



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ACUÍFERO CALAMA -
MARÍA ELENA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

RICARDO ANTONIO SALAZAR MUÑOZ

PROFESOR GUÍA:

LEONARDO ALMAGRO LANDÓ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LINDA DANIELE
BENOÎT VIGUIER

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Aluvial Consultores.

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: GEÓLOGO
POR: Ricardo Antonio Salazar Muñoz
FECHA: 29/03/2019
PROFESOR GUÍA: Leonardo Almagro Landó**

FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA ACUÍFERO CALAMA - MARÍA ELENA

El presente trabajo muestra el estudio del sistema hidrogeológico entre la ciudad de Calama y la localidad de María Elena que se encuentra ubicado en la II región de Antofagasta, Chile.

Este estudio nace con el objetivo de establecer las bases del funcionamiento hidrogeológico de este sistema y superar la escasa información hidrogeológica existente en los 70 km que dividen a ambas localidades.

Para lograr este objetivo se realiza un análisis detallado de la geología, la geomorfología, la hidráulica del río San Salvador, la hidrodinámica del sistema acuífero y la hidroquímica de las aguas superficiales que permiten desarrollar un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico y que ha sido validado numéricamente mediante la modelación del flujo con el código VISUAL MODFLOW.

Dentro de esta investigación se identifican 3 unidades hidrogeológicas que caracterizan el sistema subterráneo, la unidad acuífera kárstica Opache-Quillagua, el acuitardo Jalquinche-El batea y la unidad acuífera Calama-Sichal que presenta un carácter confinado en oriente y libre en occidente.

La unidad kárstica Opache-Quillagua presenta una conductividad hidráulica heterogénea cuyo funcionamiento hidrodinámico exhibe un flujo de dirección este-oeste que se seca al oeste de la vertiente Ojos de Opache.

La unidad Calama-Sichal presenta una diferencia en la permeabilidad de oriente y occidente cuyo flujo de agua entra por oriente con dirección este-oeste y sale por occidente con una dirección sureste-noroeste.

Finalmente, a través de la hidroquímica y la hidráulica superficial se identifican tres tramos de interacción entre el río San Salvador y el sistema subterráneo, de los cuales dos de ellos exhiben una interacción cuantificable con el sistema subterráneo, mientras que el otro exhibe una desconexión entre el río San Salvador y las unidades acuíferas presentes.

Agradecimientos



Todos los que han hecho de mi vida una alegría.

Nancy Margarita Muñoz Lizana

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Zona de estudio	1
1.2. Problemática	1
1.3. Hipótesis	2
1.4. Objetivos	2
1.5. Metodología	3
2. Revisión de Antecedentes	4
2.1. Estudios anteriores	4
3. Marco Geográfico	7
3.1. Clima y vegetación	7
3.2. Geomorfología	8
4. Marco geológico	11
4.1. Geología superficial	11
4.2. Evolución tectóno-sedimentaria	14
4.3. Estratigrafía	15
5. Caracterización hidrogeológica	19
5.1. Caracterización de Parámetros hidráulicos	32
5.2. Caracterización del funcionamiento hidrodinámico	37
6. Balance hidrogeológico	41
6.1. Escorrentía superficial	41
6.2. Precipitaciones	42
6.3. Evapotranspiración	43
6.4. Evaporación	43

6.5. Recargas antrópicas.....	44
6.6. Extracciones antrópicas.....	45
6.7. Infiltración.....	47
6.8. Afloramientos subterráneos.....	48
6.1. Escorrentía subterránea:	49
7. Caracterización hidroquímica del río San Salvador.....	54
8. Modelo numérico.....	61
8.1. Condiciones de borde.....	62
8.2. Parametrización.....	64
8.3. Calibración del modelo numérico.....	65
8.4. Análisis de sensibilidad.....	67
8.5. Resultados.....	68
9. Discusión.....	72
10. Conclusiones.....	77
11. Bibliografía.....	79
12. Anexos.....	85

Índice de tablas

Tabla 5.1 Valores de conductividad hidráulica saturada obtenidos en los ensayos de infiltración. Fuente: Elaboración propia.	36
Tabla 6.1 Valores utilizados en la fórmula de Turc. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 6.2 Parámetros utilizados en el cálculo de la infiltración.	48
Tabla 6.3 Parámetros utilizados en el cálculo del caudal de afloramiento del acuífero Opache - Quillagua. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 6.4 parámetros utilizados en el cálculo del caudal de afloramiento del acuífero Calama - Sical. Fuente: Elaboración propia.	49
Tabla 6.5 Parámetros utilizados para ajustar los caudales del flujo subterráneo. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 6.6 Entradas del balance hidrogeológico superficial y subterráneo. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 6.7 Entradas del balance hidrogeológico superficial y subterráneo. Fuente: Elaboración propia.	52
Tabla 7.1 Comparación entre la concentración estimada y la concentración medida. Fuente: Elaboración propia.	60
Tabla 8.1 Parametrización de las zonas de permeabilidad del modelo numérico, coherentes con el modelo conceptual. Fuente: Elaboración propia.	66

Índice de figuras

Figura 1.1 Imagen satelital del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.	1
Figura 3.1 Fotografía representativa del clima y vegetación que caracteriza la zona de estudio. Fuente: Bruning J. (2015)	7
Figura 3.2 fotografía de la exigua vegetación que caracteriza a la zona de estudio. Fuente: Bonacin A. (2008).....	8
Figura 3.3 Mapa de elevación de la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 3.4 Mapa de elevación de la zona de estudio junto a un perfil de elevación transversal (izquierda) y longitudinal (derecha). Fuente: Elaboración propia.	10
Figura 4.1 Mapa geológico del trazado entre Calama y María Elena. Modificado de las cartas Tocopilla-M ^a Elena, la Hoja de Calama y la Hoja de Quillagua. Fuente: Elaboración propia.	11
Figura 4.2 Antecedentes de sondajes, TEM y gravimétricas recopiladas en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 4.3 Columna estratigráfica tipo de la zona de estudio, junto a la clasificación hidrogeológica por unidades. Fuente: Modificado de Montgomery & Associates (2007).	17
Figura 4.4 Perfil estratigráfico A-A'. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 5.1 Perfil de elevación del polje identificado al sur de la quebrada Ojos de Opache.....	20
Figura 5.2 Imagen del polje identificado al sur de la quebrada Ojos de Opache. Fuente: Durán D. (2013).....	21
Figura 5.3 Perfil de elevación del polje identificado en la quebrada Ojos de Opache. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 5.4 fotografía que muestra las abruptas paredes que encausan el flujo de agua de la quebrada Quetena. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 5.5 Litologías por las que escurren los ríos Loa y San Salvador, en negro se delimitan los tramos sectorizados para el análisis hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 5.6 Perfil B-B', Los sondajes solo representan información litológica. Fuente: Modificado de Montgomery & Associates (2007).	25

Figura 5.7 Perfil C-C' realizado con la información estratigráfica de sondajes exploratorios, en conjunto con datos de profundidad del basamento obtenidos por gravimetría. Los sondajes solo representan información litológica. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 5.8 Perfil estratigráfico D-D' realizado con la información estratigráfica de sondajes exploratorios, en conjunto con los niveles estáticos de pozos cercanos. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 5.9 Perfil estratigráfico E-E' realizado con la información estratigráfica del sondaje GMAY-N05, en conjunto con datos de profundidad del basamento obtenidos por gravimetría. El sondaje solo representan información litológica. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 5.10 Perfil estratigráfico F-F' realizado con datos estratigráficos del sondaje GMAY-N04, en conjunto con un levantamiento de transiente electromagnético (TEM) y datos de profundidad del basamento obtenidos por gravimetría. El sondaje solo representa información litológica. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 5.11 Perfil G-G'. Modificado del modelo litoestratigráfico interpretado del método de exploración geofísica TEM L-7 (Anexo D). Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 5.12 Perfil estratigráfico H-H', Realizado con la información estratigráfica de 4 sondajes estratigráficos y 3 sondajes TEM. Los sondajes solo representan información litológica. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 5.13 Perfil estratigráfico I-I', Realizado con la información estratigráfica de 2 sondajes estratigráficos y 2 sondajes TEM. Los sondajes solo representan información litológica. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 5.14 Ubicación de ensayos de bombeo, recuperación, Lefranc, Slug y Packer realizados sobre las unidades Opache, Jalquinche y Calama, los cuales son obtenidos de antecedentes. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 5.15 Ubicación de los puntos de ensayos de infiltración realizados en la zona de la confluencia entre los ríos San Salvador y Loa. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 5.16 Fotografía del montaje en terreno de uno de los ensayos de infiltración de doble anillo. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 5.17 Evolución de la tasa de infiltración en el tiempo para el ensayo N° 1, efectuado en un suelo limo arcilloso. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 5.18 Evolución de la tasa de infiltración en el tiempo para el ensayo N° 2, efectuado en un suelo arenoso. Fuente: Elaboración propia.	36

Figura 5.19 Profundidad del nivel estático registrados en la estación Aeropuerto entre los años 1993 y 2001. Fuente: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea [en línea].	37
Figura 5.20 Carta piezométrica de la unidad Opache - Quillagua, junto a los perfiles piezométricos de los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.....	39
Figura 5.21 Carta piezométrica de la unidad Calama - Sical, junto a los perfiles piezométricos de los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 6.1 Área delimitada para realizar el balance hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 6.2. Caudales superficiales medidos dentro del área en estudio. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 6.3 evaporación calculada para los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 6.4 Recargas antrópicas del sistema superficial y subterráneo. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 6.5 Ubicación geográfica de los derechos de agua actuales. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 6.6 Imagen satelital del río San Salvador y la quebrada Quetena. Fuente: Google Earth Pro.....	46
Figura 6.7 Caudal de infiltración de los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 6.8 principales puntos de afloramiento de los acuíferos Opache – Quillagua y Calama – Sical. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 6.9 Caudales del flujo subterráneo del área en estudio. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 6.10 Balance Hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 7.1 Ubicación geográfica de las muestras superficiales. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 7.2 Imagen de una de las punteras realizadas para la toma de muestras de agua subterránea. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 7.3 Diagrama de Piper de las muestras superficiales tomadas. Fuente: Elaboración propia.	56

Figura 7.4 Mapa con las concentraciones de cloruro [mg/l]. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 7.5 Mapa con las concentraciones de boro [mg/l]. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 7.6 Diagrama de la razón Cloro – Boro. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 8.1 Representación 3D de las capas definidas en el modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 8.2 Condiciones de borde consideradas para las capas del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 8.3 Parametrización de las capas del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 8.4 Comparación de los caudales obtenidos del balance hidrogeológico y los calculados por el modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 8.5 Valores calculados por el modelo numérico vs valores observados. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 8.6 Piezometría de la capa 1, obtenida del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 8.7 Piezometría de la capa 3, obtenida del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 9.1 Balance Hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.....	76

1. Introducción

1.1. Zona de estudio

La presente investigación se desarrolla en la región de Antofagasta entre la ciudad de Calama y la oficina de María Elena, específicamente en las coordenadas UTM 441125 / 7531093 y 504401 / 7505400 (Figura 1.1). En este lugar se encuentran los ríos Loa y San Salvador con una orientación y flujo de agua de dirección este – oeste, que aguas abajo de la confluencia de ambos ríos varía su dirección y sentido hacia el norte de la zona de estudio.

Por otro lado, también se encuentra en este lugar las quebradas Quetena y Ojos de Opache que aportan caudales de aguas importantes a las nacientes del río San Salvador.

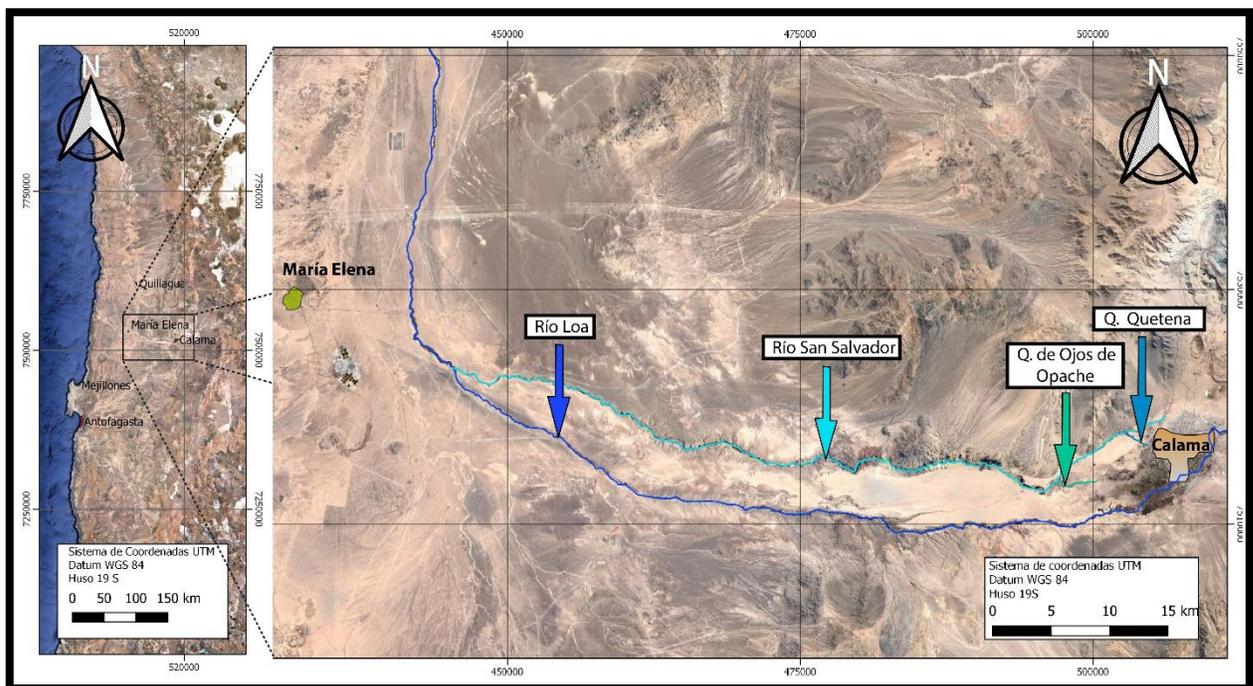


Figura 1.1 Imagen satelital del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

1.2. Problemática

Actualmente la inherente escasez del recurso hídrico y las anómalas concentraciones de arsénico presentes en el desierto del norte de Chile se han visto intensificadas producto del incremento acelerado de múltiples proyectos mineros, agronómicos, energéticos y turísticos, que han afectado a las localidades de Calama, María Elena y Quillagua en la región de Antofagasta.

En particular para la zona de estudio ha existido un aumento significativo en la demanda del recurso hídrico sobre al sistema hidrogeológico de la Cuenca del Río Loa, siendo una necesidad apremiante conocer el comportamiento hidrológico - hidrogeológico de este sistema para una gestión planificada de este recurso en la región.

A la fecha, entre Calama y María Elena, se desconoce el funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero y su interacción con los ríos Loa y San Salvador, hallando información focalizada principalmente al este, en la ciudad de Calama, y al oeste, en la confluencia de los ríos Loa y San Salvador.

Esta ausencia de información genera una gran incertidumbre que se extiende por 70 km entre la ciudad de Calama y la localidad de María Elena, la cual es de suma importancia esclarecer dado que este sistema acuífero es estratégico para el estudio antropogénico y corrobora la continuidad del flujo subterráneo de la cuenca de Calama hacia el oeste de la zona de estudio.

1.3. Hipótesis

El sistema acuífero entre Calma y María Elena está constituido por 3 unidades hidrogeológicas que presentan continuidad y permiten el flujo de agua desde oriente a occidente.

Las cuales interactúan con el sistema superficial, modificando el comportamiento hidrodinámico y aportando caudales cuantificables en la quebrada Quetena, la Quebrada de Ojos de Opache, las nacientes del río San Salvador y al sur oeste de la ciudad de Calama sobre el río Loa.

Interacción que afecta la hidroquímica del río San Salvador y sectoriza el comportamiento hidrogeológico de los ríos Loa y San Salvador con el sistema subterráneo.

1.4. Objetivos

- **Objetivo General**

Resolver el funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero entre la ciudad de Calama y la localidad de María Elena.

- **Objetivos Específicos**

- Caracterizar las diversas unidades hidrogeológicas del sistema acuífero.
- Caracterizar la interacción entre el río San Salvador y el sistema subterráneo.
- Caracterizar el funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos.
- Caracterizar los parámetros hidráulicos de las diversas unidades hidrogeológicas.
- Resolver el balance hídrico del sistema acuífero.
- Caracterizar hidroquímicamente el río San Salvador.

- Validar numéricamente el funcionamiento hidrodinámico propuesto.
- Resolver el funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero bicapa en los 70 km de ausencia de información.

1.5. Metodología

Para resolver el funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero bicapa de 70 km ubicado entre la ciudad de Calama y la localidad de María Elena, se utiliza la información existente al inicio y al final de sistema en cuestión.

Para esto en primer lugar se realiza una recopilación y un exhaustivo análisis crítico de antecedentes que permiten conocer el funcionamiento hidrológico del sistema superficial y el comportamiento hidrogeológico de la cuenca de Calama ubicada al este de la zona en estudio. Luego a través del análisis de mapas de elevación digital, mapas geológicos y en función de la revisión de 62 sondajes, la reinterpretación de 75 estudios geofísicos TEM y de 8 gravimétricas, se resuelve la estratigrafía y geometría del sistema acuífero en conjunto con la geomorfología de la región.

Posteriormente una vez resuelta la geometría, a través del uso de niveles piezométricos registrados en la DGA y de observaciones efectuadas en terreno, se analiza el comportamiento hidrodinámico de los acuíferos que permite caracterizar la evolución espacial piezométrica de cada unidad y su relación con los ríos San Salvador y El Loa.

Después, en función de antecedentes se caracterizan los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas, que se validan más adelante modelando el flujo de agua por medio del código VISUAL MODFLOW. Por otra parte, a través de ensayos de infiltración, realizados en terreno con el método del doble anillo, se determina la tasa de infiltración del lecho de los ríos permitiendo caracterizar la infiltración del sistema superficial al subterráneo.

Luego, mediante el análisis de antecedentes, pruebas de aforo y utilizando la información previamente generada se resuelve el balance hidrogeológico del sistema, el cual posteriormente es validado hidroquímicamente con el análisis de muestras de agua superficiales y subterráneas tomadas en terreno, mediante el diagrama de Piper y un balance de los elementos conservativos Cloro y Boro.

Posteriormente a través del código VISUAL MODFLOW se reproduce el modelo conceptual propuesto y se realiza un análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica de las unidades.

Finalmente, este modelo conceptual se valida mediante una discusión integral de los resultados obtenidos.

2. Revisión de Antecedentes

2.1. Estudios anteriores

- **Hidroquímica del río Loa: un prototipo para el estudio de hoyas hidrográficas en el norte de Chile. Orellana, 1985.**

Estudio Hidroquímico de las aguas del río Loa, enfocado en el contenido de los elementos Na, K, Ca, Mg, Sr, Rb, Li, As, V, F, Fe, Cu, Zn, B y los aniones Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- . Esta investigación divide la cuenca del río Loa en tres tramos y los caracteriza hidroquímicamente. Finalmente Identifica una tendencia de las sustancias a aumentar su concentración durante su curso, concluyendo que el aumento considerable de las concentraciones de Cl, As y B en la localidad de Quillagua podrían generarse por aportes subterráneos provenientes de la Pampa del Tamarugal.

- **Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca Río Loa. Cade-Idepe, 2004.**

Este estudio analiza el caso de la cuenca del río Loa y su objetivo general es conocer la calidad natural y actual de las aguas. En particular, tipificar y segmentar los cursos y cuerpos de agua superficial para luego identificar aquellas aguas que presentan una calidad idónea para diversos usos: in situ, extractivos y para la preservación de la biodiversidad.

Dentro de las actividades para la elaboración de este estudio se reúnen antecedentes relacionados principalmente con datos vectoriales (cartografía), clima, geología, volcanismo, hidrogeología, geomorfología, suelos, flora, fauna, y asentamientos humanos, con la meta de caracterizar y describir lo más general posible la cuenca del río Loa.

Además, se crea una base de datos integrada que toma en consideración información fluviométrica, proporcionada por la DGA, y datos de calidad de aguas junto a parámetros físico-químicos recopilados de diversas fuentes.

- **Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la cuenca del Río Loa. DARH. 2005**

Este estudio tiene como finalidad la evaluación de manera global y detallada, a nivel de cuenca y subcuenca, de la disponibilidad de recursos hídricos de la cuenca del río Loa. La determinación de la demanda se basa en trabajos realizados en la Dirección Regional DGA II, y en el Departamento de Administración de Recursos Hídricos, y considera el levantamiento de solicitudes presentadas en la Dirección General de Aguas hasta septiembre de 2002.

El alcance de este estudio es determinar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Loa y servir como herramienta de apoyo en la resolución de futuras solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales.

- **Generación de información geológica complementaria en la elaboración de la norma secundaria de las aguas del Río Loa. Rojas, et al. 2006.**

Este estudio se enfoca en proponer, modificar y ratificar fundamentalmente los parámetros críticos y/o conflictivos de la Calidad Objetivo establecidos en el proyecto de norma secundaria de calidad de aguas superficiales del río Loa.

Este proyecto se basa en la recopilación de datos de la DGA (2004) correspondientes a promedios estacionales para diversas estaciones de monitoreo a lo largo del río Loa entre el período 1983-2000, con mediciones de 21 parámetros hidroquímicos: B, As, Cl, SO₄, Hg, Mn, S, NO₃, Mo, Cu, Zn, CN, CE (conductividad eléctrica), RAS (razón de adsorción de Sodio), SST (sólidos suspendidos totales), SD (sólidos disueltos), HC (hidrocarburos), DBO₅ (tasa oxígeno 5 días), OD (oxígeno disuelto), CF (coliformes fecales), y CT (coliformes totales). Asimismo, se usan datos del SAG del período 1997-2000 y datos de monitoreo ambiental de la mina El Abra del período 1996-2000. Con los cuales se confeccionan mapas con la distribución espacial por elemento.

- **Simulación hidrogeológica de la explotación del acuífero freático ubicado en la formación Opache, II Región, norte de Chile. Fuentes, 2009.**

Este estudio se orienta en determinar los efectos que se podrían producir en el acuífero freático de Calama al explotar un caudal de 30 lt/s en la zona de Agua Pura y Las Cascadas en el río Loa. Esta investigación se realiza utilizando antecedentes geológicos, hidrogeológicos e hidráulicos para mejorar el modelo hidrogeológico desarrollado en el programa MODFLOW por la DGA en el informe técnico “Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea factibles de constituir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del río Loa, II Región”

- **Estudio acuífero de Calama sector medio del río Loa, región de Antofagasta. Matraz consultores asociados S.A. 2012.**

Este estudio se elabora para la DGA con la finalidad de construir un modelo hidrogeológico del acuífero de Calama, en el sector medio del río Loa, en base a la integración de la información disponible que incluya la materialización tanto de un modelo conceptual como numérico, junto con la ejecución de una campaña de prospección geofísica en el área de estudio.

Para la implementación del modelo hidrogeológico se llevan a cabo actividades previas que incluyen ámbitos como la geología, geofísica e hidrogeología que permiten en una etapa siguiente, la realización del modelo conceptual y numérico.

En lo referente a la hidrogeología, se definen seis unidades hidrogeológicas las cuales se agrupan en 4 macro unidades; acuífero superior, acuitardo, acuífero inferior y

basamento. cuyos parámetros hidráulicos, tales como permeabilidad y coeficientes de almacenamiento son obtenidos mediante ensayos de bombeo, recuperación, Lefranc, Slug y Packer.

- **Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Mayco Consultores. DGA. 2013**

Este estudio corresponde a un levantamiento de información hidrogeológica del sector Alto de la cuenca del Loa. Específicamente, el objetivo del estudio es la revisión y análisis de antecedentes geofísicos, geológicos, estratigráficos e hidrogeológicos, para definir y materializar una campaña de prospección geofísica complementaria y, a partir de esto, generar una base de datos consolidada de la información de las características y geometría del acuífero ubicado aguas arriba de la ciudad de Calama.

- **Sectorización de los acuíferos de la cuenca del río Loa. KNIGHT PIÉSOLD S.A. 2014.**

Este estudio es una sectorización de los acuíferos de la cuenca del río Loa, en la región de Antofagasta, cuyo objetivo general es la revisión y análisis de antecedentes junto a la generación de información para realizar una sectorización de estos acuíferos. Este estudio contempla la realización de 80 estaciones TEM distribuidas en los sectores de mayor importancia hidrogeológica que junto a la geología, topografía, geofísica, sondajes y derechos de agua otorgados a la fecha permiten sectorizar la cuenca del río Loa y calibrar en régimen transiente el modelo hidrogeológico realizado años anteriores con el programa MODFLOW.

3. Marco Geográfico

3.1. Clima y vegetación

Las características climáticas en la región de Antofagasta se encuentran localizadas en franjas longitudinales desde la costa hacia la cordillera de los Andes. En particular para la zona de estudio (Figura 3.1) se desarrolla un clima desértico interior, caracterizado por una extrema aridez, ausencia de humedad, gran sequedad atmosférica, alta irradiación solar y una amplitud térmica que oscila entre los 30°C y los 2°C entre el día y la noche.



Figura 3.1 Fotografía representativa del clima y vegetación que caracteriza la zona de estudio. Fuente: Bruning J. (2015)

Las precipitaciones de este sector son escasas, Las cuales ocurren generalmente en los meses de febrero a marzo producto del invierno boliviano y en los meses de mayo y julio por efecto del característico clima desértico interior.

Según los registros de la estación Calama, las precipitaciones alcanzan una media anual de 3.32 mm entre los años 1993-2017, identificando en particular para el periodo 2011-2015 una fuerte alza en las precipitaciones que superan los 5 mm anuales (Anexo A) y estarían relacionadas con el pasado fenómeno del Niño que afecto fuertemente a la región de Antofagasta.

Por otro lado, cabe destacar que a pesar de la escasa aridez que caracteriza a la zona de estudio, los sistemas superficiales y subterráneos de la región mantienen sus niveles gracias a las precipitaciones que se desarrollan en el altiplano entre los meses de verano, que debido al invierno boliviano permite una precipitación promedio anual que oscila entre los 20 y 100 mm.

