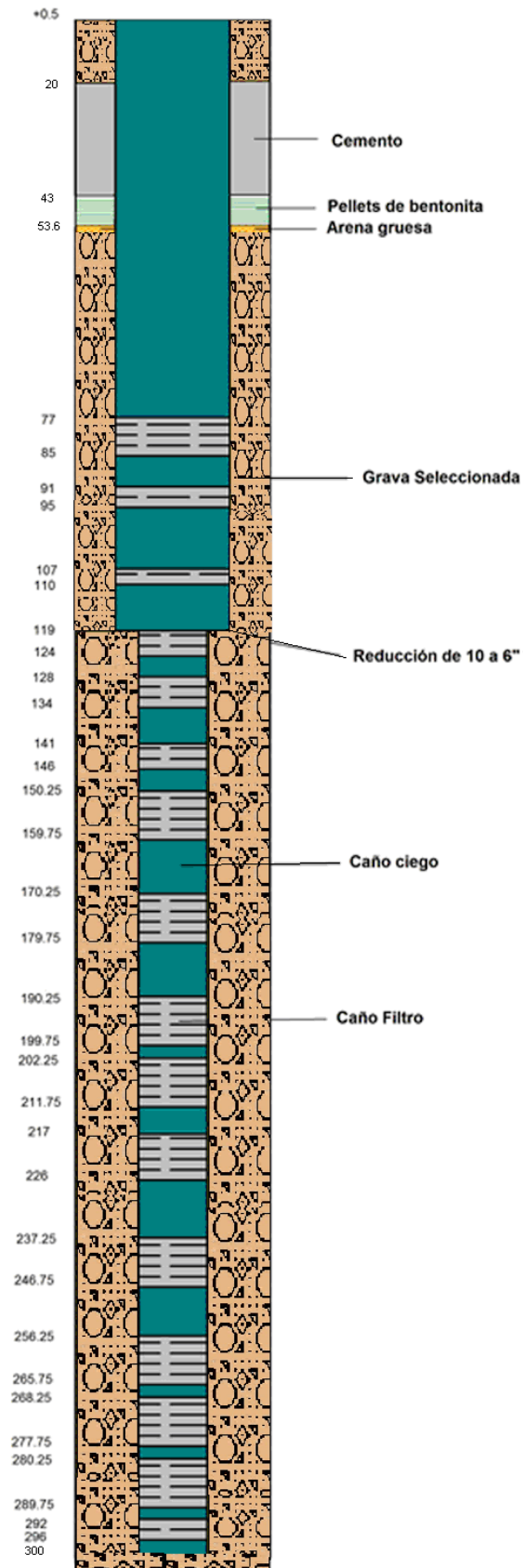


Figura 18: Características constructivas del pozo SVWW18-25 (Conhidro, 2018).



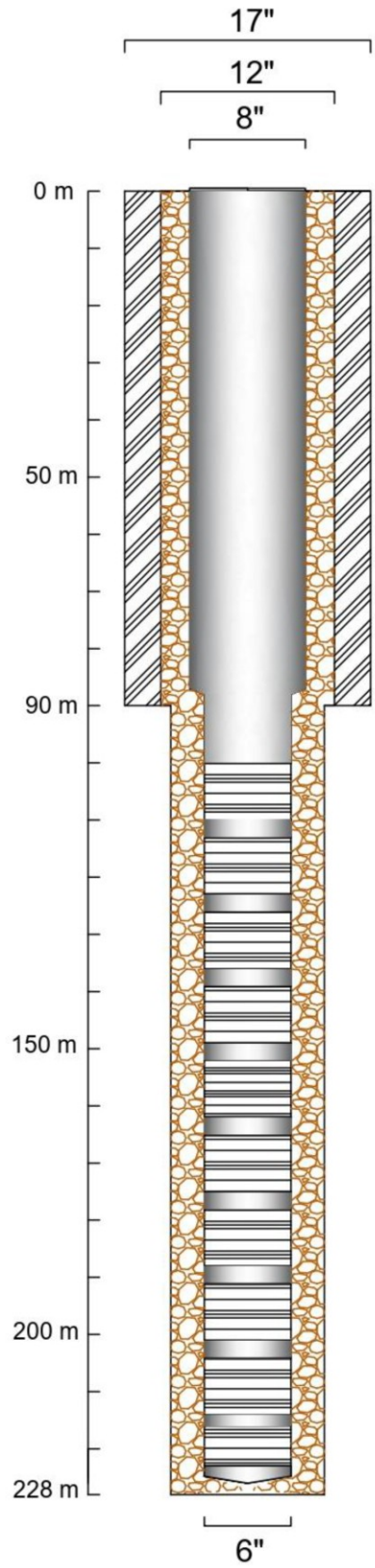


Figura 19: Características constructivas del pozo SVWW18-26 (Hidroper, 2018).



### **V.2.5 – Hidroquímica**

La calidad del agua en la cuenca del río Los Patos, según los antecedentes analizados, muestra algunos aspectos de relevancia que insinúan la interacción entre procesos endógenos y exógenos, que obligan a estudiar con mayor profundidad la hidroquímica de la cuenca. Estudios isotópicos, con inclusión de muestras de agua de lluvia y/o nieve, permitirán clarificar escenarios de mezcla de aguas y perfeccionar, validar o corregir los modelos hidrogeológicos conceptuales que se tengan hasta el momento.

En el marco de este estudio, solo se hará una breve descripción de las aguas superficiales y subterráneas, basadas en los antecedentes analizados hasta el presente.

#### **Calidad del agua superficial**

Nuestro grupo de trabajos, realizó en el año 2016 una serie de mediciones de conductividad eléctrica a lo largo de los cauces de los ríos de Aguas Caliente y Los Patos (Figura 20), obteniéndose variaciones de consideración.

Tabla 3: Puntos de mediciones de conductividad eléctrica y temperatura del río Los Patos (Conhidro, 2016).

<b>Lugar de Muestreo</b>	<b>Coordenadas Geográficas</b>	<b>Conductividad Eléctrica (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	<b>Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>
1 (Laguna)	25° 36' 19,6" LS 66° 54' 4,3" LO	3740	24,4
2 (Río Los Patos)	25° 30' 41,5" LS y66° 52' 45" LO	2050	22,5
3 (Río Los Patos)	25° 32' 51,53" LS 66° 52' 20,28" LO	2250	19,9
4 (Río Los Patos)	25° 36' 26,89" LS 66° 52' 44,44" LO	1800	21,2
5 (Río Aguas Calientes)	25° 37' 32,98" LS 66° 52' 29,62" LO	1600	21,6
6 (Río Aguas Calientes)	25° 38' 5,58" LS 66° 52' 42,23" LO	1600	21,3
7 (Río Los Patos)	25° 34' 53,42" LS 66° 52' 24,91" LO	2900	21,5
8 (Río Los Patos)	25° 28' 32,90" LS 66° 53' 53,00" LO	2400	21,3
9 (Río Aguas Calientes)	25° 37' 38,24" LS 66° 52' 27,30" LO	1500	21,1
10 (Río Los Patos)	25° 37' 51,84" LS 66° 51' 42,57" LO	1750	21,2

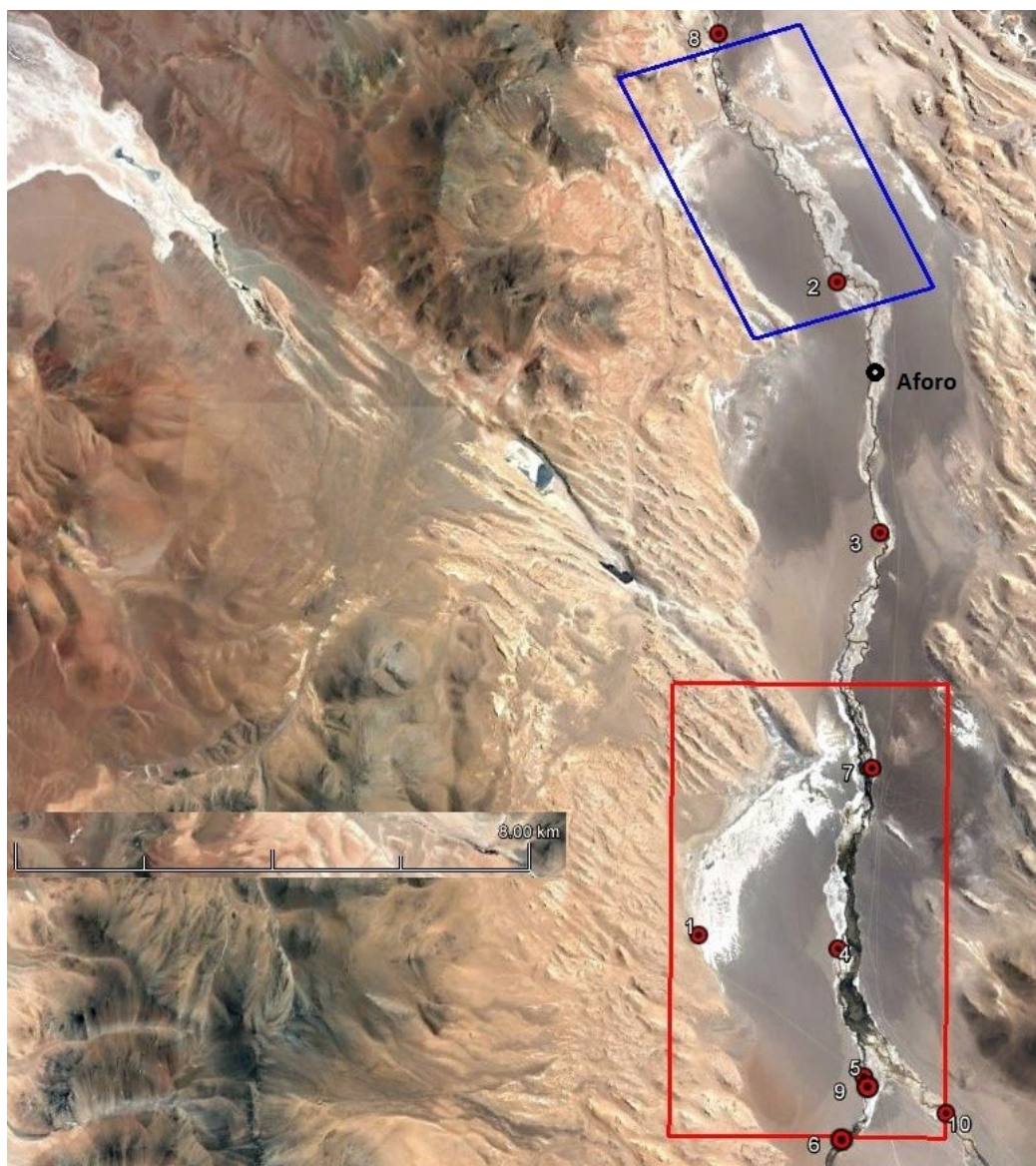


Figura 20: Ubicación de puntos de mediciones de conductividad eléctrica, temperatura y aforo en el río Los Patos. (Conhidro, 2016).

Al observar las variaciones de la conductividad eléctrica se detecta un incremento entre los puntos 4 y 7 (Tabla 3 y Figura 20) que podría estar asociado a la presencia de una falla que ingresa fluidos termales al sistema, tal como se observa al pie del volcán cerro Redondo. Esta misma situación fue corroborada en este proyecto, tal cual se observa en la Figura 29.

Existen datos hidroquímicos obtenidos por nuestro grupo de trabajos en el año 2012, que permiten diferenciar las características de los ríos Aguas Calientes y Los Patos, previo a su confluencia. El primero, contiene un agua clorurada sódica, con un valor de conductividad 1277 uS/cm, con menor contenido de calcio y magnesio y con un elevadísimo tenor de boro y de arsénico, 16.2 mg/l y 0.8 mg/l respectivamente.

El agua del río Los Patos, con 1041 uS/cm de conductividad eléctrica, se clasifica como mixta en su composición aniónica, siendo clorurada – bicarbonatada sódica, con tenores de boro y arsénico menores a los que contiene el río Aguas Calientes (1.66 mg/l y 0.17 mg/l, respectivamente).

El resultado de la mezcla de ambas da lugar a un agua clorurada sódica, con una conductividad eléctrica de 1057 uS/cm, con un elevado tenor de boro y arsénico (8.31 mg/l y 0.21 mg/l, respectivamente).

### Calidad del agua Subterránea

Los antecedentes de análisis químicos existentes en el proyecto de la Batería de Minera del Altiplano SA (Livent) y Sal de Vida (Galaxy), permitieron caracterizar de manera general las aguas obtenidas en cada caso.

Al clasificarlas en un diagrama ternario de Piper (Figura 21), todas las aguas subterráneas analizadas resultan ser Cloruradas Sódicas. La principal diferencia entre las aguas obtenidas en el proyecto Sal de Vida (situadas aguas abajo) comparadas con las de Livent (situadas aguas arriba), es el mayor contenido de sales disueltas y de cloruros de las primeras.

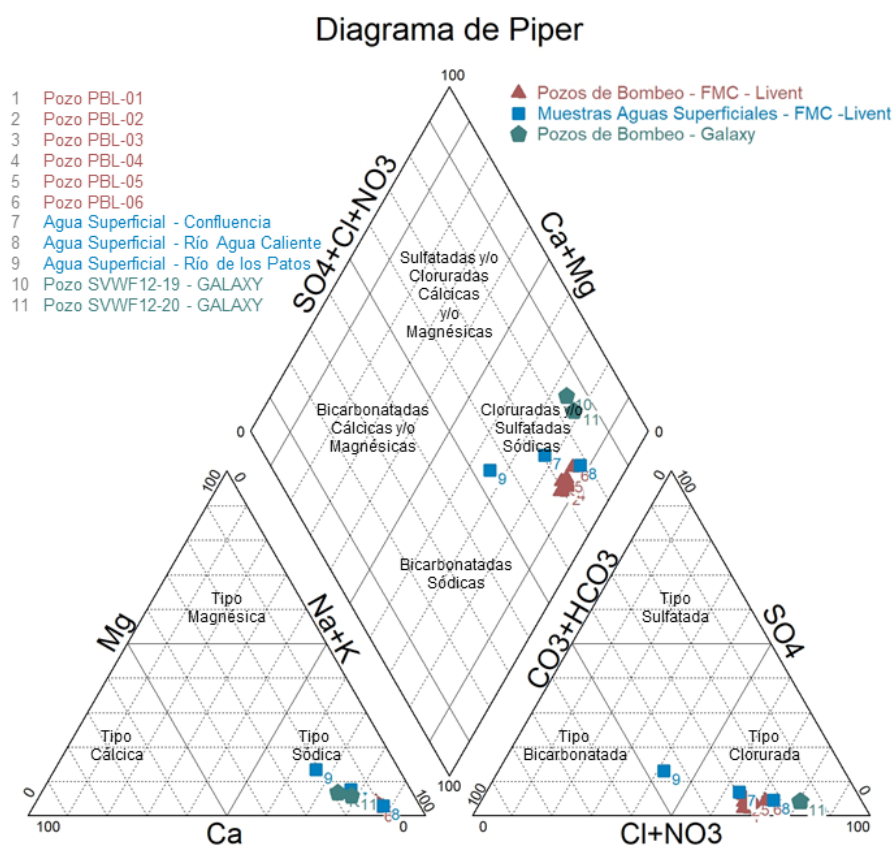


Figura 21: Diagrama ternario de Piper.

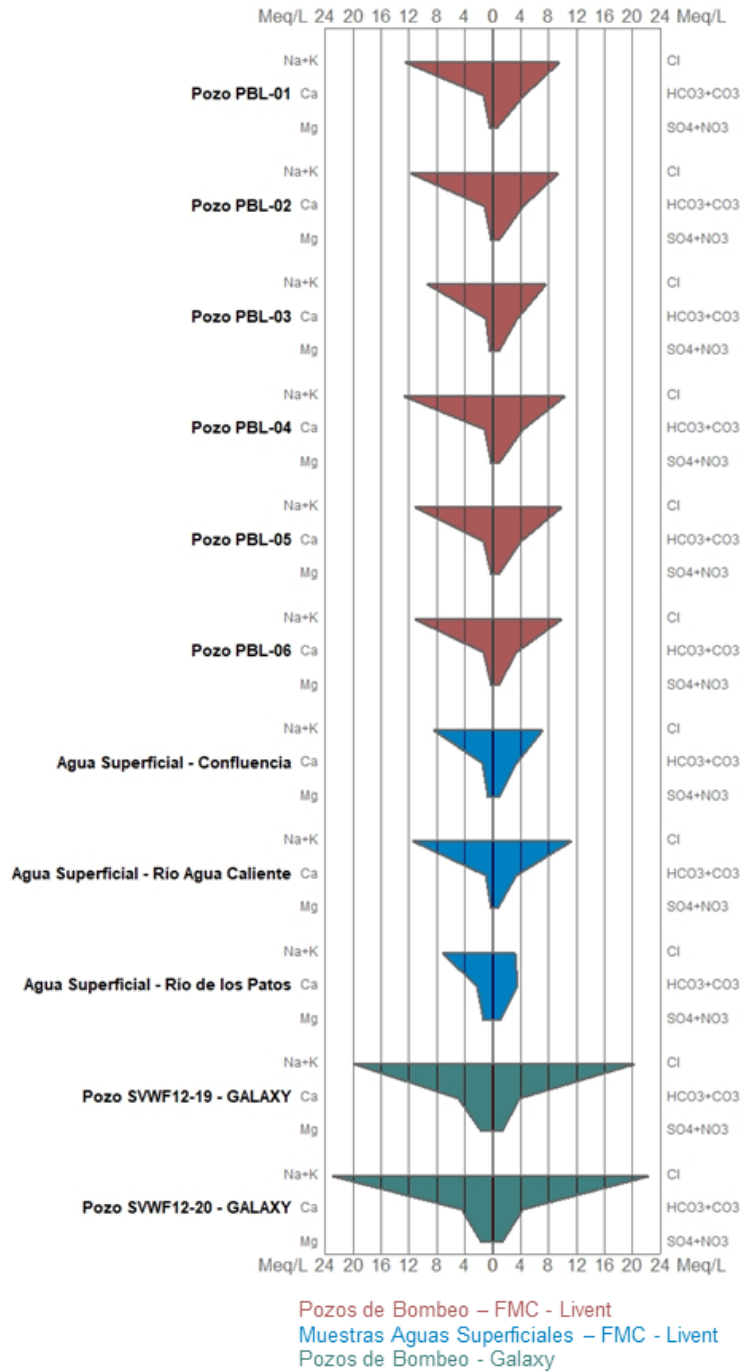


Figura 22: Diagrama comparativo de Stiff.



## VII. RELEVAMIENTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

### V.1- Relevamiento de formas y geoformas de interés hidrogeológico

Durante los trabajos de campo se relevaron aquellas unidades geológicas y geomorfológicas que revisten de interés en la hidrogeología local, influenciando aspectos hidrodinámicos e hidroquímicos, claves en el funcionamiento del sistema analizado. Para tal fin se confeccionó un mapa geológico de detalle, del entorno al Sistema Acuífero Los Patos, futura área a modelar (Figura 24).

Dentro de estos conceptos, puede referirse en primer término, a los posibles medios de circulación gobernados por las litologías que conforman el medio geológico local. De esta manera pueden dividirse los medios de circulación en dos grandes grupos: 1) Los de permeabilidad primaria y 2) Los de permeabilidad secundaria.

En el primer grupo se destacan los materiales sedimentarios inconsolidados, pertenecientes los depósitos aluviales y fluviales asociados a los ríos Aguas Calientes y Los Patos, como así también, algunos depósitos de abanicos y conos aluviales de poco desarrollo en la zona. Según los datos obtenidos de los muestreos litológicos de las perforaciones relevadas, estas secuencias tendrían continuidad en subsuelo, con espesores variables entre 7 y 200 metros (Foto 1 y Foto 2).



Foto 1: Aspecto de afloramientos de una terraza fluvial en margen derecha del río Los Patos.

El río Los Patos, próximo a su desembocadura en el salar del Hombre Muerto, ha generado a lo largo de su historia geológica, un abanico aluvial, conformado por arenas de variados tamaños. Su zona distal, probablemente se encuentre interdigitada con facies evaporíticas propias del salar. Actualmente el curso fluvial ha superado esta geofoma, descargando sus aguas en forma de un “delta” con una multiplicación de cauces que se interdigitan en el propio salar (Figura 23).



Foto 2: Muestras de cutting de una perforación exploratoria de 100 metros en zona de Batería de Livent.

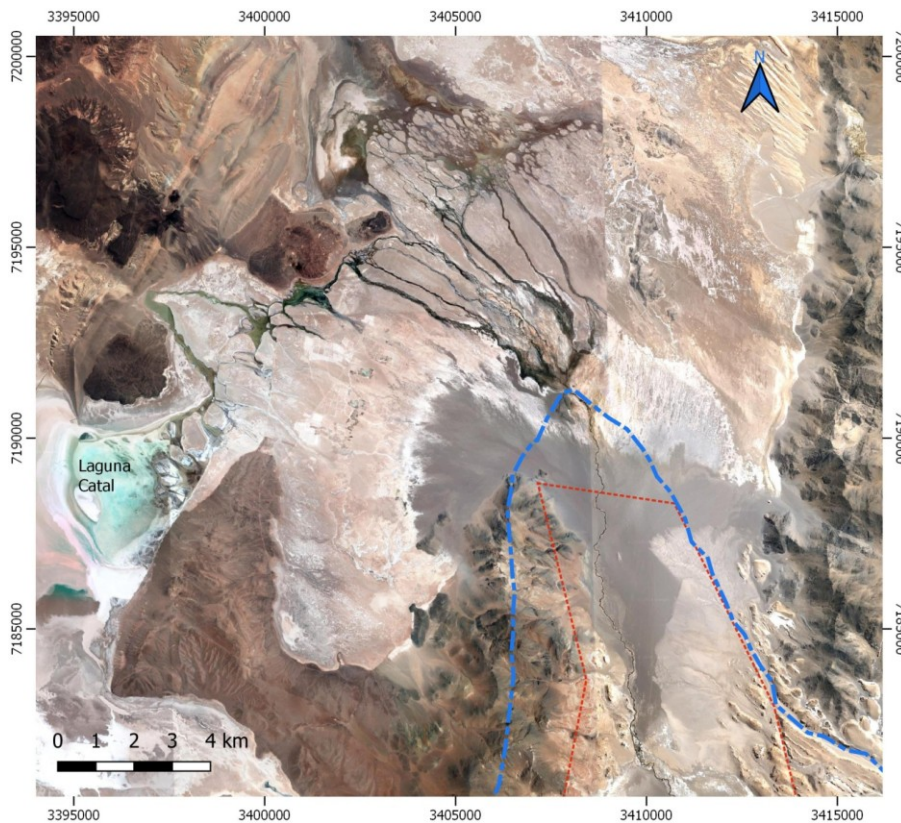


Figura 23: Cono y delta de la desembocadura del río Los Patos.



En el segundo grupo, se destacan las rocas pertenecientes a la Formación Pachamama y al Complejo Metamórfico Río Blanco, a las metamorfitas de bajo grado de la Formación Falda Ciénaga y a las rocas volcánicas del Complejo Eruptivo Oire. También se pueden incluir a las dacitas y andesitas de la Formación Tebenquicho y a las vulcanitas y piroclastitas del Complejo Volcánico Cerro Galán. Dentro de este último, se destaca el rol de las facies de Ignimbritas, que por su gran distribución areal y por encontrarse infrayaciendo a los depósitos aluviales modernos, juega un rol de suma importancia en la circulación del agua subterránea.

Las facies de ignimbritas habitualmente muestran una variación en su perfil vertical, diferenciándose su base con material piroclástico depositado en el momento del flujo ardiente (surge de base), su zona central dominado por material piroclástico soldado (colada piroclástica con prismación vertical) y su techo con un “surge” de cenizas. Estas secuencias están además afectadas por la tectónica activa en la región, por lo que adquiere en partes, fracturas, fallas, diaclasas que incrementan su permeabilidad secundaria.



Foto 3: Izq: Vista del volcán Cerro Redondo, conformado por dacitas y andesitas de la Formación Tebenquicho. Derecha: pequeño afloramiento de la Fm. Tebenquicho en el valle fluvial del río Los Patos.



Foto 4: Aspecto de afloramientos de ignimbritas (surges basales) muy fracturadas en margen izquierda del río Los Patos. Sobreyacen facies de coladas piroclásticas soldadas.





Foto 5: Detalle de afloramientos de ignimbritas (surges basales) muy fracturadas, en margen izquierda del río Los Patos.



Foto 6: Detalle de afloramientos de ignimbritas (facies de coladas piroclásticas soldadas), en ambas márgenes del río Los Patos Aguas Calientes.



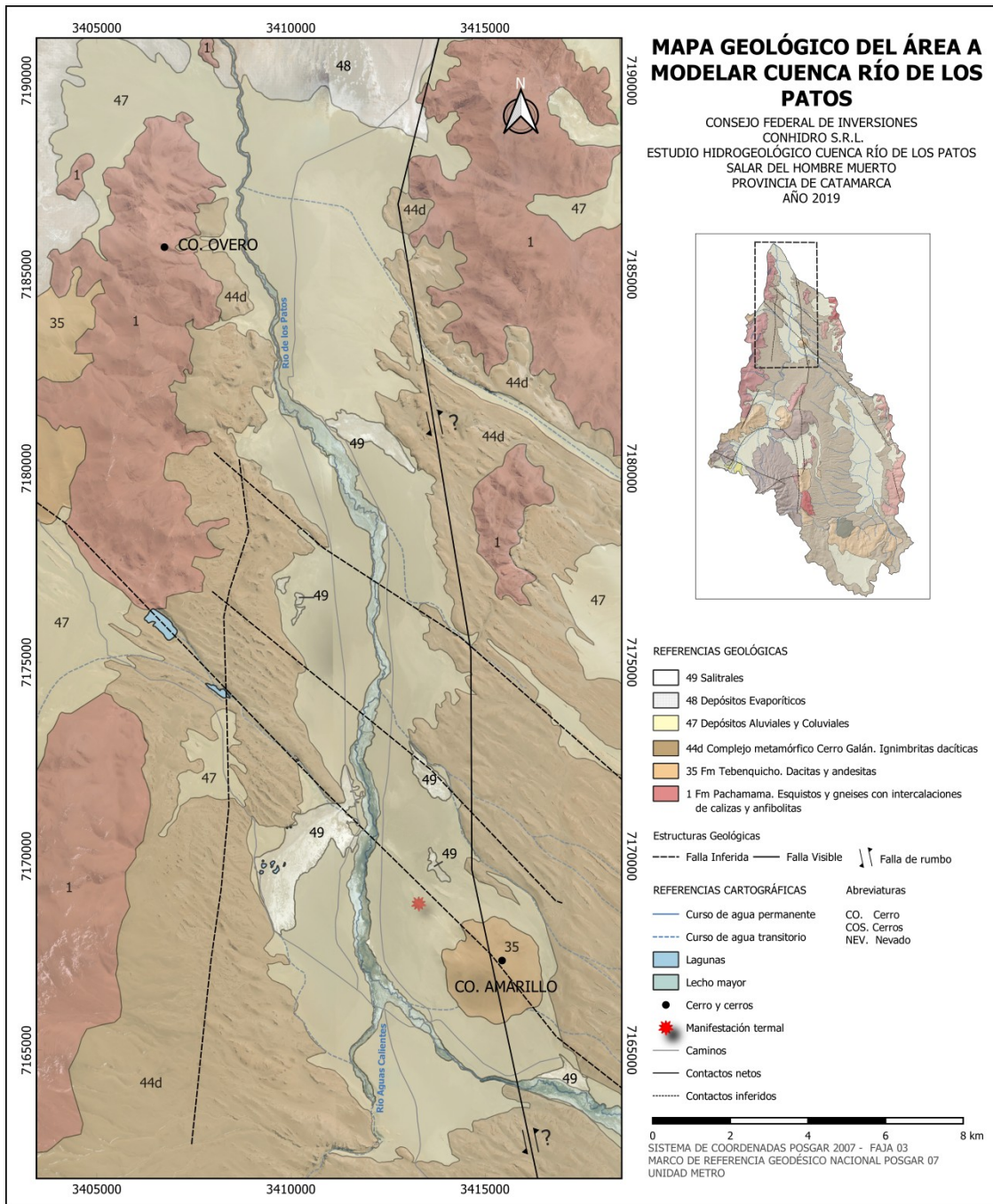


Figura 24: Mapa geológico de detalle, en el entorno del Sistema Acuífero Los Patos, modificado en este trabajo, de Hoja Geológica Cachi (2566-III) y Vinante, 2003.

## **V.2 - Relevamiento de manantiales y humedales**

### **Humedales**

Durante las tareas de campo, se procedió a reconocer algunas manifestaciones de agua que demuestran la íntima relación agua superficial / agua subterránea que ocurre en el marco de la cuenca del río de Los Patos.

Cuerpos lagunares y vegas, conforman un atractivo paisaje altoandino, siendo el resultado de aspectos geológicos e hidrogeológicos que explican su existencia y la variabilidad en el tiempo, dominados por aspectos netamente hidro-meteorológicos.

EC&Asociados, (2018) en la descripción de la línea de base ambiental para el proyecto Estudio de Impacto Ambiental y Social Aprovechamiento de agua subterránea y conducción a Planta Fénix, describe que en la cuenca de Los Patos, se desarrollan humedales altoandinos y que estos ecosistemas se encuentran vinculados de manera perenne o temporal a la presencia de agua, ya sea de la proveniente de lluvias, quebradas, aguas subterráneas, deshielo de glaciares o fusión de nieve.

Los humedales altoandinos, son considerados ambientes frágiles por la Convención de Ramsar (2010), su alta fragilidad está asociada a sequías en la puna y a causas antrópicas como: agricultura, pastoreo intensivo (Convención de Ramsar & Grupo de Contacto EHAA, 2008). Por otra parte, estos representan un valor económico para los puesteros que se encuentran en la zona.

Por otra parte, se conoce muy poco sobre la relación de los humedales con la hidrología y climatología a nivel local y regional, más aún en un contexto de cambio climático, en el que muchos investigadores han proyectado cambios en la precipitación y la temperatura en estas biorregiones.

Aunque los modelos climáticos en la región Andina aún tienen mucha incertidumbre, se pronostica un aumento de la temperatura y cambios en el régimen de la precipitación.

La cuenca del río De Los Patos, presenta una marcada variabilidad con respecto a la composición florística de humedales, lo que determina la existencia de dos unidades de vegetación de humedales: el Pastizal Hídrico y las Vegas, se aclara que el análisis que se presenta a continuación no considera la vegetación de estepa arbustiva de la cuenca, y se enfoca en los

ambientes de humedales, vinculadas directamente al sistema hidrológico. EC&Asociados, (2018).

Vegas: Son sectores con niveles freáticos superficiales a subsuperficiales, pudiendo o no presentarse niveles de saturación y el contenido de materia orgánica del suelo es medio a bajo, presentándose en este último caso, mayor afloramiento salino. Las especies presentan crecimiento rizomatoso, desarrollando un césped parejo o con desarrollo de pequeños cojines herbáceos menores a 40 cm. de altura de follaje.

Pastizal Hídrico: Son sectores que presentan una mayor concentración de sales en superficie, los niveles freáticos son medianos a altos y el suelo tiene un contenido e materia orgánica media a baja. Las especies vegetales tiene crecimiento cespitoso (en macollos), con desarrollo de follaje aéreo alto (mayor a 40cm. De altura), conformando penachos herbáceos de tamaño medio a grandes.

Un aspecto importante a considerar es que las condiciones ambientales que dominan los sistemas hídricos ubicados en los salares, son consideradas como extremas para el desarrollo de los organismos, debido a que presentan una elevada variabilidad espacial y temporal. A pesar de que los organismos que habitan estos sistemas presentan frecuentemente rangos de tolerancia ambiental amplios, estos son significativamente menores que la variabilidad natural, lo cual se traduce en una distribución en parches y un permanente recambio estacional de las especies. Desde un punto de vista ecológico, los ecosistemas acuáticos que se encuentran en los salares tienen una elevada riqueza de especies, en respuesta a la heterogeneidad espacial. Sin embargo, la estructura de los ecosistemas cambia frecuentemente en función de las variaciones temporales del ambiente físico. La estrecha relación que se genera entre las comunidades biológicas y el medio físico, determinan la existencia de dinámicas únicas en cada ecosistema. El modelo conceptual empleado para el análisis de la vegetación indica que el factor principal que controla la ecología de los humedales tiene que ver precisamente con el régimen hidrológico del lugar, el cual está determinado por la duración, flujo, cantidad y frecuencia de agua. EC&Asociados, (2018).

Se considera que un sitio tiene una hidrología de humedal cuando permanece húmedo lo suficiente como para generar suelos que pueden mantener una vegetación hidrolítica. Es decir, permite la presencia de plantas adaptadas a ambientes inundados (NOAA & EPA, 2003, en EC&Asociados, 2018).

En el mismo sentido se sostiene que en regiones áridas y semi-áridas, el agua es el factor más limitante para el asentamiento y crecimiento de las plantas, su fisiología, etc.. También se señala que entender la respuesta de las plantas es fundamental para el manejo efectivo de ecosistemas bajo condiciones de cambio climático y creciente actividad antropogénica.

Los lugares donde hay aguas subterráneas someras mantienen una densidad mayor de vegetación que en áreas con niveles freáticos más profundos, aportando aguas adicionales para el crecimiento y transpiración de las plantas. Remarca que, si bien es ampliamente reconocido que un aumento en la profundidad del agua subterránea puede ser perjudicial para la vegetación, no lo es tanto el hecho de que un aumento del nivel freático también puede ser perjudicial. En EC&Asociados, (2018).

Los valores de NDVI indican que el estado de la vegetación con una buena cobertura (mayor valor de NDVI) es el que corresponde a la clase 1 (rojo) y se relaciona a los humedales (que comprenden vegas y pajonales hídricos), los que se encuentran vinculados a los sectores con mayores valores de NDWI. Asimismo, al comparar los valores de NDVI, obtenidos para mayo y diciembre, nuevamente se denota la variación de superficie cubierta por vegetación, siendo mayor en mayo y menor en diciembre, esta situación también podría estar asociada al periodo de latencia en la que ingresan las plantas durante los meses de estiaje, por lo que la reflectancia es menor.

EC&Asociados, (2018) realizó la delimitación de humedales del área de estudio utilizando indicadores espectrales, los cuales definen unidades vegetacionales que se analizan en términos contextuales. Para mejorar la visualización y posterior vectorización de las áreas, se realizó una clasificación digital del índice, en tres clases: vegetación, cuerpos de agua y salares, lográndose con ello, la localización espacial de los humedales existentes, conociéndose sus respectivos tamaños y relaciones espaciales. Se confeccionaron las imágenes para los meses de mayo de 2018 y diciembre de 2017 (Figura 25 y Figura 26).

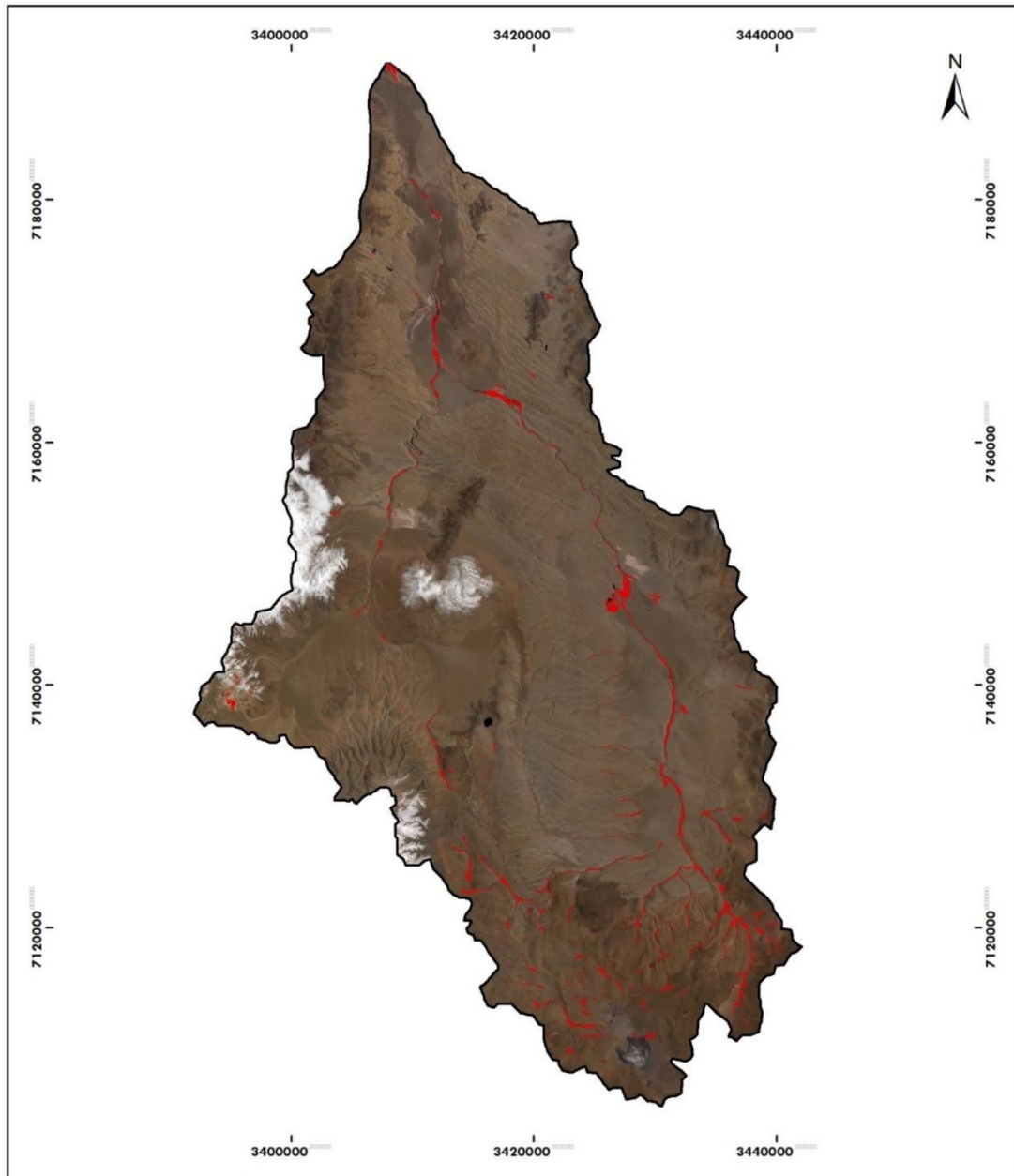


Figura 25: Teledetección de Humedales para el mes de Mayo realizado por EC&Asociados, (2018).

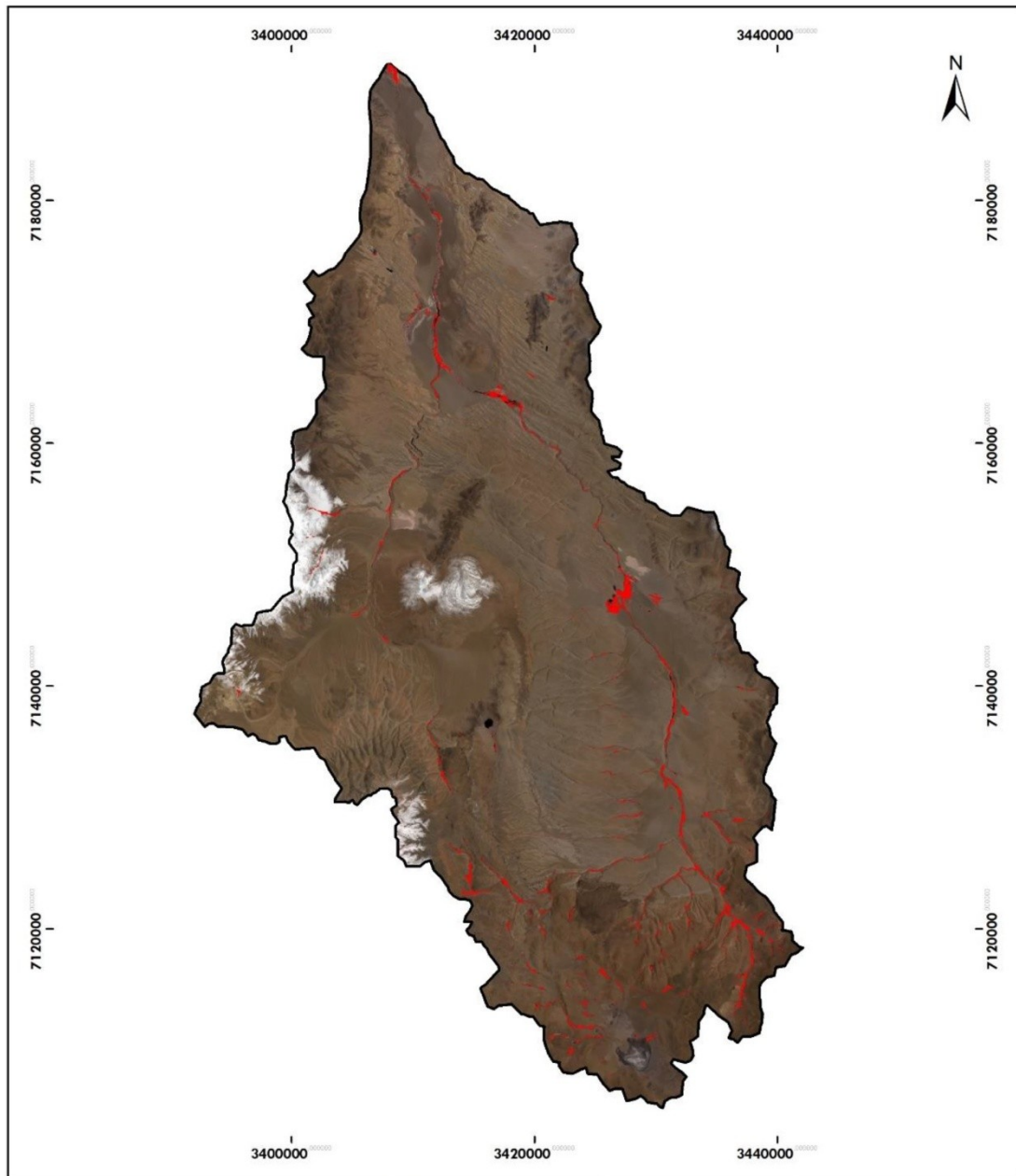


Figura 26: Teledetección de Humedales para el mes de Diciembre realizado por EC&Asociados, (2018).

### **Manantiales**

Otro aspecto que evidencia la relación agua subterránea/agua superficial, son los cuerpos lagunares que existen en el entorno del valle aluvial del río Los Patos, que en la mayoría de los caso, resultaría ser un afloramiento de las aguas subterráneas (manantiales) por causas topográficas o geológicas (estructurales o litológicas). Estudios topográficos de detalle y el seguimiento de los niveles de agua de estas lagunas, de manera conjunta con las variaciones piezométricas de la región, comprobarán esta condición.



Algunas de estas lagunas, según manifiestan algunos lugareños, suelen desaparecer en el período de máximo estiaje, razón por la cual podrían asociarse con descensos en el nivel freático local.

Se destaca la zona del ingreso al valle del Río Los Patos, unos 2 km al oeste de la batería de pozos del proyecto de Livent (Foto 7), por la presencia de varias de ellas, las cuales deberán ser monitoreadas para un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema.



Foto 7: Zona de lagunas en margen izquierda del río Los Patos.



Foto 8: "Laguna del Potasio", ubicada en margen izquierda del río Los Patos.

Particular interés despierta un manantial relevado en la base del volcán Cerro Amarillo, el cual consiste en un campo de emisión de gases con un

marcado olor sulfhídrico, en el cual existe una zona con humedad (lodos) en la que se manifiesta el burbujeo de los fluidos termales (Foto 9). Obviamente este manantial obedece a fenómenos endógenos, en los que se involucra al agua subterránea, que siempre está presente a escasas profundidades. El lugar exacto de esta manifestación, estaría asociado a una estructura regional (falla que atraviesa diagonalmente al valle fluvial del río Los Patos (Figura 24).



Foto 9: Lodos termales con escape de gases.



### **V.3 - Relevamiento, identificación y geoposicionamiento de perforaciones existentes**

Una de las actividades desarrolladas en las tareas de campo, fue el relevamiento, identificación y geoposicionamiento de todas las perforaciones existentes en la cuenca del río de Los Patos. Todas las captaciones habían sido relevadas previamente en la etapa de recopilación y análisis de antecedentes, lográndose la identificación real en campo comprobando la veracidad de los datos disponibles en los organismos públicos consultados.

La Dirección provincial de Hidrología y Evaluación de los Recursos Hídricos (DPHyERH), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas, procedió a relevar las coordenadas y cotas de cada punto de interés (perforación, punto en el río, punto fijo de base) sobre algún sistema de referencia convencional, mediante técnicas GPS de posicionamiento cinemático en Tiempo Real (RTK).

Dicha técnica consiste en ubicar un receptor satelital en algún punto de coordenadas conocidas de alta precisión (Base). Mediante un radio enlace UHF, se transmiten las coordenadas de base y correcciones diferenciales, que permiten al receptor móvil (Rover) calcular sus nuevas coordenadas en cada punto con solo 5 épocas de observación, almacenando las mismas en un dispositivo colector de datos.

Es una técnica alta productividad, que sin embargo requiere, como toda técnica GPS, un horizonte cielo despejado y mayormente libre de obstáculos, condiciones más que favorables y optimas disponibles en la zona de trabajo, en el ambiente de la Puna Catamarqueña. Se puede combinar además con métodos de posicionamiento diferencial Estático, para determinar con mayor precisión las coordenadas de los puntos Base, a partir de puntos fijos establecidos en la zona, pertenecientes a la Red Pasma (Proyecto de Apoyo al Sector Minero Argentino), como así también de bases permanentes de la Red Satelital de Monitoreo Continuo (RAMSAC), cuya información suministra el Instituto Geográfico Nacional.

Se utilizaron dos receptores Satelitales doble frecuencia, marca Trimble R4 L1/L2 (Base) y un Receptor South Galaxy G1 L1/L2 RTK (Rover). El modelo Trimble (Base) permite coleccionar datos crudos para postproceso estático, y transmite correcciones diferenciales mediante un radio modem UHF externo (Tx). El modelo South (Rover) cuenta con un modem UHF interno que recibe las correcciones (Rx) y calcula la nueva posición de cada punto. La misma se obtiene con un error aproximado de  $\pm 0.025\text{m}$ .

Las coordenadas se obtienen en el Sistema de Referencia Posgar 2007, Proyección Plana Gauss Krüger (Mercator Transversal) en la Faja 3 para Argentina. Las cotas, se obtienen transformando las alturas elipsoidales WGS84 aplicando correcciones para obtener Alturas Ortométricas referidas al modelo Geoidal EGM2008.

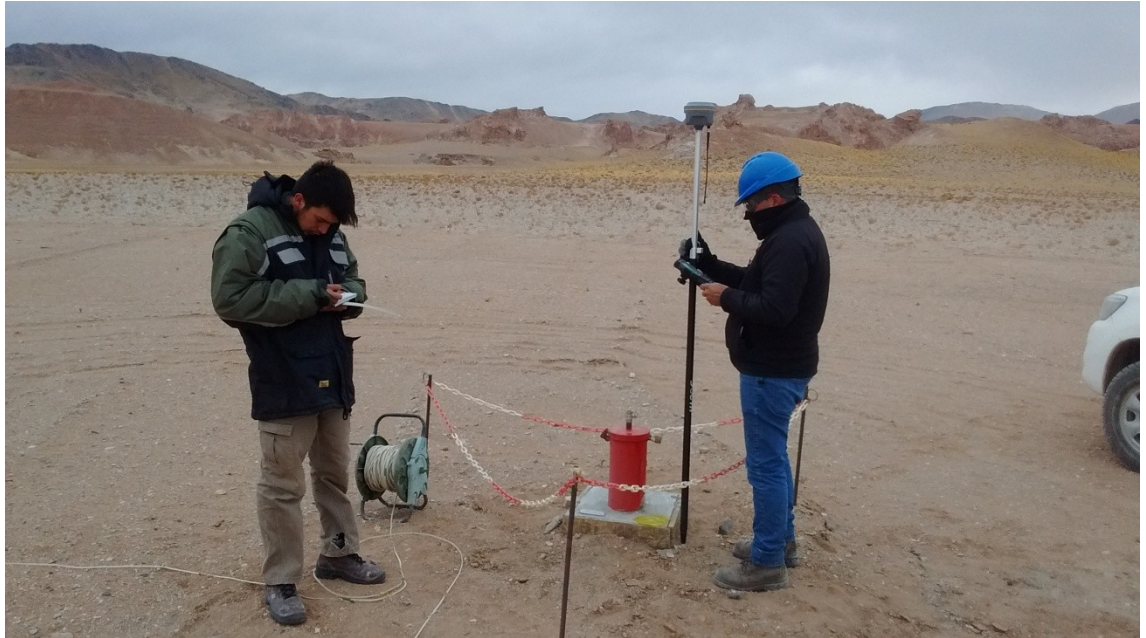


Foto 10: Determinación de cotas en el entorno de una perforación.

En la misma campaña, el personal técnico de la DPHyERH, relevó también puntos del río Los Patos y Aguas Calientes, en su “pelo de agua”, para obtener sus cotas y evaluar la situación en relación a los niveles de agua de las perforaciones y establecer relaciones piezométricas y de flujo. Toda la Información relevada por la DPHyERH, se sintetizó en un Informe Técnico que se adjunta como **ANEXO II**.

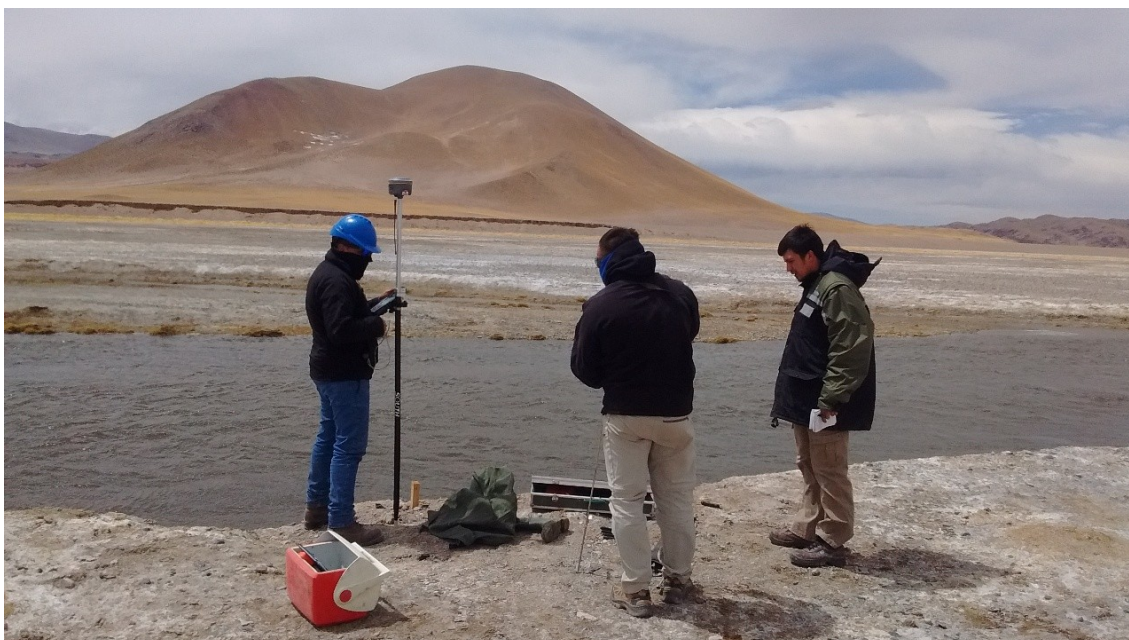


Foto 11: Determinación de cotas en el entorno del río Los Patos.