En cuanto a la vegetación de la región, esta se encuentra pobremente desarrollada debido a las características climáticas que impiden el desarrollo de cualquier tipo de especies. Sin embargo, algunas de ellas han logrado arraigarse a esta región, de las cuales se destaca la presencia de pastos y tamarugos que se desarrollan contiguos al lecho de los ríos y en aquellas zonas donde el nivel piezométrico corta la superficie (Figura 3.2).

Finalmente, dadas las condiciones climáticas descritas, para la ciudad de Calama la evaporación media según la DGA (2003) se estima de 6 a 10 mm/día.



***Figura 3.2 fotografía de la exigua vegetación que caracteriza a la zona de estudio.
Fuente: Bonacin A. (2008).***

3.2. Geomorfología

En la región de Antofagasta desde el punto de vista geomorfológico se distinguen 4 unidades morfoestructurales que a grandes rasgos presentan una orientación Norte-Sur. De Este a Oeste se encuentran la Cordillera Occidental (CO), La Precordillera (PC), La Depresión Central (DC) y la Cordillera de la Costa (CC) (Figura 3.3).

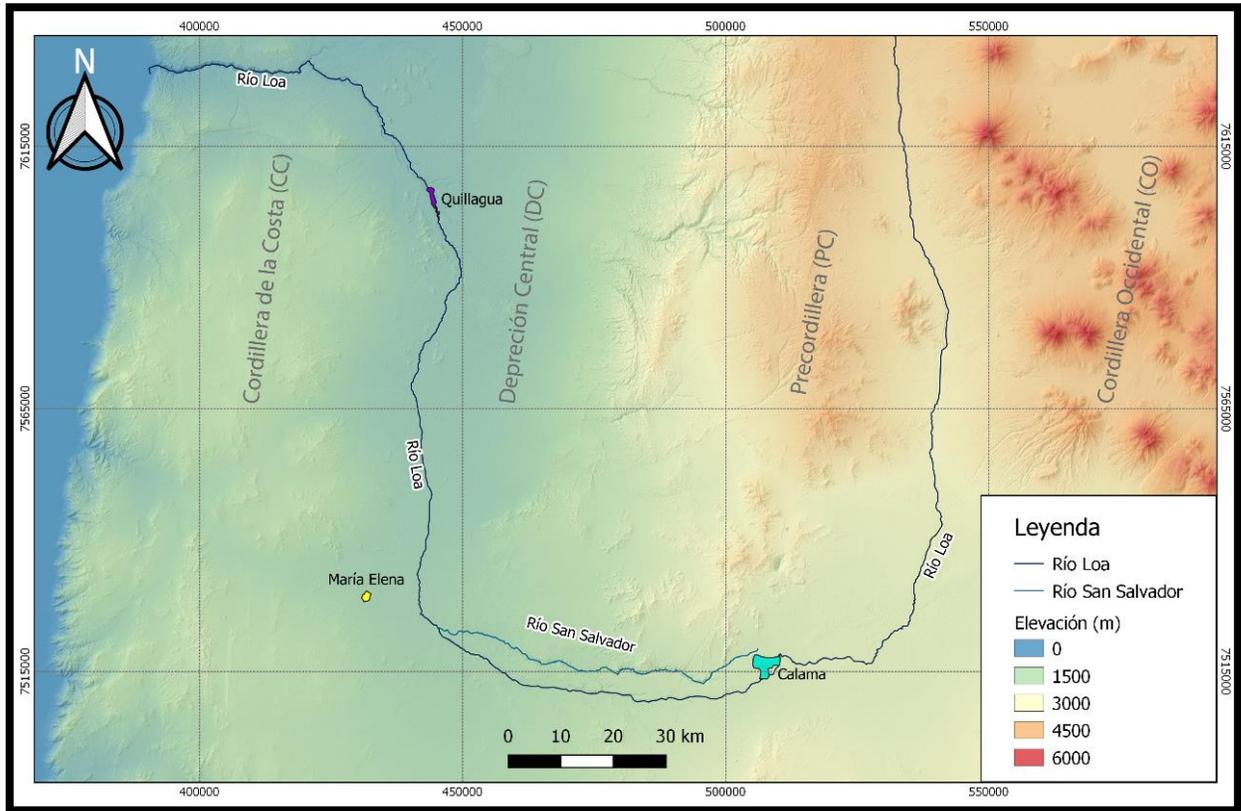


Figura 3.3 Mapa de elevación de la región de Antofagasta. Fuente: Elaboración propia.

A escala regional la zona de estudio se encuentra situada dentro de la Depresión Central y la precordillera, siendo limitada tanto al este y al oeste por el característico relieve alzado e irregular de la cordillera occidental y la cordillera de la costa respectivamente. Esta se caracteriza por presentar una topografía parcialmente regular, representada por una planicie de 70km de largo con una pendiente promedio de $0,9^\circ$, cuya altitud, de este a oeste, varía desde los 2360 a los 1270 msnm (perfil B-B', Figura 3.4).

Esta zona muestra en su extensión cárcavas de erosión de hasta 500 metros de profundidad, labradas sobre antiguos cursos de agua superficial que cortan la estratigrafía del lugar. Dentro de estas unidades geomorfológicas se destaca la presencia de dos grandes cañones paralelos y de orientación este oeste, que encausan a los ríos San Salvador y Loa, y que además exhiben una diferencia de profundidad entre ambas morfologías, tal que el río San Salvador se encuentra escurriendo a unos 80 metros más profundo que el río Loa a la misma longitud (perfil A-A', Figura 3.4).

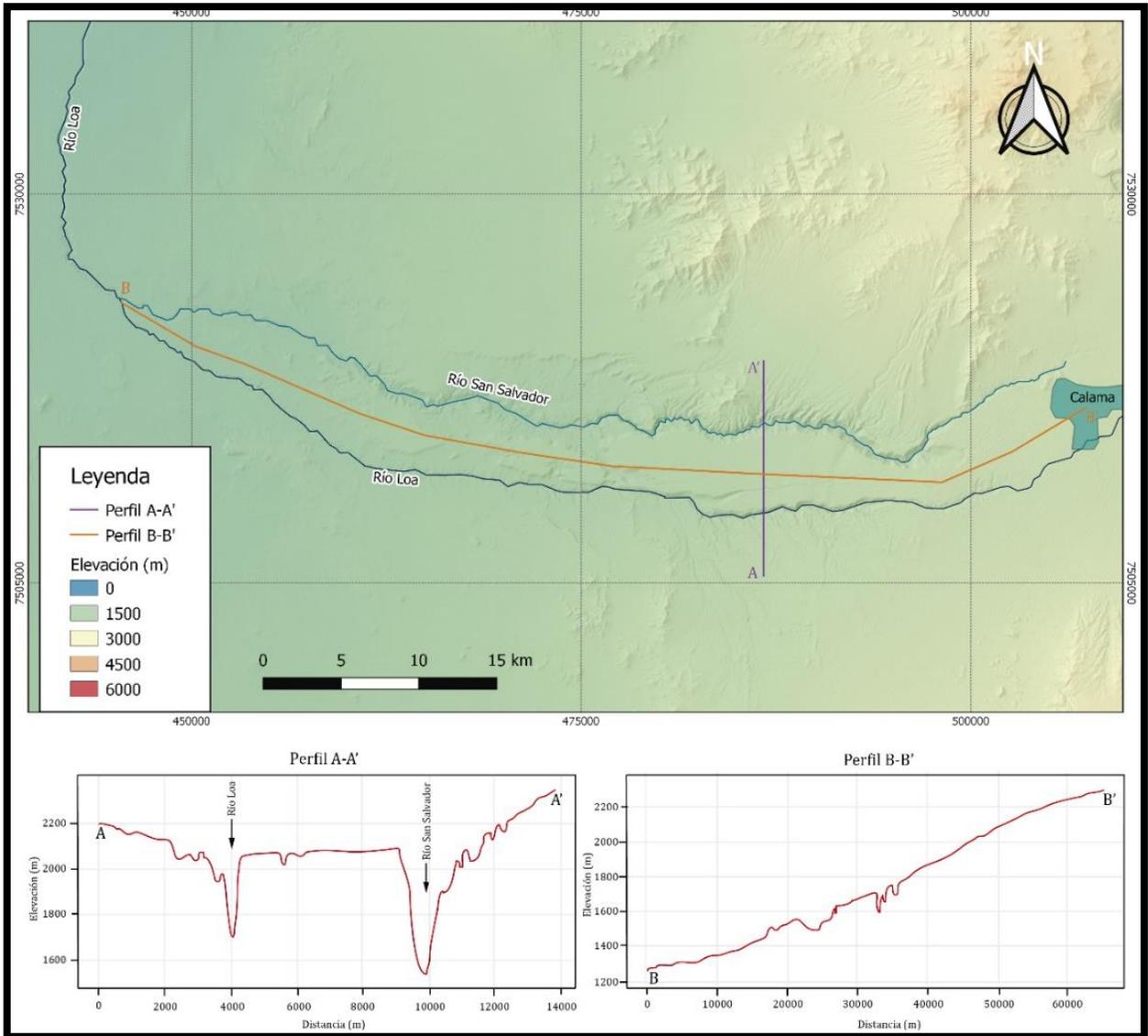


Figura 3.4 Mapa de elevación de la zona de estudio junto a un perfil de elevación transversal (izquierda) y longitudinal (derecha). Fuente: Elaboración propia.

4. Marco geológico

4.1. Geología superficial

- La geología superficial de la zona de estudio (Figura 4.1) se obtiene de la información recopilada de las cartas Tocopilla-M^a Elena (Medina et al., 2012), la Hoja de Calama (Marinovic y Lahsen, 1984), la Hoja de Quillagua (Skarmeta y Marinovic, 1981) y de la reinterpretación de sondajes y gravimétricas de la zona en estudio (Anexo B, Anexo C y Anexo D) (Figura 4.2).

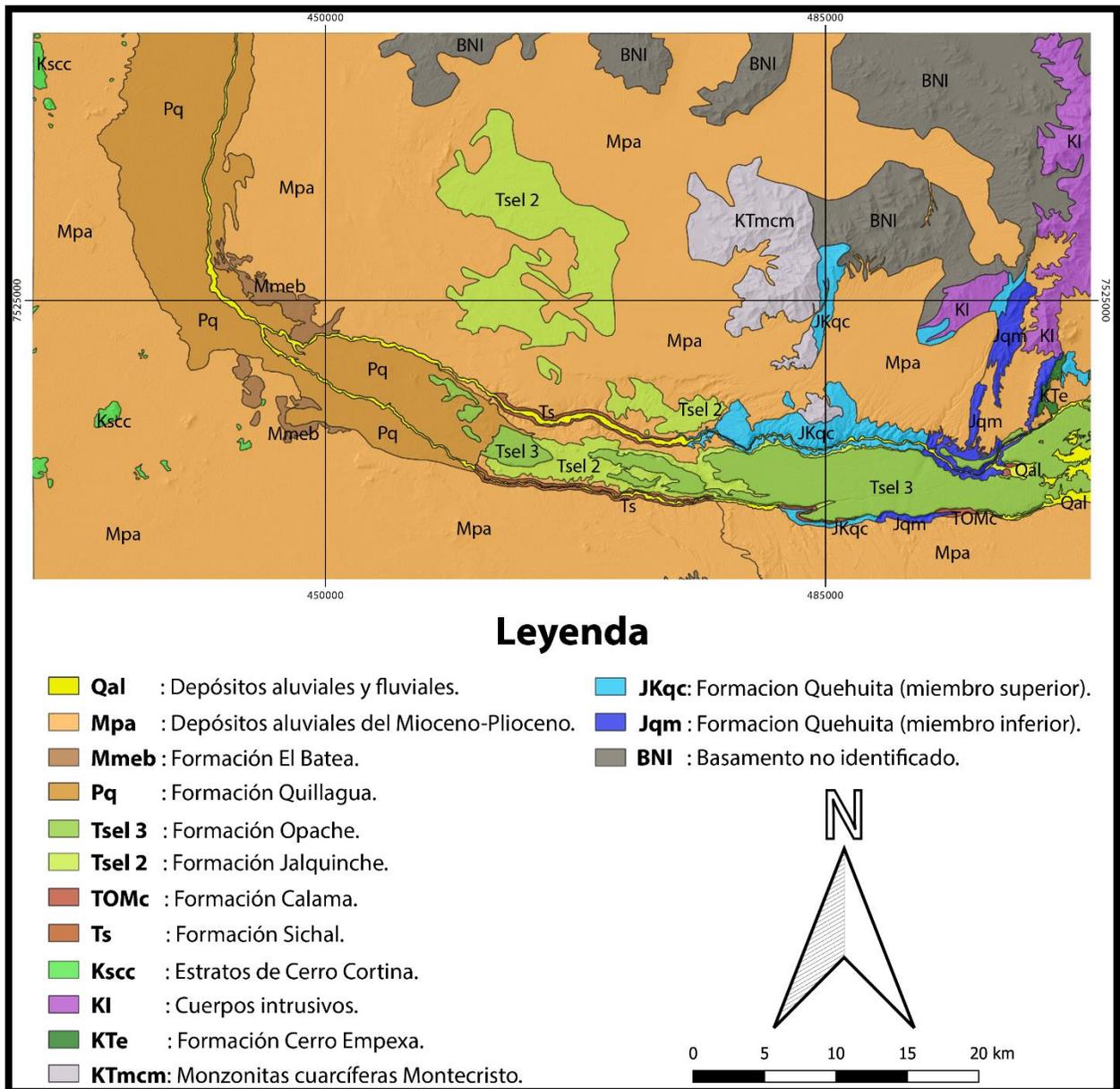


Figura 4.1 Mapa geológico del trazado entre Calama y María Elena. Modificado de las cartas Tocopilla-M^a Elena, la Hoja de Calama y la Hoja de Quillagua. Fuente: Elaboración propia.

Para este caso particular de la investigación, las formaciones y unidades que juegan un rol importante y son utilizadas en la caracterización hidrogeológica del sistema acuífero corresponden a las formaciones Calama, Sichal, Jalquinche, El Batea, Opache y Quillagua, en conjunto con los depósitos aluviales del Mioceno-Plioceno (MPa) y los depósitos aluviales y fluviales (Qal), lo cuales son descritos a cabalidad a continuación.

- **Formación Calama (TOMc) (Oligoceno a Mioceno Inferior?), (Naranjo y Paskoff, 1981).**

Conformada por una potente secuencia de conglomerados, guijarros arenosos y areniscas con geometría laminada (May, 2005) compuestas por arenas gruesas, gravas gruesas a finas, arenas gravosas con bolones y escasos niveles delgados de arenas limosas. Presenta una matriz constituida por arenas medias a finas, con fracciones de limo y arcillas escasas. En general, la unidad se encuentra mal estratificada y mal clasificada cuyo espesor varía entre los 50 y 240 m.

Según May (1997) los depósitos presentes en la formación Calama corresponden a depósitos que coalescían en los abanicos aluviales que limitaban los frentes de montaña que rodeaban la cuenca de Calama.

Límites y distribución: la Formación Calama es la unidad estratigráfica inferior dentro de la Cuenca de Calama. Esta puede ser encontrada a lo largo de la cuenca cruzando los cañones del río San Salvador y río Loa al oeste de Calama, los cerros Calama, Loma Negra y Milagro al noreste de Calama y la quebrada tuina y yalqui al este de Calama (May et al., 2005).

La base de esta formación se encuentra discordantemente sobre basamento pre-oligoceno (triásico a cretácico) y sobre esta al oeste yace discordantemente la formación Jalquinche (May et al., 2005).

- **Formación Sichal (Ts) (Oligoceno – Mioceno) (Maksaev, 1978).**

Secuencia continental clástica de hasta 1.000 m de espesor constituida por conglomerados de grano grueso y fino, brechas conglomeráticas y areniscas cuarcíferas, de grano grueso que presentan intercalaciones locales de lutitas yesíferas y yeso macizo. Arealmente, los conglomerados constituyen el 90% del volumen total de rocas aflorantes, los cuales están compuestos por fragmentos subangulosos a subredondeados de mala selección y clasificación cuyo tamaño variable oscila entre 1 y 10 cm (Skarmeta 1982).

Límites y distribución: Se dispone en discordancia sobre granitoides paleozoicos y sobre formaciones mesozoicas subyaciendo discordantemente a ignimbritas del mioceno superior de la formación Ichuno (Skarmeta 1982).

- **Formación Jalquinche (Tsel 2) (Mioceno medio) (May et al., 2005).**

Corresponde a una secuencia bien estratificada constituida principalmente por intercalaciones de areniscas finas, arcillas con niveles limo-arenosos y escasos niveles

de gravas, de 10 a 50 cm de espesor (May et al., 2005). La potencia del conjunto varía entre los 30 y 240 m, presentando particularmente un espesor promedio de 40 m en la subcuenca de Calama-Chuquicamata (Fuentes, 2009).

Límites y distribución: La formación Jalquinche se extiende desde el cerro millo, ubicado al oeste de la cuenca de Calama, hasta 7 km al sur de chiu-chiu. Esta formación sobreyace discordantemente a la Formación Calama y se encuentra localmente cubierta por la Formación Opache (May et al., 2005).

- **Formación Opache (Tsel 3)(Mioceno tardío – Plioceno) (May et al., 2005).**

A lo largo de los flancos de la cuenca de Calama, particularmente al oeste, la formación Opache está representada por conglomerados y areniscas con cemento carbonatico oscuro altamente endurecido. Los conglomerados y areniscas de la formación son clasto-soportados con matriz carbonática cemento soportada. En las zonas donde es posible identificar capas, estas presentan un espesor de hasta 0,5 m con superficies basales planas y ocasionalmente erosivas, las cuales son lateralmente continuas con estratificación paralela y ocasionalmente cruzada. En general los depósitos carbonatados marginales de cuenca presentan un extenso desarrollo de caliche. En la región, particularmente 10 km al sur oeste de Calama donde se encuentra la quebrada Opache, esta formación presenta un espesor de 66 metros (May et al., 2005).

Límites y distribución: La formación Opache se extiende tan lejos como hacia el oeste de chiu-chiu y al norte de conchi, aflorando al oeste de Calama en el área de los cerros de Guacate y Cerro Millo. Esta formación sobreyace a la formación Jalquinche y limita en el techo con la superficie actual.

- **Formación Quillagua (Pq) (Plioceno) (Naranjo y Paskkoff, 1982).**

Corresponde a una secuencia continental de ambiente fluvio-lagunar, constituida por marga pulvurenta de color crema, diatomita blanca, caliza con intercalaciones de tufa travertina, lutita pardusca y grava arenosa (Medina et al., 2012). Su potencia varia de algunos metros a decenas de metros, llegando a estimar un espesor de más de 100 m al norte de la localidad de Quillagua (Naranjo y Paskkoff, 1981). Se interpreta que esta unidad se generó en un medio de depositación netamente lacustre (Naranjo y Paskkoff 1981).

Límites y distribución: esta formación se distribuye, en la pampa del tamarugal, desde el norte de la localidad de Quillagua, hasta el sur de María Elena, entre la cordillera de la costa y Sierras de Moreno. Esta formación a la latitud de María Elena sobreyace al miembro medio e inferior de la Formación el Loa (Formación Jalquinche). Según Naranjo y Paskkoff 1981 esta formación seria contemporánea a la Formación Chiu-Chiu.

- **Formación El Batea (Mmeb) (Plioceno) (Naranjo y Paskkoff, 1982).**

Secuencia continental evaporitica de estratos horizontales, ligeramente consolidados, constituidos por arenisca gris-parda y gipsarenita blanquecina, limolita arenosa, tufita fina

y arcillolita rojiza, con intercalaciones de anhidrita y de tobas (Medina et al, 2012) llegando a presentar alrededor de 100 m de potencia en El Cerro El Batea (Naranjo y Paskkoff, 1982).

Límites y distribución: La formación El Batea está ampliamente distribuida al norte del río San Salvador, entre los cerros de Monte Cristo y el río Loa, y en los alrededores de la confluencia de este con el río San Salvador. Esta formación cubre y rellena las extensas depresiones excavadas en la Formación El Loa (Naranjo y Paskkoff, 1982) y en la zona subyace a la formación Quillagua (Medina et al, 2012)

- **Depósitos aluviales del mioceno-Plioceno (MPa) (mioceno-Plioceno) (Medina et al., 2012)**

Gravas y arenas, poco consolidadas clasto soportadas, mal seleccionadas, estratificadas en capas centimétricas, de baja consolidación que alternan con capas centimétricas a milimétricas de arenas laminadas.

- **Depósitos aluviales y fluviales (Qal) (Plioceno superior - Holoceno).**

Corresponden a depósitos no consolidados de cursos de aguas abandonados, recientes y ocasionales, compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas o a una acumulación caótica de bloques producto de derrumbes o colapsos gravitacionales.

4.2. Evolución tectóno-sedimentaria

Actualmente se piensa que la evolución tectóno-sedimentaria de la cuenca del río Loa, presenta un carácter regional, siendo la evolución particular de la Cuenca de Calama representativa de los procesos ocurridos en el área de estudio. Según Blanco (2008) la Cuenca de Calama exhibe cuatro episodios paleogeográficos principales.

El primero de ellos ocurre durante el Eoceno Medio al Eoceno Superior, período en el cual se generó la exhumación de grandes bloques de basamento Paleozoico y de unidades pre-eocenas (Maksaev y zentilli, 1999, Tomlinson et al. 2001), que originaron prominentes relieves y cuencas (Arriagada et al., 2000, Blanco et al., 2003, Blanco y Tomlinson, 2009) que fueron rellenadas por sedimentos de llanura aluvial trenzada, acumulados discordantemente sobre el basamento pre-Eoceno. Presentando una correlación con el comienzo de la depositación de las formaciones Calama y Sical.

Posteriormente en el segundo episodio, ocurrido entre el Oligoceno y Mioceno Inferior, se generó una cuenca de tipo hemigraben de carácter endorreico (Blanco, 2008) con la tasa más alta de sedimentación de toda su evolución, depositando brechas sedimentarias de grano medio, conglomerados finos y gruesos, areniscas limosas de guijarro, limolitas y arcillolitas laminadas. Todos estos correlacionables a la depositación de las formaciones Calama y Sical.

Luego en el tercer episodio ocurrido durante el Mioceno Inferior a Superior bajo, se inicia con escasa actividad tectónica la expansión de la cuenca por erosión de sus bordes, que originó la depositación de material fino de las formaciones Jalquinche y El Batea.

Finalmente, en el cuarto y último episodio paleogeográfico, se produce la expansión máxima de la cuenca, con tasa de sedimentación entre 17 a 27 m/Ma, formando depósitos de conglomerados, margas diatomíticas y areniscas cementadas por carbonato y calizas de las formaciones Opache y Quillagua. En este período se configura una red hidrológica similar a la actual, que posteriormente entre el Plioceno y Pleistoceno adquiere un carácter exorreico producto de la apertura hidrológica.

4.3. Estratigrafía

El análisis estratigráfico se realiza en función de la reinterpretación de 62 sondajes con información litológica (Anexo B y Anexo C), 75 perfiles geofísicos TEM (Anexo D) y 8 gravimétricas (Figura 4.2).

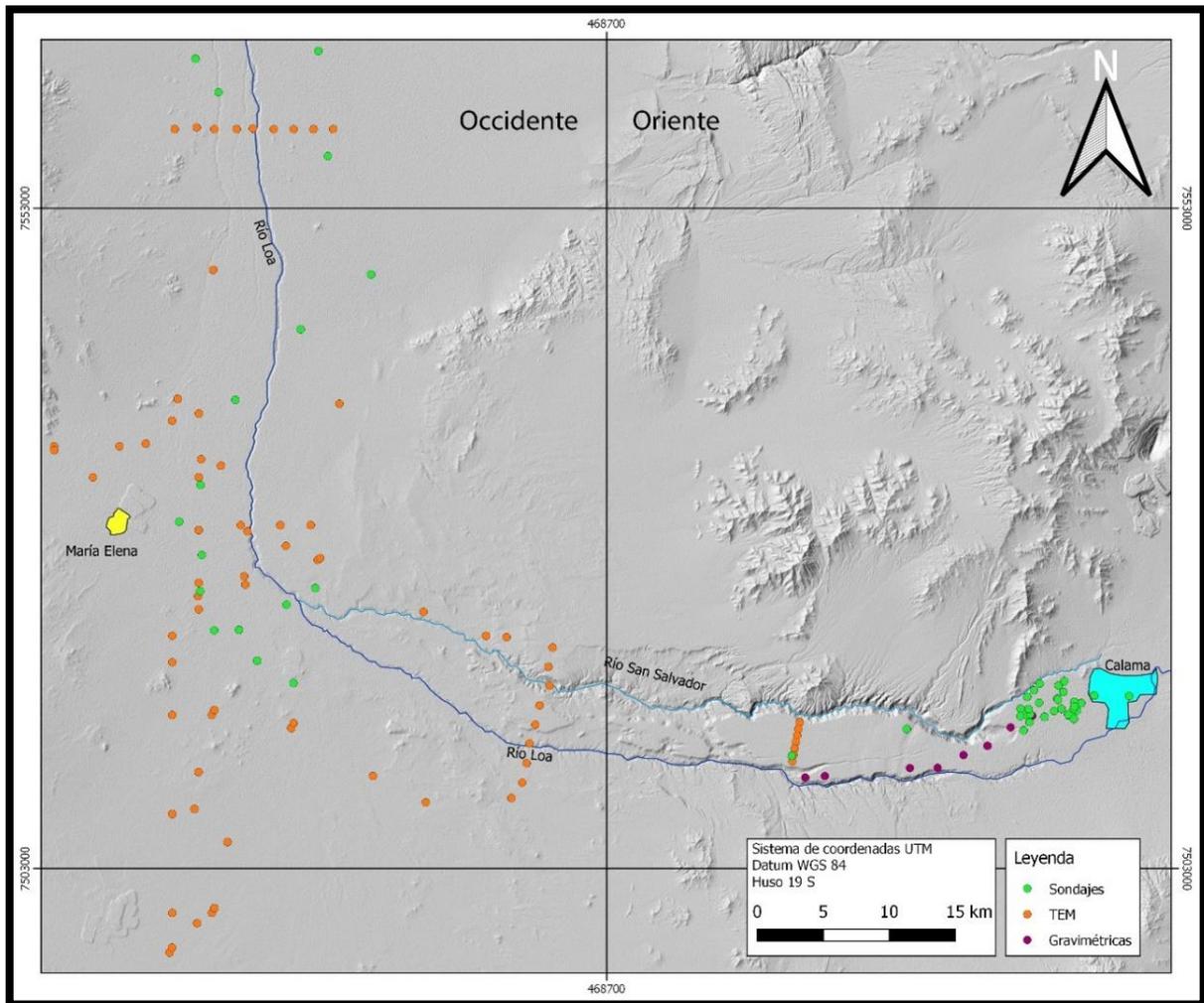


Figura 4.2 Antecedentes de sondajes, TEM y gravimétricas recopiladas en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

En los 18 sondajes del extremo occidental del área de estudio (Anexo B) se identifica en los primeros metros una capa de sedimentos calcáreos, arenas y gravas arenosas de 20 metros de espesor que son asignadas a la formación Quillagua. Subyacentemente se identifica una capa de intercalaciones de limos, arcillas y arenas grises, parduscas y rojizas de 140 metros de espesor que son asignadas como una interdigitación de la formación El Batea y la unidad MPa. Por último, en la base de ambas unidades, se distingue una potente capa de espesor aparentemente variable (100 a 390 metros) de gravas arenosas intercaladas con escasos niveles de arena y limo asignadas a la formación Sichal.

Por otra parte, para los 44 sondajes del extremo oriental (Anexo C) se identifica en el techo una capa de arenas y gravas de cemento calcáreo de 60 metros de espesor asignadas a la formación Opache, seguido de una secuencia de limos y arcillas de 110 metros de potencia interpretadas como de la formación Jalquinche que asienta sobre depósitos de gravas arenosas y arenas gravosas de 100 metros de espesor asignadas a la formación Calama.

A grandes rasgos la estratigrafía existente en oriente y occidente presenta una aparente correlación estratigráfica, distinguiendo en primer lugar que la Formación Opache y la Formación Quillagua, ambas ubicadas en el techo de las columnas estratigráficas, presentan una composición litológica de similares características hidrogeológicas (sedimentos carbonáticos) cuyos períodos de depositación coetáneos implican por lo tanto una correlación cronoestratigráfica de la formación Opache del borde oriental con la formación Quillagua del borde occidental.

Por otro lado, en la base de las formaciones anteriores y considerando los períodos de depositación de estas unidades subyacentes, se identifica que la formación Jalquinche se correlaciona cronoestratigráficamente con la formación El Batea y la unidad MPA. Sin embargo, cabe destacar que la composición litológica de la unidad MPA es distinta a los limos y arcillas de Jalquinche y El Batea dado que el contenido de gravas y arenas presente en esta última es mayor. Por lo tanto, la correspondiente unidad de arcillas de Jalquinche del borde oriental se correlaciona cronoestratigráficamente con la interdigitación de limos, arcillas y gravas de la formación El Batea y la unidad MPa del borde occidental.

Finalmente, en la base de las columnas estratigráficas de oriente y occidente se reconoce que las formaciones Calama y Sichal, son depositadas coetáneamente y presentan una composición litológica de similares características hidrogeológicas (Gravas y arenas), exhibiendo una mayor potencia de la formación Sichal al oeste. En consecuencia, la formación Calama del borde oriental se encuentra correlacionada cronoestratigráficamente con la formación Sichal del borde occidental.

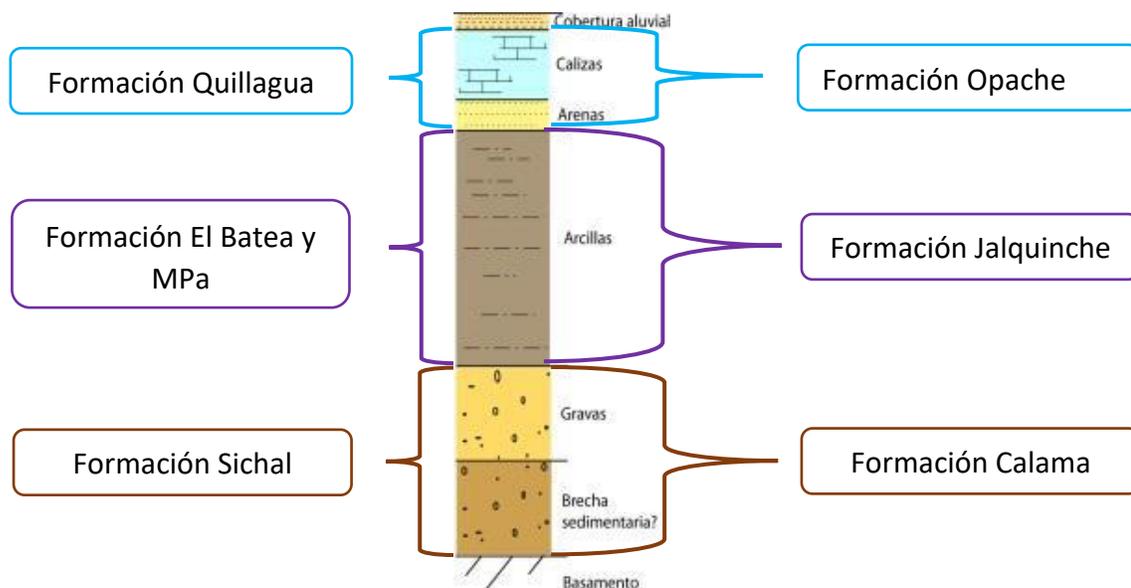


Figura 4.3 Columna estratigráfica tipo de la zona de estudio, junto a la clasificación hidrogeológica por unidades. Fuente: Modificado de Montgomery & Associates (2007).

De lo anterior e integrando los 75 sondajes TEM y las 8 gravimétricas existentes (Figura 4.2), se obtiene el perfil estratigráfico A-A' de la Figura 4.4, el cual muestra la correlación estratigráfica entre las formaciones Opache – Quillagua, Jalquinche - El Batea – Mpa y Calama – Sichal a lo largo de toda la zona de estudio.

De este perfil se infiere la existencia de tres unidades hidrogeológicas características de la zona en estudio, la primera de ellas corresponde a la Unidad Calama – Sichal, compuesta por gravas y arenas que se encuentran en la base del perfil estratigráfico. La segunda, que subyace a la unidad anterior pertenece a la unidad Jalquinche - El Batea, compuesta por limos y arcillas cuyo contenido de sedimento grueso aumenta hacia occidente. finalmente, la tercera corresponde a la unidad Opache – Quillagua, conformada principalmente por sedimentos calcáreos ubicados en el techo del perfil estratigráfico.

Además, se distingue que las cárcavas de erosión de los antiguos cursos de agua superficial cortan la estratigrafía de la unidad Opache – Quillagua generando una discontinuidad de esta unidad entre oriente y occidente.

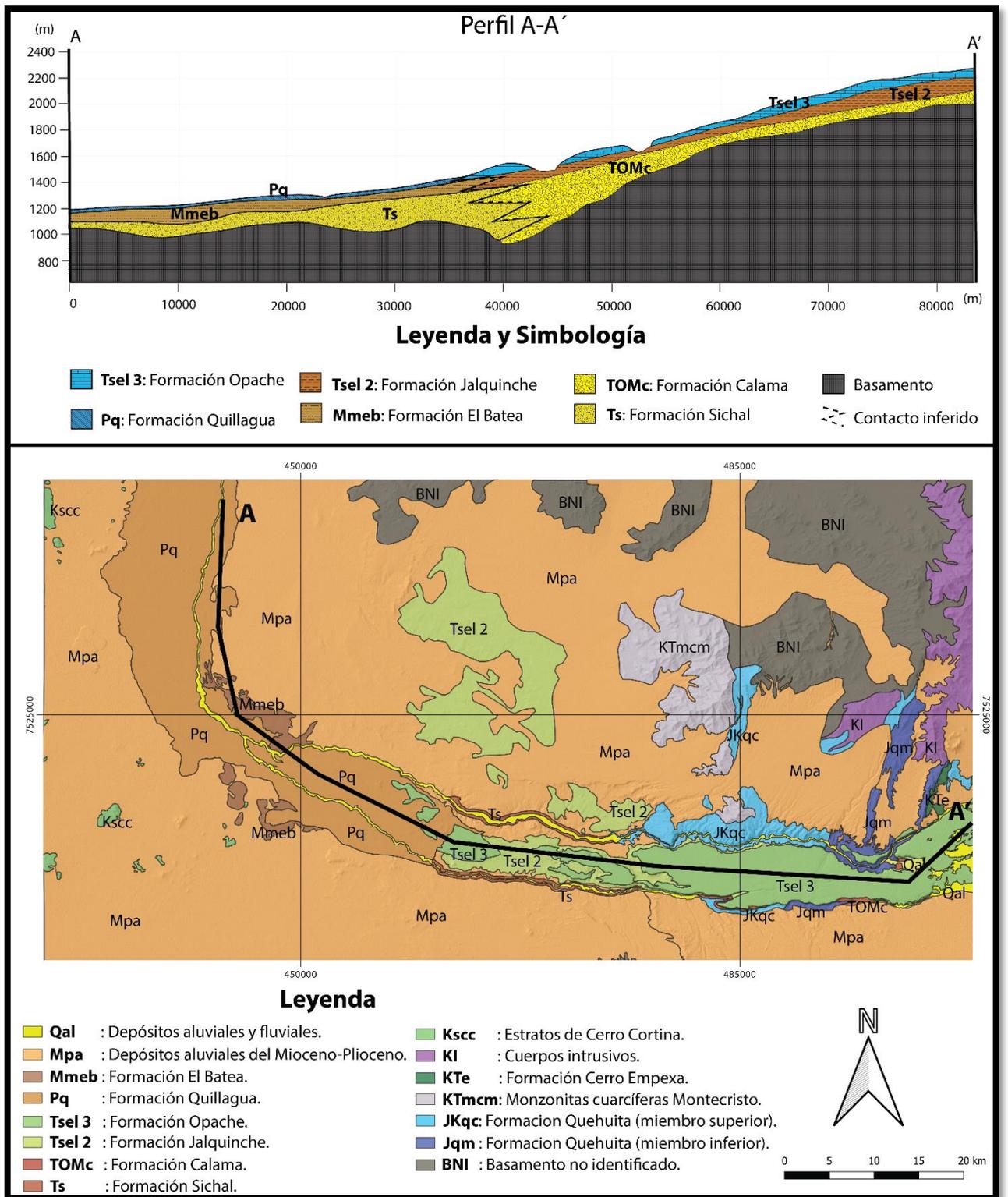


Figura 4.4 Perfil estratigráfico A-A'. Fuente: Elaboración propia.

5. Caracterización hidrogeológica

En función de antecedentes y considerando las tres unidades hidrogeológicas previamente definidas se caracterizan hidrogeológicamente las unidades a continuación:

- **Unidad Calama - Sical:** Esta unidad ubicada en la base de la columna (Figura 4.3) presenta un alto potencial hidrogeológico debido a sus características litológicas que permiten la circulación y el almacenamiento de agua, además dado que se encuentra limitada en el techo por la unidad Jalquinche-El Batea de baja permeabilidad (Figura 4.3) la unidad presenta las características propias de un acuífero confinado.
- **Unidad Jalquinche – El Batea:** Esta unidad se encuentra separando a las unidades acuíferas Calama-Sical y Opache-Quillagua (Figura 4.3), presentando un alto contenido de limos y arcillas que impiden la circulación del flujo de agua, presentando por consiguiente un carácter impermeable. Sin embargo, cabe destacar que puede existir un posible aumento de la permeabilidad hacia el borde occidental debido a la presencia de sedimentos de grano grueso.
- **Unidad Opache - Quillagua:** Esta unidad, constituida principalmente por sedimentos carbonáticos, se encuentra en el techo de la columna estratigráfica (Figura 4.3) y muestra en superficie estructuras geomorfológicas características de un sistema acuífero Kárstico (Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4)

Estas estructuras geomorfológicas se encuentran hacia el sur de la quebrada de Ojos de Opache, donde se observa en terreno y en imágenes satelitales la existencia de Poljes constituidos por depresiones alargadas de base horizontal con contornos irregulares elevados y empinados (Figura 5.1). Algunas de estas estructuras además exhiben en la base una acumulación de agua de geometría irregular que pueden corresponder a Dolinas o Uvalas de este sistema (Figura 5.2).

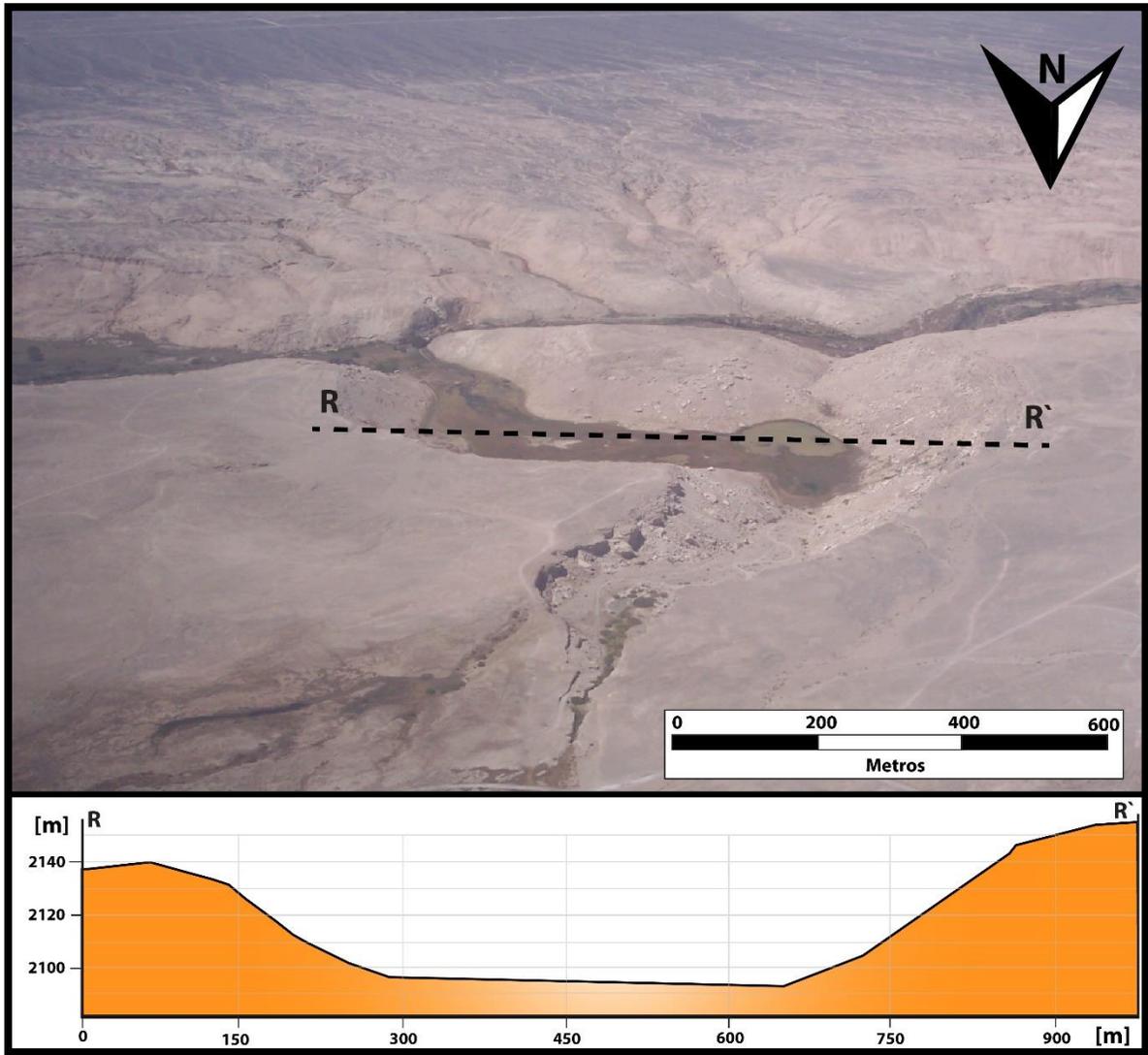


Figura 5.1 Perfil de elevación del polje identificado al sur de la quebrada Ojos de Opache.



**Figura 5.2 Imagen del polje identificado al sur de la quebrada Ojos de Opache.
Fuente: Durán D. (2013).**

Caso similar es lo que se observa en la misma quebrada de Ojos de Opache (Figura 5.3), en donde existe un Poljé alargado de 2,6 km y 80 metros de profundidad con bordes escarpados y fondo horizontal. En esta estructura en particular se distingue una discontinuidad en el flujo de agua superficial que se ve interrumpida abruptamente y vuelve a aparecer de manera caudalosa un kilómetro más abajo de la misma quebrada (Figura 5.3), exhibiendo por lo tanto la posible existencia de un sumidero que drena el agua superficial y transmite el agua de manera subterránea a través de un sistema de cavernas que permite el flujo y posterior afloramiento caudaloso del mismo.

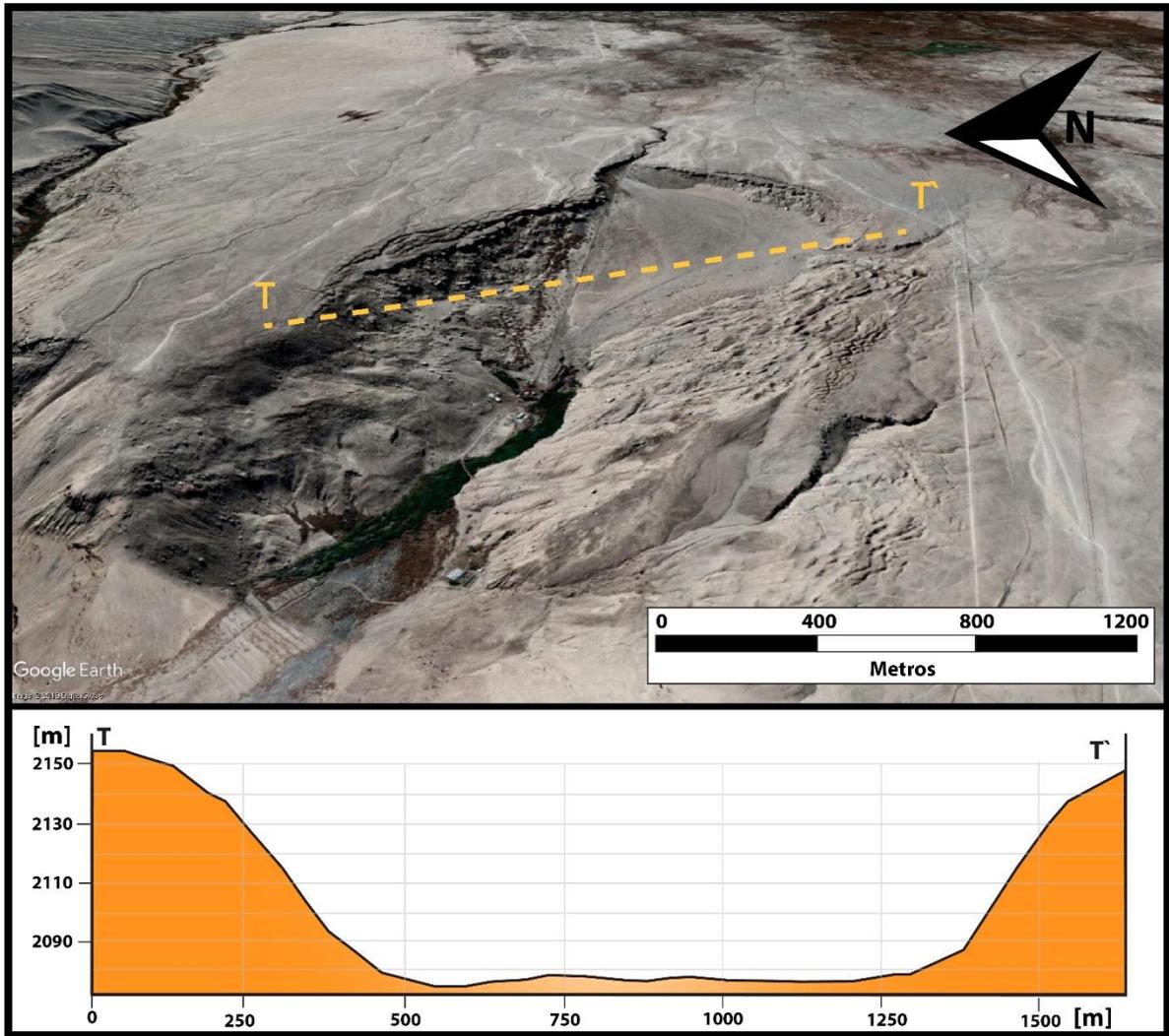


Figura 5.3 Perfil de elevación del poljé identificado en la quebrada Ojos de Opache. Fuente: Elaboración propia.

Otra estructura geomorfológica característica se observa dentro de la quebrada Quetena, lugar donde la presencia de abruptas paredes que encausan el flujo de agua (Figura 5.4), exhibe los fuertes procesos de erosión y disolución que afectan a esta unidad generando profundas gargantas.



Figura 5.4 fotografía que muestra las abruptas paredes que encausan el flujo de agua de la quebrada Quetena. Fuente: Elaboración propia.

Las unidades Opache – Quillagua, Jalquinche – el Batea y Calama – Sichal se encuentran a largo de toda la zona de estudio y presentan una interacción directa con los ríos Loa y San Salvador, inclusive en función de la estratigrafía y la geomorfología es posible identificar las unidades por las que escurren ambos ríos, distinguiendo cuatro tramos con particular interacción entre los cursos superficiales y el sistema acuífero (Figura 5.5).

A grandes rasgos los tramos son definidos considerando la interacción entre el sistema superficial y subterráneo. Por una parte, el tramo 1 se define como aquel tramo donde existe una interacción del sistema superficial con la unidad Opache - Quillagua. Mientras que los tramos 2 y 3, se definen como aquellos tramos donde existe una interacción del sistema superficial con la unidad Calama – Sichal, sin embargo, el tramo 2 a diferencia del 3 presenta una interacción unidireccional, en donde solo existen aportes del sistema subterráneo al superficial y no en el sentido opuesto como en el tramo 3.

Finalmente, el tramo 4 se define como el trazado en que el flujo de agua superficial se encuentra aparentemente desconectado del sistema subterráneo debido a que el agua que escurre por el río Loa estaría fluyendo sobre la unidad impermeable Jalquinche – el Batea.

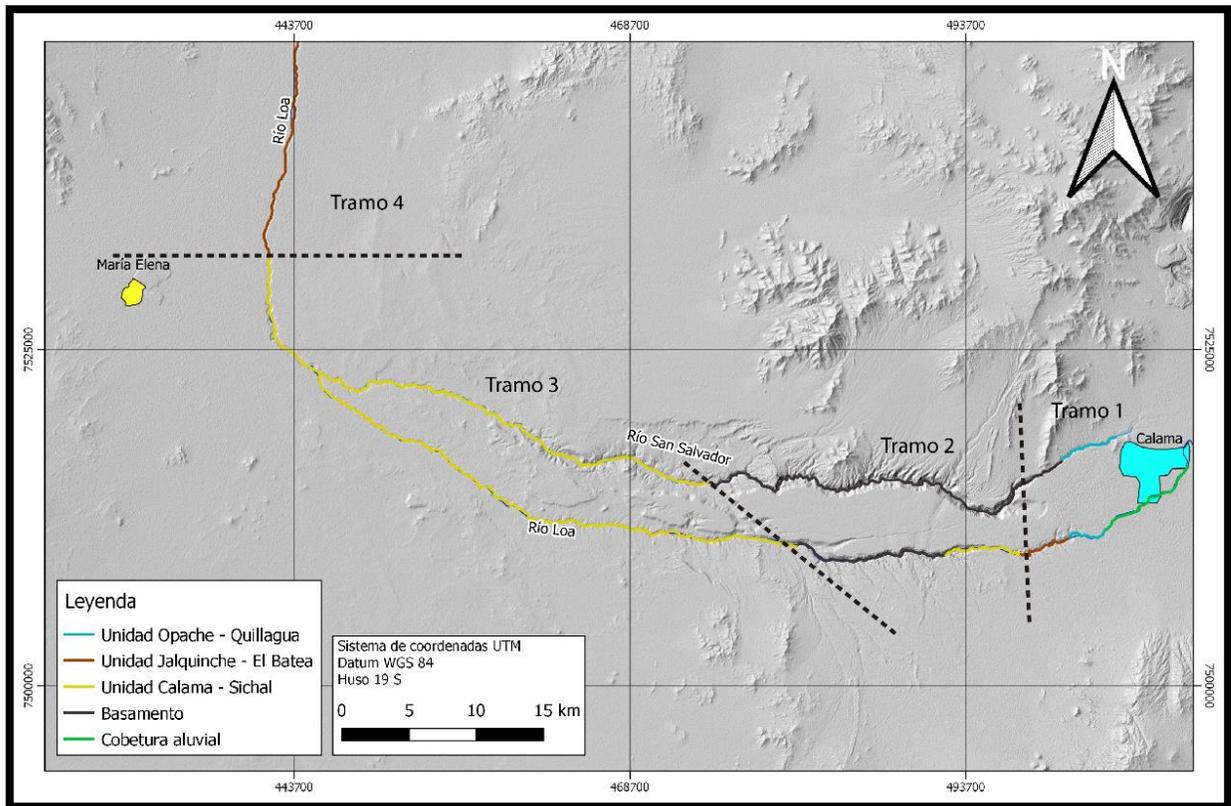


Figura 5.5 Litologías por las que escurren los ríos Loa y San Salvador, en negro se delimitan los tramos sectorizados para el análisis hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.

Entrando a un mayor detalle, a través del análisis estratigráfico y piezométrico, se observa en el Tramo 1 ubicado entre las nacientes del río San Salvador y la confluencia del mismo con la quebrada Ojos de Opache, que el flujo subterráneo proviene desde el este y noreste aguas arriba de Calama y se desarrolla tanto por el acuífero libre kárstico superior de Opache-Quillagua, de rápida renovación, como por el acuífero inferior de Calama-Sical, el cual presenta un mayor tiempo de retención y un flujo más lento. Al observar el perfil B-B' (Figura 5.6), se distingue que las tres unidades hidrogeológicas disminuyen su espesor tanto al norte como al sur de la zona de estudio, presentando un mayor desarrollo de estas en la zona media del perfil.