El relevamiento de perforaciones permitió confeccionar una ficha individual que sintetiza las características constructivas visibles, incluidas en el **ANEXO II** y su ubicación dentro de la cuenca (Figura 27).

Del relevamiento de campo realizado surge la existencia de 31 perforaciones dentro del dominio de interés hidrogeológico de la cuenca del río Los Patos (Figura 27). Tres de ellas, fueron ejecutadas en el año 2012 por Minera del Altiplano SA (Livent) mediante el uso de una retroexcavadora, para un estudio hidráulico y de calidad del agua en el subálveo del río Los Patos. Existen 8 perforaciones de diamantina realizadas por la empresa Galán Lithium, en su proyecto de exploración geológica “Candelas”. También se relevó el campo de bombeo del proyecto de Minera del Altiplano (Livent), en el que existen 16 perforaciones (6 de ellas habilitadas para bombeo y las 10 restantes para observación piezométrica). Por último el Proyecto Sal de Vida (Galaxy) posee 4 perforaciones (dos construidas para obtener agua dulce o fresa y las otras dos para exploración de salmueras en profundidad).



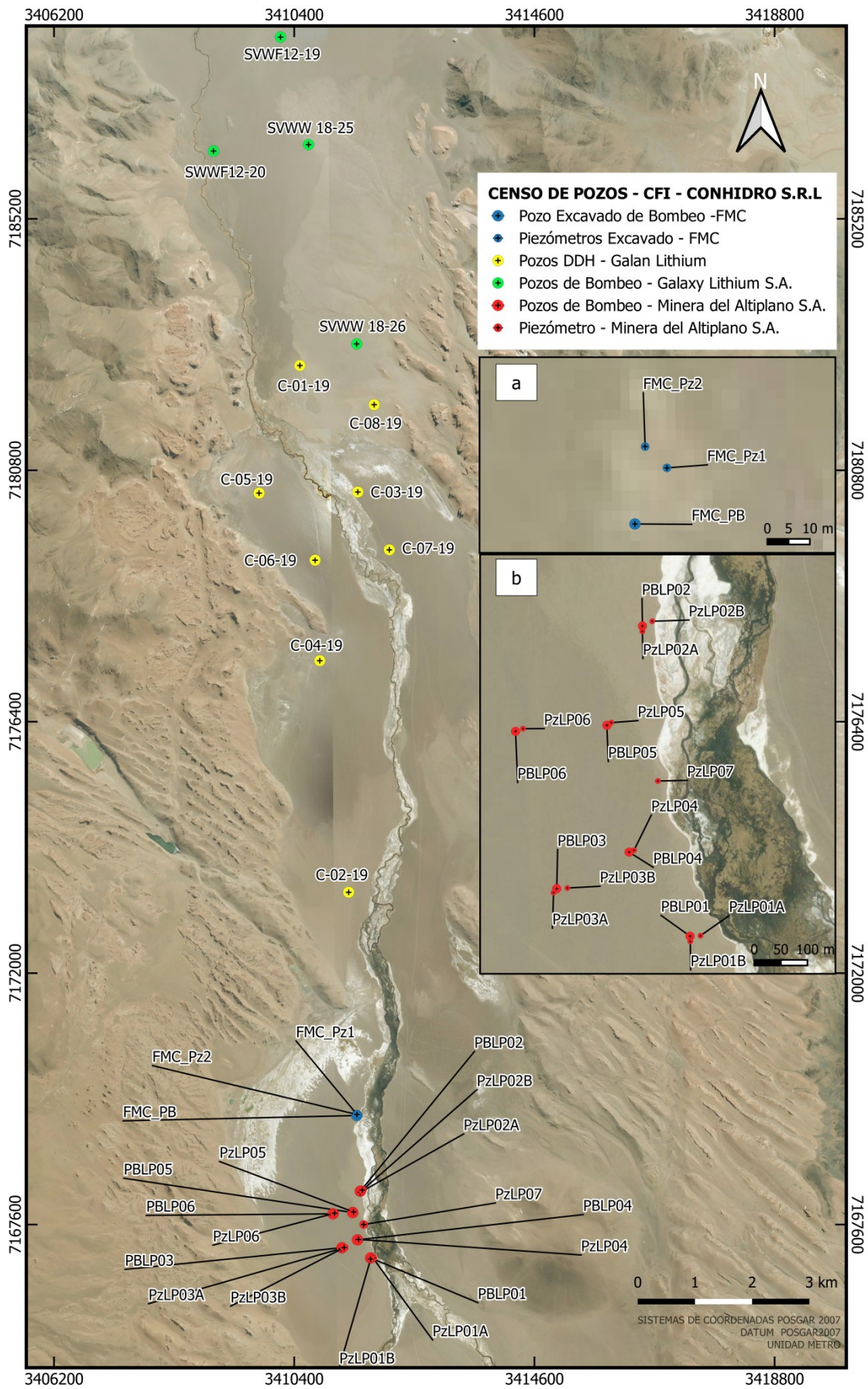


Figura 27: Ubicación de las perforaciones relevadas durante los trabajos de campo.

Tabla 4: Enumeración e identificación de las perforaciones censadas.

N°	Nombre	Proyecto	Empresa	Sist. Perforación	X	Y
1	FMC_PB	Fénix	Minera del Altiplano S.A.	Retroexc.	3411495	7169508
2	FMC_Pz1	Fénix	Minera del Altiplano S.A.	Retroexc.	3411503	7169521
3	FMC_Pz2	Fénix	Minera del Altiplano S.A.	Retroexc.	3411498	7169526
4	SVWW 18-26	Sal de Vida	Galaxy Resources	Rotary	3411492	7183011
5	SVWW 18-25	Sal de Vida	Galaxy Resources	Rotary	3410650	7186500
6	SVWF12-19	Sal de Vida	Galaxy Resources	Rotary	3410161	7188381
7	SWWF12-20	Sal de Vida	Galaxy Resources	Rotary	3408989	7186387
8	PBLP01	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411736	7167016
9	PzLP01A	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411775	7167018
10	PzLP01B	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411737	7166996
11	PBLP02	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411557	7168184
12	PzLP02A	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411557	7168164
13	PzLP02B	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411594	7168203
14	PBLP03	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411234	7167195
15	PzLP03A	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411222	7167180
16	PzLP03B	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411274	7167197
17	PBLP04	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411506	7167332
18	PBLP05	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411423	7167810
19	PzLP04	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411525	7167340
20	PzLP05	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411440	7167820
21	PBLP06	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411079	7167788
22	PzLP06	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411107	7167798
23	PzLP07	Los Patos	Minera del Altiplano S.A.	Rotary	3411615	7167601
24	C-01-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3410499	7182633
25	C-02-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3411352	7173415
26	C-03-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3411512	7180420
27	C-04-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3410847	7177468
28	C-05-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3409786	7180401
29	C-06-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3410765	7179226
30	C-07-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3412063	7179408
31	C-08-19	Candelas	Galan Lithium Limited	diamantina	3411798	7181947



Foto 12: Relevamiento de perforaciones en proyecto Livent.





Foto 13: Relevamiento de perforaciones en proyecto Candela.



Foto 14: Relevamiento de perforaciones en proyecto Sal de Vida.



Foto 15: Relevamiento de perforaciones en proyecto Livent.

#### **V.4 - Medición de niveles piezométricos**

Durante la realización del censo de perforaciones se procedió a medir los niveles estáticos en cada perforación, mediante el uso de sondas piezométricas.

El resultado de las mediciones de niveles estáticos, fueron referidos a la boca de pozo, tomando como referencia el caño original de la perforación (la medida se indica como “mbbp” metros bajo boca de pozo).

En la Tabla 5 se resumen los niveles estáticos obtenidos durante la etapa de censo y sus correspondientes cotas piezométricas, calculadas según el detalle altimétrico de alta precisión, que se adjunta como **ANEXO II**.

Tabla 5: Niveles estáticos y cotas piezométricas de perforaciones.

Pozo	Coordenadas		Nivel Estático (mbbp)	Cota piezométrica (msnm)
	y	x		
PBLP01	7167015.64	3411736.28	2.01	4038.408
PzLP01A	7167017.51	3411775.05	27.22	4038.424
PzLP01B	7166995.97	3411736.87	6.04	4038.420
PBLP02	7168184.38	3411556.82	2.67	4035.123
PzLP02A	7168164.2	3411556.56	4.10	4035.183
PzLP02B	7168202.6	3411593.54	3.51	4035.014
PBLP03	7167194.71	3411234.01	3.54	4037.950
PzLP03A	7167179.99	3411222.15	2.94	4038.003
PzLP03B	7167197.27	3411274.08	2.39	4037.940
PBLP04	7167332.49	3411506.39	1.65	4037.523
PzLP04	7167339.66	3411525.07	5.32	4037.502
PBLP05	7167810.24	3411422.92	4.73	4036.224
PzLP05	7167820.46	3411439.51	4.52	4036.185
PBLP06	7167787.61	3411079.05	4.55	4036.328
PzLP06	7167797.57	3411107.1	4.05	4036.313
PzLP07	7167600.54	3411614.82	3.85	4036.688
FMC_PZ1	7169521.29	3411502.7	3.44	4031.787
FMC_PZ2	7169526.3	3411497.56	4.12	4031.819
C-01-19	7182633.39	3410498.84	3.54	3973.005
C-02-19	7173415.15	3411352.02	3.65	4009.702
C-03-19	7180420.19	3411512.16	23.40	3978.803
C-04-19	7177467.5	3410847.02	14.48	4010.730
C-05-19	7180401.04	3409785.83	25.85	3980.797
C-06-19	7179226.38	3410764.93	1.66	3983.120

C-08-19	7181947.46	3411797.64	22.35	3971.370
SVWF12-19	7188380.89	3410161.44	24.63	3980.445
SVWF12-20	7186387.04	3408988.78	43.17	3985.102
SVWW18-25	7186500.11	3410649.71	2.01	3981.939
SVWW18-26	7183011.47	3411491.82	2.67	3992.097



Foto 16: medición de nivel estático durante el censo de perforaciones.

Si bien no es objetivo de esta etapa del estudio, con la obtención de las cotas piezométricas pudo determinarse que los pozos construidos por Livent, en margen izquierda, poseen niveles piezométricos similares a las cotas del pelo de agua del río Los Patos en el mismo entorno. Esta situación permite relacionar hidráulicamente el curso fluvial y la zona saturada del acuífero conformado por las facies aluviales modernas. Bajo esta hipótesis se confeccionó un mapa piezométrico local de la batería de pozos de Livent, observándose que el río posee un comportamiento influente en algunos tramos y efluente en otros. También se observa una zona de flujo y descarga, sobre el borde occidental del valle fluvial, que queda evidenciado por la presencia de lagunas (Figura 28).

En el entorno de la batería se registran gradientes variables entre 0.0016308 y 0.001677. Inmediatamente al norte de este sector, en el entorno del pozo FMC\_PZ1, se observa un incremento del gradiente (0.00385), que podría obedecer a una disminución del área permeable, en función de la información geofísica realizada.

Se destaca que los pozos de investigación geológica profunda del proyecto Candelas, que tendrían sus filtros en unidades volcánicas y clásticas



terciarias, poseen niveles piezométricos que se encuentran entre 20 y 25 metros por debajo de la cota absoluta del pelo de agua de río más cercano. Solo en los pozos C-04-19 y C-02-19 las cotas piezométricas están 1.4 y 10.15 metros por debajo de la del curso fluvial en su “pelo de agua”. Lamentablemente, al no conocer los detalles constructivos (profundidad, posición de filtros, aislamientos del espacio anular, etc.), no se puede elaborar una conclusión contundente sobre la piezometría de estas unidades, solo la desvinculación hidráulica que tendría con el acuífero aluvial moderno.

Los pozos construidos con sistema rotativo en el proyecto Sal de Vida, para prospección de salmueras, con exploraciones que alcanzaron los 300 metros de profundidad, poseen cotas piezométricas que se encuentra unos 4 metros por debajo de las cotas del pelo de agua del río Los Patos en su zona más cercana. Indicando también una posible desvinculación con las unidades aluviales modernas.

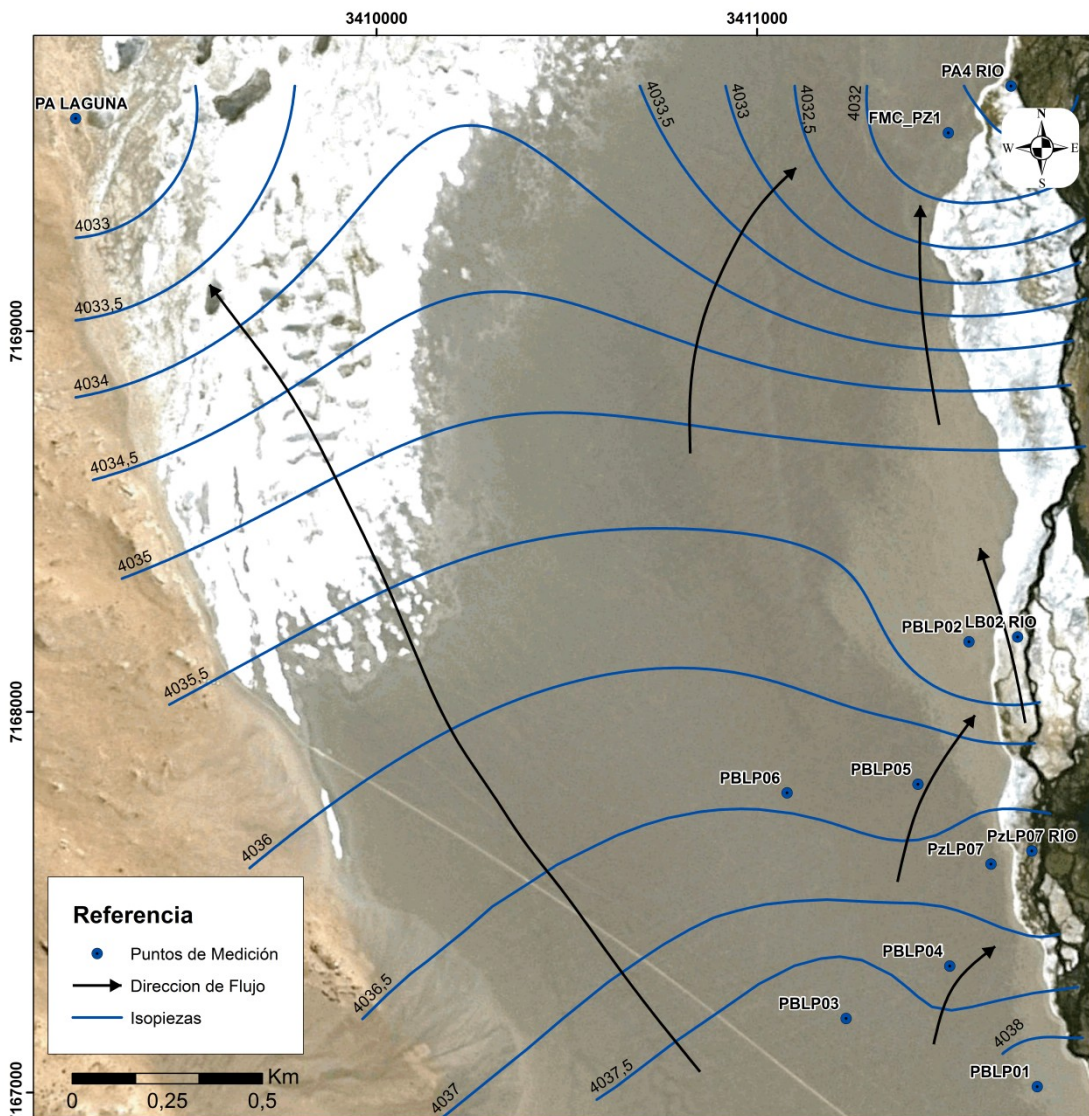


Figura 28: Mapa piezométrico en sector de Batería de pozos de Livent.

## V.5 - Medición de caudales superficiales

Dentro de las actividades programadas en los términos de referencia del presente contrato, estaba la determinación del caudal del sistema de escurrimiento superficial del río Los Patos, en cinco puntos de aforos (Figura 29).

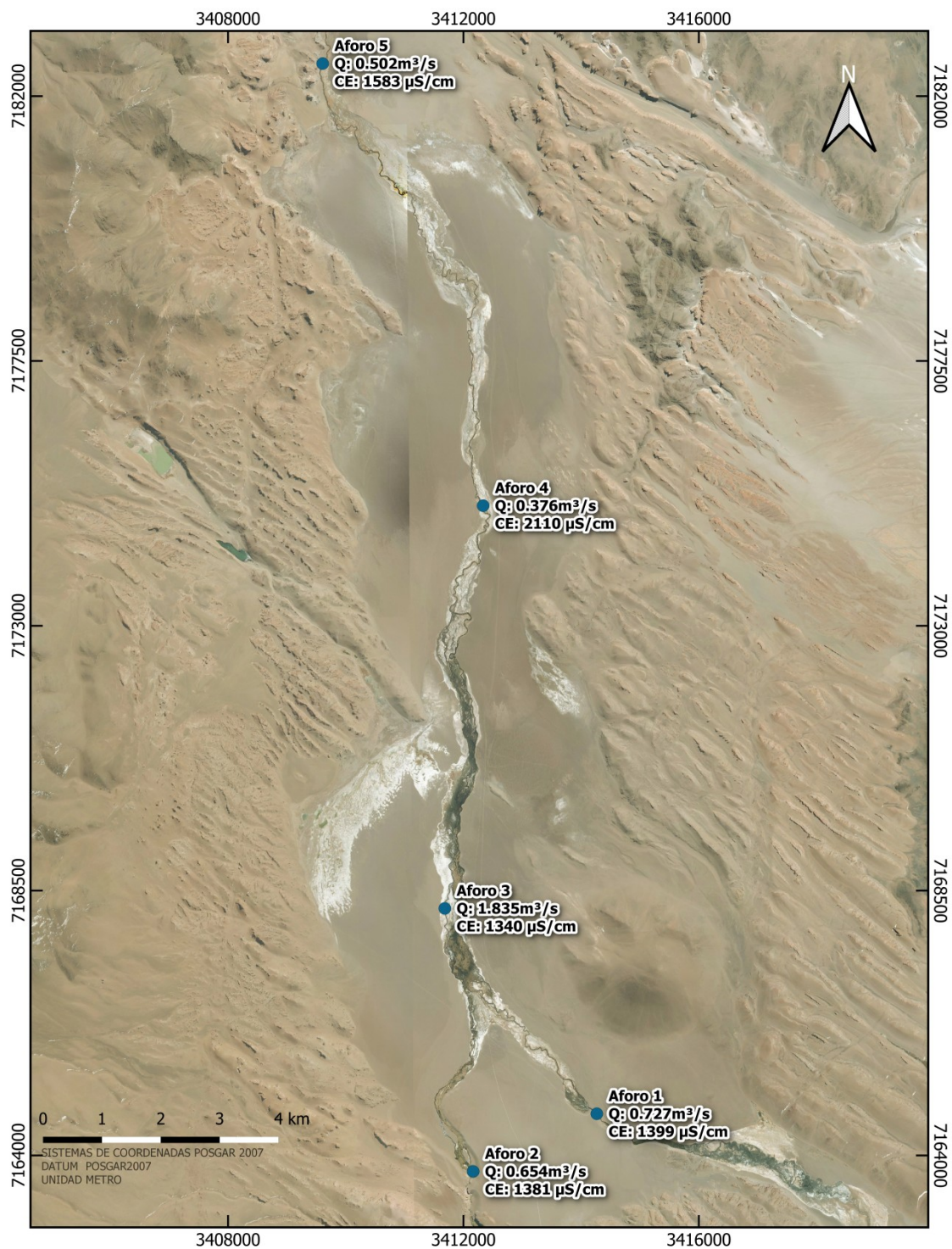


Figura 29: Mapa de ubicación de las 5 estaciones de Aforo.



Los caudales fueron obtenidos mediante el uso de un molinete hidrométrico marca Global Water (Aforos 1 y 2) y AOTT H3 (Aforos 3, 4 y 5), para obtención de la velocidad del flujo, y mediante la medición de la sección del cauce en cada sitio de aforo.



Foto 17: Aforo (A2) en Río Aguas Calientes.



Foto 18: Aforo (A1) en Río Los Patos.



Foto 19: Aforo (A3) en Río Los Patos, zona batería pozos Livent.

Tabla 6: Resultados obtenidos en los puntos de Aforo.

ID	Coordenadas		Cota (msnm)	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	Equipo utilizado (velocidad)
	Lat	Long			
Aforo 1	7164708	3414267	4052.74	0.727	Global Water
Aforo 2	7163727	3412165	4056.86	0.654	Global Water
Aforo 3	7168197	3411684	4035.28	1.835	AOTT (H3)
Aforo 4	7175040	3412336	4015.46	0.376	AOTT (H3)
Aforo 5	7182554	3409608	3996.3	0.502	AOTT (H3)

En cada sitio de aforo se procedió a medir algunos parámetros físico-químicos del agua del curso fluvial. Los resultados se muestran en Tabla 7.

Tabla 7: Parámetros físico-químicos del agua medidos en cada punto de aforo.

ID	Coordenadas		CE (uS/cm)	Temp. (°C)	Ph	Eh (mV)
	Lat	Long				
Aforo 1	7164708	3414267	1399	16.7	8	-76.1
Aforo 2	7163727	3412165	1381	10.6	8.3	-86.5
Aforo 3	7168197	3411684	1340	6.3	8.7	-80.3
Aforo 4	7175040	3412336	2110	10.6	8.2	-80
Aforo 5	7182554	3409608	1583	2.6	7.4	-77





Foto 20: Medición de parámetros físico-químicos del agua.

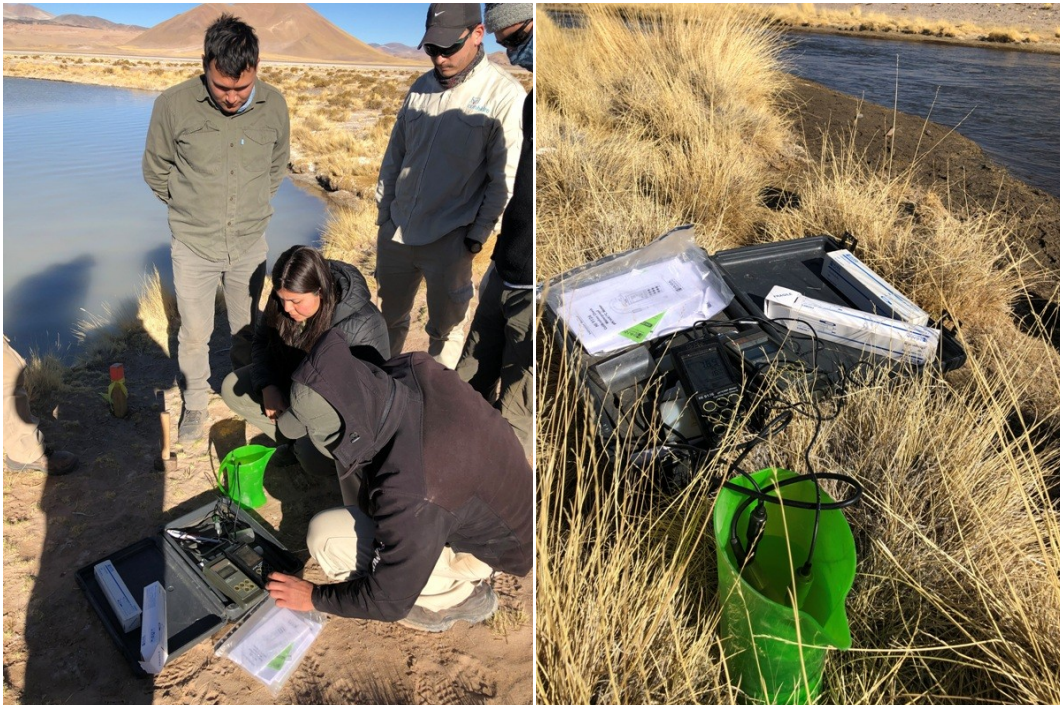


Foto 21: Aforo Medición de parámetros físico-químicos del agua en laguna Potasio (izq) y río Los Patos (der).

## VIII. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

### VI.1 Descripción del método del SEV

Previo a definir el método geoelectrico del SEV, se enuncian algunos conceptos claves de prospección geoelectrica tomados de (García, 2013).

La prospección geoelectrica es un tipo específico de estudios geofisicos donde se prospecta alguna propiedad eléctrica de las rocas y de los fluidos que se encuentran relleno los intersticios porales. Por su relativa simplicidad y bajos costos, normalmente, se emplean los métodos resistivos.

La característica física que se mide en el método resistivo, empleando corriente continua, es la capacidad que poseen los terrenos naturales de conducir la corriente eléctrica. Si en un terreno cualquiera se introduce una corriente eléctrica, ésta se propaga de forma tal que es posible asignarle al terreno una resistividad o resistencia específica, una capacitancia y una inductancia.

Si la corriente eléctrica empleada es continua, la resistividad es el único parámetro que tiene importancia. Se debe tener presente que solo son conductores los materiales metálicos y algunas de sus sales. Por lo tanto, normalmente, el suelo y subsuelo se comportarían como aislante o de resistividad muy alta. Generalmente, en la mayoría de los terrenos existen poros y/o fisuras que pueden estar o no saturados de agua u otro fluido. El agua, por la presencia de sales disueltas, en una proporción que depende a la vez de la temperatura, actúa como un conductor. La resistividad de las rocas dependerá, por lo tanto, del volumen de sus poros, de su distribución y de la resistividad del fluido que los rellena. Se comprende así porque no es posible clasificar en forma simple a los terrenos por su resistividad, ya que esta característica eléctrica está ligada a la porosidad, al contenido de agua u otro fluido y a su resistividad.

Si se introduce un par de electrodos en la superficie plana de un terreno homogéneo e isótropo y se hace circular una corriente eléctrica continua de intensidad (I), se puede registrar la caída de potencial ( $\Delta V$ ) que existe, también en superficie, entre dos puntos del terreno. A través de estas medidas y en base a la ley de Ohm, puede conocerse la resistividad de los terrenos involucrados en el circuito.

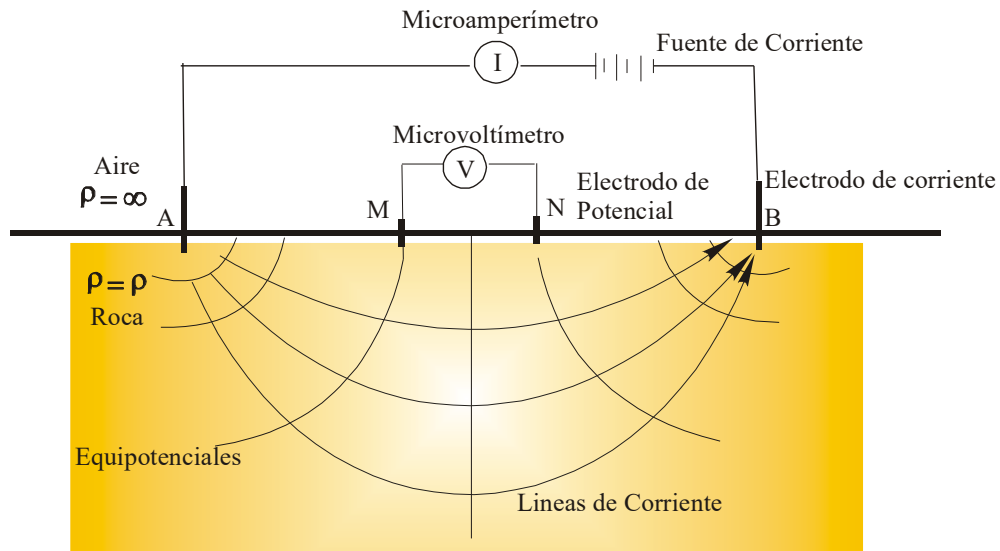


Figura 30: Circuito de emisión y recepción.

Si se tiene presente que el potencial es máximo en uno de los electrodos y mínimo en el otro, el gradiente de potencial puede graficarse en forma de líneas equipotenciales, que se disponen en forma perpendicular a las líneas de corriente. Vistas desde superficie, estas equipotenciales poseen la siguiente disposición:

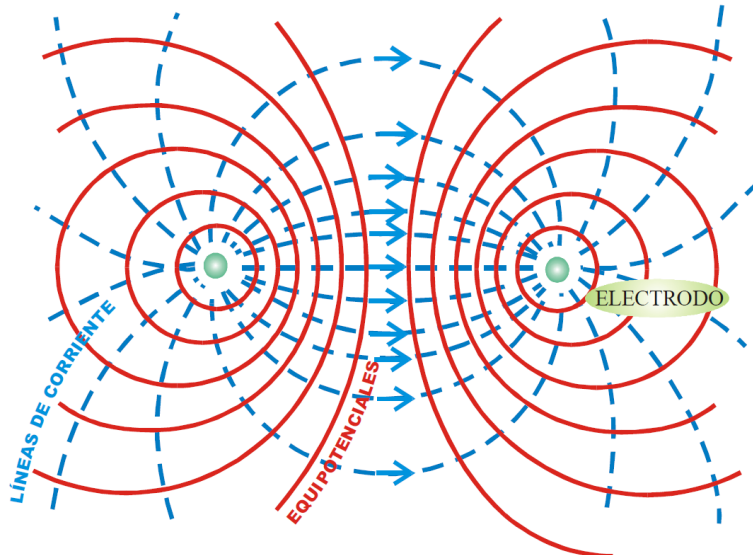


Figura 31: Líneas de corriente y equipotenciales en una vista en planta, generadas por dos electrodos conectados en superficie.

Hasta el momento se ha visto la medición de la resistividad en un medio homogéneo e isótropo, circunstancia que en la naturaleza pocas veces se encuentra. En la mayor parte de los casos, los materiales de la corteza terrestre se disponen en capas horizontales, cuyas propiedades, incluida la resistividad, varían considerablemente.

Si en el circuito de emisión - recepción están involucradas dos capas o más, la resistividad que se medirá en superficie será un promedio entre las resistividades de los materiales por los que pasa la corriente. A esta resistividad medida se la denomina resistividad aparente.

El sondeo eléctrico vertical consiste en registrar, desde la superficie, la resistividad aparente en puntos situados sobre una recta, que se alejan del centro "O" del dispositivo, en forma progresiva y regular, a intervalos de escala logarítmica. Con las mediciones obtenidas, se puede establecer la curva de variaciones de resistividad aparente, en función de la distancia entre el electrodo y el centro del sistema.

Como a medida que la separación entre los electrodos aumenta, en general también se incrementa la profundidad de investigación (esto no es estrictamente cierto), las resistividades aparentes serán representativas de espesores cada vez mayores de rocas por las que circula la corriente.

Los pares de valores resistividad aparente/distancia OA se vuelcan a un gráfico bilogarítmico y dan como resultado una "curva de campo", que posteriormente se interpreta por métodos cualitativos, cuantitativos manuales y por computadora. Los resultados de esta interpretación permiten distinguir capas a partir de sus resistividades verdaderas diferentes, así como también determinar sus espesores. Estos resultados son representativos para el punto central de medición (O) y su proyección en profundidad.

La correlación de SEV contiguos, permite elaborar perfiles geoelectrónicos, que muestran las variaciones de las propiedades del subsuelo en forma lateral. La interpretación con especificaciones de resistividades y espesores de cada capa identificada en el subsuelo recibe el nombre de corte geoelectrónico.

La manera de disponer los electrodos por los que se introduce la corriente y aquellos con los que se registra el potencial en la superficie de un medio cuya resistividad se desea investigar, da lugar a diferentes dispositivos o arreglos electródicos. La importancia de estos dispositivos es que sus formulaciones matemáticas condicionan el trabajo en campaña, permitiendo mayor o menor agilidad en el desarrollo de las operaciones o posibilitando la medición en lugares que poseen condicionamientos naturales. Los más conocidos y empleados son: Wenner, Schlumberger y Semi-Schlumberger, siendo este último el empleado en el presente trabajo:



Schlumberger es un dispositivo tetrapolar, rectilíneo y simétrico. Debe cumplir con la siguiente condición:

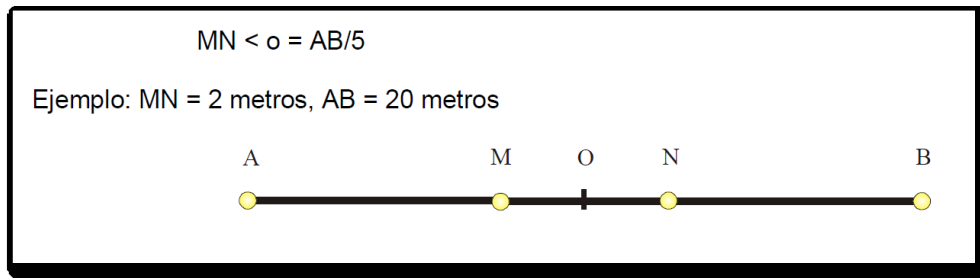


Figura 32: Dispositivo Schlumberger (visto en planta)

El dispositivo Schlumberger tiene la ventaja que para una misma posición de los electrodos M y N, los electrodos A y B pueden disponerse a cualquier distancia que respete la condición mencionada. Esto acelera el trabajo en campaña ya que ahorra gran cantidad de operaciones.

## **VI.2 Introducción**

Para la determinación de la geometría del reservorio o medio de circulación, se cuenta con 31 perforaciones, de las cuales no todas contienen información disponible de la geología atravesada. Por tal motivo la exploración indirecta mediante métodos geofísicos permitirá conocer la presencia y continuidad espacial de facies capaces de almacenar y transmitir agua subterránea.

En este marco, para etapas anteriores de exploración de subsuelo de proyectos mineros y para la actual ampliación de estudio contemplada en este proyecto, es que se optó por la utilización del método geoelectrico del SEV.

Los contrastes eléctricos impuestos por el tipo de sedimentos y rocas existentes en la cuenca, sumado una calidad variable del agua (en términos de salinidad) que satura los poros y fisuras de medio, hacen que la metodología empleada tenga resultados que facilitan la interpretación de la geología de subsuelo.

### VI.3 Dispositivos e instrumental empleados

El estudio se realizó con un equipo marca CGEG CO Ltd. Modelo DUK – 2 A, autocompensador, de corriente continua con lectura directa de resistividad. Se usaron electrodos de corriente de acero inoxidable y de potencial, de cobre, en solución saturada de sulfato de cobre. Se emplearon cables de corriente de cobre acerado de 1 mm de sección y 1.000 metros de longitud.

Como fuente de energía se utilizó un amplificador-regulador de voltaje, alimentado con 220 V, que alcanza un valor máximo de 850 voltios. La prospección geoelectrica se llevó a cabo por el método del SEV (sondeo eléctrico vertical), con un dispositivo electródico tetrapolar Schlumberger de constante geométrica  $K = \pi \cdot ((AM \cdot AN) / MN)$ . Las longitudes entre los electrodos de corriente fueron variables, hasta distancias máximas de 1600 metros. Las separaciones entre los electrodos de potencial, MN, variaron entre 1 y 200 metros.



Foto 22: Equipo resistivímetro (izq.) y carretes de cable de corriente (der.).





Foto 23: Equipo resistímetro, grupo electrógeno y convertidor de corriente.



Foto 24: Electrodo de corriente (izq.) y electrodo de potencial (der.).





Foto 25: Instalación de electrodos en dispositivo tertapolar Schlumberger.



Foto 26: Realización de un SEV próximo a perforación proyecto Candelas.

#### VI.4 Tareas realizadas

En las tareas de gabinete previas y sobre la base de los estudios geofísicos obtenidos durante la etapa de recopilación y análisis de antecedentes, se diagramó una campaña para ejecutar 42 sondeos eléctricos verticales de manera de completar los sitios donde la información era menor. De esta manera, se puede observar una interesante cantidad de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) dispuestos en el área de interés (valle fluvial del río Los Patos).

La curva de campo se graficó en papel bilogarítmico de módulo 62,5 mm, donde la abscisa corresponde a los valores de OA (en metros) y la ordenada, a los de  $\rho_a$  (resistividad aparente en Ohm.m). La interpretación se realizó con programas de computación. El resultado final es un gráfico donde las marcas representan a los puntos de la curva de campo empalmada y la línea continua corresponde a la curva de interpretación optimizada que responde al modelo físico y matemático más ajustado.

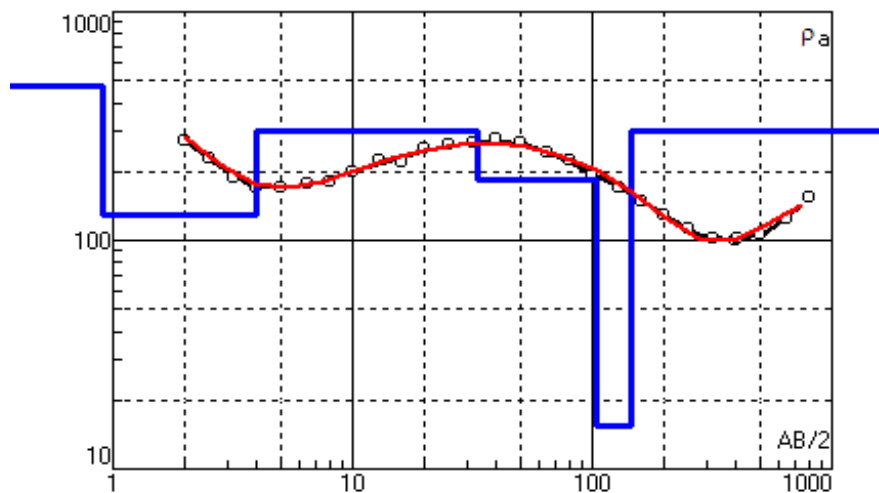


Figura 33: : Representación en gráfico bilogarítmico de la curva de campo empalmada (en negro) y la curva de interpretación optimizada que responde al modelo físico – matemático mas ajustado (en rojo). En azul se representa el modelo geoelectrico con las resistividades verdaderas y las profundidades.



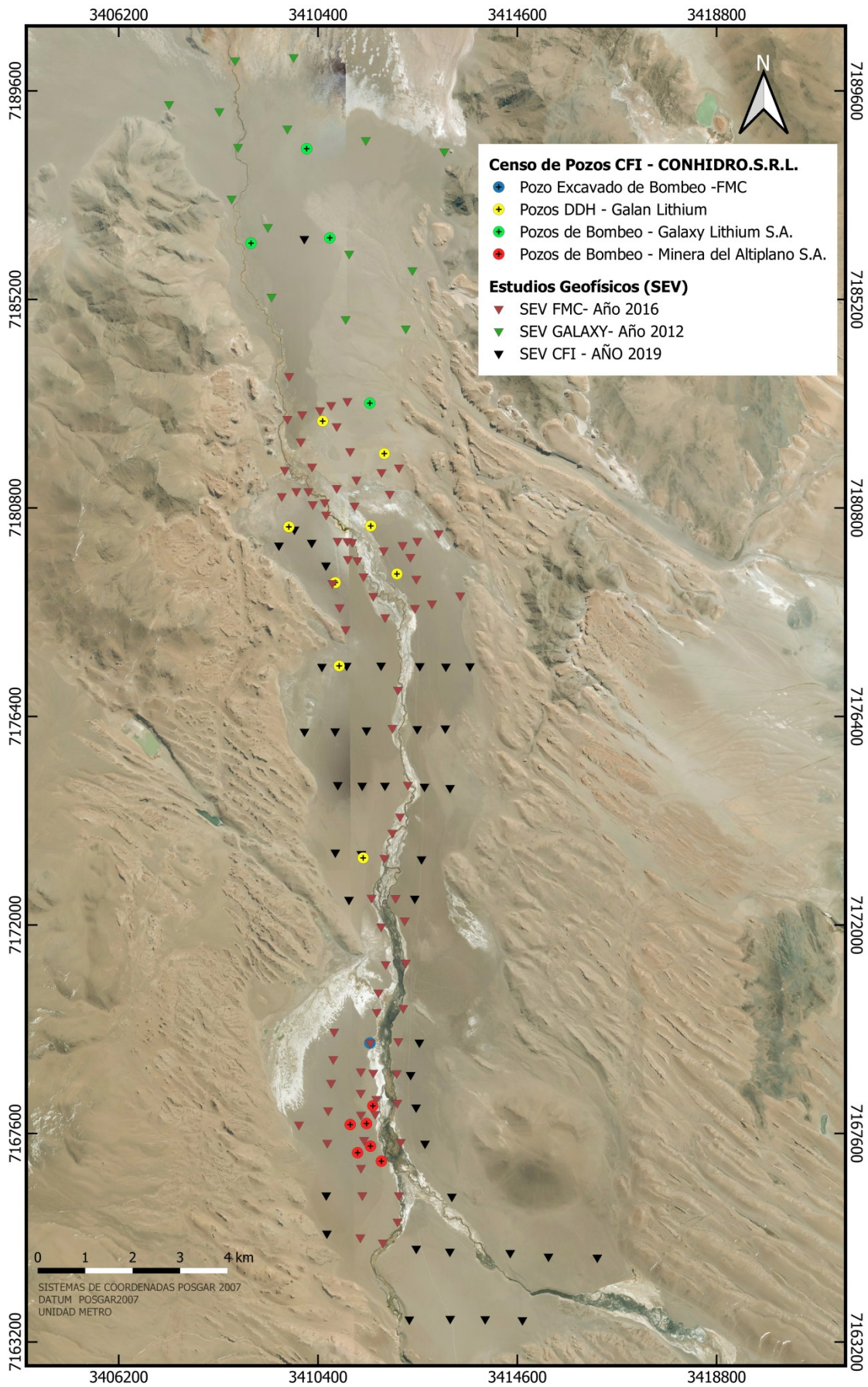


Figura 34: Mapa de ubicación de SEV antecedentes y los realizados en este proyecto.

## VI.5 Interpretación de resultados

La interpretación de cada SEV genera un corte geoelectrico en el cual se muestran las diferentes electrocapas con sus respectivos espesores y/o profundidad del contacto entre las mismas. La información geológica del entorno, los datos provenientes de las perforaciones y el criterio del profesional intérprete, permiten luego asignarle a cada electrocapa, un significado geológico, procurando establecer la litología de la misma y en algunos casos determinar la posibilidad de que una roca o formación esté saturada con agua. Incluso en el medio geológico estudiado, existe la posibilidad de encontrar aguas dulces, salobres, saladas y salmueras, dificultando mucho las tareas de interpretación.

A modo de ejemplo se muestra en el siguiente cuadro un ejemplo simplificado de la interpretación de un SEV de manera individual.

CFI 1		INTERPRETACION	
Res. (Ohm.m)	Prof. (m)	Color	Unidad litológica posible
751.8	9.2	negro	Sedimentos aluviales modernos, secos
48.5	38.7	azul	Sedimentos aluviales modernos, saturados
107.6	67.7	naranja	Unidades Volcánicas Pre cuaternarias soldadas
6.5		rojo	Unidades Volcánicas Pre cuaternarias con permeabilidad secundaria –
		rojo	y/o Sedimentitas con agua salada
		verde	Rocas pre terciarias

Cuadro 1: Ejemplo de Interpretación geológica de de un Sondeo Eléctrico Vertical.

En el Cuadro 2, se muestran los 42 Sondeos realizados en el marco de este proyecto y su correspondiente interpretación simplificada.

Las curvas de campo de los SEV realizados en este trabajo, junto con su interpretación de resistividades y espesores, se muestran en el **ANEXO III**.



Cuadro 2: Interpretación de los 42 Sondeos Eléctricos Verticales realizados en el marco de este proyecto, identificados como CFI.

CFI 1		CFI 2		CFI 3		CFI 4		CFI 5	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
751.8	9.2	1847.9	6.8	1344	0.6	271.4	0.8	362.8	1
48.5	38.7	887.5	47.9	684.2	43.9	407	4.6	686.9	2.9
107.6	67.7	245.4	161.7	290.5	84.8	150.4	7	226	5.5
6.5		64.1		58.6		984.3	33.1	1124.4	21.1
						45.5	100.5	33.7	78.1
						24.5		19.8	
CFI 6		CFI 7		CFI 8		CFI 9		CFI 10	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
1323.4	1.4	958.9	2.7	909.9	0.5	569.1	9.6	493.3	0.8
1841.4	9.2	222.7	9.7	300.4	1.7	111.1	30.7	1512.8	2.2
74.2	54.7	56.2	75.5	410.2	9.1	11.2	1277.7	903.6	4.7
106.8	271.4	29.7		76.9	75.4	80.2		1408.2	31.6
15.5				24.1				12.6	998.7
								87.3	
CFI 11		CFI 12		CFI 13		CFI 14		CFI 15	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
716.9	1.5	903	0.7	295.7	1.2	232	1	434.3	4.1
1467	5.8	2861	5.5	863.4	3.7	526.9	5.1	268.9	8.9
748	29.5	50.9	67.6	407.1	8.6	210	9	27.6	36.8
124.9	134.9	145.8	209.1	50	80.6	45.8	78.1	5.6	
12.4		8.6		7.1		10.3			
CFI 16		CFI 17		CFI 18		CFI 19		CFI 20	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
255.2	1	1828.9	2.4	519.4	1	1622	1.6	406.4	7.5
483.9	3.5	154.6	3.8	235.8	2.5	179	3.4	18.9	38.9
181.9	5.8	6.7	39.7	713.3	5.9	8.7	15.5	3.9	76
1.1	119	3.6		7	35.3	3.5	35.2	12.6	100.3
66.2				10.9		8	89.9	3.7	
						3.3			

CFI 21		CFI 22		CFI 23		CFI 24		CFI 25	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
668.3	3.7	862.5	1.7	413.7	3.8	848.3	0.4	546.4	2.1
401.1	7.6	171.3	6.5	225	8.6	341.5	5.6	171.5	5.3
3.9	33.1	14.5	44.4	28	55.3	6.7	101.9	21.2	51.9
26.4	60.9	4		4.7		2.7		5.5	
1.5									
CFI 26		CFI 27		CFI 28		CFI 29		CFI 30	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
540.2	2.6	1114.3	2.6	390.9	3.5	339.8	3.2	366.5	1.8
115.1	19.6	82.1	66.7	111.2	103.8	109	6.8	87.7	4.5
151.4	84.4	11.4		8.3		16.6	33.8	11.5	55.6
5						4.2		4.9	
CFI 31		CFI 32		CFI 33		CFI 34		CFI 35	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
44.2	2.1	30.1	0.9	33.4	1.8	1403.6	1.1	525.6	1.4
17.3	80.6	13.5	4.1	13.7	21.4	124.1	3.1	265.2	4.6
4.3		25	64.3	19.9	45.3	18.2	5	62.5	48.5
		5.3		5.1		27.1	56.2	20.9	
						3.1			
CFI 36		CFI 37		CFI 38		CFI 39		CFI 40	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
852.6	3.4	622.2	3.1	8367.2	0.8	376.9	2.2	434.2	1.7
289.2	6.4	297.4	6.2	92.8	2.4	53.9	5.5	116.3	3.8
50.4	10.6	36.3	11.2	6.9	17.4	3.9		6.5	26.7
90.3	114.3	98.3	40.2	20.6	48.9			24.1	47.8
7		7.1		1.9				1.8	
CFI 41		CFI 42							
Res.	Prof.	Res.	Prof.						
235.3	0.7	1000.1	1.1						
34.2	2.5	246.8	5.5						
2.7	87.1	43	38.2						
1.4		2.5							

Cuadro 3: Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro SRL (2016) en Servidumbre 1, utilizados en este trabajo e identificados como SEV.

SEV 12		SEV 13		SEV 14		SEV 15		SEV 18	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
16	0.5	89	1	207	1.4	425	1	8	0.4
20	8	45	17	47	20	40	10	36	9
215	24	80	59	100	76	50	58	20	48
51	126	6		4		5		3	
10									
SEV 19		SEV 20		SEV 38		SEV 39		SEV 40	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
49	1.9	1633	1.2	816	2.4	735	2.5	437	2
23	23	28	10	26	22	3	19	4	5
7		4		1		1		1	
SEV 41		SEV 42							
Res.	Prof.	Res.	Prof.						
1353	5	1243	3.4						
25	20	305	12.3						
1		67	43						
		0.3							

Cuadro 4: Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro SRL (2016) en Servidumbre 2, utilizados en este trabajo e identificados como FMC.

FMC 1		FMC 2		FMC 3		FMC 4		FMC 5	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
18	0.6	42	2.7	97	0.8	54	0.9	491	0.9
45	52	50	17	45	20	66	17	13	23
3		8	129	9	171	14	47	43	43
		1		0.4		52	116	2	
						1			

FMC 8		FMC 9		FMC 11		FMC 12		FMC 15	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
962	1.9	1258	2.6	1092	4	1298	5.5	847	2.2
59	88	66	100	63		46	49	73	150
17		23				124	130	28	
						51			
FMC 18		FMC 19		FMC 20		FMC 21		FMC 22	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
70	2.4	7	0.5	908	2.9	4	0.4	18	0.6
53	101	55	127	41	3.4	63	21	60	46
275	156	22		58	170	34	82	9	
15				24		6			
FMC 23		FMC 24		FMC 25		FMC 26		FMC 29	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
27	2.8	1	0.2	29	4	52.5	2	5	0.2
101	9	13	4.5	4	63	35.5	5.3	103	0.8
57	56	3	19	12	124	45.9	62.7	18	70
8		5	96	1		2.6		4	
		0.1							
FMC 30		FMC 33		FMC 35					
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.				
15	0.4	399	8.1	302	5				
22	38	39	56	35	17				
8		4		3					

Cuadro 5: Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro SRL (2012), utilizados en este trabajo e identificados como SG.

SG 1		SG 2		SG 4		SG 5		SG 6	
Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.	Res.	Prof.
671	1.2	19	0.5	49	0.6	228	1.9	58	0.6
37	24	27	10	10	1.5	27	13	28	8
16	79	39	47	18	10	6	63	37	46
9	126	13	82	9	90	0.7		24	63
0.4		1.3		4				2	
SG 7		SG 12							
Res.	Prof.	Res.	Prof.						
96	1.9	220	1.8						
188	5	347	6						
380	24	140	11						
64	48	24	28						
28	59	4							
13	92								
2									



## **VI.6 Confección de perfiles geofísicos**

Luego de analizar las distintas electrocapas detectadas en cada sondeo eléctrico vertical (SEV), se realizaron catorce perfiles geoelectricos en el ámbito del valle fluvial del Río Los Patos (Figura 35). En todos los casos se correlacionaron las unidades que presentan una respuesta similar desde el punto de vista de configuración de curva, ajustando las interpretaciones con la información geológica de subsuelo analizada en etapas anteriores.