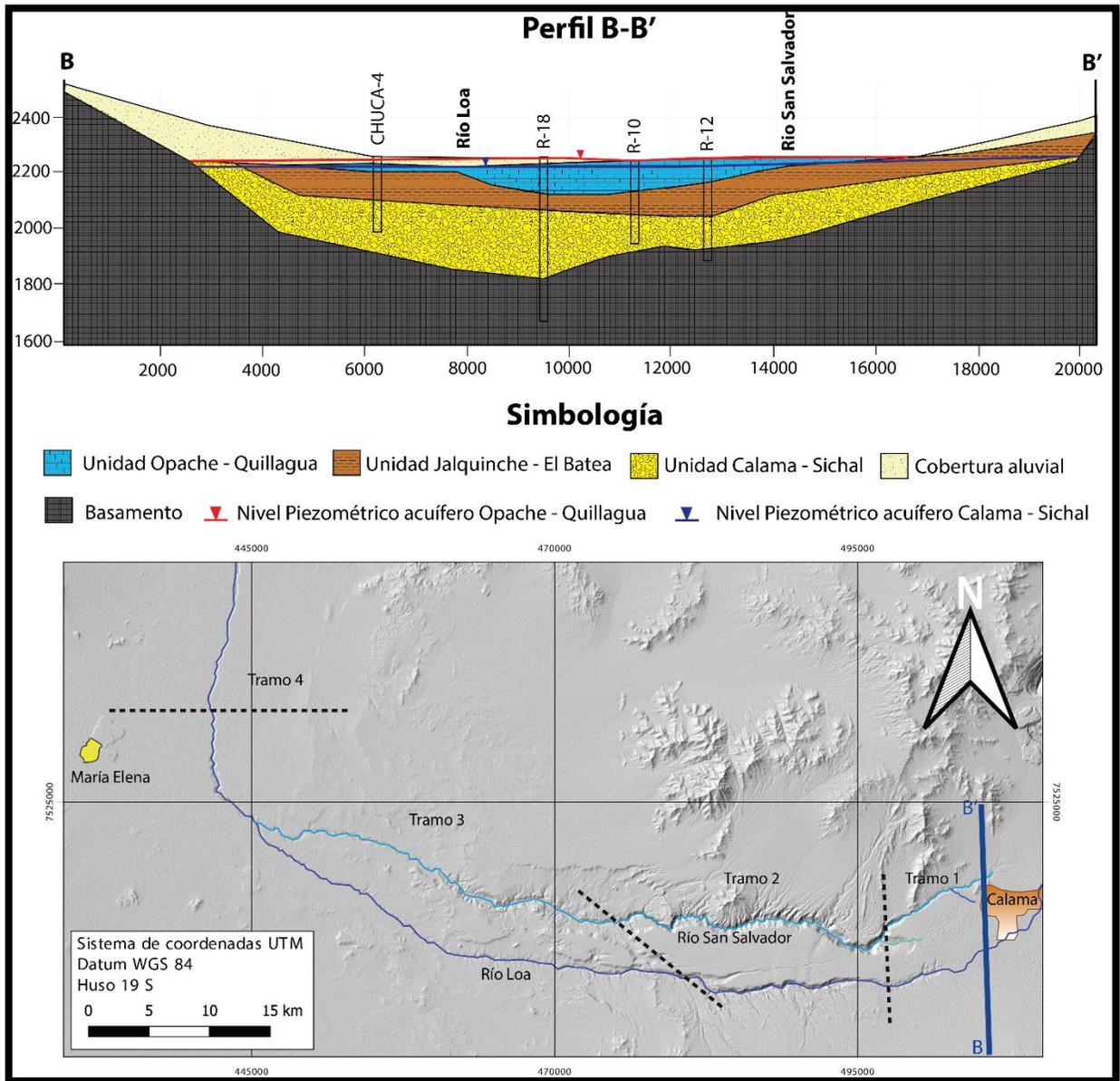


Figura 5.6 Perfil B-B', Los sondajes solo representan información litológica.
Fuente: Modificado de Montgomery & Associates (2007).

Al Este la ciudad de Calama, debido a las características topográficas, el nivel piezométrico, determinado a partir de niveles observados (Matraz Consultores Asociados S.A., 2012; Knight Piésold, 2014), intersecta la superficie de terreno en una serie de quebradas, dando origen a vertientes que alimentan el río Loa y dan origen al río San Salvador. Estos afloramientos naturales de las unidades Opache-Quillagua, se observan en el perfil C-C' (Figura 5.7), en el cual se observa que la cubierta sedimentaria disminuye su espesor hacia el río San Salvador, acunándose completamente la unidad Calama-Sichal en la misma dirección, así el acuífero Calama-Sichal no tendría presencia en el río San Salvador y además explicaría el escurrimiento temprano del río por sobre el

basamento. Al mismo tiempo, se observa hacia el sur del perfil una continuidad de la unidad Opache-Quillagua, distinguiendo un intrínseco contacto entre el río Loa y esta unidad.

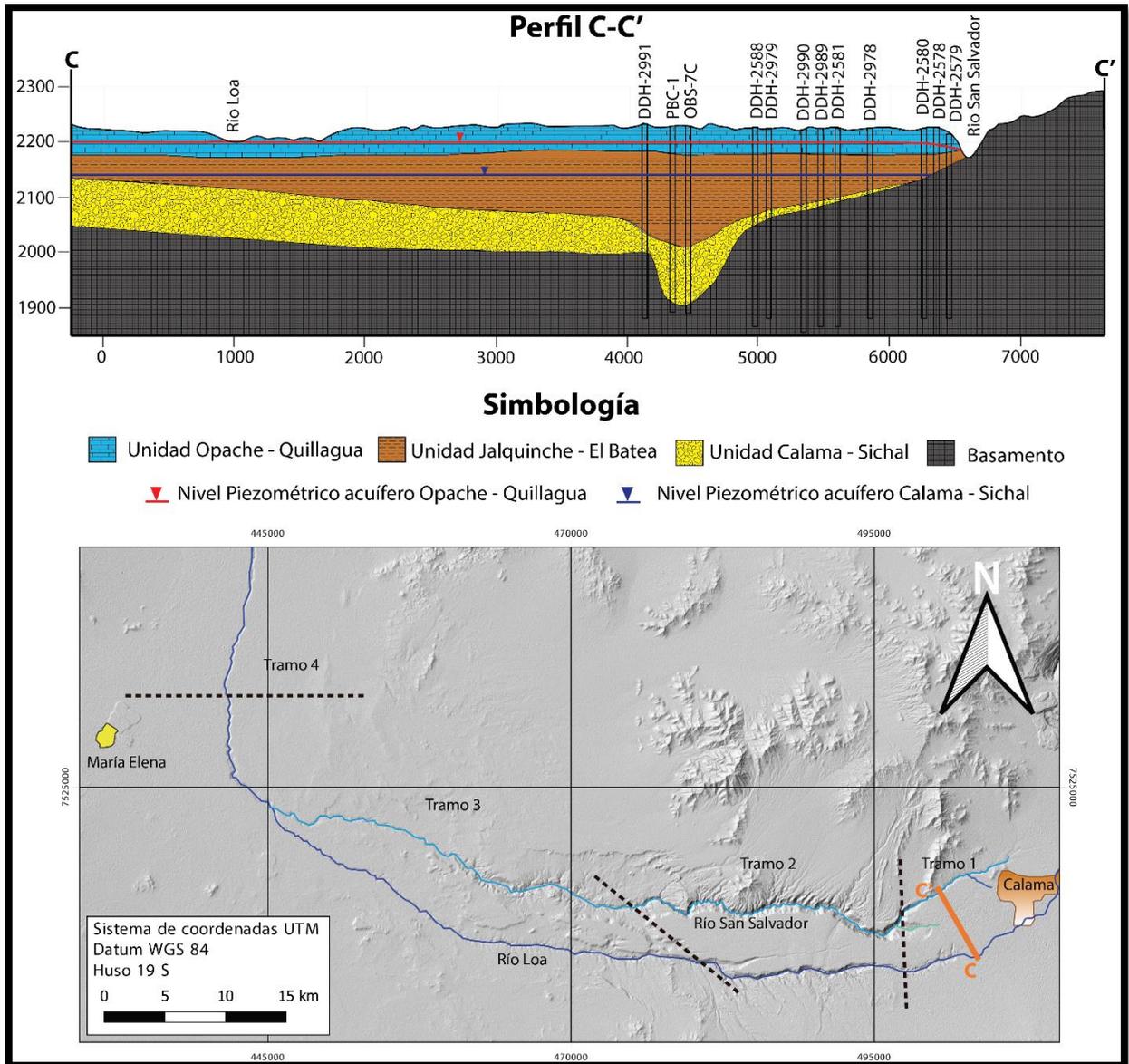


Figura 5.7 Perfil C-C' realizado con la información estratigráfica de sondajes exploratorios, en conjunto con datos de profundidad del basamento obtenidos por gravimetría. Los sondajes solo representan información litológica. Fuente: Elaboración propia.

Hacia el Oeste se encuentra la vertiente Ojos de Opache presentada en el perfil longitudinal D-D' (Figura 5.8), donde se puede apreciar que el relieve del terreno corta la piezometría del acuífero Opache-Quillagua, encontrándose la propia vertiente de Ojos de Opache, asociada a este acuífero, por otro lado según este mismo perfil la unidad Calama-Sichal también se ve incidida por el terreno, sugiriendo por lo tanto que en esta

quebrada existen aportes subterráneos al río San Salvador tanto de la unidad Opache-Quillagua como de la unidad Calama-Sichal.

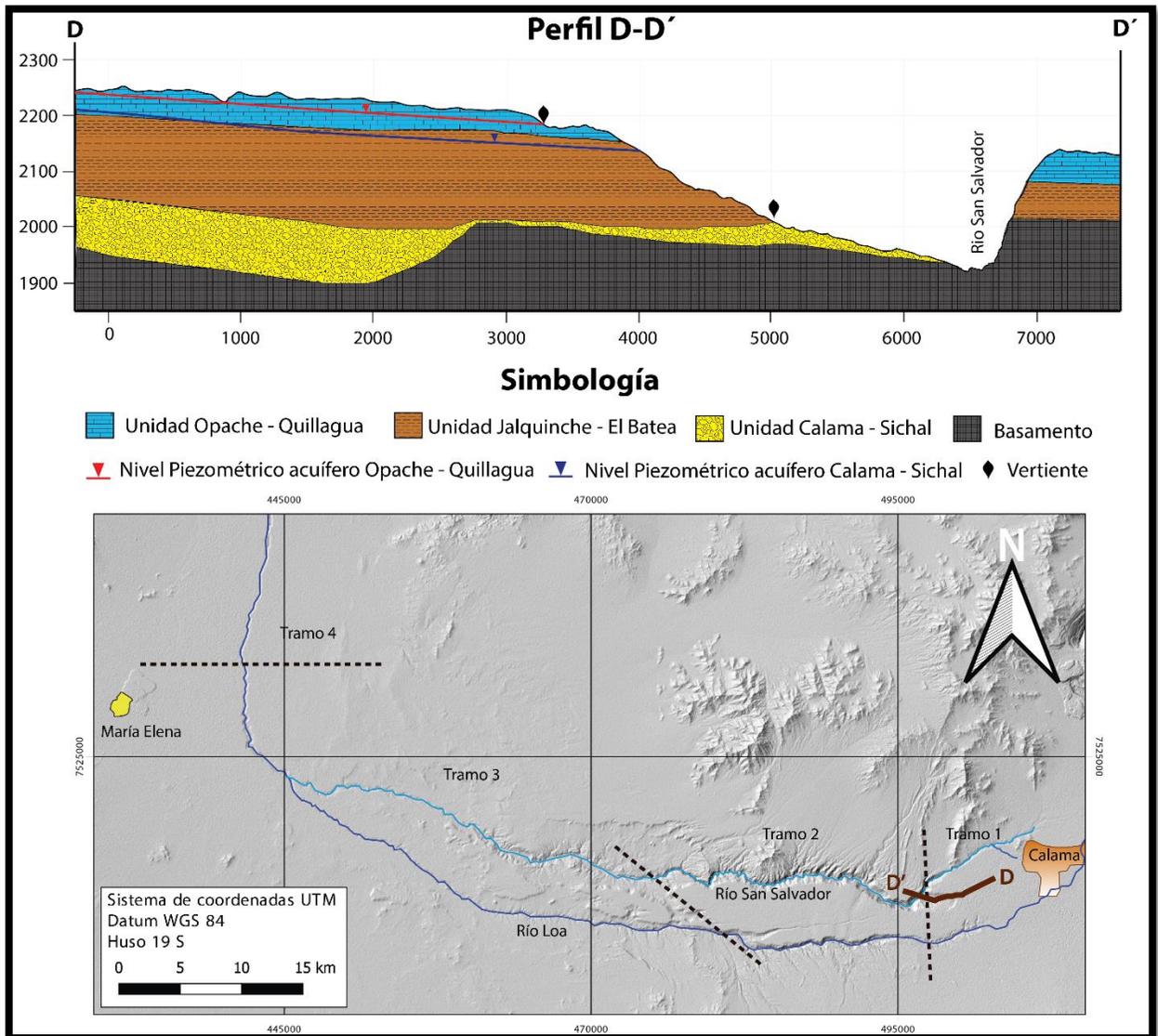


Figura 5.8 Perfil estratigráfico D-D' realizado con la información estratigráfica de sondajes exploratorios, en conjunto con los niveles estáticos de pozos cercanos. Fuente: Elaboración propia.

El Tramo 2 (Figura 5.5) se asocia al sector en que el río Loa y el río San Salvador cortan en su totalidad a las tres unidades hidrogeológicas, escurriendo en gran parte de este tramo por sobre el basamento y evidenciando una escasa interacción entre el sistema superficial y subterráneo.

Esta afirmación se evidencia de los perfiles E-E' y F-F' (Figura 5.9 y Figura 5.10), de los cuales se exhibe para el acuífero Opache – Quillagua la ausencia del nivel piezométrico, indicando que esta unidad se encuentra totalmente drenada y sin interacción alguna con el sistema superficial en este tramo.

Además, de los mismos perfiles se reconoce que el nivel piezométrico del acuífero Calama – Sical disminuye considerablemente en comparación al perfil C-C’, logrando incluso a restringir el flujo de agua subterráneo a los bajos topográficos del basamento, lo cual implica un desconfinamiento del acuífero y la nula interacción con los ríos Loa y San Salvador.

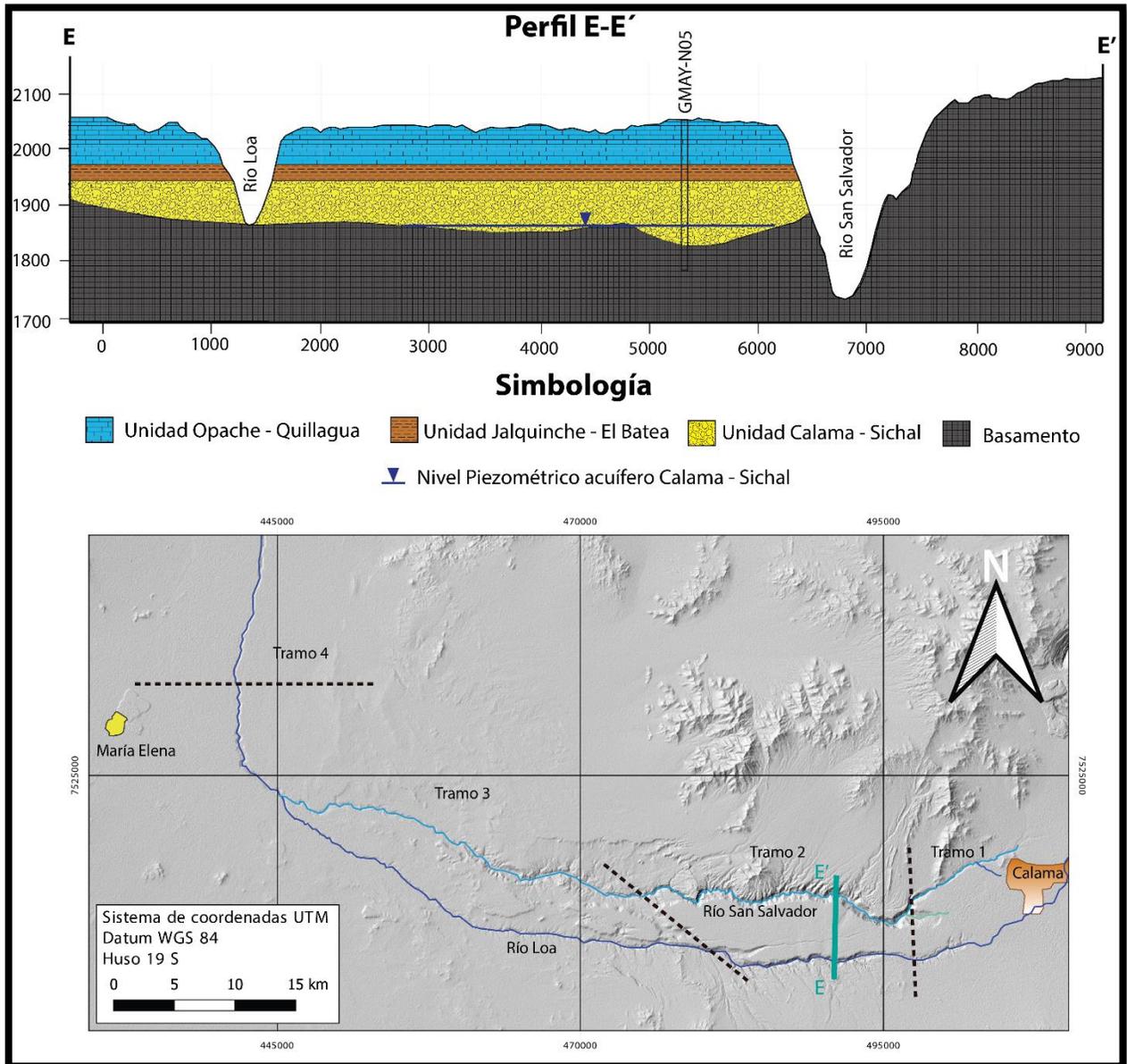


Figura 5.9 Perfil estratigráfico E-E' realizado con la información estratigráfica del sondaje GMay-N05, en conjunto con datos de profundidad del basamento obtenidos por gravimetría. El sondaje solo representa información litológica. Fuente: Elaboración propia.

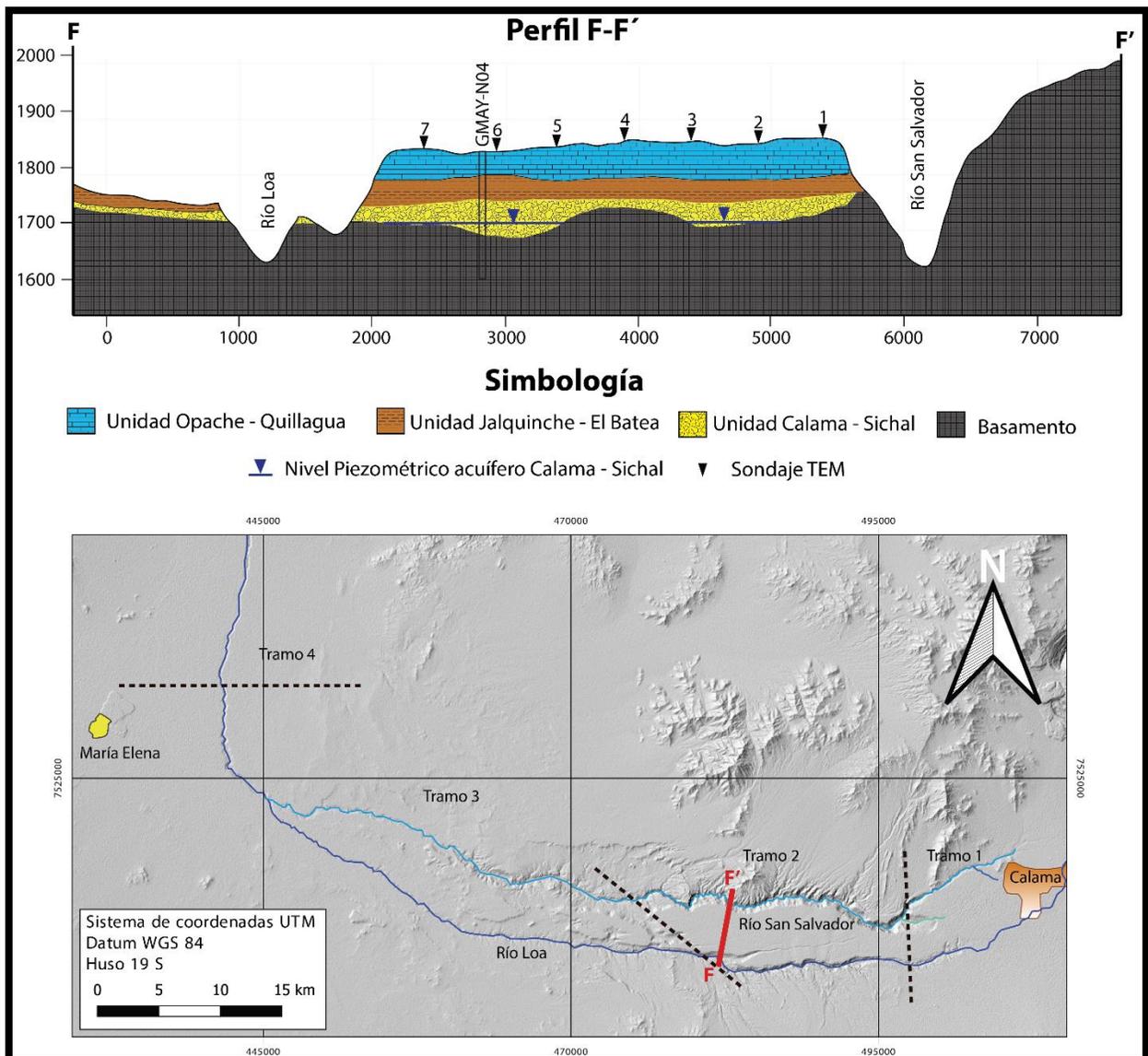


Figura 5.10 Perfil estratigráfico F-F' realizado con datos estratigráficos del sondaje G MAY-N04, en conjunto con un levantamiento de transiente electromagnético (TEM) y datos de profundidad del basamento obtenidos por gravimetría. El sondaje solo representa información litológica. Fuente: Elaboración propia.

El tramo 3 (Figura 5.5) se representa con una profundización del basamento hacia la confluencia de los ríos, desarrollándose un potente aumento de la unidad Calama-Sichal que llega a superar incluso los 600 metros de espesor (Perfil G-G' y H-H', Figura 5.11 y Figura 5.12). En este tramo ambos ríos se encontrarían en contacto con la unidad Calama-Sichal, que presentaría el comportamiento de un acuífero libre.

Además, de acuerdo con la información piezométrica inferida de aquella zona, la que se detalla más adelante en el capítulo de piezometría, el nivel piezométrico se presentaría a nivel de los ríos, implicando un flujo subterráneo desde el Loa al San Salvador. Así, el

flujo subterráneo continuaría en profundidad hacia María Elena por dicho paquete sedimentario, el cual dependiendo de la diferencia de niveles río-acuífero recibiría aportes del río Loa.

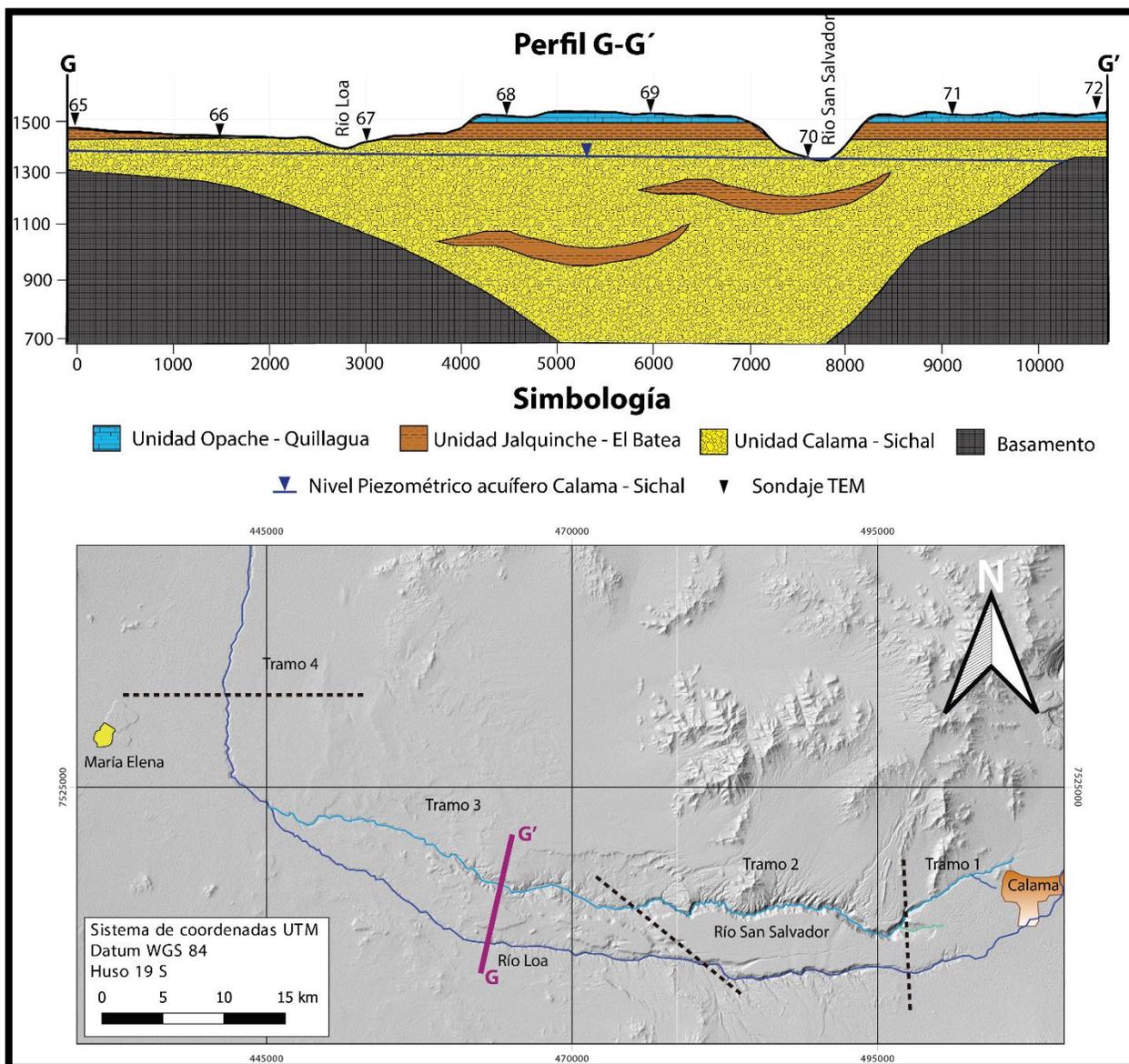


Figura 5.11 Perfil G-G'. Modificado del modelo litoestratigráfico interpretado del método de exploración geofísica TEM L-7 (Anexo D). Fuente: Elaboración propia.