De esta manera y luego de establecer el modelo más acorde a las condiciones geológicas – geomorfológicas de la zona de estudio, se individualizaron cinco unidades mayores que fueron denominadas, de arriba hacia abajo como:

**Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*, representando generalmente al relleno aluvial moderno, seco;

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*, que corresponde a las mismas facies anteriores pero saturadas con agua dulce a salobre;

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*, englobando secuencias volcánicas pre cuaternarias;

**Unidad 4** o *Zona Conductiva Inferior*, que podría representar tanto a unidades volcánicas pre cuaternarias como a sedimentitas o facies clásticas saturadas con agua salada;

**Unidad 5** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Inferior*, que podría representar a unidades rocosas pre terciarias.

Para una mejor visualización de los trabajos geofísicos realizados y del detalle de los diferentes perfiles geoelectricos logrados, se ha dividido la zona de estudio en tres: Zona Norte, Zona Centro y Zona Sur (Figura 36, Figura 37 y Figura 38).

En el análisis de cada perfil, se describirá de manera particular la interpretación geológica de cada unidad geoelectrica.

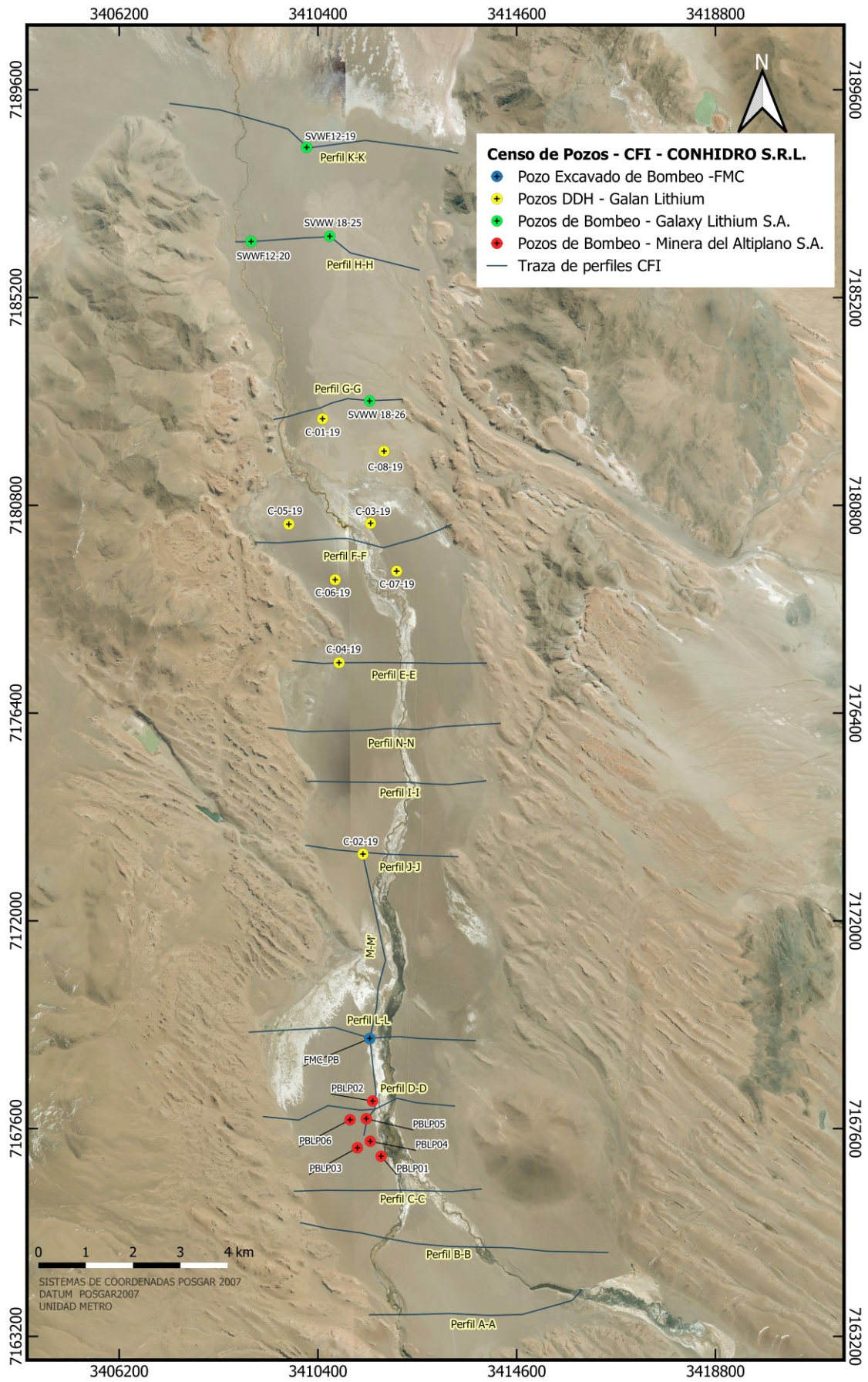


Figura 35: Mapa de ubicación de trazas de perfiles geoelectricos.



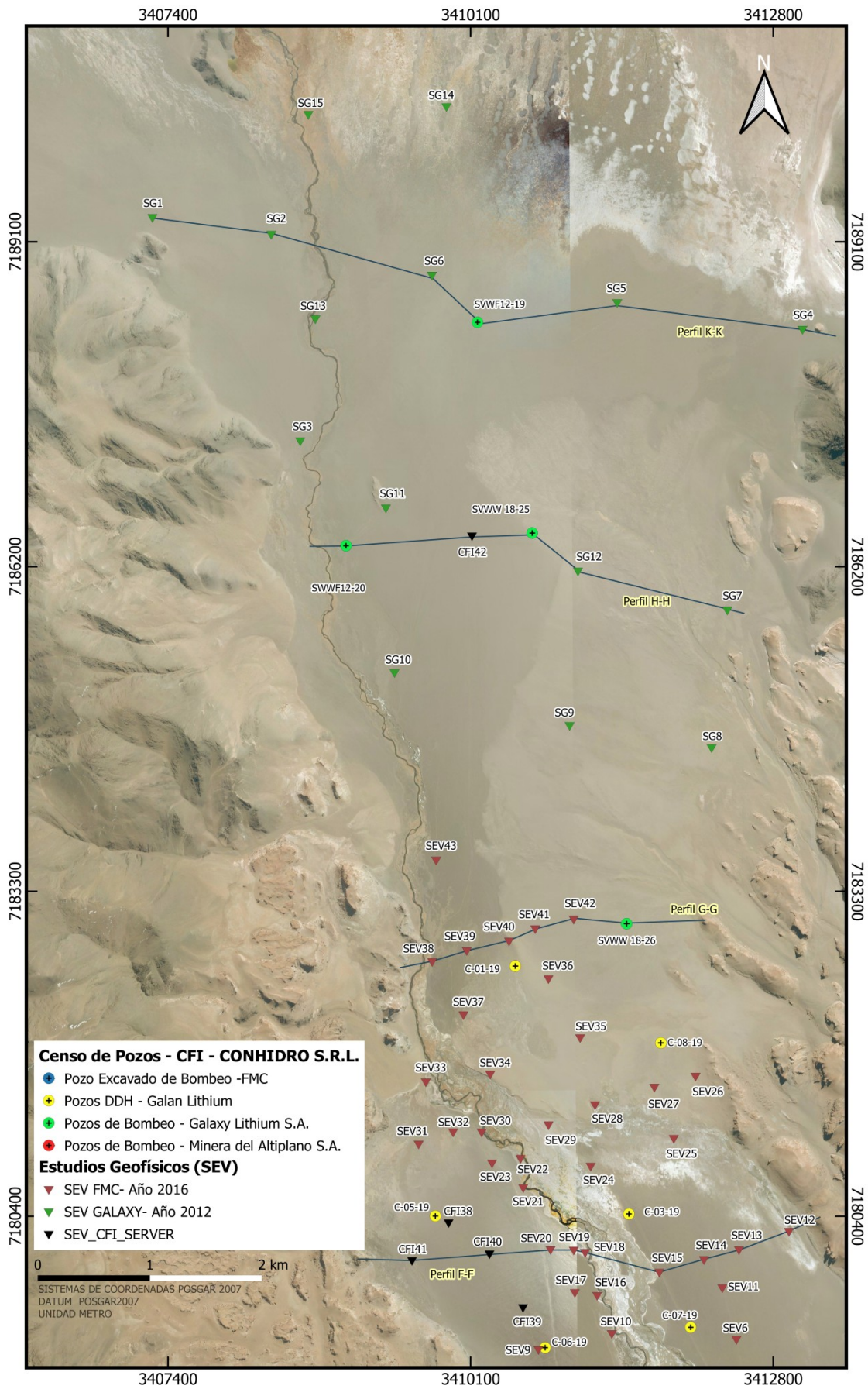


Figura 36: Mapa de ubicación de trazas y SEV en Zona Norte.



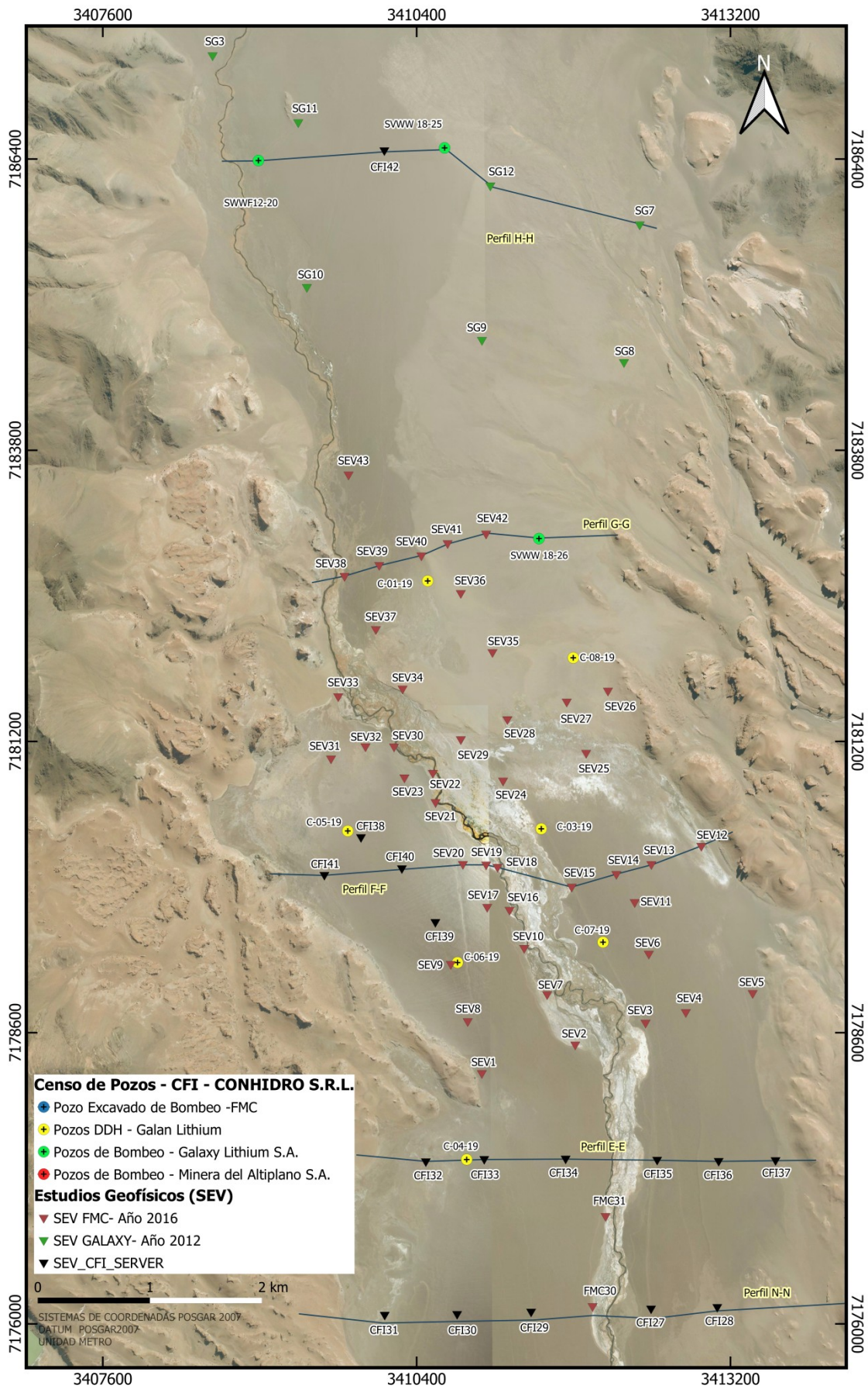


Figura 37: Mapa de ubicación de trazas y SEV en Zona Centro.



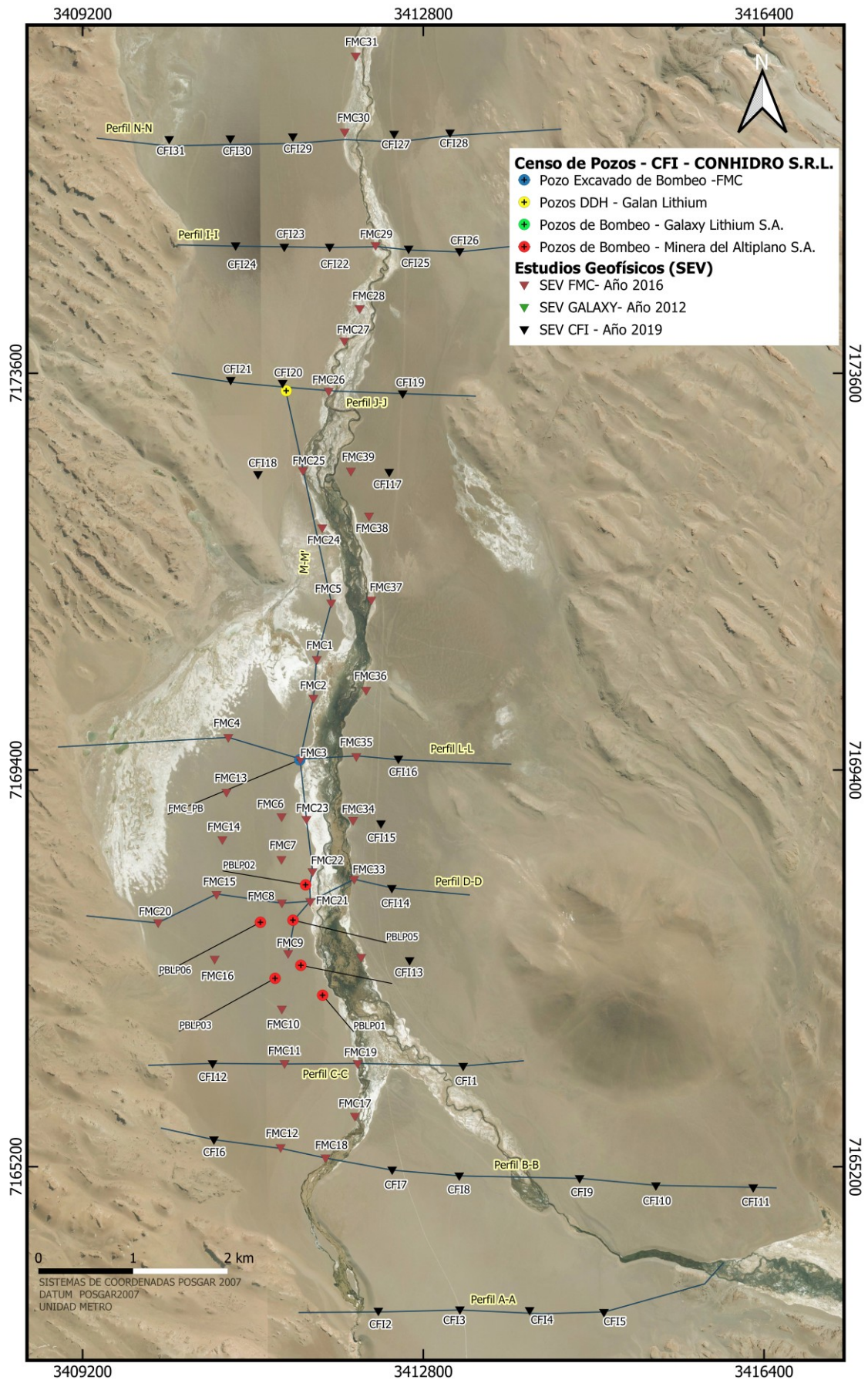


Figura 38: Mapa de ubicación de trazas y SEV en Zona Sur.



## **Perfil Geoeléctrico A-A'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 02, 03, 04 y 05, realizados en este proyecto e identificados como "CFI", por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona sur del valle fluvial del río Los Patos, aguas arriba de la confluencia con el río Aguas Calientes (Figura 39).

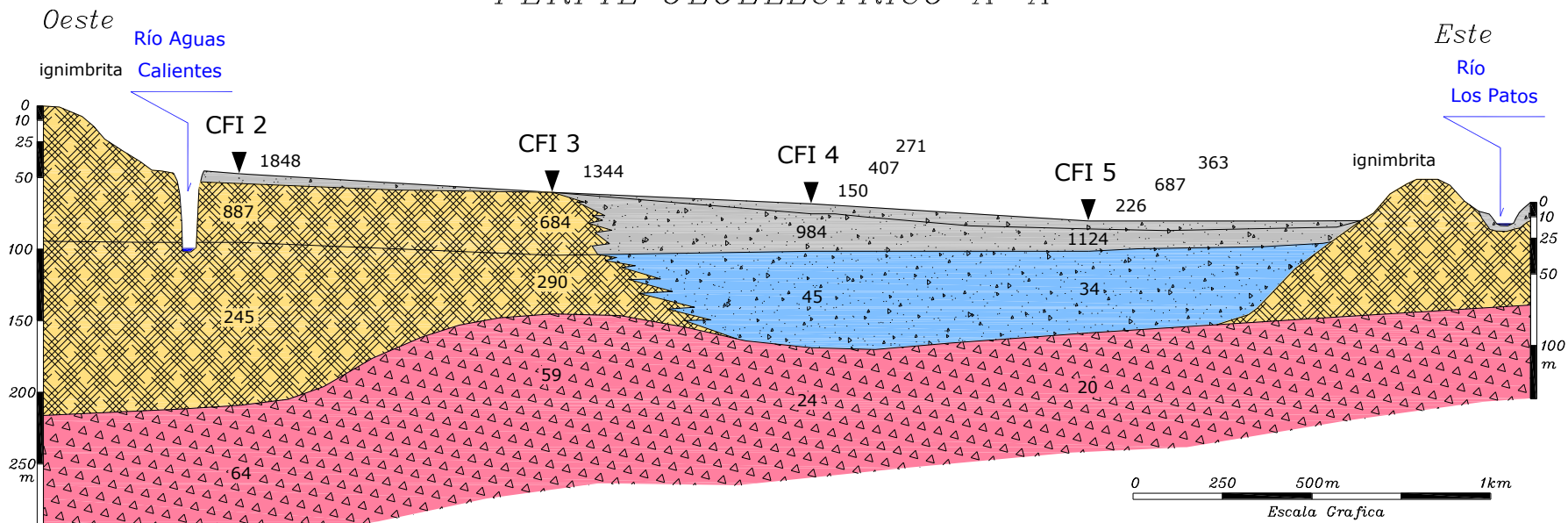
**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos en el sector occidental que no superan los 7 metros y máximos en el sector oriental alcanzando los 33 metros. Por sus altos valores de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales gruesas, con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en los SEV 04 y 05 de este perfil, hasta una profundidad de 100 y 78 metros respectivamente, con valores moderados de resistividad (45 y 34 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en los SEV 02 y 03 de este perfil, hasta una profundidad de 162 y 85 metros respectivamente, con valores altos de resistividad (variables entre 245 y 887 Ohm.m), que representarían a las mismas facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán.

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 162 metros en el SEV 02 y 78 metros en el SEV 05. Posee valores bajos a moderados de resistividad (variables entre 20 y 64 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente.

## PERFIL GEOELÉCTRICO A-A'



### REFERENCIAS

- UNIDAD 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior (Relleno aluvial moderno seco)
- UNIDAD 2 o Zona Semiresistiva a Semiconductiva (Relleno aluvial moderno saturado)
- UNIDAD 3 o Zona Resistiva a Semiresistiva (Unidades volcánicas pre Cuaternarias)
- UNIDAD 4 o Zona Conductiva Inferior (Unidades volcánicas pre Cuaternarias)

CFI 5 SEV CONHIDRO - CFI (2019)  
 (Sondeo Eléctrico Vertical)

1124 Resistividad (Ohm.m)

Figura 39: Perfil Geoelectrico A-A'

## **Perfil Geoeléctrico B-B'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 06, 07, 08, 09, 10 y 11, realizados en este proyecto e identificados como "CFI" y los SEV FMC12 y FMC18, del estudio de Conhidro (2016), por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona sur del valle fluvial del río Los Patos, aguas arriba de la confluencia con el río Aguas Calientes (Figura 40).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos en el sector central del valle fluvial que no superan los 10 metros y máximos en el sector oriental alcanzando los 32 metros de potencia. Por sus altos valores de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales gruesas, con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en los SEV CFI06, CFI07, CFI08, CFI09, FMC12 y FMC18 de este perfil, hasta una profundidad máxima de 101 metros en la zona del río Aguas Calientes y mínima de 31 metros en la margen derecha del río Los Patos. La unidad presenta valores moderados de resistividad (variables entre 46 y 111 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en los SEV CFI06, FMC12, FMC18 y CFI11, hasta una profundidad variable entre 271 y 130 metros, con valores altos de resistividad (variables entre 107 y 275 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán.

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 271 metros en el SEV CFI06 y 32 metros en el SEV CFI10. Posee valores bajos a moderados de resistividad (variables entre 11 y 51 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente.

**Unidad 5** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Inferior*, fue detectada en los SEV CFI09 y CFI10 este perfil, a profundidades de 1278 y 999 metros respectivamente, con valores de resistividad moderados a altos (80 y 87 Ohm.m) que podría representar unidades rocosas pre terciarias. Por cuestiones de escala, esta Unidad no fue plasmada en el gráfico del perfil geoeléctrico.

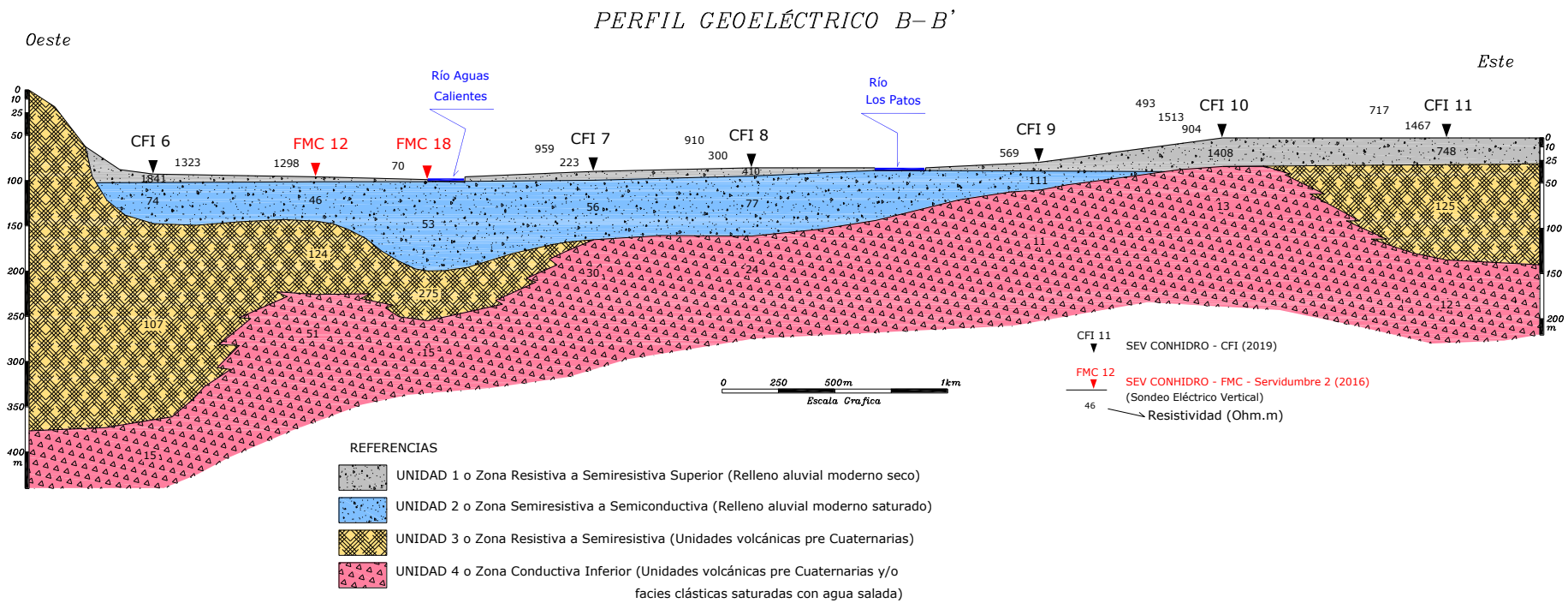


Figura 40: Perfil Geoelectrico B-B'

## **Perfil Geoeléctrico C-C'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 12 y 01, realizados en este proyecto e identificados como "CFI" y los SEV FMC11 y FMC19, del estudio de Conhidro (2016), por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona sur del valle fluvial del río Los Patos, en la propia zona de la confluencia con el río Aguas Calientes (Figura 41).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos en el sector central del valle fluvial que no superan los 5 metros y máximos en el sector oriental alcanzando los 9 metros de potencia. Por sus altos valores de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales gruesas, con presencia de arenas y gravas, secas.

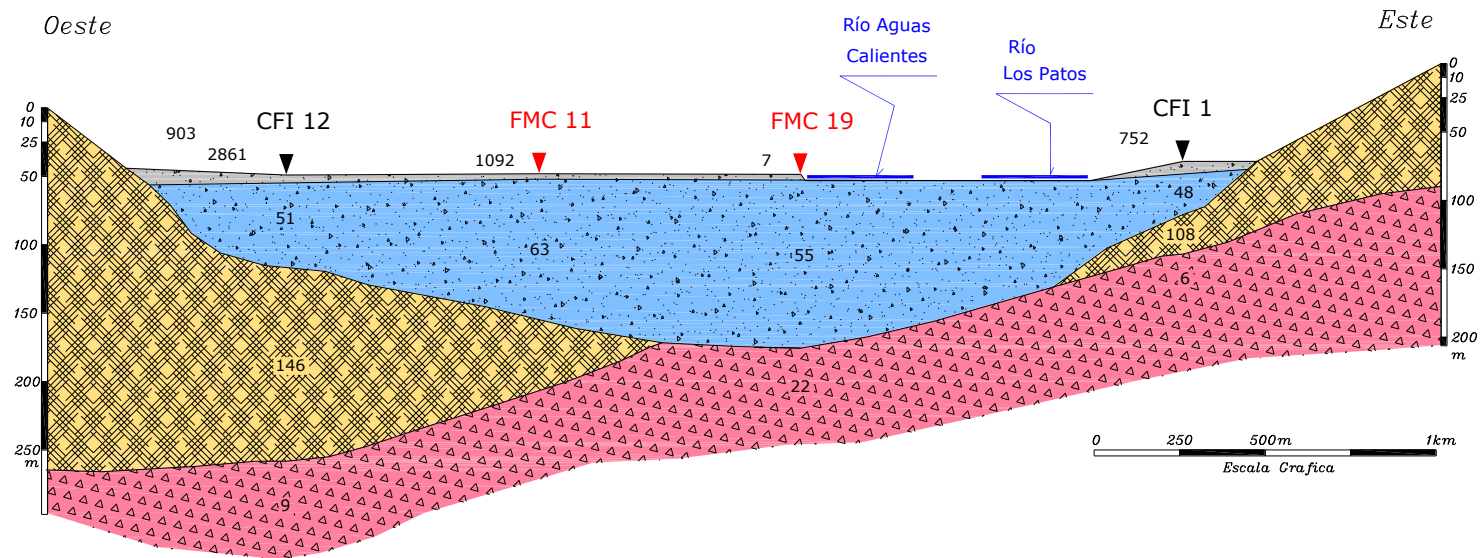
**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil, hasta una profundidad máxima de 127 metros en el SEV FMC19 margen izquierda del río Aguas Calientes y mínima de 39 metros en la margen derecha del río Los Patos. La unidad presenta valores moderados de resistividad (variables entre 48 y 63 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: solo fue detectada en los SEV CFI12 y CFI01, hasta una profundidad de 209 y 68 metros respectivamente, con valores altos de resistividad (variables entre 146 y 108 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán.

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil, excepto en FMC11, a profundidades variables entre 209 metros en el SEV CFI12 y 68 metros en el SEV CFI01. Posee valores bajos a moderados de resistividad (variables entre 6 y 22 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente.



## PERFIL GEOELÉCTRICO C-C'



### REFERENCIAS

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li> UNIDAD 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior (Relleno aluvial moderno seco)</li> <li> UNIDAD 2 o Zona Semiresistiva a Semiconductiva (Relleno aluvial moderno saturado)</li> <li> UNIDAD 3 o Zona Resistiva a Semiresistiva (Unidades volcánicas pre Cuaternarias)</li> <li> UNIDAD 4 o Zona Conductiva Inferior (Unidades volcánicas pre Cuaternarias y/o facies clásticas saturadas con agua salada)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li> CFI 12 SEV CONHIDRO - CFI (2019)</li> <li> FMC 19 SEV CONHIDRO - FMC - Servidumbre 2 (2016)<br/>(Sondeo Eléctrico Vertical)</li> <li> 55 Resistividad (Ohm.m)</li> </ul> |
|---|--|

Figura 41: Perfil Geoelectrico C-C'

## **Perfil Geoeléctrico D-D'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales FMC20, FMC15, FMC08, FMC21 y FMC33, del estudio de Conhidro (2016), mas el SEV CFI14, realizado en este proyecto, por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona sur del valle fluvial del río Los Patos, en la zona donde se encuentra la batería de perforaciones de Minera del Altiplano (Livent). Por tal motivo pudo incluirse información de subsuelo proveniente de la plataforma de perforaciones N°2, para el ajuste e interpretación de los SEV (Figura 42).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos en el sector oriental y central del valle fluvial, donde no superan los 3 metros y máximos en el sector oriental, asociado a la margen derecha del río Los Patos, alcanzando los 9 metros de potencia. Por sus altos valores de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales gruesas, con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil, hasta una profundidad máxima de 170 metros en el SEV FMC20 margen izquierda del río Aguas Los Patos y mínima de 56 metros en la margen derecha del curso fluvial (SEV FMC33). La unidad presenta valores moderados de resistividad (variables entre 34 y 73 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: no fue detectada en los SEV que componen este perfil.

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil, a profundidades variables entre 170 metros en el SEV FMC20 y 56 metros en el SEV FMC33. Posee valores bajos a moderados de resistividad (variables entre 4 y 28 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente. En algunos casos esta unidad podría englobar facies aluviales modernas, saturadas con agua salobre o salada.

## PERFIL GEOELÉCTRICO D-D'

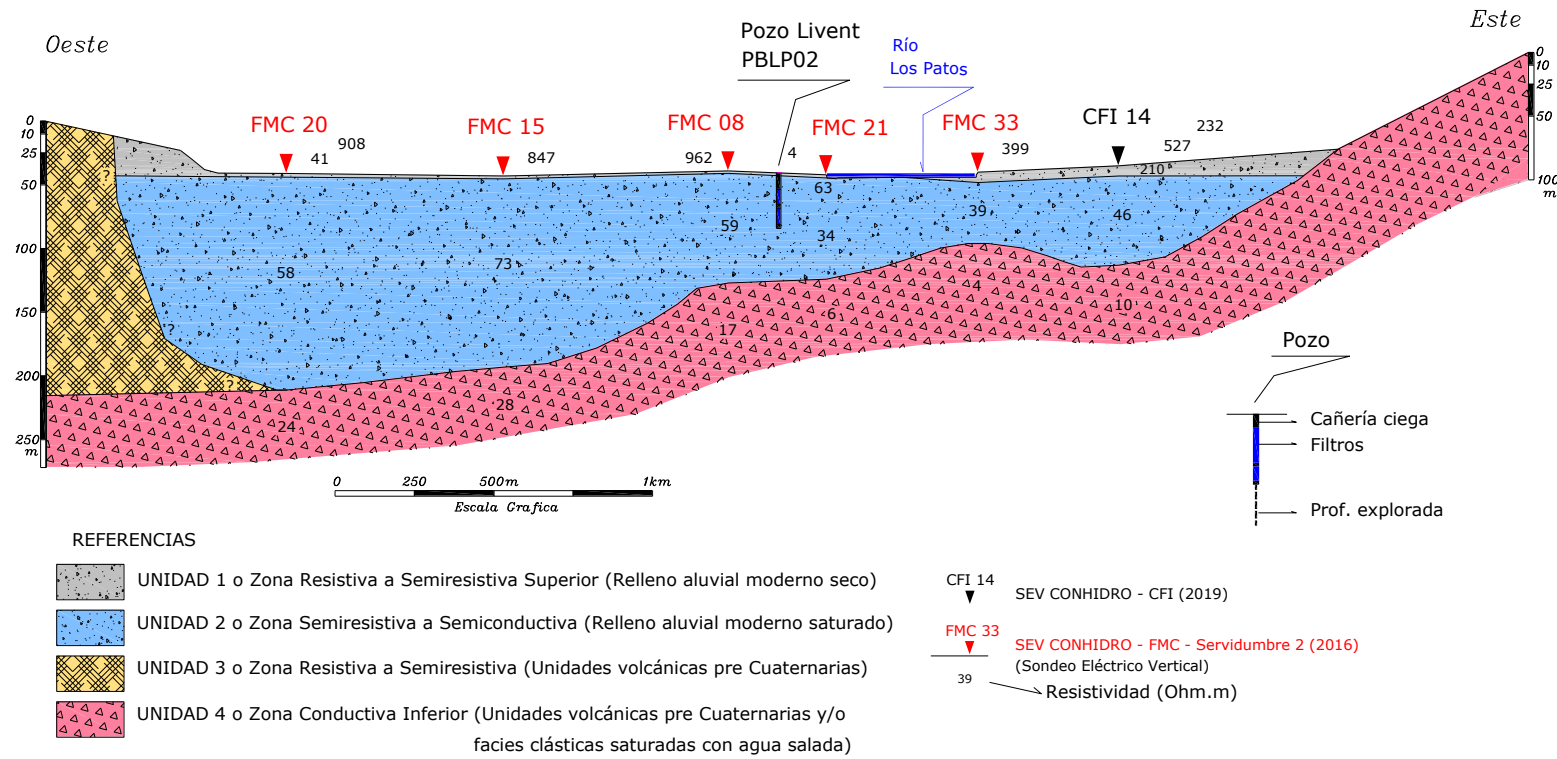


Figura 42: Perfil Geoelectrico D-D'

## **Perfil Geoeléctrico E-E'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 32, 33, 34, 35, 36 y 37, realizados en este proyecto e identificados como "CFI", por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona centro del valle fluvial del río Los Patos, en la zona donde el proyecto Candelas (Galán Lithium) ha perforado su pozo C-04-19 (Figura 43).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos en el sector occidental y central del valle fluvial que no superan los 2 metros y máximos en el sector oriental (margen derecha del río Los Patos), alcanzando los 6 metros de potencia. Por sus valores altos a moderados de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil, hasta una profundidad máxima de 21 metros en el SEV CFI33 y mínima de 4 metros. La unidad presenta valores moderados de resistividad (variables entre 13 y 50 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en todos los SEV, hasta una profundidad máxima de 114 metros y mínima de 40 metros, con valores de resistividad altos a moderados (variables entre 20 y 98 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán, con variaciones faciales que explicarían esta variabilidad (grado de soldamiento de las coladas piroclásticas, o presencia de facies de "surges").

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 114 metros en el SEV CFI36 y 40 metros en el SEV CFI33. Posee valores bajos a moderados de resistividad (variables entre 3 y 21 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente.

# PERFIL GEOELÉCTRICO E-E'

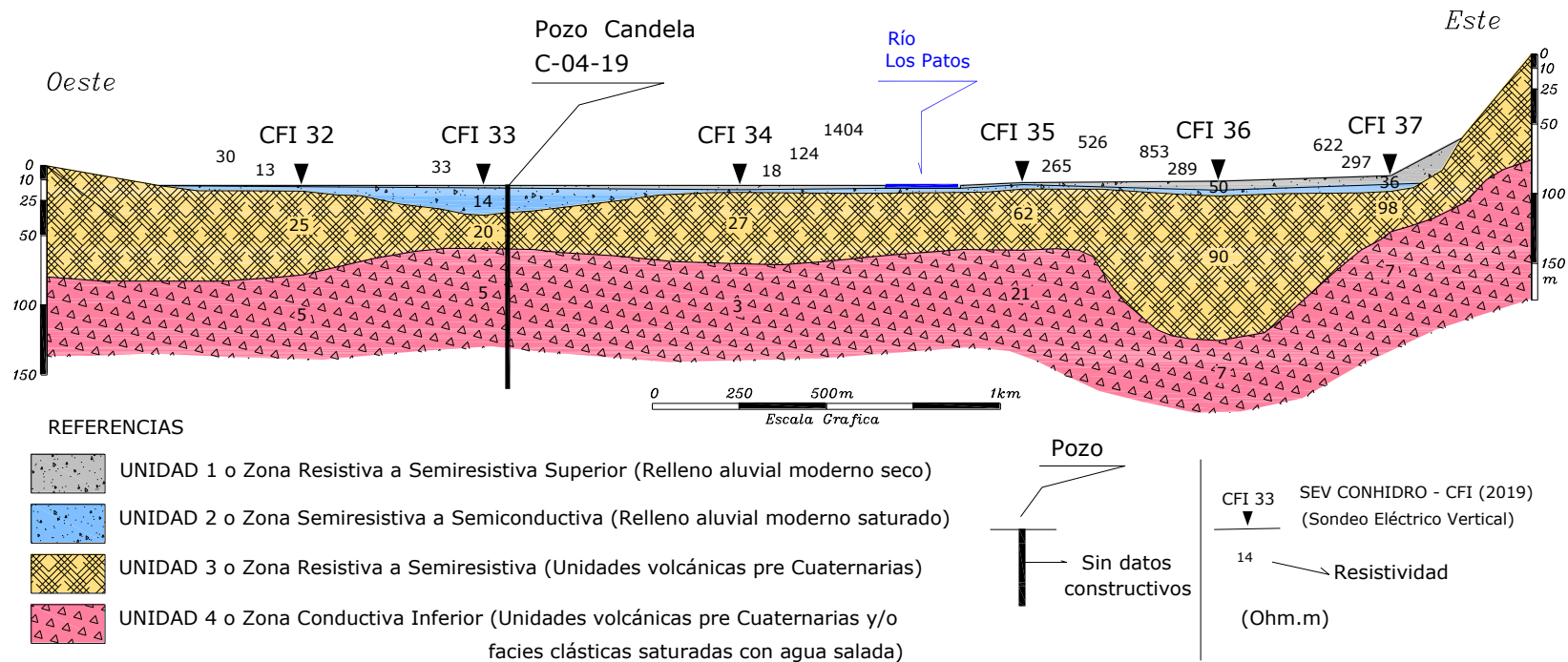


Figura 43: Perfil Geoelectrico E-E'



## **Perfil Geoeléctrico F-F'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 41 y 40, realizados en este proyecto e identificados como "CFI", sumados a los sondeos antecedentes de Conhidro (2016) SEV20, SEV19, SEV18, SEV15, SEV14, SEV13 y SEV12, por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona centro del valle fluvial del río Los Patos, próximo a los pozos C-03-19, C-05-19, C-06-19 y C-07-19, pertenecientes al proyecto Candelas (Figura 44).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos en el sector occidental y central del valle fluvial, que no superan los 2 metros y máximos en el sector oriental (SEV12), alcanzando los 8 metros de potencia. Por sus valores altos a moderados de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil (excepto en el SEV12), hasta una profundidad máxima de 48 metros en el SEV18 y mínima de 2,5 metros en el SEV CFI41. La unidad presenta valores moderados de resistividad (variables entre 20 y 116 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en los SEV: CFI40, SEV15, SEV14, SEV 13 y SEV12, hasta una profundidad máxima de 126 metros y mínima de 58 metros, con valores de resistividad altos a moderados (variables entre 24 y 215 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán, con variaciones faciales que explicarían esta variabilidad (grado de soldamiento de las coladas piroclásticas, o presencia de facies de "surges").

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 126 metros en el SEV12 y 2.5 metros en el SEV41. Posee valores bajos de resistividad (variables entre 1.4 y 10 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente. En algunos casos esta unidad podría englobar facies aluviales modernas, saturadas con agua salobre o salada.

# PERFIL GEOELÉCTRICO F-F'

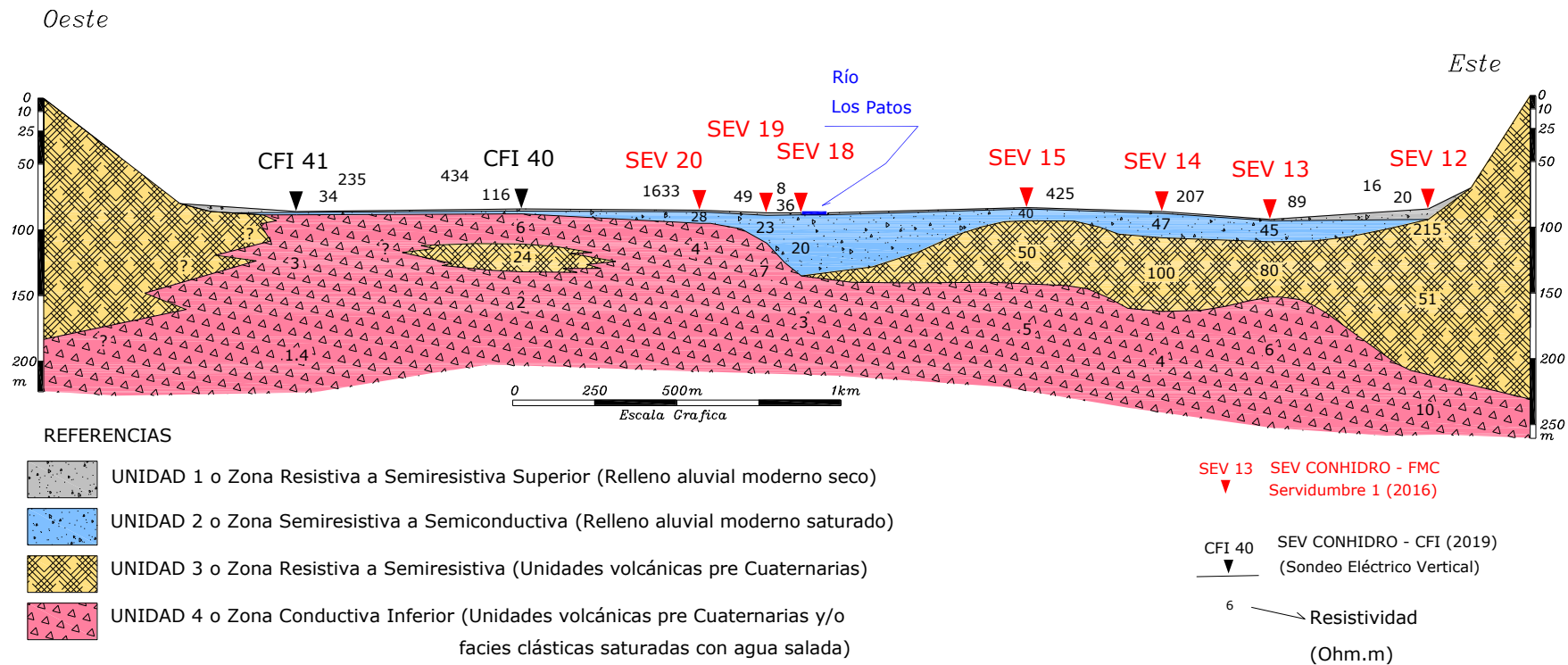


Figura 44: Perfil Geoelectrico F-F'

## **Perfil Geoeléctrico G-G'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro (2016): SEV38, SEV39, SEV40, SEV41 y SEV42, por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona norte del valle fluvial del río Los Patos, próximo al pozo C-01-19 del proyecto Candelas y al pozo SVWW18-26 perteneciente al proyecto Sal de Vida (Galaxy), cuya información de subsuelo permitió ajustar los modelos de interpretación (Figura 45).

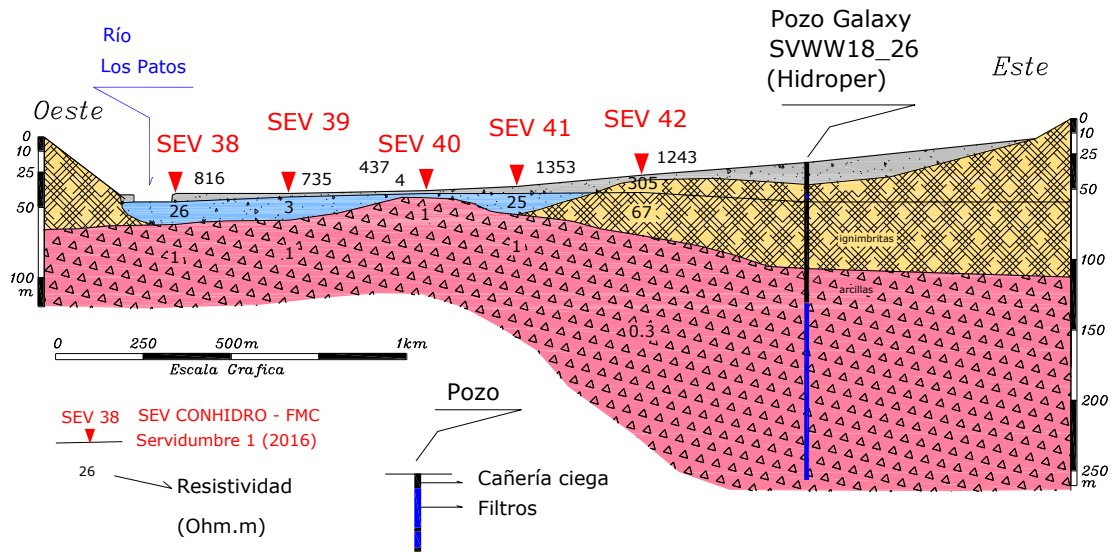
**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores variables entre 2 y 5 metros. Por sus valores altos de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil (excepto en el SEV42), hasta una profundidad máxima de 22 metros en el SEV38 y mínima de 5 metros en el SEV40. La unidad presenta valores moderados a bajos de resistividad (variables entre 3 y 26 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce a salada.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: solo fue detectada en el SEV42, hasta una profundidad 43 metros, con valores de resistividad altos a moderados (variables entre 67 y 305 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán, con variaciones faciales que explicarían esta variabilidad (grado de soldamiento de las coladas piroclásticas, o presencia de facies de “surges”).

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 43 metros en el SEV42 y 5 metros en el SEV40. Posee valores muy bajos de resistividad (variables entre 0.3 y 1 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente. En algunos casos esta unidad podría englobar facies sedimentarias modernas o antiguas, saturadas con agua salobre o salada.

## PERFIL GEOELÉCTRICO G-G'



### REFERENCIAS

- UNIDAD 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior (Relleno aluvial moderno seco)
- UNIDAD 2 o Zona Semiresistiva a Semiconductiva (Relleno aluvial moderno saturado)
- UNIDAD 3 o Zona Resistiva a Semiresistiva (Unidades volcánicas pre Cuaternarias)
- UNIDAD 4 o Zona Conductiva Inferior (Unidades volcánicas pre Cuaternarias y/o facies clásticas saturadas con agua salada)

Figura 45: Perfil Geoeléctrico G-G'

## **Perfil Geoeléctrico H-H'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro (2012): SG12 y SG7, sumado al SEV CFI42 realizado en el marco de este proyecto. De esta manera se pueden observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona norte del valle fluvial del río Los Patos, próximo a los pozos SWF12-20 y SVWW18-26, pertenecientes al proyecto Sal de Vida (Galaxy), cuya información de subsuelo permitió ajustar los modelos de interpretación (Figura 46).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores variables entre 5.5 y 24 metros. Por sus valores altos de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil, hasta una profundidad máxima de 92 metros en el SEV SG7 y mínima de 28 metros en el SG12. La unidad presenta valores moderados a bajos de resistividad (variables entre 13 y 64 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce a salobre.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: no fue interpretada en este perfil.

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 92 metros en el SEV SG7 y 28 metros en el SG12. Posee valores muy bajos de resistividad (variables entre 2 y 4 Ohm.m), por lo que podría representar facies clásticas modernas y/o antiguas, saturadas con agua salada o bien a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad Suprayacente.