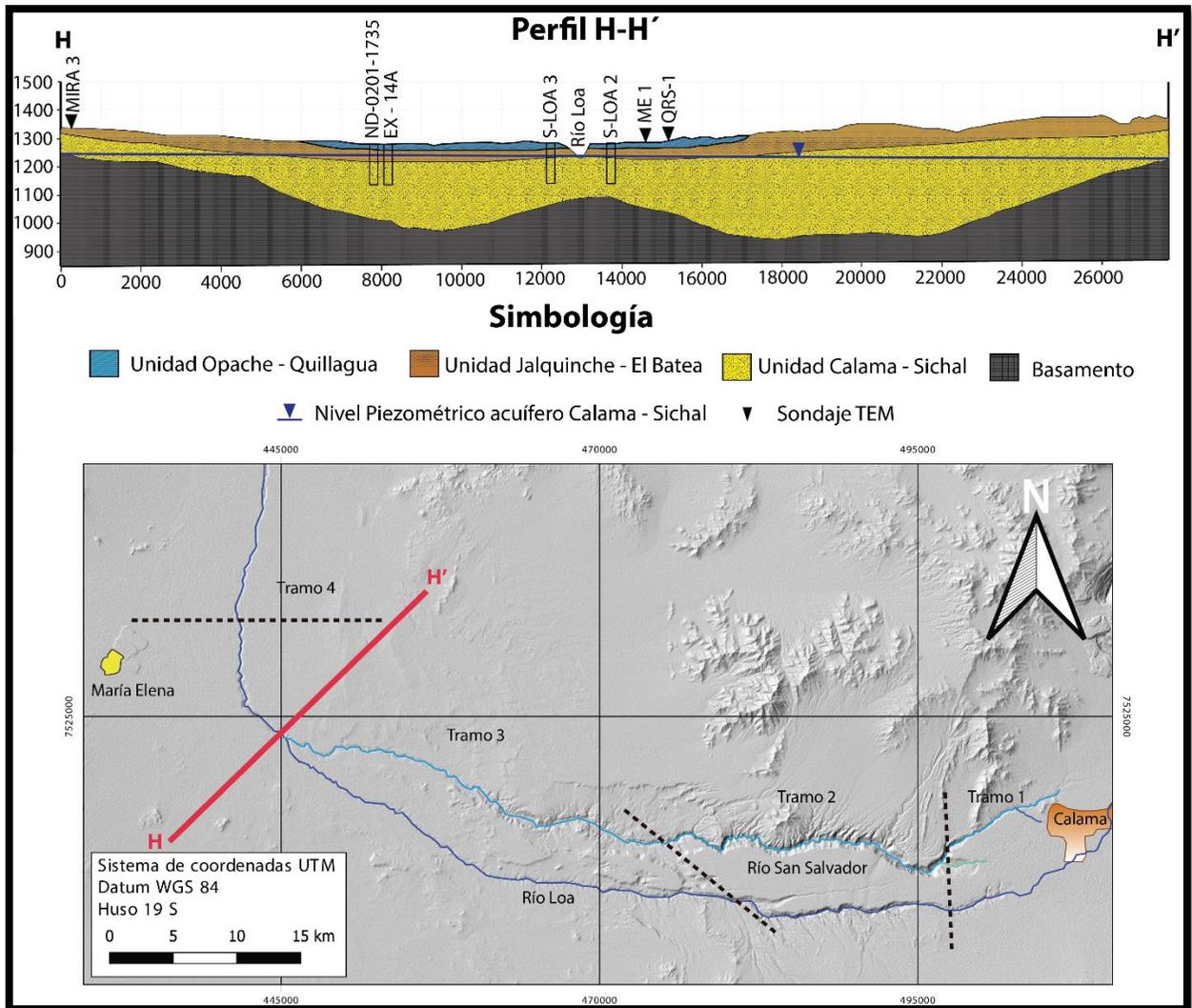


Figura 5.12 Perfil estratigráfico H-H', Realizado con la información estratigráfica de 4 sondajes estratigráficos y 3 sondajes TEM. Los sondajes solo representan información litológica. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el Tramo 4 (Figura 5.5) define el sector ubicado aproximadamente 10 km luego de la confluencia de los ríos Loa y San Salvador. El cual se caracteriza por un confinamiento de la unidad Calama-Sichal por parte de la unidad Jalquinche-El Batea, que a partir de la confluencia comienza a aumentar considerablemente su espesor (Figura 5.13).

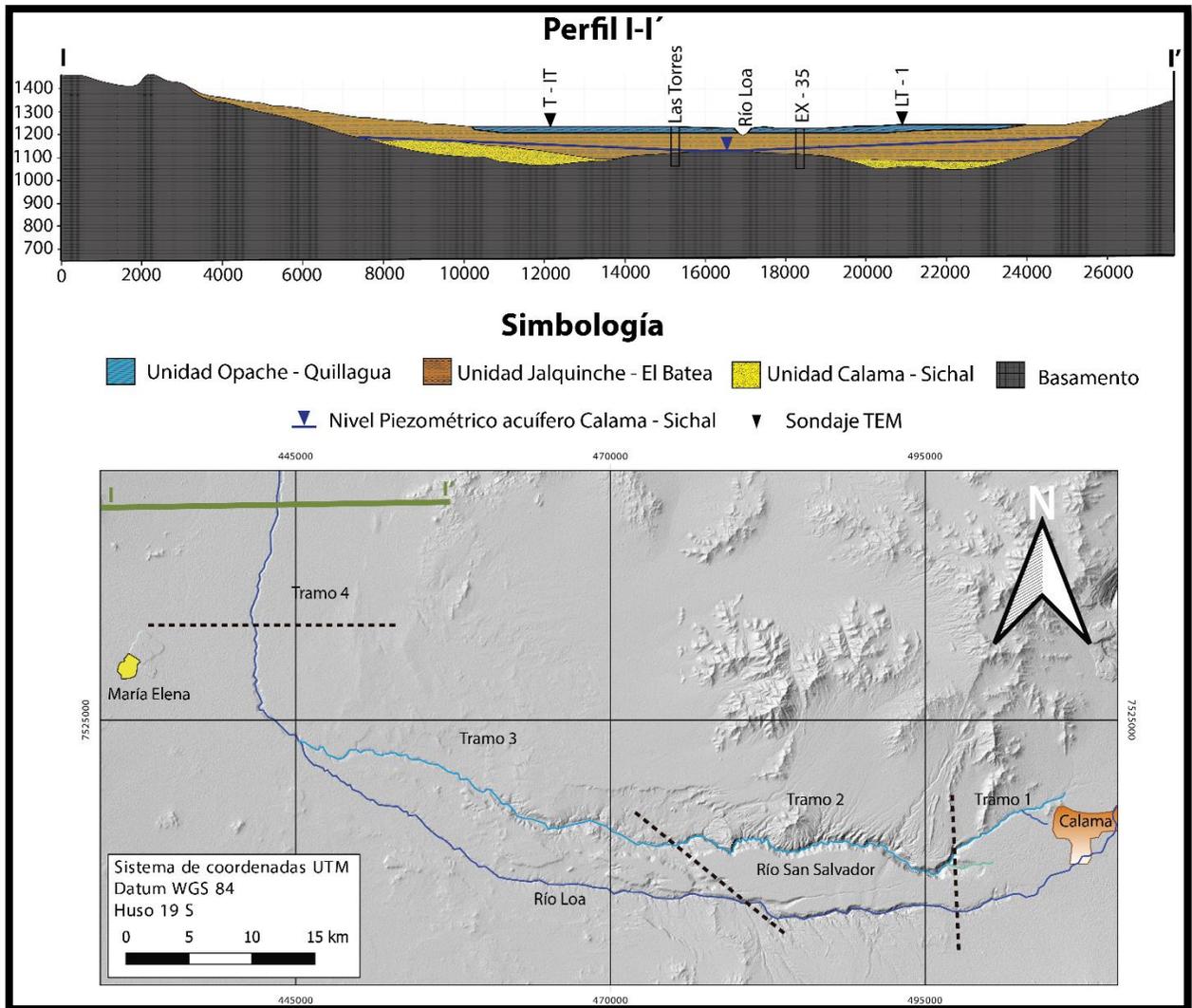


Figura 5.13 Perfil estratigráfico I-I', Realizado con la información estratigráfica de 2 sondajes estratigráficos y 2 sondajes TEM. Los sondajes solo representan información litológica. Fuente: Elaboración propia.

5.1. Caracterización de Parámetros hidráulicos.

- Caracterización de unidades hidrogeológicas

En términos generales, en la zona de estudio existe una escasa información sobre las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas del sistema, sin embargo, distintos autores (Fuentes, 2009 y Matraz, 2012) han realizado al este de la ciudad de Calama ensayos de bombeo, de recuperación, Lefranc, Slug y Packer para conocer la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento de los acuíferos.

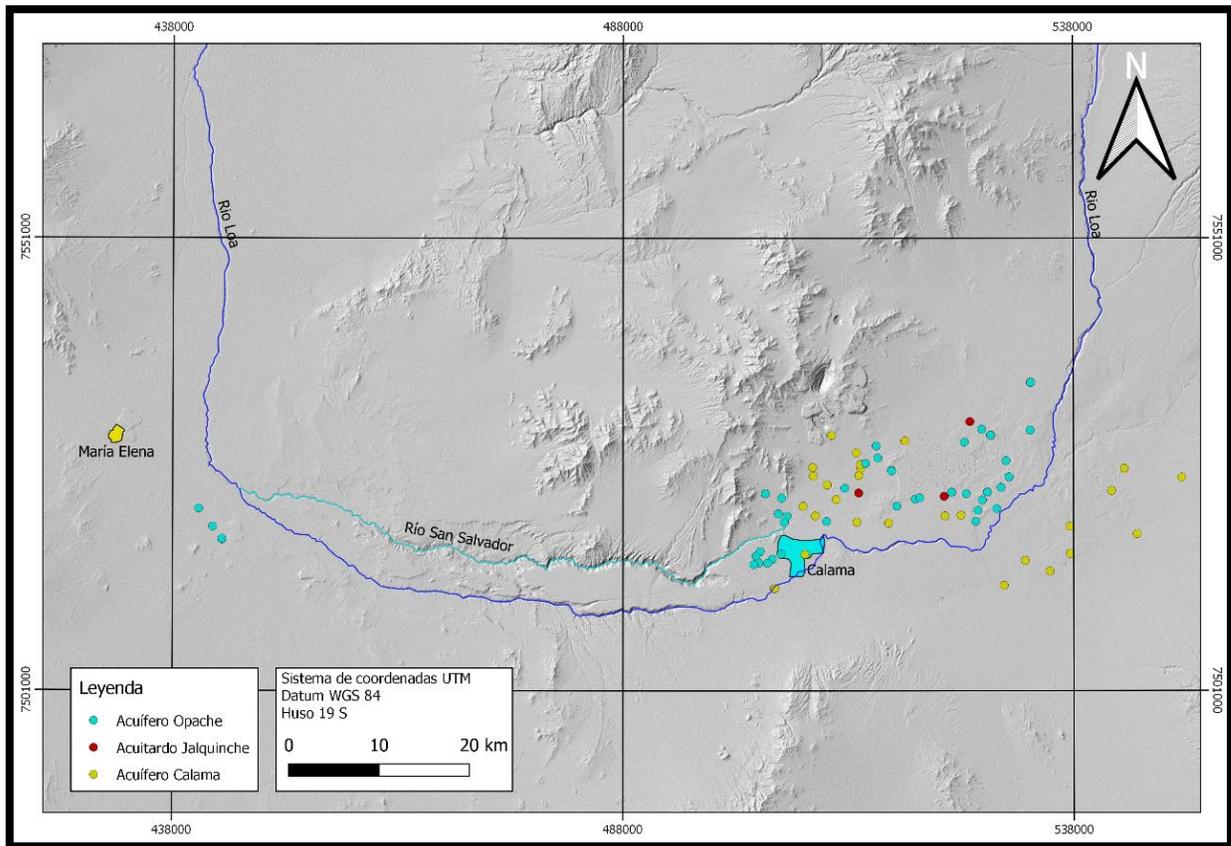


Figura 5.14 Ubicación de ensayos de bombeo, recuperación, Lefranc, Slug y Packer realizados sobre las unidades Opache, Jalquinche y Calama, los cuales son obtenidos de antecedentes. Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados recuperados de los ensayos realizados por Matraz (2012), se observa que los valores de permeabilidad calculados para la unidad Opache – Quillagua oscilan entre los 0,0015 y 309 m/día, valores que resultan ser inadmisibles dada la falta de precisión intrínseca del tipo de ensayos realizados, la diferencia de 6 órdenes de magnitud entre la cota superior e inferior y el tipo de acuífero que representa la unidad Opache – Quillagua.

En otras palabras, dadas las características litológicas y a las estructuras geomorfológicas presentes en la unidad Opache – Quillagua, que afirmar la existencia de un sistema karstico, resulta imposible caracterizar esta unidad mediante ensayos y métodos tradicionales debido a que la heterogeneidad es un rasgo que caracteriza a estos sistemas. Por lo tanto, este rango de permeabilidades de la unidad Opache – Quillagua no sería representativo de la unidad.

Por otro lado, en cuanto a la unidad Jalquinche – El Batea, la información recopilada es escasa, sin embargo, se hallaron valores de permeabilidad al noreste de Calama que rodean los 0,01 m/día (Matraz, 2012).

Finalmente, para la unidad Calama – Sichal, la permeabilidad del acuífero oscila entre los 0,01 y 120 m/día (Matraz, 2012), exhibiendo nuevamente resultados amplios e

imprecisos que no permiten caracterizar la conductividad hidráulica de esta unidad, pero permiten acotar este parámetro a estos rangos.

En resumen, con los valores recopilados no es posible caracterizar los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas. Sin embargo, para lograr el objetivo de la investigación se hará un análisis de sensibilidad con el modelo numérico de flujo, considerando estos rangos de permeabilidad.

- **Caracterización del lecho del río**

Considerando que la interacción entre el sistema superficial y subterráneo juega un rol importante en el comportamiento hidrogeológico del sistema, se realiza en la confluencia de los ríos Loa y San Salvador dos ensayos de infiltración (Figura 5.15) mediante el método de doble anillo (Figura 5.16), que permiten caracterizar la capacidad de infiltración del lecho de los ríos Loa y San Salvador.

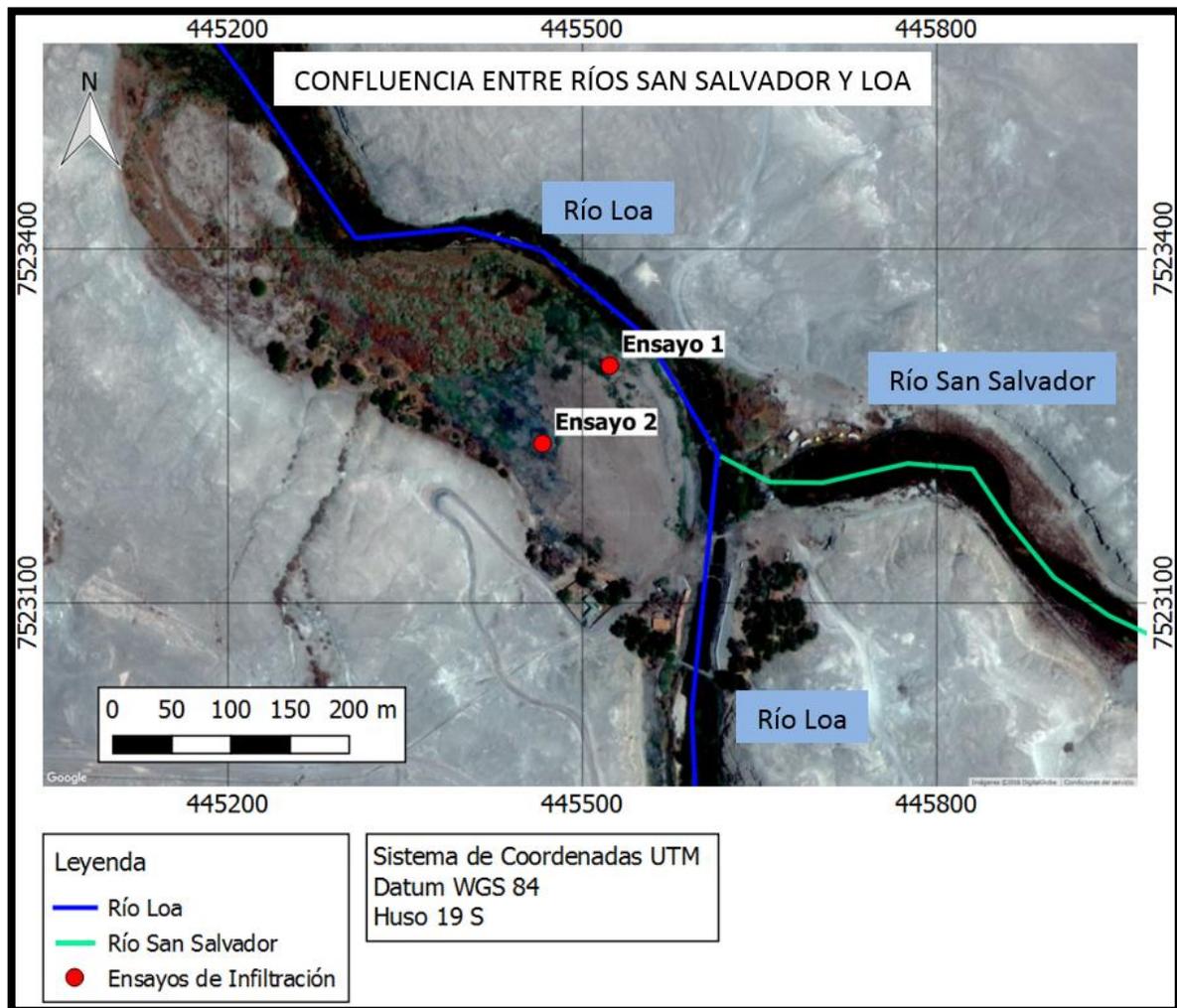


Figura 5.15 Ubicación de los puntos de ensayos de infiltración realizados en la zona de la confluencia entre los ríos San Salvador y Loa. Fuente: Elaboración propia.

En los ensayos se registra la evolución de la tasa de infiltración del agua contenida en el anillo interior (de menor diámetro), teniendo especial cuidado en medir con precisión el tiempo de descenso de la columna de agua, evitando flujos entre los cilindros, pérdidas laterales y diferencias de nivel entre el cilindro interior y exterior.



Figura 5.16 Fotografía del montaje en terreno de uno de los ensayos de infiltración de doble anillo. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de los ensayos (Figura 5.17 y Figura 5.18), exhiben una estabilización de la tasa de infiltración, lo cual considerando que la filtración fue estrictamente vertical y que el perfil de suelo es profundo y uniforme, se infiere que el valor de estabilización de la tasa de infiltración corresponde a la conductividad hidráulica saturada del suelo en el lugar de realización del ensayo. De esta forma, promediando las mediciones desde que éstas se estabilizan, se obtienen los valores de conductividades hidráulicas saturadas que se presentan en la (Tabla 5.1).

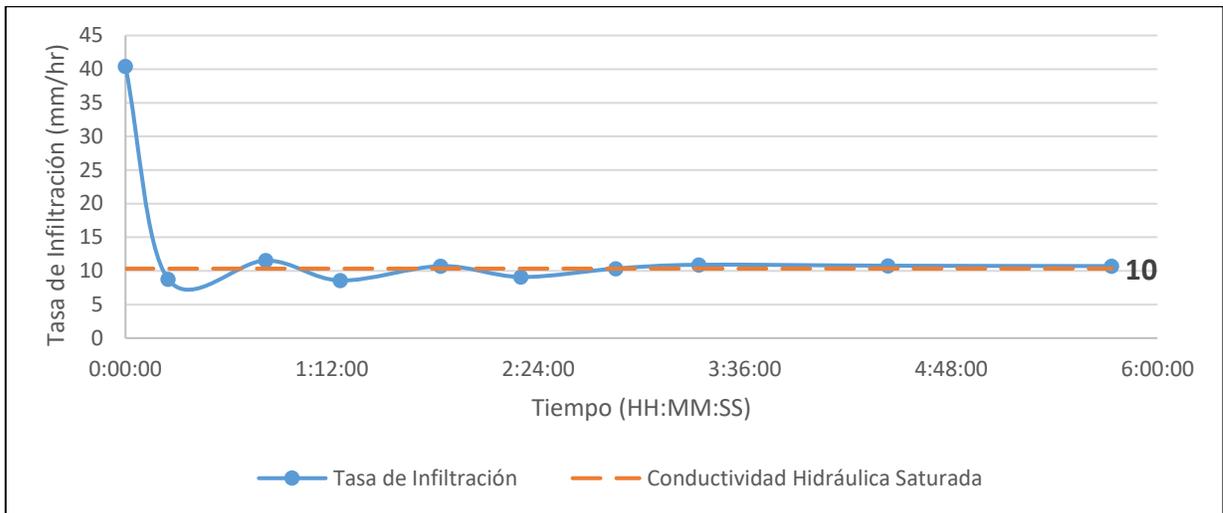


Figura 5.17 Evolución de la tasa de infiltración en el tiempo para el ensayo N° 1, efectuado en un suelo limo arcilloso. Fuente: Elaboración propia.

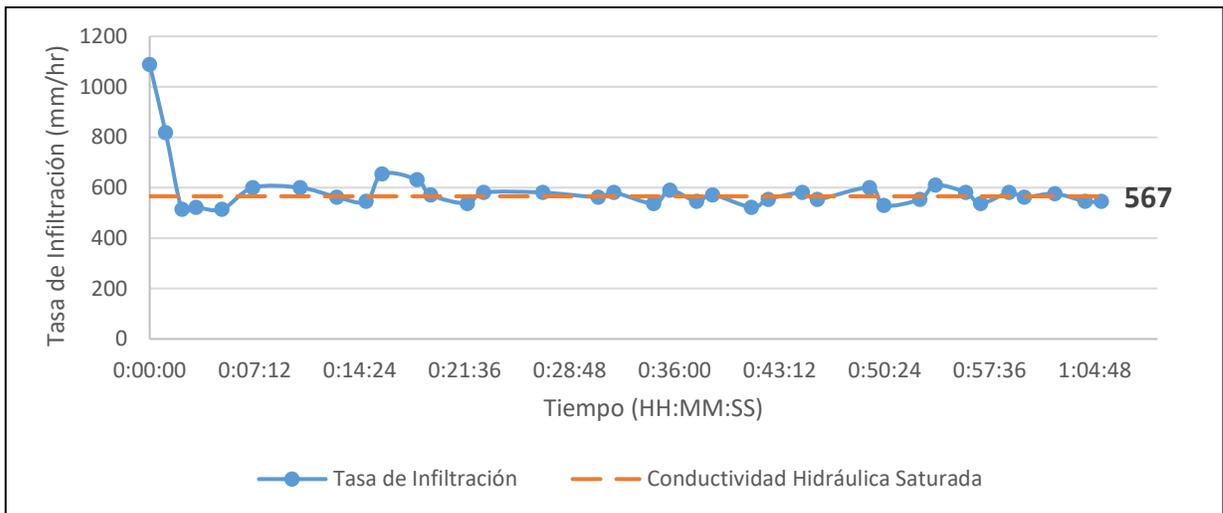


Figura 5.18 Evolución de la tasa de infiltración en el tiempo para el ensayo N° 2, efectuado en un suelo arenoso. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.1 Valores de conductividad hidráulica saturada obtenidos en los ensayos de infiltración. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo	Conductividad Hidráulica Saturada (mm/h)
Ensayo N° 1	10
Ensayo N° 2	567

En esta tabla (Tabla 5.1) se puede observar una diferencia significativa entre las tasas de infiltración a largo plazo obtenidas en cada ensayo. Esto se debe a que los ensayos se realizan en suelos con características diferentes: el ensayo N°1 se realiza en un suelo que presenta una capa de aproximadamente 20 cm de material fino (limo y arcilla),

seguido en profundidad por arena fina, mientras que el segundo ensayo se realiza en un suelo compuesto por arena fina a medía de mayor permeabilidad.

Esta variación en la permeabilidad da cuenta de la heterogeneidad esperable en las capas del lecho del río, cuyas variaciones se deben a la depositación diferenciada de materiales finos y gruesos producto de ocasionales crecidas del río Loa que desbordan el cauce y depositan estas secuencias de sedimentos. Por lo tanto, considerando que el lecho del río está conformado por una intercalación de arenas y limo arcilloso, la permeabilidad vertical del lecho dependerá en mayor proporción de la conductividad hidráulica de las capas finas, esperando encontrar valores cercanos a los 10 mm/h.

5.2. Caracterización del funcionamiento hidrodinámico

Para la unidad Opache – Quillagua, se desarrolla la carta piezométrica mediante el uso de información piezométrica de 24 sondajes realizados entre los años 1993 y 2001 (Anexo E), fechas en la cual la variación del nivel registrado por la estación Aeropuerto de la DGA sufrió una variación máxima de 1 metro del nivel piezométrico (Figura 5.19), variación que debido a la escala regional de este estudio se puede considerar despreciable.

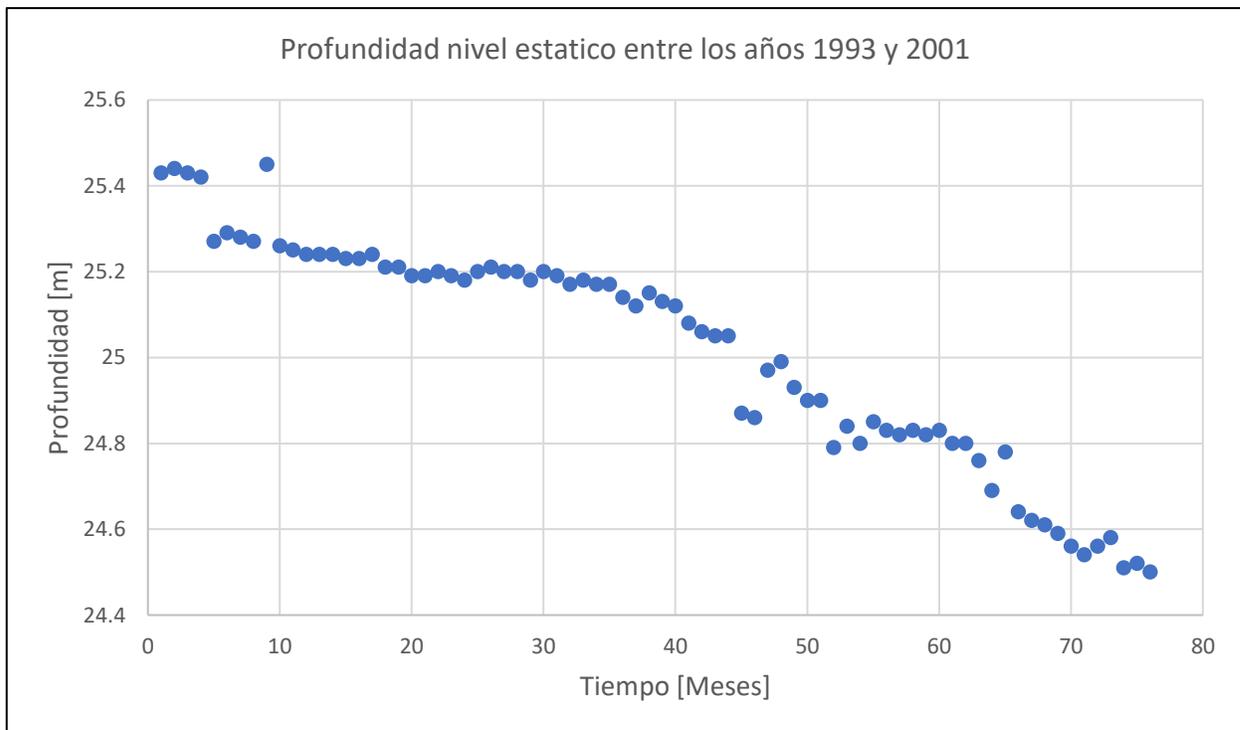


Figura 5.19 Profundidad del nivel estático registrados en la estación Aeropuerto entre los años 1993 y 2001. Fuente: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea [en línea].

Junto a lo anterior también se considera para esta carta piezométrica el afloramiento de la vertiente de ojos de Opache, como un punto representativo del nivel piezométrico en este lugar, y el análisis estratigráfico previamente realizado para representar la

interacción entre el río y el acuífero. Lo cual permite obtener la piezometría y los perfiles piezométricos de la Figura 5.20.

En esta figura se identifica que el flujo de agua regional de la unidad Opache – Quillagua proviene desde el noreste con dirección suroeste, fluye paralelo a los ríos Loa y San Salvador y además vierte, desde Calama hasta la quebrada de Ojos de Opache, un flujo de agua importante sobre ambos ríos.

Además, cabe destacar que en esta misma carta el flujo se ve suspendido hacia el oeste de la vertiente de ojos de Opache, lo cual se debe a que el nivel piezométrico 2140 m calculado, coincide con la base de la unidad acuífera Opache – Quillagua, sugiriendo que este acuífero kárstico se encuentra prácticamente drenado hacia occidente.

Por otro lado, para la unidad Calama - Sichal (Figura 5.21) la carta piezométrica se desarrolla utilizando información piezométrica de 44 sondajes (Anexo E) y la reinterpretación de 35 sondajes de transiente electromagnético. Los cuales permiten obtener la piezometría y los perfiles piezométricos de la Figura 5.21.

En esta figura (Figura 5.21), se observa en los tramos 1 y 2 que el flujo de agua de la unidad acuífera Calama – Sichal proviene desde el este con dirección oeste, fluye paralelo a los ríos Loa y San Salvador e interactúa con el sistema superficial en la quebrada de Ojos de Opache y en el río Loa al sur de la misma quebrada, identificando en particular al oeste de la ciudad de Calama un domo cuyos niveles piezométricos se encuentran notoriamente elevados.

Por otro lado, a diferencia de los tramos 1 y 2, en el tramo 3 el flujo de agua de dirección este oeste comienza a desviarse gradualmente hacia el norte hasta cambiar la dirección del flujo en dirección sur norte a la altura de la confluencia del río San Salvador con el río Loa.

Este flujo, además en este mismo tramo interactúa con el sistema superficial, identificando de los perfiles piezométricos de ambos ríos (Figura 5.21), aportes del acuífero al río en gran parte de este tramo que se ven suspendidos por infiltraciones al sistema subterráneo en la confluencia de ambos ríos.

Finalmente, en el tramo 4 el flujo de agua de la unidad Calama – Sichal, fluye paralelo al río Loa sugiriendo de acuerdo con las líneas de flujo una escasa a nula interacción entre el sistema superficial y subterráneo.

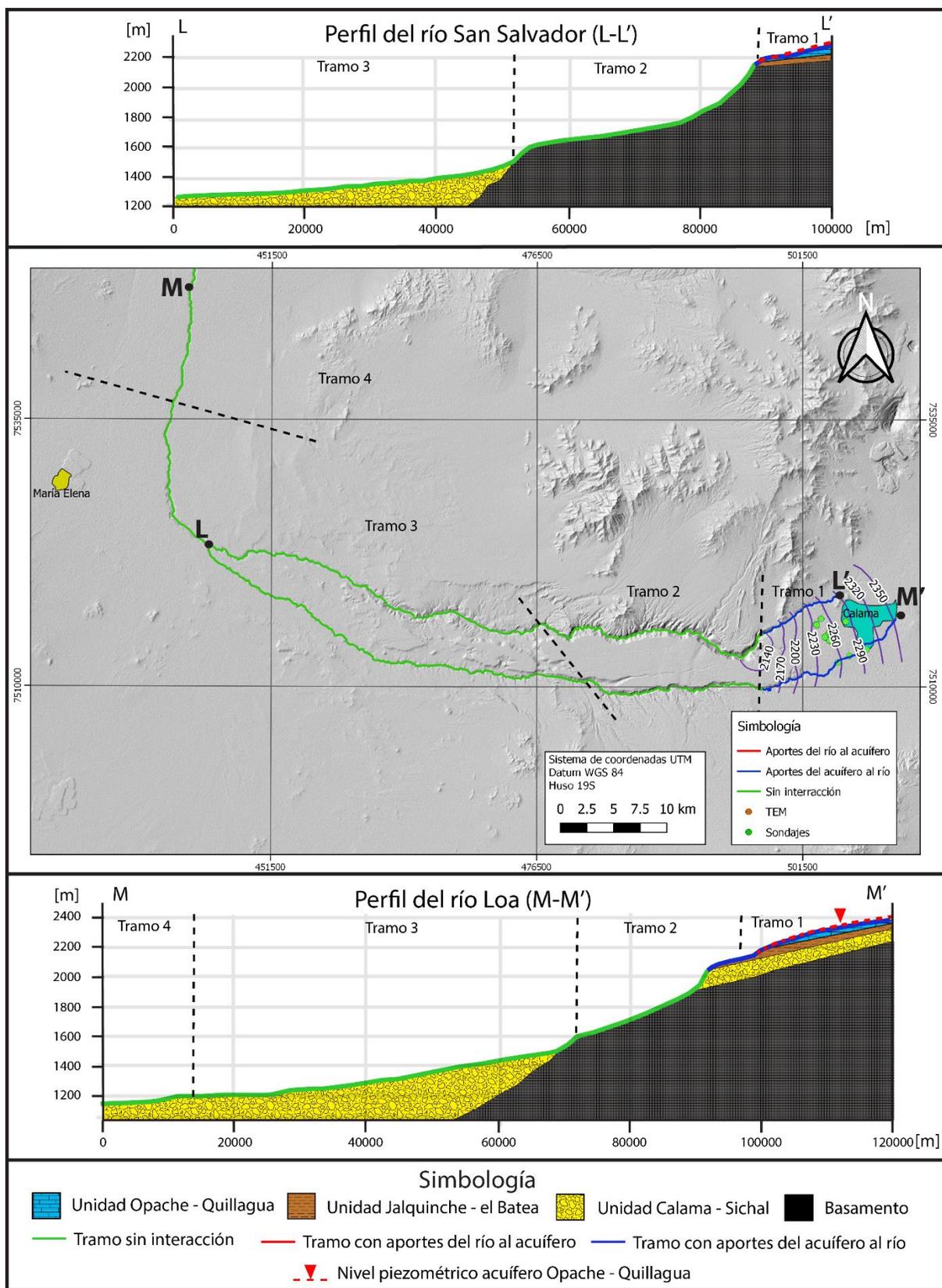


Figura 5.20 Carta piezométrica de la unidad Opache - Quillagua, junto a los perfiles piezométricos de los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.

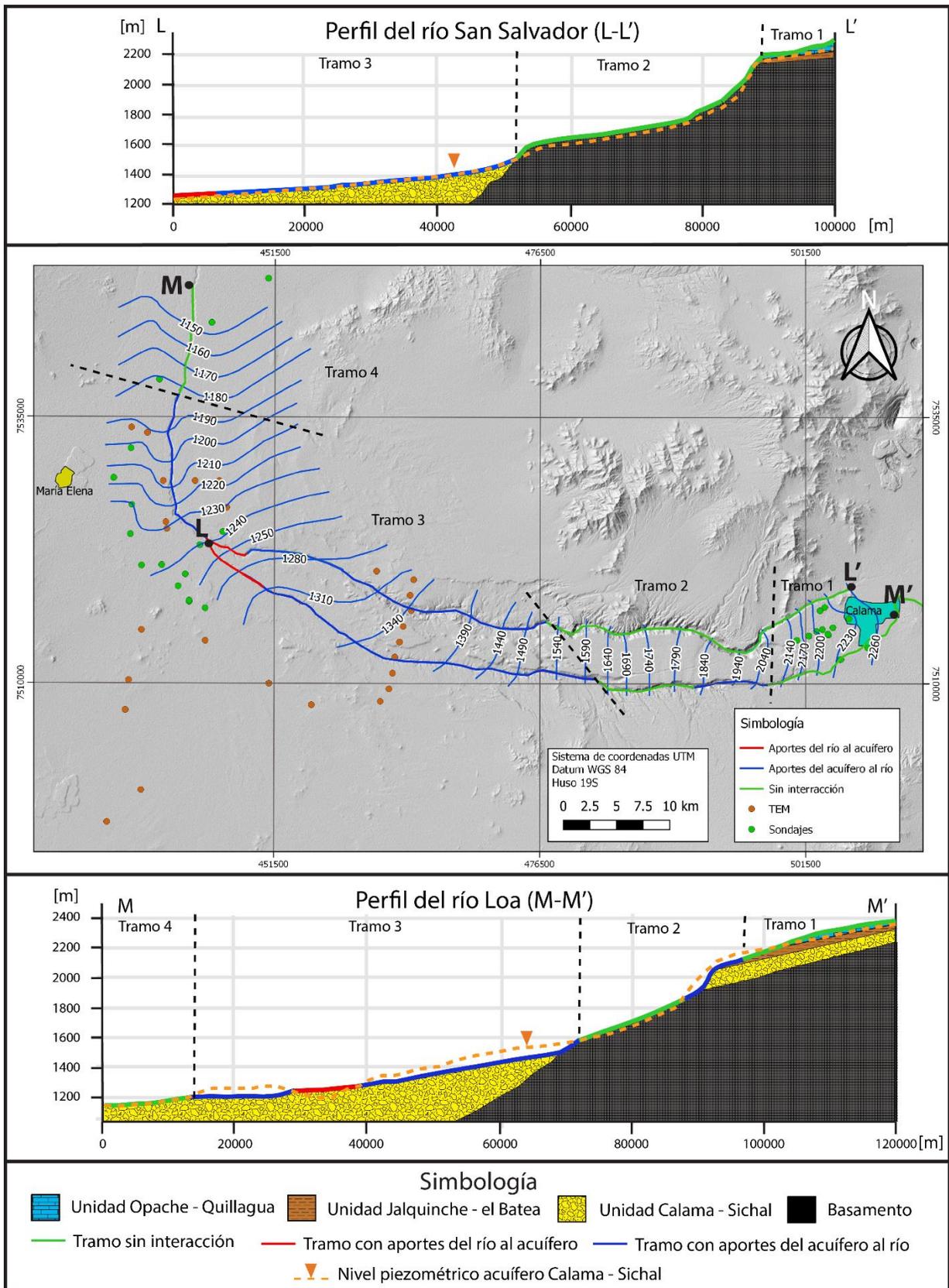


Figura 5.21 Carta piezométrica de la unidad Calama - Sichal, junto a los perfiles piezométricos de los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.

6. Balance hidrogeológico

El balance hidrogeológico de la zona de estudio se desarrolla desde las nacientes del río San Salvador y se extiende por 70 km hacia el oeste, exactamente hasta la confluencia de los ríos Loa y San Salvador (Figura 6.1). En este balance se considera como borde oriental la isopieza 2350 de la carta piezométrica del acuífero Opache – Quillagua (Figura 5.20) y como borde occidental la isopieza 1240 de la carta piezométrica del acuífero Calama – Sichal (Figura 5.21).

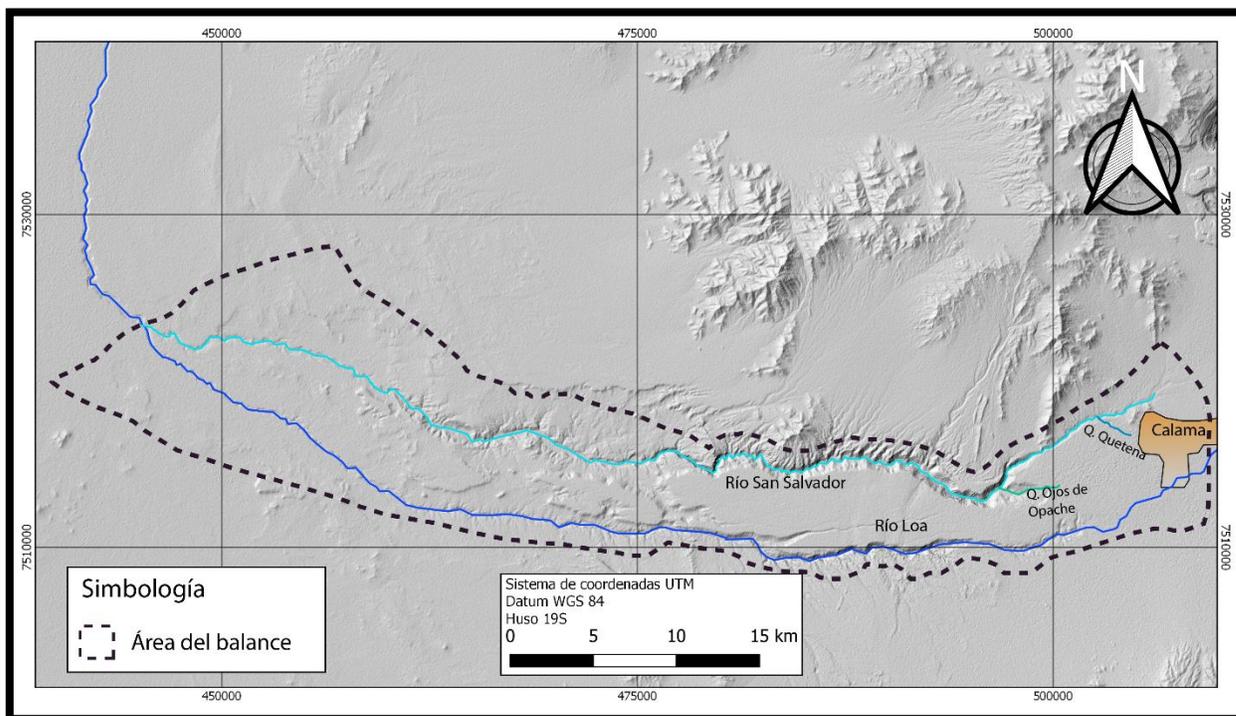


Figura 6.1 Área delimitada para realizar el balance hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.

En función de antecedentes, trabajo en terreno y de acuerdo con la caracterización hidrogeológica de la zona de estudio, se identifica que los principales mecanismos de recarga y descarga que están afectando al sistema hidrogeológico son; la escorrentía superficial, las precipitaciones, la evapotranspiración, la evaporación, las extracciones antrópicas, las recargas antrópicas, la infiltración, los afloramientos y por último la escorrentía subterránea, los cuales se encuentran definidos con mayor detalle a continuación:

6.1. Escorrentía superficial

Entre Calama y María Elena la escorrentía superficial se encuentra dominada por una parte por el escurrimiento de los ríos Loa y San Salvador, y por otro lado por las

quebradas Quetena y Ojos de Opache que aportan al río San Salvador un caudal importante de agua subterránea (Figura 6.2).

Estos datos de caudales superficiales considerados en este balance son recopilados de antecedentes de la Dirección General de Aguas (Anexo F) y de pruebas de aforo realizada en diciembre de 2017 (GHD, 2018).

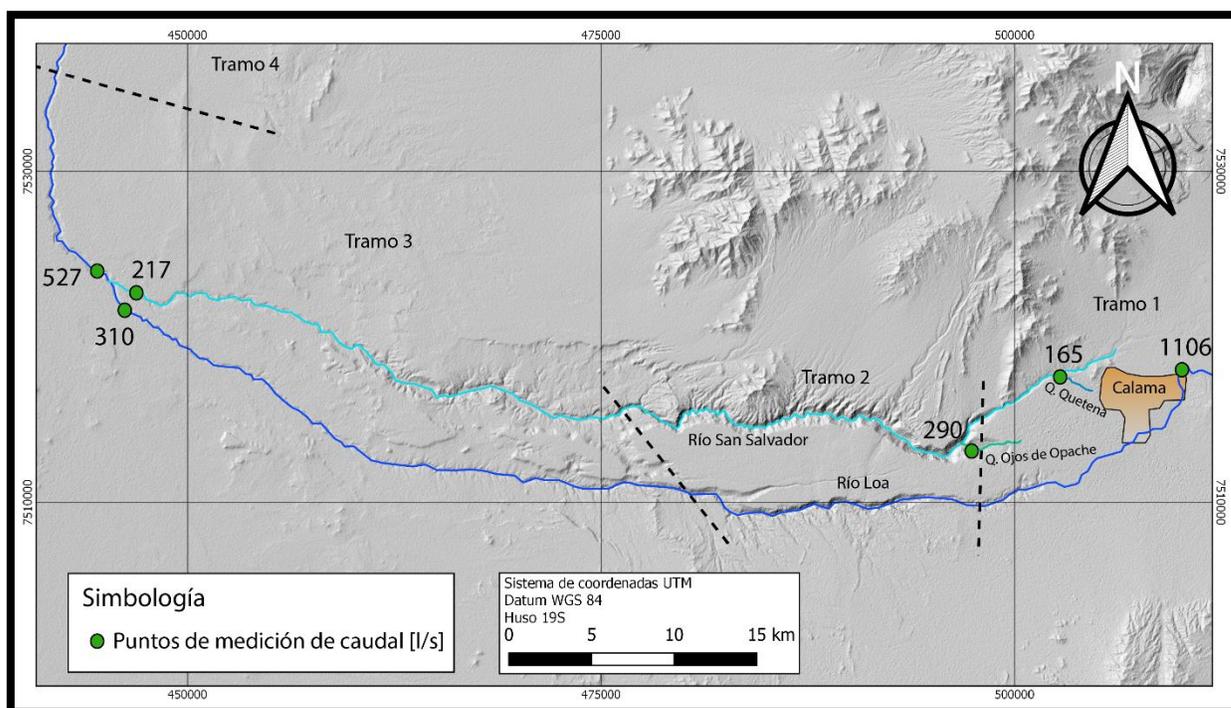


Figura 6.2. Caudales superficiales medidos dentro del área en estudio. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de esta recopilación (Figura 6.2) se identifica que por el río Loa entra en el borde oriental un caudal de agua superficial de 1106 l/s y sale por el borde occidental, después de la confluencia de los ríos Loa y San Salvador, un caudal de 527 l/s, de los cuales 217 l/s provienen del río San Salvador y 310 l/s del río Loa.

Por otro lado, también se identifica que en el río San Salvador existen dos puntos donde ingresa un flujo de agua al sistema superficial, el primero proviene netamente de afloramientos de agua subterránea correspondiente a los afloramientos de la quebrada Ojos de Opache que aporta a este sistema un caudal de 290 l/s. mientras que el segundo de ellos, proveniente de la quebrada Quetena, aporta un caudal total de 165 l/s cuyo flujo de agua se origina de aportes subterráneo y de un vertido de aguas servidas.

6.2. Precipitaciones

Como se mencionó en un principio las precipitaciones de la zona de estudio son escasas y por lo tanto no generan un gran aporte al sistema hidrogeológico en cuestión, sin embargo, de acuerdo con los reportes pluviométricos de la estación Calama de la DGA, el promedio anual de las precipitaciones en la ciudad de Calama es de 3.32 mm/año. Por

lo tanto, considerando esta información pluviométrica como representativa de la zona de estudio, se infiere que la recarga promedio mensual en el área delimitada (Figura 6.1) es de 116 l/s.

6.3. Evapotranspiración

Mediante el método de Turc que correlaciona la evapotranspiración, precipitación y temperatura ambiente (Tabla 6.1) se obtiene que para una precipitación promedio de 3.32 mm/año y una temperatura media del aire de 12.2°C, que caracterizan a la ciudad de Calama, la evapotranspiración resultante es de 3.49 mm/año, equivalentes a una descarga del sistema de 122 l/s que resulta ser levemente mayor que las precipitaciones medias previamente calculadas. Sugiriendo por lo tanto que las escasas precipitaciones presentes en la zona son íntegramente evapotranspiradas.

Tabla 6.1 Valores utilizados en la fórmula de Turc. Fuente: Elaboración propia.

$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$	3.49 mm/año
$P = \text{Precipitación en mm/año}$	3.32 mm/año
$t = \text{Temperatura media anual en } ^\circ C$	12.2°C
$L = 300 + 25 \times t + 0.05 \times t^2$	612.44

6.4. Evaporación

Entre Calama y María Elena el proceso de evaporación se desarrolla en mayor proporción sobre los cursos de agua superficiales permanentes y de gran extensión como lo son los ríos Loa y San Salvador, los cuales presentan una extensión de aproximadamente 70 Km y un ancho promedio que oscila entre los 15 y 25 metros.

Sin embargo, no está demás mencionar que a pesar de que existe una evaporación en las quebradas Quetena y Ojos de Opache estos valores son despreciables en comparación a la gran masa de agua evaporada sobre los ríos Loa y San Salvador.

La evaporación de estos cursos de agua, según el balance hidrogeológico efectuado por la DGA (2003), es de aproximadamente 265 l/s entre Chintoraste (ubicado a 10 km al oeste de Calama) y la confluencia de los ríos Loa - San Salvador, cuyo valor se puede corroborar utilizando la tasa de evaporación de 6–10 mm/día estimada para la zona, obteniendo como resultado una evaporación de 136 l/s sobre el río Loa y de 129 l/s sobre

el río San Salvador, cuyos caudales sectorizados por tramo se encuentran en la Figura 6.3.

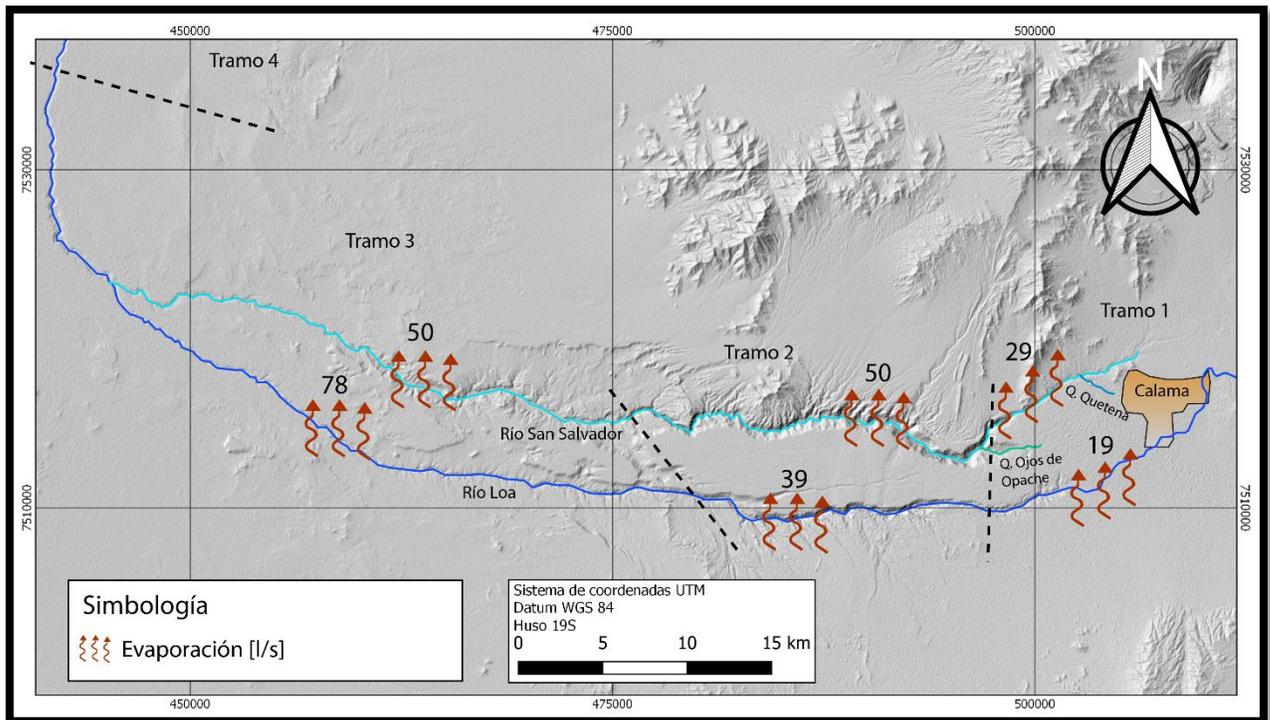


Figura 6.3 evaporación calculada para los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.