## PERFIL GEOELÉCTRICO H-H'

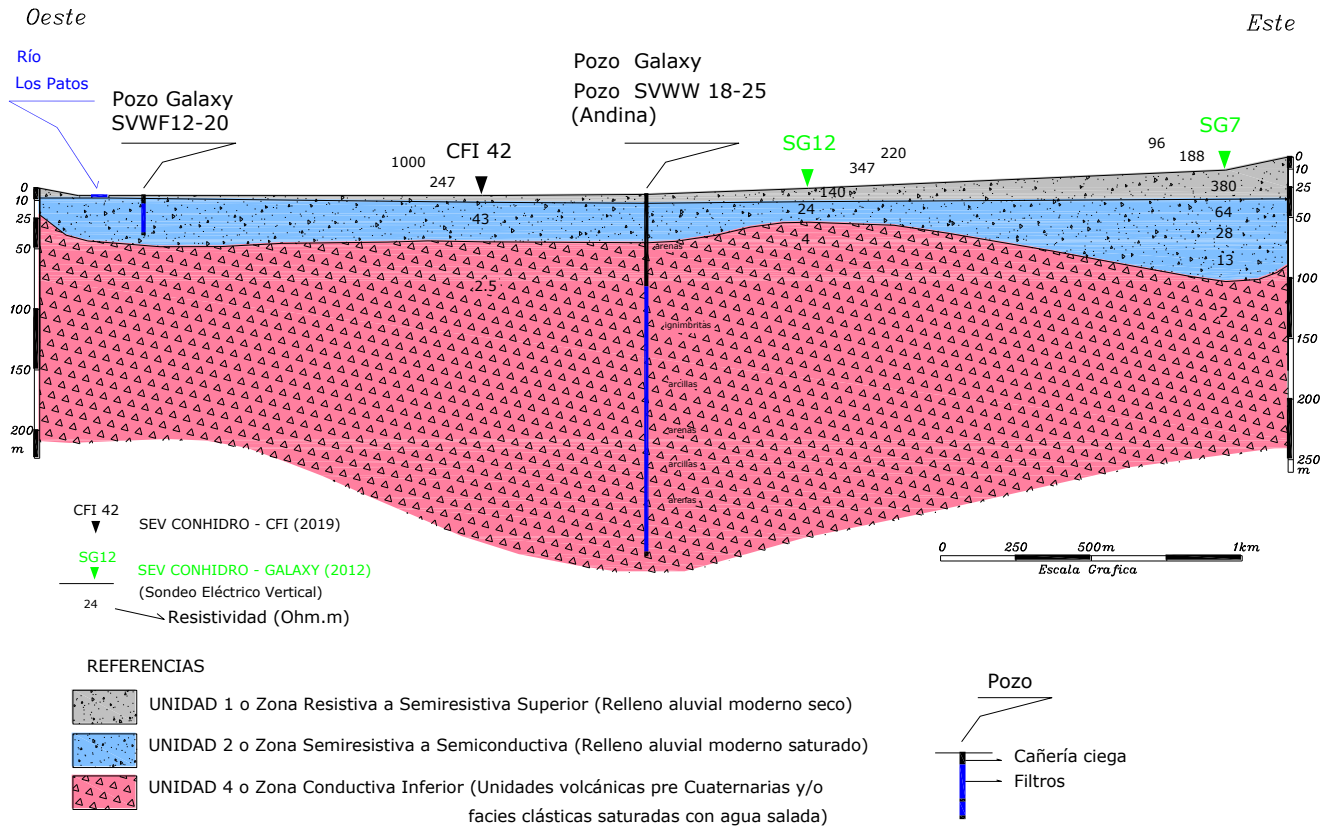


Figura 46: Perfil Geoelectrico H-H'

## **Perfil Geoeléctrico I-I'**

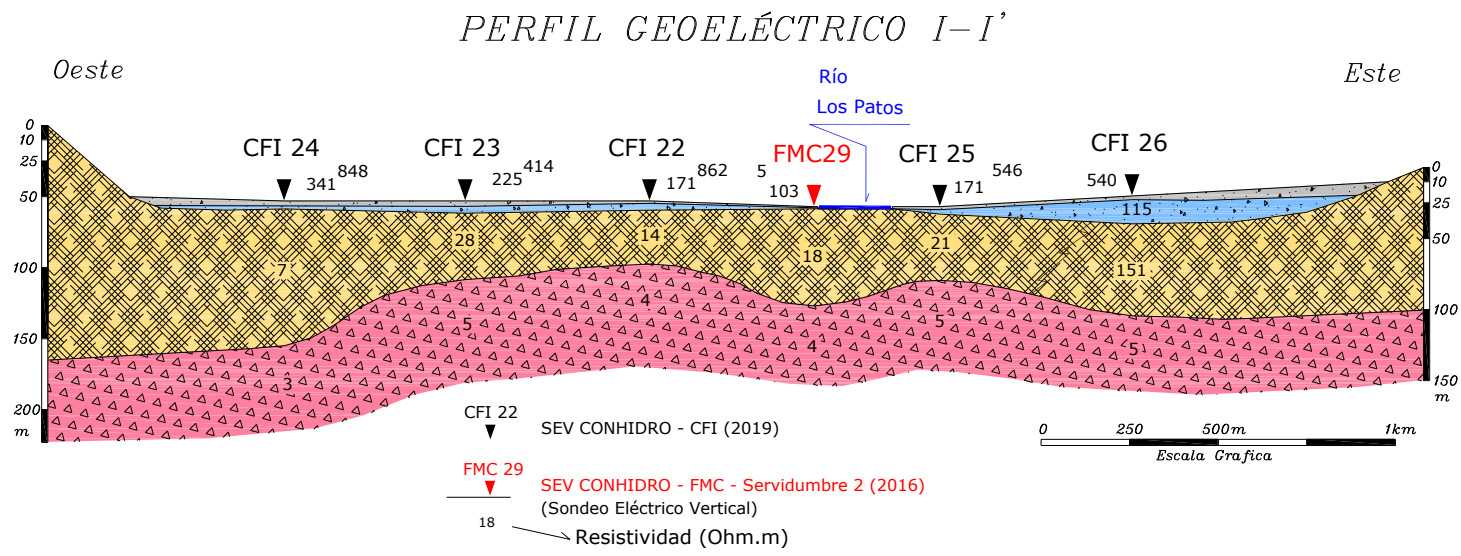
El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 24, 23, 22, 25 y 26, realizados en este proyecto e identificados como "CFI", mas el SEV FMC29, realizado por Conhidro (2016), por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona centro del valle fluvial del río Los Patos (Figura 47).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores que no superan los 4 metros. Por sus valores altos de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil, hasta una profundidad máxima de 20 metros en el SEV CFI26. La unidad presenta valores altos a moderados de resistividad (variables entre 103 y 341 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en todos los SEV, hasta una profundidad máxima de 102 metros y mínima de 44 metros, con valores de resistividad bajos a moderados (variables entre 7 y 151 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán, con variaciones faciales que explicarían esta variabilidad (grado de soldamiento de las coladas piroclásticas, o presencia de facies de "surges").

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 102 metros en el SEV CFI24 y 44 metros en el SEV CFI22. Posee valores bajos de resistividad (variables entre 3 y 5 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente.



**REFERENCIAS**

- UNIDAD 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior (Relleno aluvial moderno seco)
- UNIDAD 2 o Zona Semiresistiva a Semiconductiva (Relleno aluvial moderno saturado)
- UNIDAD 3 o Zona Resistiva a Semiresistiva (Unidades volcánicas pre Cuaternarias)
- UNIDAD 4 o Zona Conductiva Inferior (Unidades volcánicas pre Cuaternarias y/o facies clásticas saturadas con agua salada)

Figura 47: Perfil Geoelectrico I-I'

## **Perfil Geoeléctrico J-J'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 21, 20 y 19, realizados en este proyecto e identificados como "CFI", mas el SEV FMC26, realizado por Conhidro (2016) por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona centro del valle fluvial del río Los Patos, en la zona donde el proyecto Candelas (Galán Lithium) ha perforado su pozo C-02-19 (Figura 48).

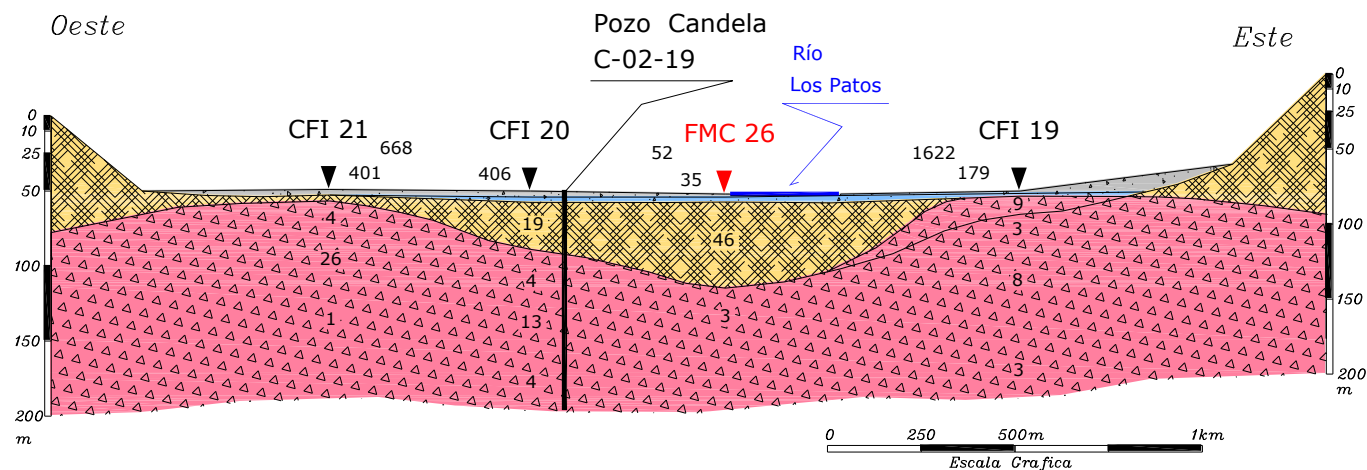
**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos no superan los 7.5 metros. Por sus valores altos a moderados de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en los SEV CFI19 y FMC26, hasta profundidades de 3 y 5 metros respectivamente. La unidad presenta valores moderados y altos de resistividad (variables entre 35 y 179 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en los SEV CFI21, CFI20 y FMC26, hasta una profundidad máxima de 63 metros y mínima de 8 metros, con valores de resistividad altos a moderados (variables entre 19 y 401 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán, con variaciones faciales que explicarían esta variabilidad (grado de soldamiento de las coladas piroclásticas, o presencia de facies de "surges").

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 63 metros en el SEV FMC26 y 3 metros en el SEV CFI19. Posee valores bajos de resistividad (variables entre 1 y 26 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente.

## PERFIL GEOELÉCTRICO J-J'



### REFERENCIAS

- UNIDAD 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior (Relleno aluvial moderno seco)
- UNIDAD 2 o Zona Semiresistiva a Semiconductiva (Relleno aluvial moderno saturado)
- UNIDAD 3 o Zona Resistiva a Semiresistiva (Unidades volcánicas pre Cuaternarias)
- UNIDAD 4 o Zona Conductiva Inferior (Unidades volcánicas pre Cuaternarias y/o facies clásticas saturadas con agua salada)

- CFI 20  
▼ SEV CONHIDRO - CFI (2019)
- FMC 26  
▼ SEV CONHIDRO - FMC - Servidumbre 2 (2016)  
(Sondeo Eléctrico Vertical)
- 46  
→ Resistividad (Ohm.m)

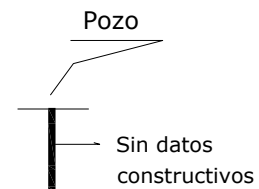


Figura 48: Perfil Geoelectrico J-J'



## **Perfil Geoeléctrico K-K'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales realizados por Conhidro (2012): SG1, SG2, SG6, SG5 y SG4. De esta manera se pueden observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona norte del valle fluvial del río Los Patos, próximo al pozo SVWF12-19, perteneciente al proyecto Sal de Vida (Galaxy), cuya información de subsuelo permitió ajustar los modelos de interpretación (Figura 49).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con un espesor que no supera los 2 metros. Por sus valores altos de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil, hasta una profundidad máxima de 126 metros en el SEV SG1 y mínima de 10 metros en el SG4. La unidad presenta valores moderados a bajos de resistividad (variables entre 9 y 39 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce a salobre.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: no fue interpretada en este perfil.

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 126 metros en el SEV SG1 y 10 metros en el SG4. Posee valores muy bajos de resistividad (variables entre 0.4 y 9 Ohm.m), por lo que podría representar facies aluviales modernas, saturadas con agua salada o bien a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad Suprayacente.

## PERFIL GEOELÉCTRICO K-K'

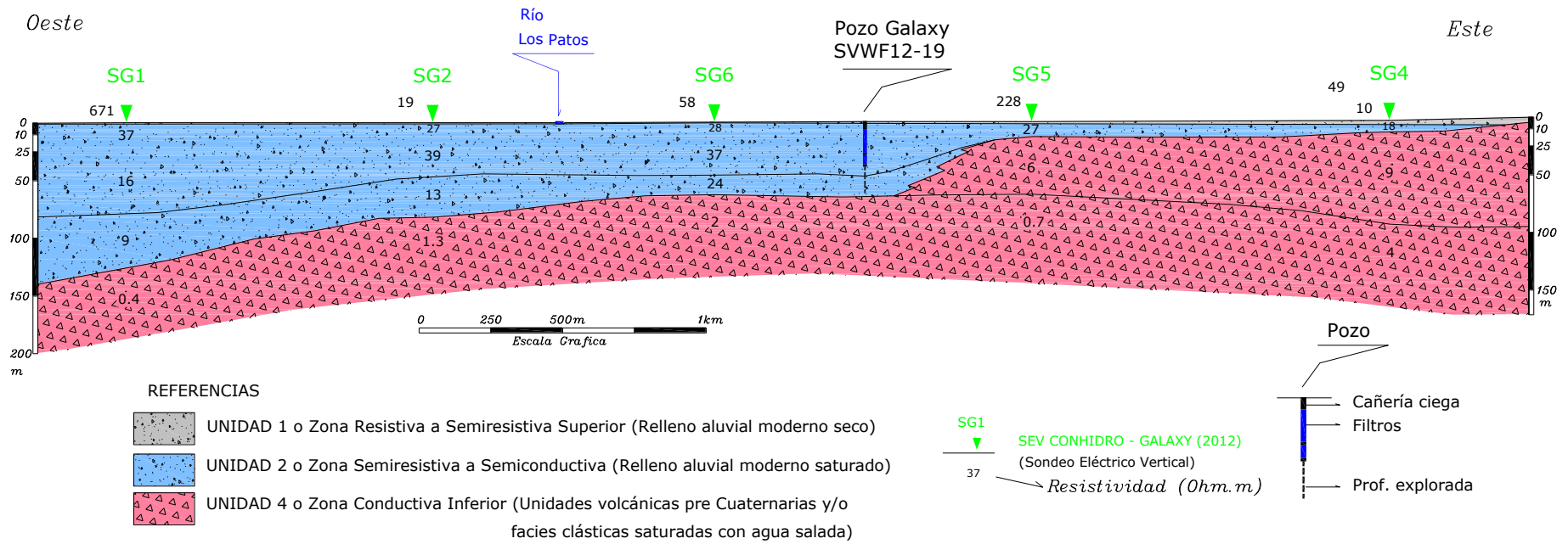


Figura 49: Perfil Geoelectrico K-K'

## **Perfil Geoeléctrico L-L'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales FMC4, FMC3 y FMC35, del estudio de Conhidro (2016), mas el SEV CFI16, realizado en este proyecto, por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona sur del valle fluvial del río Los Patos (Figura 50).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores mínimos en el sector oriental y central del valle fluvial, donde no superan el metro y un máximos en el sector oriental, asociado a la margen derecha del río Los Patos, alcanzando los 5 metros de potencia. Por sus altos valores de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales gruesas, con presencia de arenas y gravas, secas.

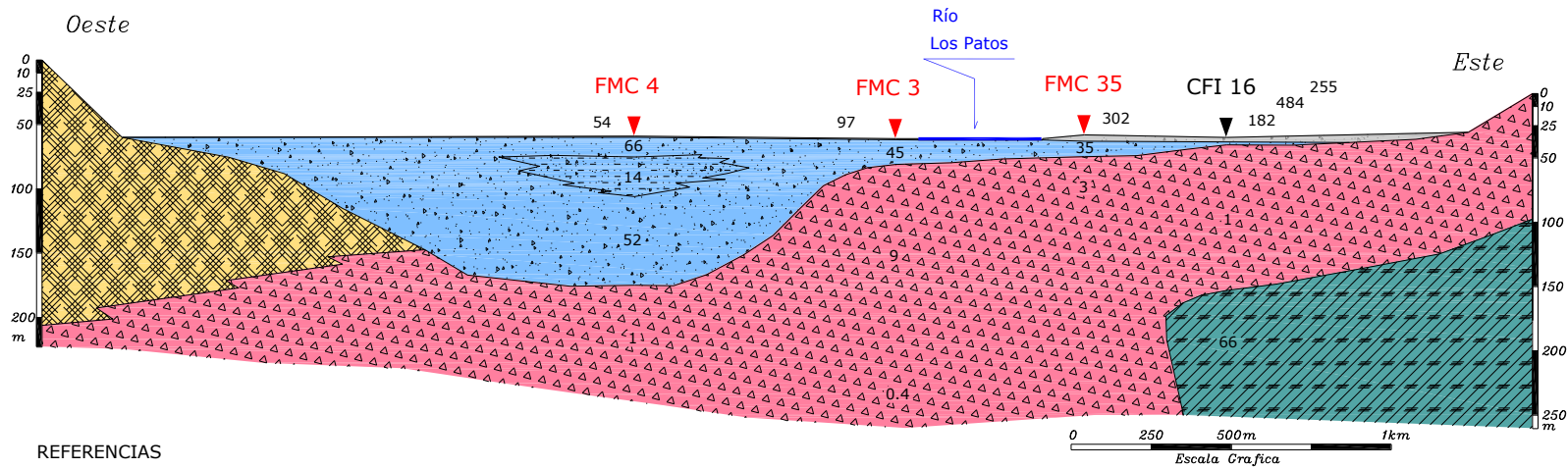
**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV de este perfil, hasta una profundidad máxima de 116 metros en el SEV FMC4, margen izquierda del río Aguas Los Patos y mínima de 6 metros en la margen derecha del curso fluvial (SEV CFI16). La unidad presenta valores moderados de resistividad (variables entre 14 y 182 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: no fue detectada en los SEV que componen este perfil.

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil, a profundidades variables entre 116 metros en el SEV FMC4 y 6 metros en el SEV CFI16. Posee valores bajos de resistividad (variables entre 0.4 y 9 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente. En algunos casos esta unidad podría englobar facies aluviales modernas, saturadas con agua salobre o salada.

**Unidad 5** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Inferior*, fue detectada en el SEV CFI16 a una profundidad de 119 metros, con un valor de resistividad moderado a alto (66 Ohm.m) que podría representar unidades rocosas pre terciarias.

## PERFIL GEOELÉCTRICO L-L'



### REFERENCIAS

- UNIDAD 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior (Relleno aluvial moderno seco)
- UNIDAD 2 o Zona Semiresistiva a Semiconductiva (Relleno aluvial moderno saturado)
- UNIDAD 3 o Zona Resistiva a Semiresistiva (Unidades volcánicas pre Cuaternarias)
- UNIDAD 4 o Zona Conductiva Inferior (Unidades volcánicas pre Cuaternarias y/o facies clásticas saturadas con agua salada)
- UNIDAD 5 o Zona Resistiva a Semiresistiva Inferior (Unidades rocosas pre Terciarias)

- CFI 16 SEV CONHIDRO - CFI (2019)
- FMC 3 SEV CONHIDRO - FMC - Servidumbre 2 (2016) (Sondeo Eléctrico Vertical)
- 45 Resistividad (Ohm.m)

Figura 50: Perfil Geoeléctrico L-L'

## **Perfil Geoeléctrico M-M'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales FMC25, FMC24, FMC5, FMC1, FMC2, FMC3, FMC23, FMC22, FMC21 y FMC9, del estudio de Conhidro (2016), mas el SEV CFI20, realizado en este proyecto, por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Norte – Sur, en la zona sur del valle fluvial del río Los Patos. En este perfil se vincula el área del pozo C-02-19 (proyecto Candelas) y la zona de la batería de pozos de Minera del Altiplano SA (Livent) (Figura 51).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores que en general no superan los 7 metros. Por sus altos a moderados valores de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales gruesas, con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en todos los SEV FMC2, FMC3, FMC23, FMC22, FMC21 y FMC9 de este perfil, hasta una profundidad máxima de 100 metros en el SEV FMC9 y mínima de 17 metros en el SEV FMC2. La unidad presenta valores moderados de resistividad (variables entre 34 y 101 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en los SEV CFI20, FMC25, FMC24, FMC5y FMC1, hasta una profundidad máxima de 52 metros y mínima de 4 metros, con valores de resistividad moderados (variables entre 13 y 45 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán, con variaciones faciales que explicarían esta variabilidad (grado de soldamiento de las coladas piroclásticas, o presencia de facies de “surges”).

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil, a profundidades variables entre 100 metros en el SEV FMC9 y 4 metros en el SEV FMC25. Posee valores bajos de resistividad (variables entre 0.1 y 23 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente. En algunos casos esta unidad podría englobar facies aluviales modernas, saturadas con agua salobre o salada.



PERFIL GEOELÉCTRICO M-M'

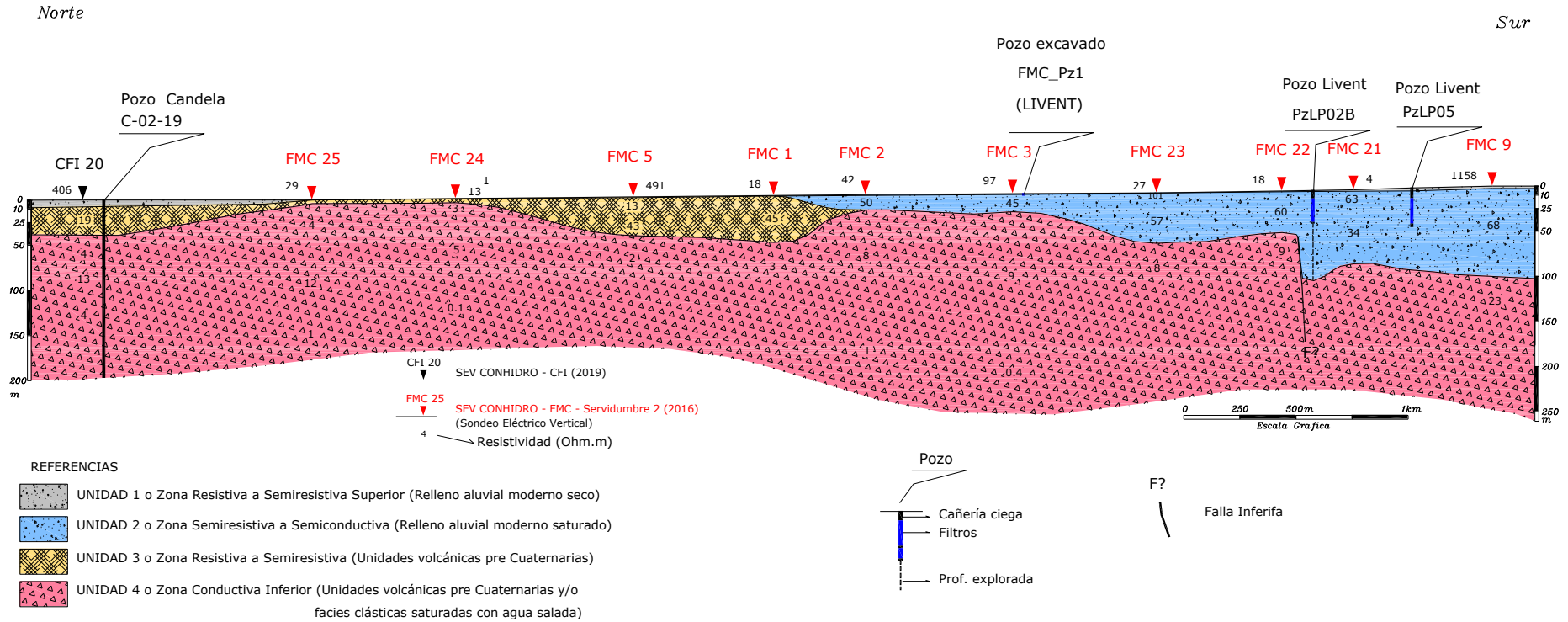


Figura 51: Perfil Geoelectrico M-M'

## **Perfil Geoeléctrico N-N'**

El presente perfil incluye los Sondeos Eléctricos Verticales 31, 30, 29, 27 y 28, realizados en este proyecto e identificados como "CFI", mas el SEV FMC30, realizado por Conhidro (2016), por lo que permite observar las variaciones faciales en sentido Oeste – Este en la zona centro del valle fluvial del río Los Patos (Figura 52).

**La Unidad 1** o *Zona Resistiva a Semiresistiva Superior*: se detecta a lo largo de todo el perfil con espesores que no superan los 3.5 metros. Por sus valores altos de resistividad, se interpreta la presencia de facies aluviales con presencia de arenas y gravas, secas.

**Unidad 2** o *Zona Semiresistiva a Semiconductiva*: fue detectada en los SEV CFI30, CFI29 y FMC30, hasta una profundidad máxima de 7 metros en el SEV CFI29. La unidad presenta valores altos a moderados de resistividad (variables entre 109 y 90 Ohm.m), que representarían a las mismas facies fluviales de la Unidad anterior, pero saturadas con agua dulce.

**Unidad 3** o *Zona Resistiva a Semiresistiva*: fue detectada en todos los SEV, hasta una profundidad máxima de 104 metros y mínima de 34 metros, con valores de resistividad altos a moderados (variables entre 11 y 111 Ohm.m), que representarían a las facies volcánicas pre cuaternarias, conformadas por las ignimbritas del Complejo Volcánico Galán, con variaciones faciales que explicarían esta variabilidad (grado de soldamiento de las coladas piroclásticas, o presencia de facies de "surges").

**Unidad 4** o *Zona Conductiva inferior*: fue detectada en todos los SEV que componen este perfil a profundidades variables entre 104 metros en el SEV CFI28 y 34 metros en el SEV CFI29. Posee valores bajos de resistividad (variables entre 4 y 11 Ohm.m), por lo que podría representar a unidades volcánicas pre cuaternarias que por su composición litológica o por contener mayor permeabilidad secundaria, responde de manera más conductiva al paso de la corriente que la unidad suprayacente.