6.5. Recargas antrópicas

Las recargas antrópicas presentes en este sistema se localizan en los alrededores de la ciudad de Calama (Figura 6.4) y afectan tanto al sistema superficial como al sistema subterráneo.

Dentro de los agentes que afectan al sistema superficial se identifica la existencia de la planta de tratamiento de aguas servidas Tratacal que vierte continuamente sobre la quebrada Quetena un caudal de 265 l/s, siendo por lo tanto este vertido de aguas servidas el principal tributario de agua a la quebrada Quetena y al flujo superficial del río San Salvador.

Por otro lado, dentro de los agentes que afectan el sistema subterráneo se reconoce que al suroeste de la zona de estudio existen 1103 hectáreas (DGA, 2003) que son utilizadas con fines de riego y que estarían recargando el sistema subterráneo. Por lo tanto, considerando que en Calama existe una demanda neta de 0.5 l/s/ha (DGA, 2003) se calcula que en particular para la unidad Opache – Quillagua, existe una recarga de 559 l/s, considerando inexistencia de escorrentía superficial ni subsuperficial, ni la demanda hídrica de la planta ni del suelo.

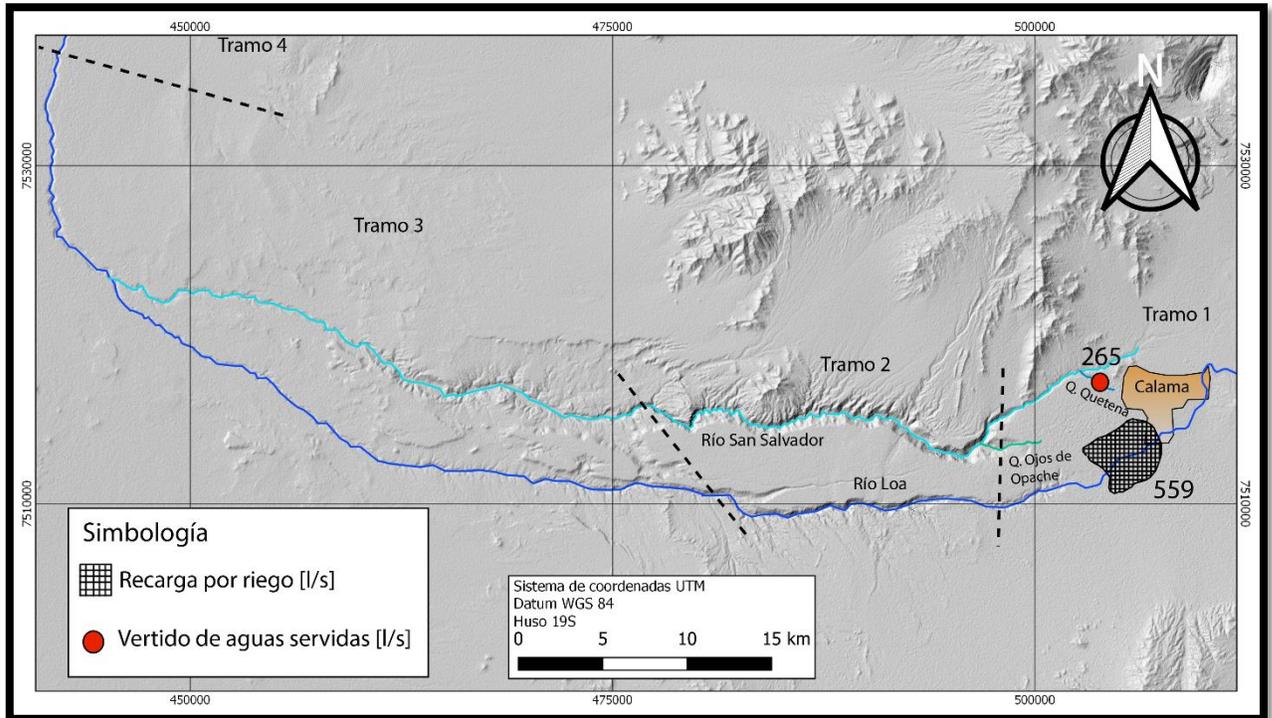


Figura 6.4 Recargas antrópicas del sistema superficial y subterráneo. Fuente: Elaboración propia.

6.6. Extracciones antrópicas

De acuerdo con los derechos de agua otorgados hasta la fecha por la DGA, en la zona existen 35 derechos de agua de tipo consuntivos, de los cuales 7 de ellos corresponden a extracciones de naturaleza superficial y 18 a extracciones de naturaleza subterránea (Figura 6.5 y Anexo G).

Dentro de las extracciones superficiales se conoce, según los registros de la DGA, que 61 l/s son extraídos directamente del cauce del río Loa. Sin embargo, considerando las observaciones del balance hidrológico de la DGA (2003) se deduce que sobre el río Loa se extraen adicionalmente 323 l/s, los cuales son utilizados exclusivamente para fines de riego.

Por otro lado, de los mismos registros de la DGA, se identifica que sobre el río San Salvador existen 3 puntos de extracción importantes, el primero de ellos se ubica en las nacientes del río y del cual se extrae un caudal de 55 l/s. Cabe destacar que este caudal extraído consume en su totalidad los 55 l/s que afloran en las nacientes y seca por completo el cauce del río San Salvador antes de confluencia con la quebrada Quetena (Figura 6.6).

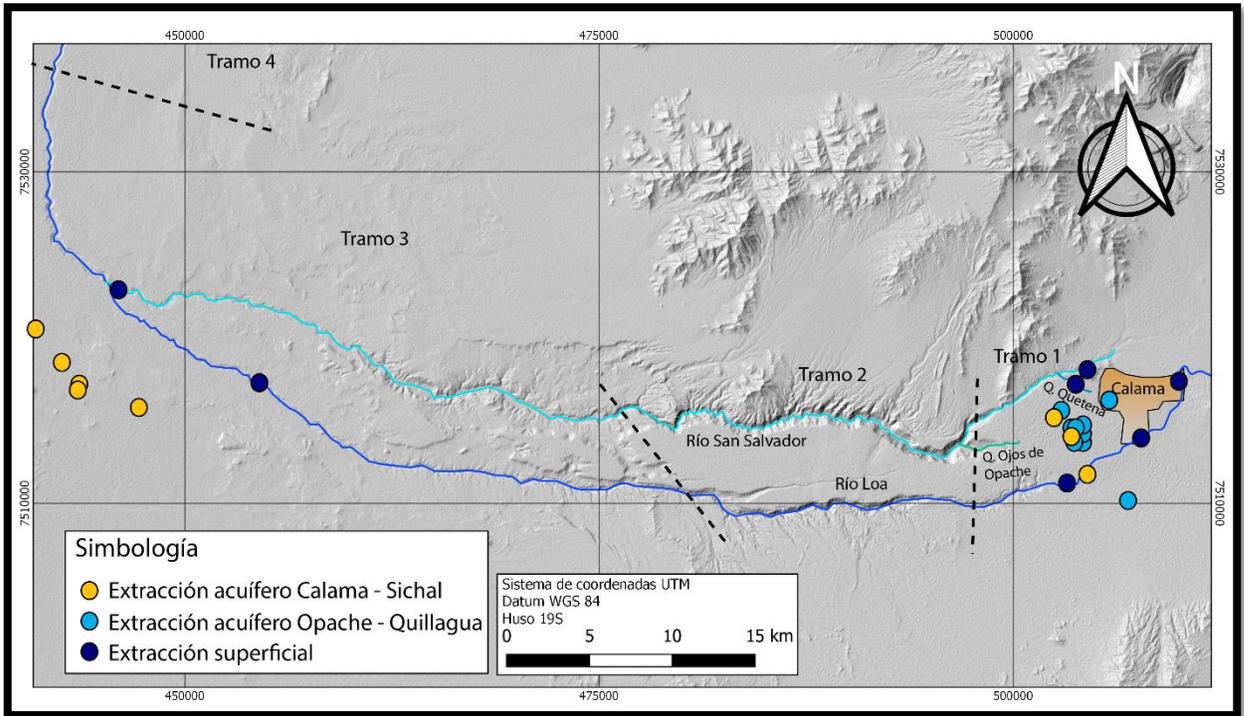


Figura 6.5 Ubicación geográfica de los derechos de agua actuales. Fuente: Elaboración propia.

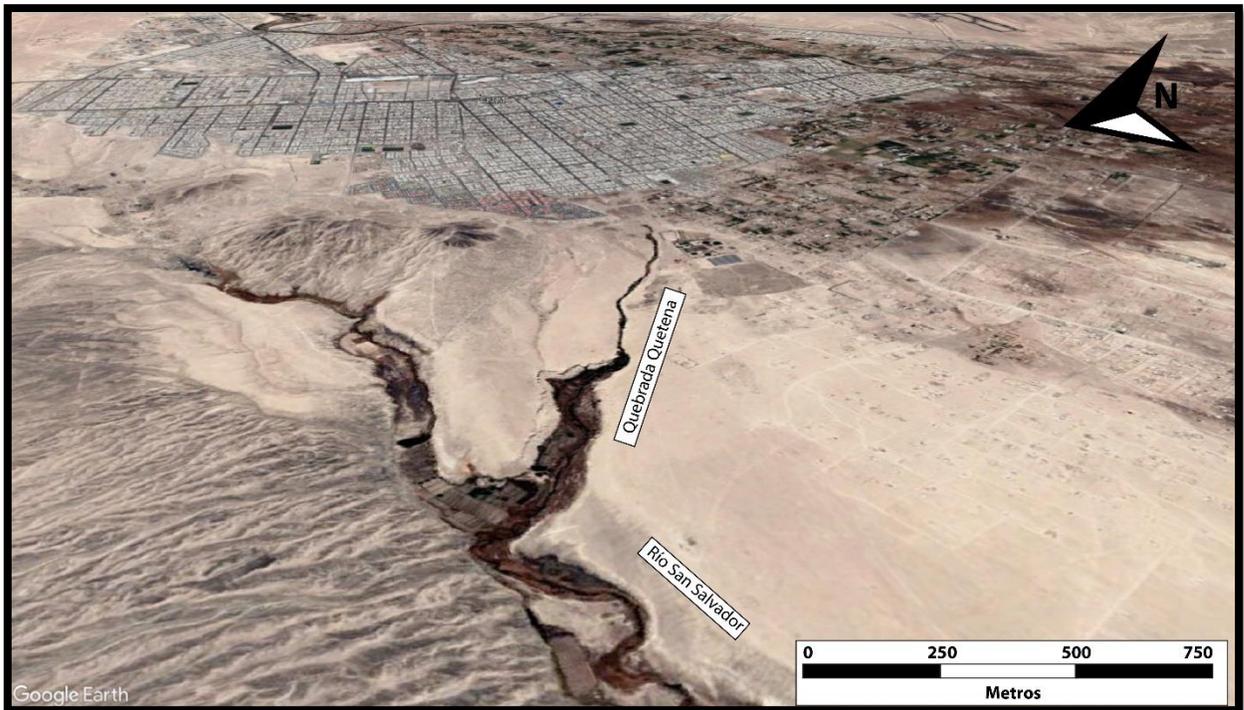


Figura 6.6 Imagen satelital del río San Salvador y la quebrada Quetena. Fuente: Google Earth Pro.

Por otro lado, en cuanto a las extracciones subterráneas, se infiere según los expedientes de la DGA, que 190 l/s son extraídos directamente del acuífero Calama-Sichal y 370 l/s son extraídos del sistema acuífero Opache-Quillagua. Obteniendo por lo tanto que sobre este sistema hidrogeológico se extraen antropicamente un total de 1172 l/s entre el sistema superficial y subterráneo.

6.7. Infiltración

De acuerdo con la piezometría realizada, la geometría del acuífero y los ensayos de infiltración efectuados en terreno se identifica que existe una infiltración del sistema superficial al subterráneo que se genera por unos kilómetros antes de la confluencia de los ríos Loa y San Salvador (Figura 6.7).

Esta infiltración se calcula considerando una tasa de infiltración del lecho del río de 1.1 m/día, correspondiente a la infiltración de un perfil estratigráfico de capas horizontales que considera un 80 % de materiales gruesos como arenas y 20 % de materiales finos como limos y arcillas, obteniendo como resultado un caudal de infiltración de 118 l/s del río San Salvador y de 762 l/s del río Loa (Tabla 6.2).

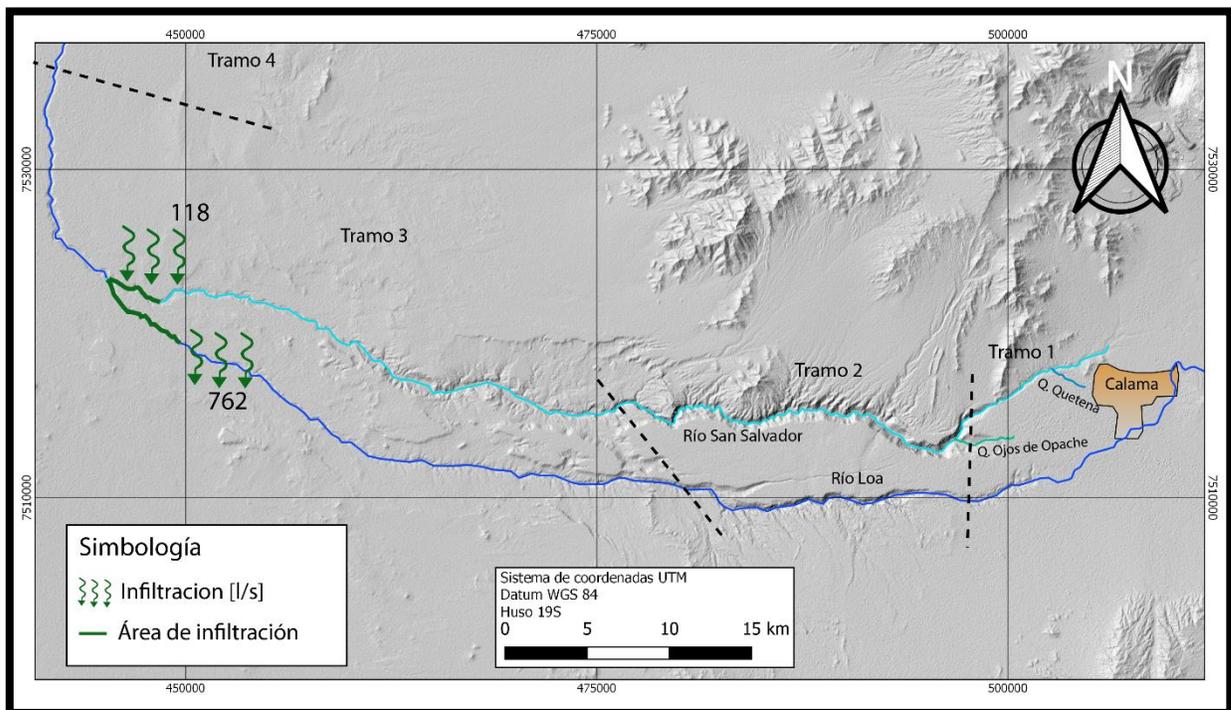


Figura 6.7 Caudal de infiltración de los ríos Loa y San Salvador. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.2 Parámetros utilizados en el cálculo de la infiltración.

	Infiltración río San Salvador	Infiltración río Loa
Área de infiltración [m ²]	9268	59851
Tasa de infiltración [m/día]	1.1	1.1
Caudal [l/s]	118	762

6.8. Afloramientos subterráneos

En función de la piezometría, la geomorfología, el trabajo en terreno y la estratigrafía de la zona de estudio se logra identificar aquellos lugares en que la superficie de terreno corta el nivel piezométrico de los acuíferos permitiendo el afloramiento de agua subterránea al sistema superficial (Figura 6.8).

En primer lugar para la unidad Opache – Quillagua, estos lugares de afloramientos se ubican en las nacientes del río San Salvador, en la quebrada Quetena, la Quebrada de Ojos de Opache y en el tramo 1 del río Loa, en los cuales para determinar el caudal vertido desde el sistema subterráneo se considera, un gradiente hidráulico de 0.04, según la piezométrica realizada, y una permeabilidad heterogénea coherente con el balance hidrogeológico y con los rangos de permeabilidad esperados para el acuífero Kárstico Opache – Quillagua (Tabla 6.3), obteniendo como resultado los valores de la Tabla 6.3, que en total suman un caudal de 782 l/s que afloran desde la unidad Opache – Quillagua al sistema superficial.

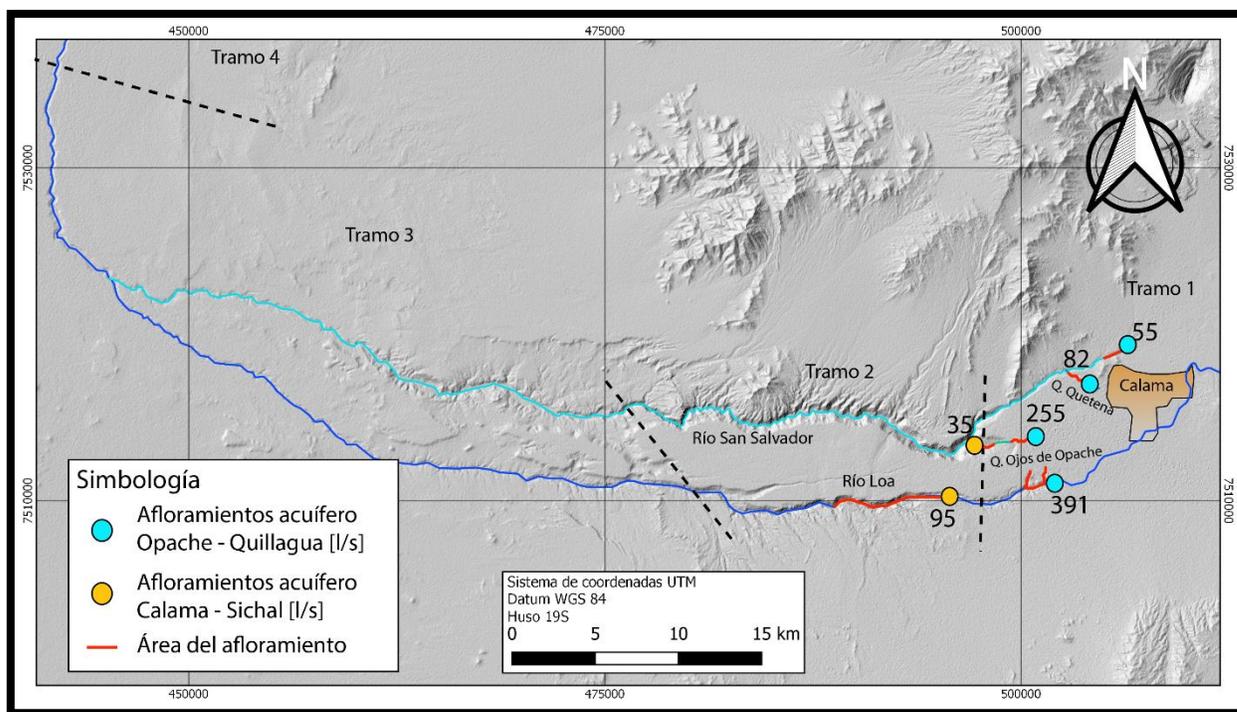


Figura 6.8 principales puntos de afloramiento de los acuíferos Opache – Quillagua y Calama – Sical. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.3 Parámetros utilizados en el cálculo del caudal de afloramiento del acuífero Opache - Quillagua. Fuente: Elaboración propia.

	Naciente río San salvador	Quebrada Quetena	Quebrada Ojos de Opache	Río Loa
Gradiente hidráulico	0.016	0.016	0.016	0.016
Área promedio [Km ²]	8.7 x 10 ⁻²	13 x 10 ⁻²	1.15 x 10 ⁻²	1.76 x 10 ⁻²
Conductividad hidráulica [m/día]	3.4	3.4	120	120
Caudal [l/s]	55	82	255	391

En segundo lugar, las zonas en que aflora agua de la unidad Calama – Sichal, se ubican en la quebrada Ojos de Opache y en el río Loa al suroeste de la misma quebrada, en donde esta unidad vierte al sistema superficial un caudal de 35 y 95 l/s respectivamente (Figura 6.8), el cual se obtuvo considerando un gradiente hidráulico de 0.04, según la piezométrica realizada, y una permeabilidad coherente con el balance y los rangos previamente caracterizados, de 0.75 m/día (Tabla 6.4).

Tabla 6.4 parámetros utilizados en el cálculo del caudal de afloramiento del acuífero Calama - Sichal. Fuente: Elaboración propia.

	Río Loa al sur oeste de Ojos de Opache	Quebrada Ojos de Opache
Gradiente hidráulico	0.04	0.04
Área promedio [Km ²]	10 x 10 ⁻²	27.4 x 10 ⁻²
Conductividad hidráulica [m/día]	0.75	0.75
Caudal [l/s]	35	95

6.1. Escorrentía subterránea:

En función de antecedentes y considerando la caracterización hidrogeológica previamente definida, se conoce que el flujo de agua subterráneo que ingresa al sistema por oriente con dirección Este-Oeste (Figura 6.9), presenta un caudal de entrada estimado según el balance hidrogeológico realizado por la DGA (2003) de 934 l/s, de los cuales 594 l/s provienen del sistema acuífero Opache-Quillagua y 340 l/s del sistema acuífero Calama-Sichal.

Por otro lado, hacia occidente se conoce que el flujo de agua subterránea sale del sistema con una dirección sureste-noroeste, cuyo caudal de descarga de 894 l/s se calcula al realizar el balance del sistema hidrogeológico (Tabla 6.6 y Tabla 6.7), el cual toma en cuenta un estado de equilibrio entre el sistema superficial y subterráneo.

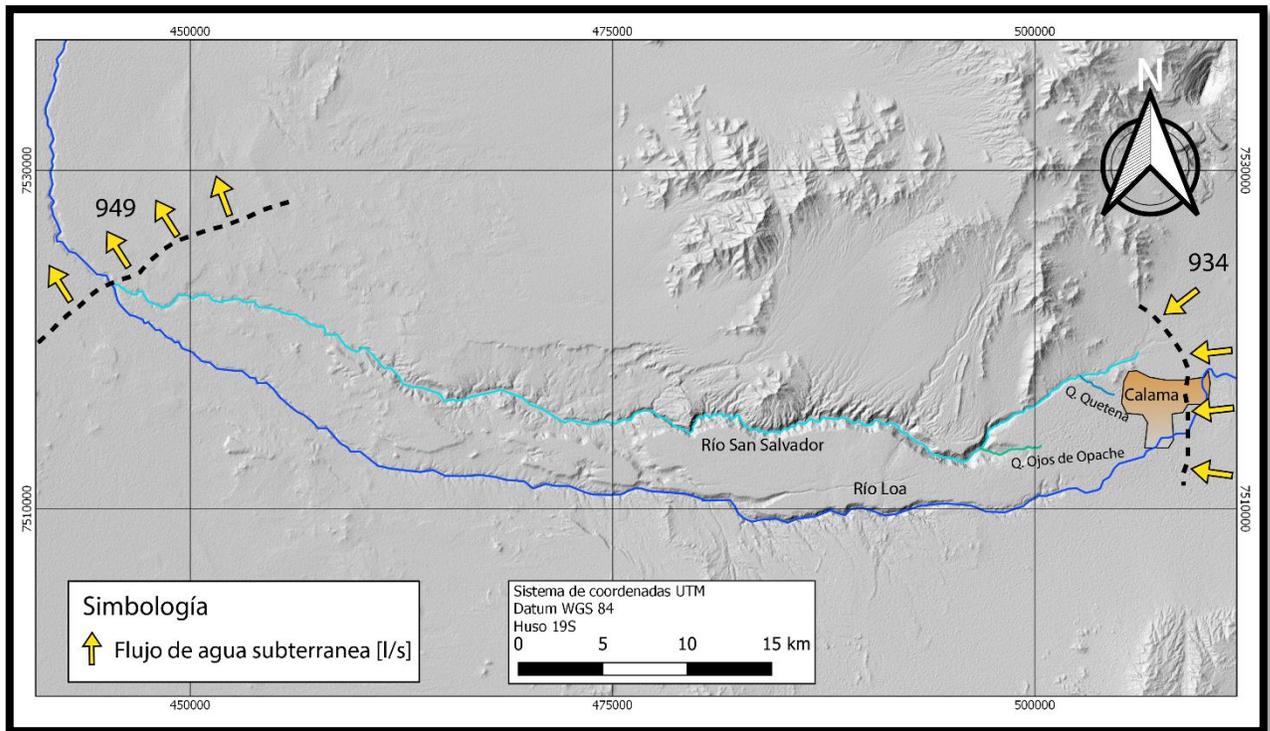


Figura 6.9 Caudales del flujo subterráneo del área en estudio. Fuente: Elaboración propia.

Todos estos valores de caudal obtenidos junto a la caracterización hidrogeológica del sistema permiten determinar a través de la ley de Darcy un valor preliminar para la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas (Tabla 6.5), dado que en función de la hidrodinámica del sistema, se conoce que el gradiente hidráulico en oriente para las unidades acuíferas Opache-Quillagua y Calama-Sichal resulta ser de 0.016 y que en occidente para la única unidad acuífera Calama-Sichal resulta ser de 0.006.

Tabla 6.5 Parámetros utilizados para ajustar los caudales del flujo subterráneo. Fuente: Elaboración propia.

Unidad	Permeabilidad [m/día]	Gradiente hidráulico	Área [Km ²]	Caudal [l/s]
Opache-Quillagua	3.44	0.016	0.93	594
Calama-Sichal (Este)	0.72	0.016	2.56	340
Calama-Sichal (Oeste)	2.83	0.006	4.53	894

Estos valores por una parte muestran que los resultados obtenidos del balance hídrico son consistentes con los rango de permeabilidades esperado para estas unidades según la caracterización de parámetros hidráulicos previamente realizado, exhibiendo en particular para la unidad Calama-Sichal un aumento de la conductividad hidráulica hacia

occidente, lo cual concuerda con la leve variación litológica existente en esta unidad entre las formaciones Calama y Sical entre oriente y occidente respectivamente.