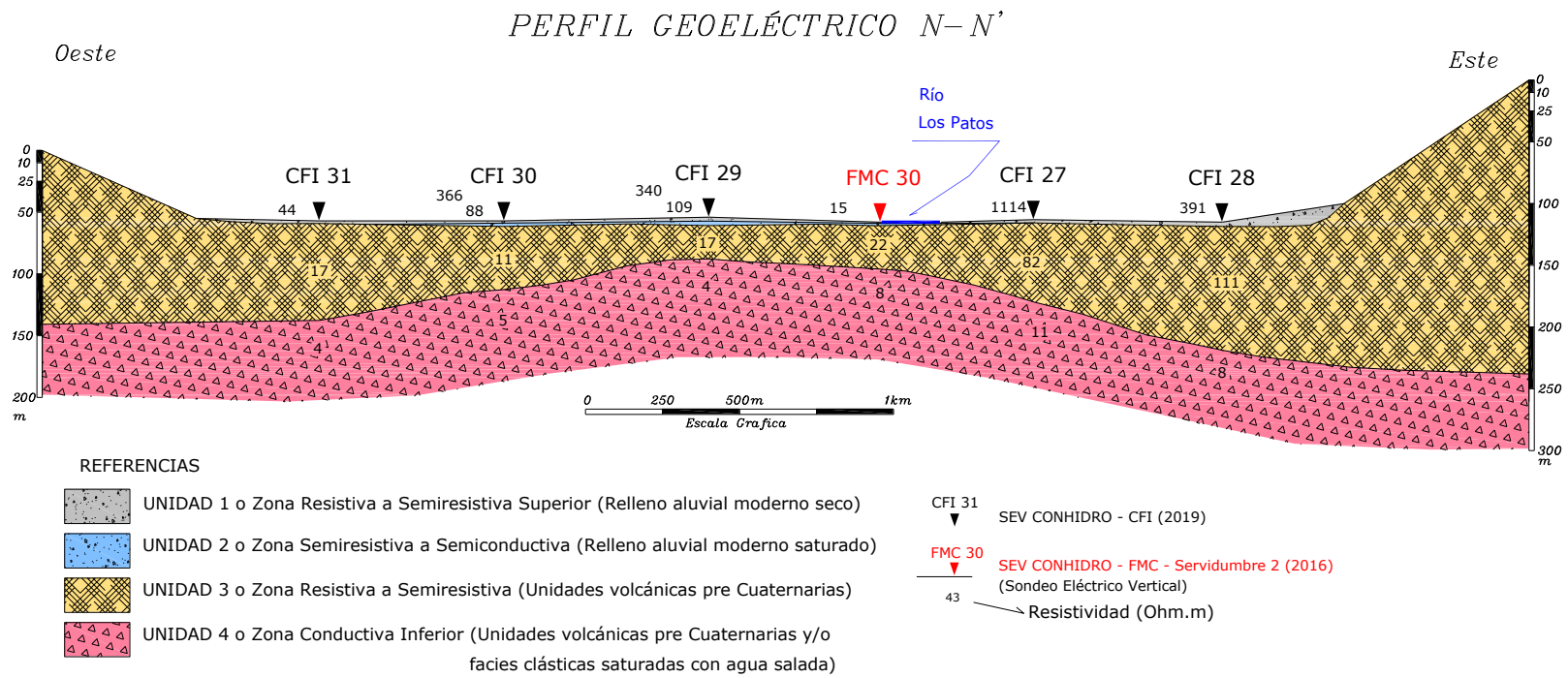


Figura 52: Perfil Geoelectrico N-N'

## **IX. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Debido a la dificultad de hacer mediciones en coordenadas esféricas, los datos geográficos se proyectan en sistemas de coordenadas planas (frecuentemente llamados sistemas de coordenadas cartesianas), la cual se representan sobre la superficie plana, las posiciones se identifican por coordenadas X, Y.

El Sistema de Proyección utilizado fue el Marco de Referencia Geodésico Nacional POSGAR 07 (Posiciones Geodésicas Argentinas 2007). Dicho marco se vinculó al Marco de Referencia Terrestre Internacional denominado ITRF05 (International Terrestrial Reference Frame 2005) y SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, solución DGF08P01) donde todas las coordenadas de las estaciones GPS permanentes que pertenecen a la red RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo).

### **Imágenes satelitales**

Para la digitalización cartográfica se utilizaron imágenes satelitales y Modelos de Elevación Digital (DEM), provenientes de plataformas digitales de descarga libre como: SAS.Planet: es un programa gratuito (freeware con licencia GNU ) diseñado para ver y descargar imágenes de satélite de alta resolución y mapas convencionales de servidores como:

- Google Earth.
- Google Maps
- Bing Maps.
- Nokia.
- Here.
- Yahoo.
- Yandex.
- OpenStreetMap.
- ESRI.
- Navteq.

ASTER GDEM fue el sitio utilizado para la descarga de DEM. Es un proyecto desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), con la finalidad de construir con Modelo de Elevación Digital de toda la superficie terrestre con una cobertura global con 30 metros de resolución horizontal.

## **Organización de la Información en el software**

Se volcó la información en el paquete GeoPackage, este es un formato estándar que constituye una base de datos SQLite (sistema de gestión de base de datos) independiente de plataformas o aplicaciones, donde se genera un único archivo de extensión .gpkg utilizado para la transferencia de información geoespacial, soportando datos vectoriales, ráster, atributos (datos no espaciales) y extensiones, es leído por cualquier paquete de GIS, componiéndose por un solo archivo y conectándolo con el administrador de la base de datos del software libre, buscando la ruta de ubicación, permitiendo la integración con diferentes tipos de programas y aplicaciones y los datos contenidos en dicha plataforma pueden ser exportados en .gpkg, Para este estudio se organizó la información geoespacial en el siguiente orden:

### **Gis mapa regional geológico rio de Los Patos**

#### Imágenes Satelitales

- Ráster de resolución de 1, 08m/pixel. Formato TIFF

#### Shapefiles

- Contactos Geológicos
- Estilos
- Estructuras
- Formaciones Geológicas
- Hidrografía
- Orografía
- Límite de área de trabajo

#### Hoja Geológica

- Cachi. Formato TIFF.

#### GIS mapa área a modelar cuenca rio de Los Patos

#### Shapefiles

- Estructuras
- Formaciones Geológicas
- Hidrografía
- Referencias Cartográficas
- Imágenes Satelitales
- Ráster de resolución de 1, 08m/pixel. Formato TIFF

#### Mapa de sondeos eléctricos verticales

#### Imágenes Satelitales

- Ráster de resolución de 1, 08m/pixel. Formato TIFF

#### Shapefiles



- SEV CFI 2019
- Antecedentes\_ GALAXY\_FMC
- Perfiles

#### Mapa de Pozos

##### Imágenes Satelitales

- Ráster de resolución de 1, 08m/pixel. Formato TIFF

##### Shapefiles

- Censo de pozos CFI 2019
- Pozos FMC año 2012\_2016

#### Mapa de Aforos

##### Imágenes Satelitales

- Ráster de resolución de 1, 08m/pixel. Formato TIFF

##### Shapefiles

- Censo de pozos CFI 2019
- Pozos FMC año 2012\_2016

#### Mapa de Isopiezas

##### Imágenes Satelitales

- Imagen satelital georreferenciada de Google Earth. Formato TIFF

##### Shapefiles

- Dirección de flujo
- Línea de isopiezas

Toda la Información incluida en el GIS, se adjuntará en formato Digital.

## X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La cuenca endorreica del Río Los Patos se desarrolla en la Puna Austral Argentina, en la zona limítrofe entre las provincias de Catamarca y Salta, en un relieve montañoso que involucra zonas de hasta 5800 msnm en su cabecera y desemboca en el salar del Hombre Muerto a 3980 msnm.
- El clima imperante en la zona es continental andino, desértico, con una gran sequedad atmosférica, bajas temperaturas y una importante amplitud térmica diaria. El tratamiento estadístico de los datos hidrometeorológicos muestra una precipitación media anual de 82,1 mm/año (para el período comprendido entre 1992 – 2016 en Campamento Fénix, Salar del Hombre Muerto).
- Las escasas precipitaciones y el alto poder evaporante de la atmósfera, generan un marcado déficit hídrico a nivel regional.
- El río Los Patos, con una cuenca imbrífera de 1974 km<sup>2</sup>, representa uno de los principales sistemas fluviales de la región, siendo su régimen permanente, con caudales medios mensuales muy contrastantes y fluctuantes según las diferentes épocas del año y con un caudal medio anual de 1.81 m<sup>3</sup>/seg.
- La geología local impone un ambiente dominado por rocas volcánicas y piroclásticas neógenas (Fm. Tebenquicho y Complejo Eruptivo Cerro Galán) y rocas metamórficas neoproterozoicas (Fm. Pachamama y Complejo Metamórfico Río Blanco). En el ámbito de la cuenca no afloran sedimentitas paleógenas ni neógenas.
- Arealmente se observa una gran predominancia de las ignimbritas dacíticas (Complejo Eruptivo Cerro Galán), que básicamente dan el límite lateral a los depósitos aluvio-fluviales del río Los Patos.
- El Sistema Acuífero Los Patos, se desarrolla principalmente en facies fluviales y aluviales holocenas y recientes.
- Desde el punto de vista hidrogeológico, existen dos medios de circulación principales: el relleno aluvial moderno del valle del río Los Patos y las facies permeables de las ignimbritas pliocenas del Complejo Volcánico Cerro Galán.

- El relleno aluvial/fluvial moderno asociado al río Los Patos, constituye el principal medio de circulación y almacenamiento de la cuenca, ya que por su génesis y composición (gravas y arenas poco consolidadas), posee una importante permeabilidad primaria.
- Las ignimbritas del Complejo Volcánico Cerro Galán, constituyen también un importante medio de circulación, no tanto por su permeabilidad, sino por su gran espesor. Estas unidades por su origen y composición (facies de coladas piroclásticas y de “surges”) poseen una variable permeabilidad secundaria, por su grado de fracturación y alteración y por sus condiciones de depositación, que generaron estructuras columnares por enfriamiento.
- Los antecedentes de perforaciones realizadas con fines de investigación hidrogeológica en algunos casos y de prospección de salmueras en otros, permiten comprobar la existencia de agua subterránea en ambas unidades o medios de circulación.
- Se han censado en total de 31 perforaciones, 8 de las cuales pertenecen al proyecto minero Candelas (Galán Lithium Limited), que prospecta salmueras enriquecidas en litio y que fueron perforadas con sistema de diamantina hasta profundidades de 600 metros. Lamentablemente por cuestiones de confidencialidad, no se ha accedido a los datos geológicos ni constructivos de las mismas.
- La compañía Galaxy Resources, en su proyecto Sal de Vida, perforó también dos pozos de exploración de salmueras en la zona norte de la cuenca, hasta profundidades de 228 y 300 metros cada uno, obteniendo resultados positivos en facies compuestas por ignimbritas y sedimentitas neógenas.
- La misma compañía (Galaxy Resources) posee dos perforaciones que no superan los 40 metros de profundidad, para extracción de agua fresca o dulce, en la zona norte de la cuenca, tres kilómetros antes de la desembocadura del río Los Patos en el Salar del Hombre Muerto.

- La empresa Minera del Altiplano SA (Livent) ha construido una batería de 16 perforaciones (6 pozos de Bombeo y 10 pozos de observación) en un sector ubicado en la margen izquierda del río Los Patos, inmediatamente aguas debajo de su confluencia con el río Aguas Calientes.
- Estas perforaciones, con exploraciones de hasta 100 metros y que fueron habilitadas hasta los 40 metros de profundidad, permitieron comprobar los modelos geofísicos realizados por Conhidro SRL en el año 2016, en los que se advertía la posibilidad de encontrar facies clásticas modernas hasta profundidades superiores a los 100 metros. El sistema de bombeo y observación construidos, permitió también caracterizar hidrogeológicamente el acuífero descubierto y factibilizar su uso para fines industriales.
- La geofísica realizada en el marco del este proyecto (prospección geoelectrica, método del SEV), complementó a la realizada por Conhidro SRL para Minera del Altiplano en el año 2016, permitiendo cubrir aquellas zonas en las que no se contaba con información de subsuelo.
- Se confeccionaron 14 perfiles geoelectricos, que permiten identificar unidades geoelectricas con diferentes connotaciones hidrogeológicas. El ambiente en el cual se desarrolla el principal acuífero, además de tener una geología variable en subsuelo, tiene la particularidad de estar saturado con aguas que van desde extremos dulces (1000 uS/cm de conductividad eléctrica) hasta salmueras que superan los 200000 uS/cm. Esta particularidad hace que los distintos materiales (tanto los acuíferos como los que constituyen el basamento técnico) tengan una respuesta muy distinta al paso de la corriente, en función de la salinidad del fluido que las satura, haciendo compleja y ambigua la interpretación geofísica.
- Luego de interpretar los SEV realizados, se individualizaron cinco unidades geoelectricas mayores que fueron denominadas, de arriba hacia abajo como:
  - Unidad 1 o Zona Resistiva a Semiresistiva Superior, representando generalmente al relleno aluvial moderno, seco;

- Unidad 2 o Zona Semiresistiva a Semiconductiva, que corresponde a las mismas facies anteriores pero saturadas con agua dulce a salobre;
  - Unidad 3 o Zona Resistiva a Semiresistiva, englobando secuencias volcánicas pre cuaternarias;
  - Unidad 4 o Zona Conductiva inferior, que podría representar tanto a unidades volcánicas pre cuaternarias como a sedimentitas o facies clásticas saturadas con agua salada;
  - Unidad 5 o Zona Resistiva a Semiresistiva Inferior, que podría representar a unidades rocosas pre terciarias.
- La Unidad Geoeléctrica 2, (relleno aluvial moderno) constituye el principal medio de circulación y almacenamiento de agua subterránea dulce en la cuenca, desde donde captan los pozos construidos por Minera del Altiplano y los dos pozos de agua dulce del proyecto Sal de Vida (Galaxy).
  - Lamentablemente no existen perforaciones diseñadas de manera tal, de comprobar la calidad del agua contenida exclusivamente en la Unidad Geoeléctrica 3 (secuencias volcánicas pre cuaternarias) que estaría representada mayoritariamente por las ignimbritas del Cerro Galán.
  - Los estudios hidráulicos realizados por Minera del Altiplano SA, permitieron obtener algunos datos hidráulicos del acuífero aluvial explotado en el entorno de la batería, registrándose valores de Transmisividad variables entre 879 y 3124 m<sup>2</sup>/día y Coeficientes de Almacenamiento variables entre 0.00209 y 0.000061, indicando la existencia de un reservorio semiconfinado.
  - Las cuatro perforaciones existentes en la zona norte de la cuenca, pertenecientes al proyecto Sal de Vida (Galaxy) no poseen pozos piezométricos o de observación, razón por la cual no se pudo calcular la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del o los acuíferos puestos en producción. No obstante en los pozos de agua dulce (que explotan las facies aluviales modernas): SVWF12-19 y SVWF12-20 se obtuvieron rendimientos específicos altos: de 97 y 75 m<sup>3</sup>/h/m para caudales de bombeo de 96 y 86 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.



- Por el contrario, en los pozos del Proyecto Sal de Vida, que exploraron las facies pre cuaternarias, SVWW18-25 y SVWW18-26, se obtuvieron rendimientos específicos notoriamente inferiores a los anteriores: 4.2 y 0.2, para caudales de bombeo de 29.7 y 7.3 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.
- Las aguas superficiales, existentes en la zona sur del SALP, se diferencian claramente según se trate del río Los Patos o bien el Aguas Calientes. Las primeras se clasifican como bicarbonatadas sódicas, mientras que las segundas son cloruradas sódicas. Si bien ambas muestras poseen un bajo a moderado grado de salinidad (con Conductividades eléctricas que no superan los 1300 uS/cm), ambas poseen excesos de boro y arsénico, siendo las del río Aguas Calientes las que poseen elevadísimos contenidos de estos elementos. Esta diferenciación refuerza el ingreso de agua de fuentes termales, vinculadas a procesos endógenos. Una vez producida la unión entre ambos cursos fluviales, el río Los Patos contiene un agua clorurada sódica (con una Conductividad eléctrica de 1057 uS/cm), detectándose cambios en el contenido salino, a lo largo de su recorrido, producto de la interacción con el acuífero y con estructuras que ingresarían fluidos termales.
- Las aguas subterráneas, obtenidas de la batería de pozos de Minera del Altiplano SA, se clasifican como cloruradas sódicas, de similares características a la descrita para el río Los Patos luego de la confluencia con el Aguas Calientes, denotando la íntima relación río/acuífero.
- Las aguas subterráneas obtenidos por los pozos de agua fresca del proyecto Sal de Vida (Galaxy), muestran también una composición clorurada sódica, pero con mayor contenido de sales disueltas y por ende conductividad eléctrica (2300 – 2500 uS/cm).
- El mapa de Isopiezas obtenido para el sector de la batería de pozos de Minera del Altiplano, muestra que el río Los Patos posee un comportamiento influente en algunos tramos y efluente en otros, sobre su margen izquierda. Lamentablemente no existe una cantidad adecuada de pozos que monitoreen el acuífero superior (facies aluviales modernas) como para realizar un mapa piezométrico de todo el sistema.

- La escasa información de perforaciones existentes en la zona central del Sistema Acuífero Los Patos, donde la geofísica muestra la presencia de la Unidad Geoeléctrica 4 (Zona Conductiva Inferior) a escasa profundidad, impide elaborar hipótesis del flujo subterráneo en este sector del valle fluvial.
- Lo expuesto en el punto anterior, muestra la imperiosa necesidad de realizar perforaciones de estudio hidrogeológico en este sitio, tendientes a determinar el o los medios de circulación existentes y evaluar las características hidráulicas e hidroquímicas de los mismos. Se proponen perforaciones, según el **ANEXO IV**.
- Para una correcta definición del modelo conceptual del funcionamiento del Sistema Acuífero Los Patos (SALP), se considera imprescindible realizar estudios hidroquímicos que analicen las aguas meteóricas (líquidas y sólidas), superficiales, termales y subterráneas, sus composiciones isotópicas y los probables escenarios de mezcla.
- Es también inevitablemente necesario, realizar el aforo continuo del flujo superficial del río Los Patos en al menos tres sitios dentro del dominio del SALP. Las variaciones del caudal superficial a nivel diario, mensual y anual, que se observan a simple vista, deben ser cotejadas con datos de variaciones piezométricas continuas y cruzadas con información de precipitaciones en la cuenca.
- Se considera esencial proceder a medir de manera sistemática y continua, la variación piezométrica en las perforaciones que monitorean el acuífero clástico superficial, y también aquellas que investigan unidades volcánicas y clásticas neógenas. De esta manera se podrá corroborar el grado de desvinculamiento que tendrían estas Unidades Hidrogeológicas, tal cual lo marca la piezometría obtenida en este proyecto.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, R., J.G. Viramonte y R. Gutiérrez., 1984. Puna Austral Bases para el Subprovincialismo Geológico de la Puna Argentina. Actas IX Congreso Geológico Argentino. I: 25-41.

Bianchi, A.R. y C.E. Yañez, 1992. Las Precipitaciones en el Noroeste Argentino. Segunda Edición. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Centro Regional Salta – Jujuy. Estación Experimental Regional Agropecuaria Salta. Secretaría de Estado de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Salta.

Bianchi, A.R., 2006. Distribución Geográfica de las Lluvias en el Noroeste de Argentina (Región NOA). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Estación Experimental Agropecuaria Salta. Recursos Naturales. Laboratorio de Teledetección. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación.

Catalano, L., 1964. Estudio geológico – Económico del Salar de Hombre Muerto (Puna de Atacama). Ministerio de Economía de la Nación. Secretaría de Industria y Minería. Serie Argentina 4.

Conhidro S.R.L., 2019. Informe final Batería de Pozos Río Los Patos – Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano – Livent.

Conhidro S.R.L., 2016. Estudio Hidrogeológico Río Los Patos. Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano – FMC.

Conhidro S.R.L., 2015. Modelo Conceptual Sistema Acuífero Trapiche. Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano – FMC.

Conhidro S.R.L., 2012. Prospección Geoeléctrica y Test de Bombeo en el Valle Fluvial del Río Los Patos. Departamento Antofagasta de La Sierra. Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano – FMC.

Conhidro S.R.L., 2010. Informe Final de Obra Captación de Agua Dren Horizontal. El Alfarcito, Departamento Rosario de Lerma. Provincia de Salta. Fundación Alfarcito.

Conhidro S.R.L., 2008. Diagnóstico Hidrogeológico Para Ejecución de Captación Subsuperficial (Dren). El Alfarcito, Departamento Rosario de Lerma. Provincia de Salta. Fundación Alfarcito.

Conhidro S.R.L., 2006. Estudio de Impacto Ambiental y Social del Proyecto de Riego Para Supresión de Polvo y Mejoramiento de la Ruta Provincial N° 17 Tramo Salar de Pocitos – Límite Con la Provincia de Catamarca. Provincia de Salta. Minera del Altiplano – FMC.

Conhidro S.R.L., 2007. Estudio de Impacto Ambiental y Social del Proyecto Ampliación de Adsorción Selectiva (SA) y Recuperación de Potasio del Efluente de SA. Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano S.A – FMC.

Consultora Ambiental, 2002. Estudio de Impacto Ambiental y Social del Proyecto Fénix, Salar del Hombre Muerto, Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano – FMC.

Consultora Ambiental, 2004. Renovación Bianual. Estudio de Impacto Ambiental y Social del Proyecto Fénix, Salar del Hombre Muerto, Provincia de Catamarca. Minera del Altiplano – FMC.

Custodio, E y Llamas, M.R, 1996. Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Segunda Edición. Editorial Omega. España.

EC&Asociados, 2018. Estudio de Impacto Ambiental y Social Aprovechamiento de agua subterránea y conducción a Planta Fénix. Acueducto Los Patos Dpto. Antofagasta de la Sierra. Pcia. Catamarca. Elaborado para FMC Corporation.

Fetter, C.W., 1988. Applied Hydrogeology. Second Edition. Mac Millan.

Frezee, R.A. y J.A., Cherry, 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliffs, New Jersey.

Fuertes, A., R. García, F. Moya Ruiz, G. Baudino, O. Rionda y G. López Vázquez, 1990. Caracterización Hidrogeológica del Noroeste Argentino, Provincias de Salta y Jujuy. Informe Final Proyecto CUHINOA. Universidad Nacional de Salta, Consejo de Investigación. Inédito, Salta.

García Maurizzio, R. F., 2013. Geología de los Recursos Hídricos. 1° Edición. Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GA). 450 pág. ISBN 978-987-27407-2-6.

García, R.F. V. Rocha Fasola y F. A. Moya Ruiz, 2016. El agua subterránea en la Puna salteña: Recurso estratégico para el desarrollo de la región. Asociación Argentina de Geólogos Economistas. AAGE. Salta. Provincia de Salta.

García, R.F, V. Rocha Fasola, F. A. Moya Ruiz y E. Tálamo, 2011. El Ambiente Hidrogeológico de la Puna Salteña. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Salta, República Argentina.

Houston, J and A. J. Hartley, 2003. The Central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. International Journal of Climatology, vol. 23, pp. 1453-1464. Wiley Interscience.

Issar A. y R. Passchier, 1990. Regional hydrogeological concepts. En: LERNER, D., A. ISSAR e I.SIMMERS. 1990. Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge. International contributions to Hydrogeology, Vol 8. International Association of Hydrogeologists - Heisse. Hannover.

Integral Consulting Inc. 2015. Acuífero del río Trapiche. Modelación de las Aguas Subterráneas. Minera del Altiplano S.A., FMC Lithium.

Igarzábal, A. P y R.F Poppi, 1980. El Salar del Hombre Muerto. Provincia de Catamarca. Acta Lilloana XV: 2. Instituto Miguel Lillo. Universidad Nacional de Tucumán.

Jordan, T. E.; Alonso, R. N y L. V. Godfrey, 1999. Tectónica, subsidencia y aguas en el salar del Hombre Muerto, Puna argentina. XIV Congreso Geológico Argentino, Actas I, Salta. Argentina.

Maidment, D.R, 1993. Handbook of Hydrology. Mc Graw Hill.

Moya Ruiz, F.; García, R.; Rocha, V.; Ferretti, J.; Massei, G y R. González, 2008. Sistema Acuífero Río Trapiche: Un Modelo de Reservorio de Agua Subterránea en Cuencas Endorreicas de la Puna Argentina. IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Quito, Ecuador.

SEGEMAR, 2001. Hoja Geológica 2566-III. 1:250.000. Cachi. Provincias de Salta y Catamarca. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina.

Tóth J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero, ISSN 0366-0176, Vol. 111, N° 4, 2000 , págs. 9-26.

Vinante, D., 2003. Estudio Geológico de la Subcuenca Boratífera Oriental del Salar del Hombre Muerto, Puna Argentina. Provincias de Catamarca y Salta. Tesis Profesional. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Inédito.

Water Management Consultants. 1994. Evaluation of the Recoverable Reserve in the Salar del Hombre Muerto.



## **XII. EQUIPO DE TRABAJO**

### **CONHIDRO S.R.L.**

- Geól. Esteban Tálamo – Coordinador General del Proyecto, Ejecución e interpretación geofísica, Hidrogeología.
- Lic. Javier Díaz Ramos – Supervisor y Coordinador de trabajos. Ejecución de SEV, Cartografía GIS.
- Geól. Verónica Rocha Fasola – Interpretación Geofísica
- Lic. Gonzalo Martínez – Trabajos de prospección geofísica.
- Téc. Federico Díaz Ramos – Trabajos de campo y gabinete,
- Téc. Braian Ballhorst – Trabajos de campo y gabinete
- Téc. Carolina Córdoba – Trabajos de campo y gabinete
- Téc. Nicolás Ibáñez – Trabajos de campo.

### **DIRECCIÓN PROVINCIAL DE HIDROLOGÍA Y EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS**

- Téc. César Solohaga (determinación de coordenadas y cotas de perforaciones y puntos de interés)
- Téc. Luciano Alvarado (determinación de coordenadas y cotas de perforaciones y puntos de interés)
- Téc. Gastón Caliva (determinación de coordenadas y cotas de perforaciones y puntos de interés)

### **XIII. ANEXOS**

**ANEXO I** – Antecedentes constructivos e hidráulicos de Perforaciones relevadas en la cuenca.

**ANEXO II** – Determinación de Coordenadas y Cotas de Perforaciones (Dirección Provincial de Hidrología y Evaluación de los Recursos Hídricos).

**ANEXO III** – Curvas y modelos de interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales.

**ANEXO IV** – Propuesta de Perforaciones para estudios hidrogeológicos.



**GEÓL. ESTEBAN TÁLAMO**  
**CONHIDRO S.R.L.**  
**SOCIO APODERADO**  
**M.P. A-184**