Por otra parte, para la unidad Opache – Quillagua se calcula una permeabilidad única y representativa del sistema de 3.44 m/día, la cual en un ámbito regional responde al flujo de agua subterránea que entra por oriente en la zona de estudio, sin embargo, hay que recordar la heterogeneidad que caracteriza a este acuífero kárstico, por lo que considerar este valor como representativo de la unidad sería erróneo a una escala local.

Por otro lado, incorporando cada uno de los mecanismos de carga y descarga del sistema hidrogeológico se resuelve el balance hidrogeológico (Figura 6.10). en el cual se identifica en primer lugar que los valores calculados son coherente y consistentes con el modelo conceptual y los aforos realizados en el río San Salvador (GHD, 2018), sugiriendo por lo tanto que estos mecanismos son los principales agentes que están afectando al sistema hidrogeológico regional.

Por otra parte, también hay que destacar que este balance hidrogeológico concuerda con la sectorización del sistema, identificando para el tramo 1 una fuerte interacción del sistema superficial con la unidad acuífera Opache – Quillagua, para el tramo 2 una nula interacción entre los sistemas superficial y subterráneo, y finalmente, en el tramo 3 una reactivación de la interacción que se ve expresada principalmente por infiltraciones del sistema superficial a la unidad acuífera Calama – Sical.

Por último, a su vez hay que destacar que todas las entradas sobre la unidad acuífera Opache - Quillagua, son extraídas por efecto de los afloramientos y las extracciones subterráneas antrópicas, las que provocan que esta unidad se encuentre completamente drenada al oeste de la vertiente de Ojos de Opache.

Tabla 6.6 Entradas del balance hidrogeológico superficial y subterráneo. Fuente: Elaboración propia.

Entradas	
Mecanismo	Caudal [l/s]
Flujo subterráneo unidad Opache - Quillagua (Este)	594
Flujo subterráneo unidad Calama – Sical (Este)	340
Flujo superficial río Loa (Este)	1106
Flujo superficial río San Salvador (Este)	0
Afloramiento Quebrada Quetena (Unidad Opache-Quillagua) *	82
Afloramiento 1 Quebrada ojos de Opache (Unidad Opache-Quillagua) *	255
Afloramiento 2 Quebrada ojos de Opache (Unidad Calama - Sical) *	35
Afloramiento al sur de Ojos de Opache (Unidad Opache-Quillagua) *	391
Afloramiento naciente San Salvador (Unidad Opache-Quillagua) *	55
Afloramiento al sur oeste de Ojos de Opache en río Loa (Unidad Calama - Sical) *	95
Infiltración del río San Salvador *	118

Infiltración del río Loa *	762
Recargas por riego	559
Vertido de aguas servidas (Quebrada Quetena)	265
Precipitaciones	116
Entradas totales del sistema	4773

* Mecanismos que reflejan la interacción entre el sistema superficial y subterráneo, y han sido considerados tanto como caudales de entrada y de salida de este sistema.

Tabla 6.7 Entradas del balance hidrogeológico superficial y subterráneo. Fuente: Elaboración propia.

Salidas	
Mecanismo	Caudal [l/s]
Flujo subterráneo unidad Opache - Quillagua (Este)	0
Flujo subterráneo unidad Calama – Sichal (Este)	894
Flujo superficial río Loa (Este)	310
Flujo superficial río San Salvador (Este)	217
Afloramiento Quebrada Quetena (Unidad Opache-Quillagua) *	82
Afloramiento 1 Quebrada ojos de Opache (Unidad Opache-Quillagua) *	255
Afloramiento 2 Quebrada ojos de Opache (Unidad Calama - Sichal) *	35
Afloramiento al sur de Ojos de Opache (Unidad Opache-Quillagua) *	391
Afloramiento naciente San Salvador (Unidad Opache-Quillagua) *	55
Afloramiento al sur oeste de Ojos de Opache en río Loa (Unidad Calama - Sichal) *	95
Infiltración del río San Salvador *	118
Infiltración del río Loa *	762
Extracciones antrópicas de la unidad Opache - Quillagua	370
Extracciones antrópicas de la unidad Calama - Sichal	190
Extracciones antrópicas río Loa	384
Extracciones antrópicas río San Salvador	228
Evaporación del río Loa	136
Evaporación del río San Salvador	129
Evapotranspiración	122
Salidas totales del sistema	4773

* Mecanismos que reflejan la interacción entre el sistema superficial y subterráneo, y han sido considerados tanto como caudales de entrada y de salida de este sistema.

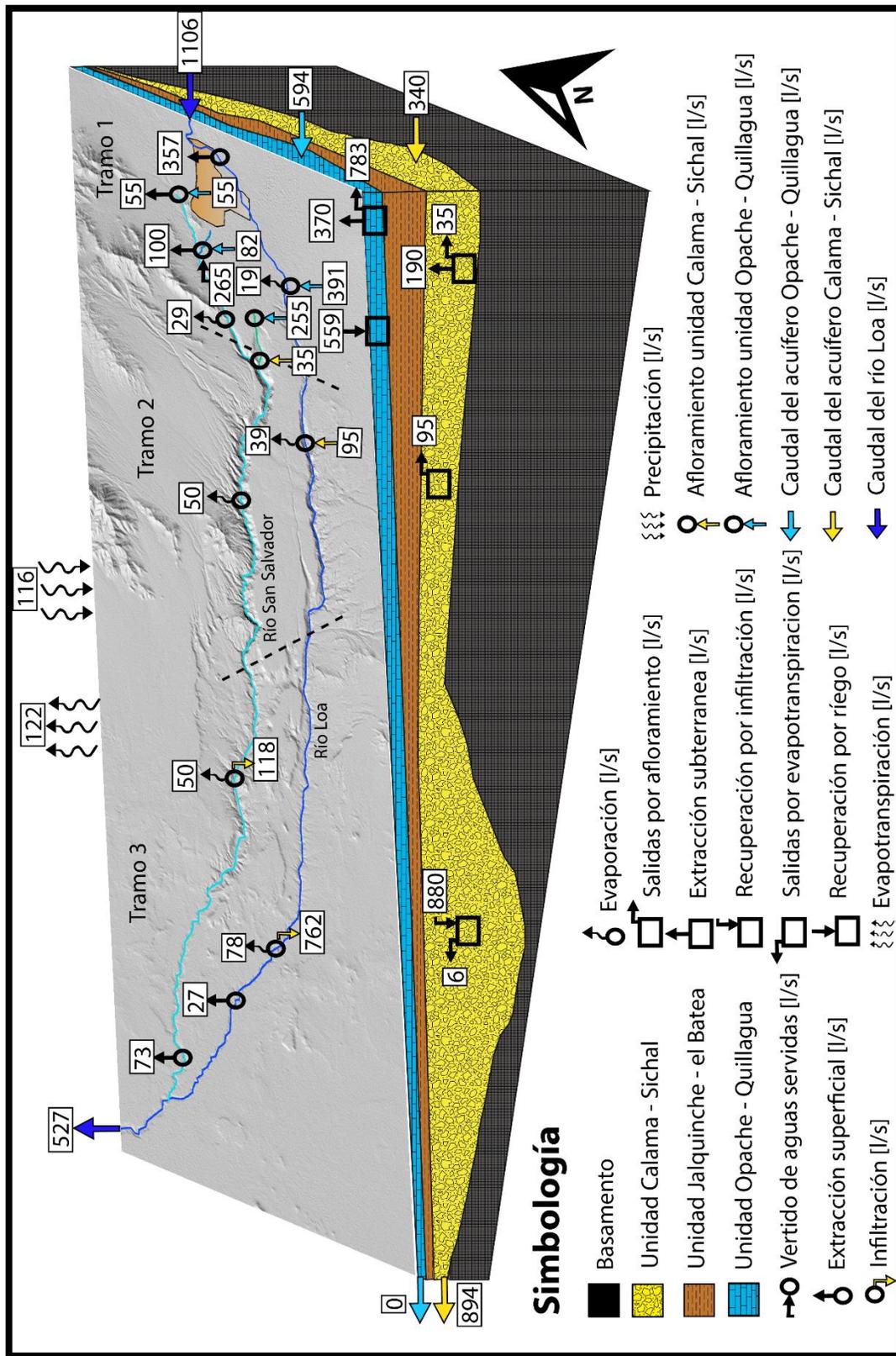


Figura 6.10 Balance Hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las muestras de agua subterránea se obtienen a través de la construcción de 6 punteras de aproximadamente 1,5 metros de profundidad, ubicadas a menos de 1 metro de distancia de las muestras de agua superficial tomada (Anexo I). Sin embargo, estas muestras de agua subterránea resultan ser poco representativas del sistema subterráneo, debido a que la cercanía de estas con el sistema superficial genera una mezcla con el sistema subterráneo que altera las concentraciones de las muestras, además al obtener la muestra a tan solo unos centímetros de la superficie las altas tasas de evaporación de la zona aumentan las concentraciones de los elementos de la muestra.



Figura 7.2 Imagen de una de las punteras realizadas para la toma de muestras de agua subterránea. Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, dadas las complicaciones que puede traer el análisis de las muestras obtenidas en punteras, se considera en este estudio tan solo las muestras de agua superficial para caracterizar este sistema. Dentro de las cuales, las muestras PSA y PF*, ubicadas en la naciente del río San Salvador y en la vertiente de Ojos de Opache respectivamente son consideradas como representativa del agua subterránea de la unidad Opache Quillagua, esto debido a que ambas muestras provienen directamente de los afloramientos de esta misma unidad.

Además, es importante destacar que la muestra de agua superficial PSC es tomada en un afloramiento de agua, ubicado en las nacientes de la quebrada Quetena, que se encuentra estancada y desconectada del flujo de agua superficial de la quebrada, por lo cual las concentraciones obtenidas de esta muestra se encuentran fuertemente influenciados por las altas tasas de evaporación.

Para caracterizar hidroquímicamente la zona se representa la información hidroquímica de las muestras en un diagrama de Piper (Figura 7.3), del cual se evidencia en primer lugar que el agua del río San Salvador, en toda su extensión, es de tipo clorurada sódica.

En segundo lugar también se identifica en particular para las muestras PSD y DESCARGA (muestras encerradas en azul en la Figura 7.3) una variación en la concentración de cloruro y sulfato que aparta estas dos muestras del resto, lo cual estaría netamente relacionado por el impacto que genera el vertido de aguas servidas en la quebrada Quetena que disminuye las concentraciones de estos elementos.

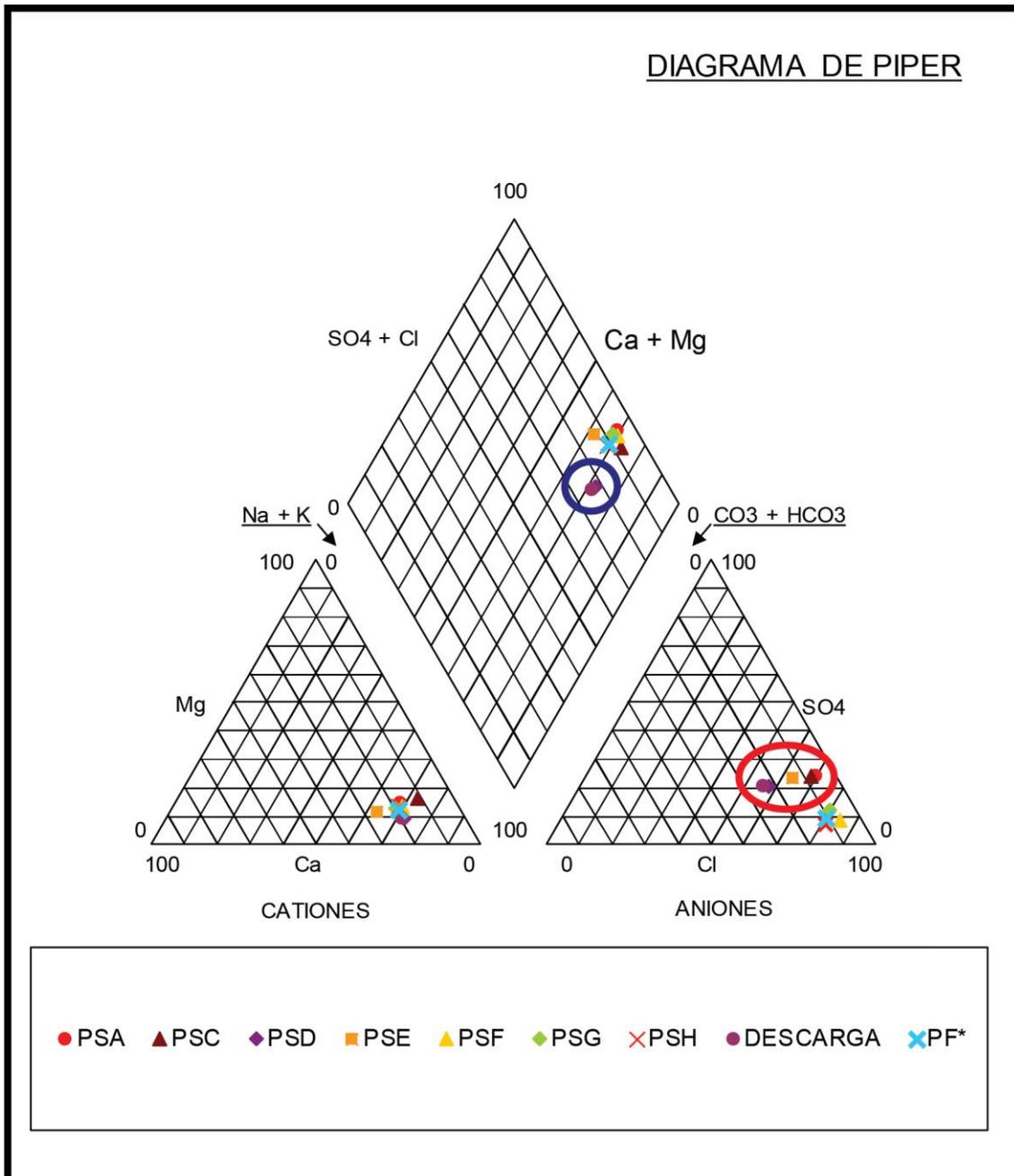


Figura 7.3 Diagrama de Piper de las muestras superficiales tomadas. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte a su vez se identifica en el mismo diagrama (Figura 7.3), que todas las muestras tomadas al este de la quebrada Ojos de Opache (muestras encerradas en rojo en la Figura 7.3) presentan una composición inferior de cloruro que el resto, que en otras palabras indica un aumento en la concentración de cloruro aguas abajo de la confluencia del río San Salvador con la vertiente Ojos de Opache.

Esta variación en la concentración de cloruro estaría netamente relacionada por el aporte de agua subterránea proveniente de la quebrada Ojos de Opache, ya que la concentración químicas de la muestra PF*, representativa del sistema subterráneo, es de similares características que las muestra PSG y PSH (Figura 7.3) ubicadas aguas abajo de la confluencia del río San Salvador con la quebrada Ojos de Opache (Figura 7.1).

Por lo tanto, hidroquímicamente el río San Salvador se divide en dos tramos, el primero ubicado entre la quebrada Quetena y la quebrada Ojos de Opache caracterizado por presentar una composición química dominada por la descarga de aguas servidas de la quebrada Quetena y el segundo ubicado al oeste de la quebrada Ojos de Opache caracterizado por presentar un dominio hidroquímico dependiente del agua subterránea proveniente de la vertiente Ojos de Opache.

En conjunto con la información anterior, también se analiza el sistema y se valida el balance hidrogeológico a través del estudio de elementos conservativos como el cloro (Figura 7.4) y el boro (Figura 7.5).

Sin embargo, antes de comenzar con este análisis es importante dejar claro y recordar que las muestras de agua PSA y PSC ubicadas en la naciente del río San Salvador y de la quebrada Quetena, se encuentra desconectadas del sistema superficial del río San Salvador y que además la muestra PSC se encuentra fuertemente perturbada por la evaporación, que genera concentraciones elevadas de Cloruro y boro, que llegan hasta los 7735 y 121 mg/l respectivamente.

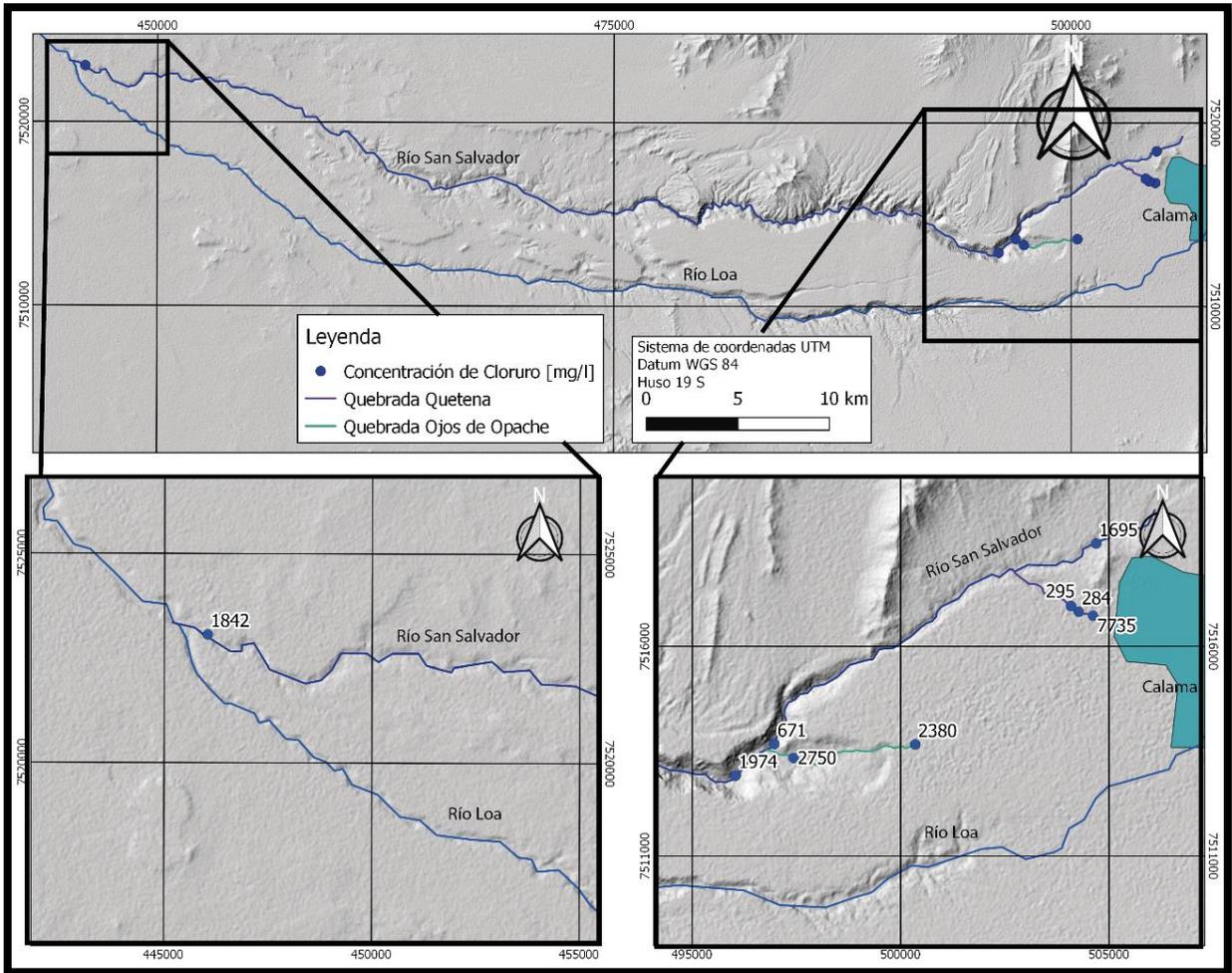


Figura 7.4 Mapa con las concentraciones de cloruro [mg/l]. Fuente: Elaboración propia.

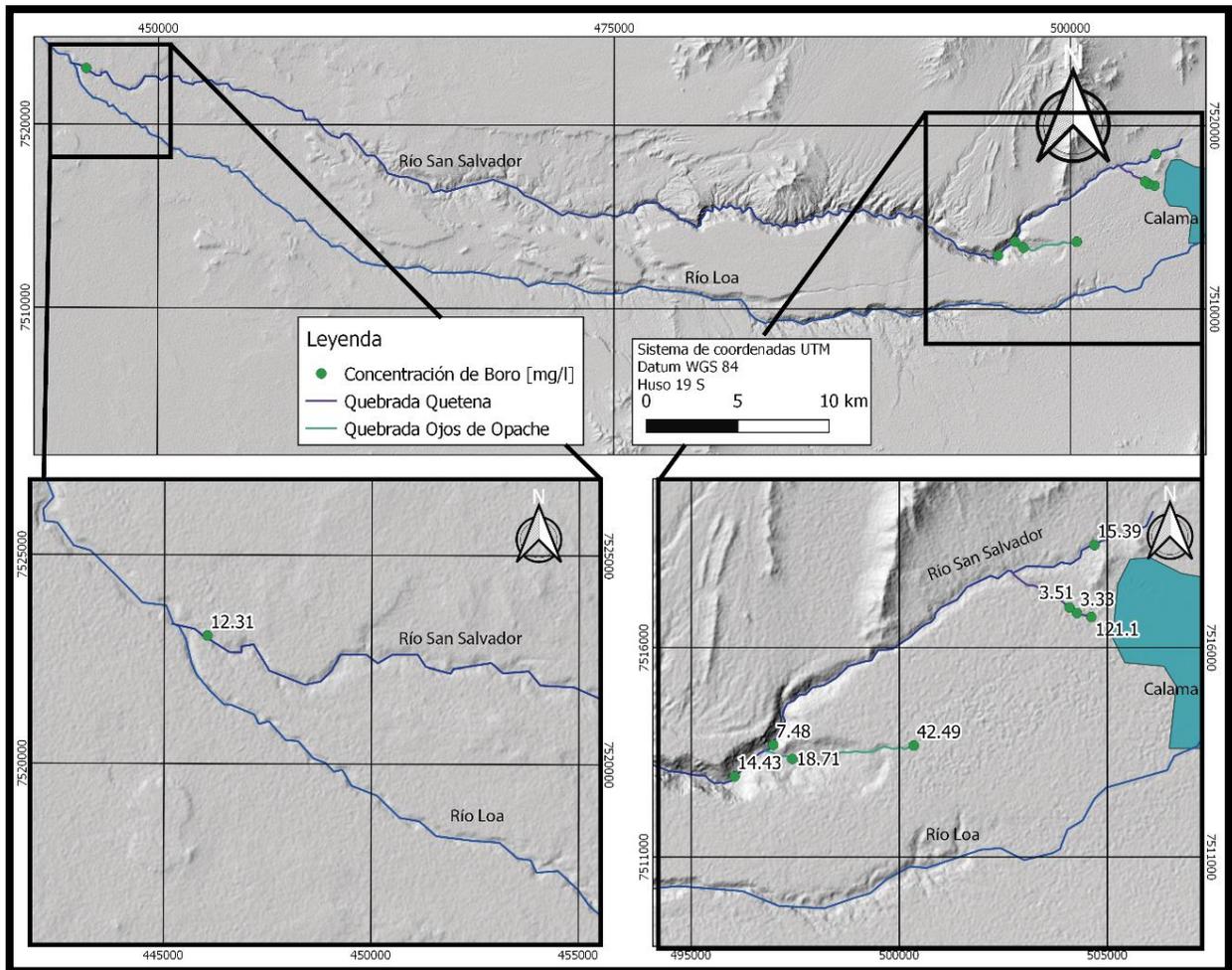


Figura 7.5 Mapa con las concentraciones de boro [mg/l]. Fuente: Elaboración propia.

Comenzando desde este a oeste por la quebrada Quetena, principal afluente de agua al río San Salvador, se identifica que las concentraciones de cloruro y boro se duplican entre la quebrada Quetena y la quebrada de Ojos de Opache, alza que se justifica considerando la evaporación de 29 l/s y el aporte de 82 l/s de agua subterránea del acuífero Opache – Quillagua (ver balance Figura 6.10) en la quebrada Quetena.

Luego en la Quebrada de Ojos de Opache se identifica entre las nacientes y la desembocadura un aumento en la concentración de Cloruro y una disminución en la concentración de Boro, cuyo comportamiento anómalo se explica considerando el aporte de agua subterránea de la unidad Calama – Sichal determinada a través de la estratigrafía y piezometría calculados previamente.

Este aporte de la unidad Calama - Sichal se ve claramente al representa en un diagrama la razón entre la concentración de Cloro y Boro (Figura 7.6), en donde se reconoce la existencia dos series de datos con distintas razones Cl/B. En una de estas series cuya razón es inferior a los 110 se ubican la muestra de agua de las nacientes de la quebrada Ojos de Opache (PF*) y las muestras de agua ubicadas al este de esta misma quebrada.

Mientras que, por otro lado, se encuentran la serie cuya razón es superior a los 110 e incluye a las muestras de agua tomadas en la desembocadura de la quebrada Ojos de Opache (PSF) y las muestras ubicadas al oeste de la misma quebrada.

Esta diferencia en la razón Cl/B indica que la hidroquímica de las muestras entre las nacientes y la desembocadura de la quebrada Ojos de Opache, dependen de distintas fuentes de agua con distintas concentraciones de elementos conservativos, por lo cual el afloramiento de la unidad Opache – Quillagua evidenciado en las nacientes de esta quebrada extraían afectados por los afloramientos de la unidad Calama – Sical propuestos estratigráficamente.



Figura 7.6 Diagrama de la razón Cloro – Boro. Fuente: Elaboración propia.

Continuando con el análisis de los elementos conservativos, se identifica en la confluencia del río San Salvador con la quebrada Ojos de Opache, que las concentraciones de los elementos conservativos de las muestras responden al balance hidrogeológico propuesto. En otras palabras, la concentración calculada mediante un balance de cloruros y boro después de la confluencia es coherente con los caudales y las concentraciones medidas, al suponer una mezcla de agua proveniente del río San Salvador y de la quebrada Ojos de Opache. La cual exhibe un error entre los valores calculados y medidos inferior al 6% (Tabla 7.1).

Tabla 7.1 Comparación entre la concentración estimada y la concentración medida. Fuente: Elaboración propia.

Elemento analizado	Concentración estimada en PSF [mg/l]	Concentración medida en PSF [mg/l]	Error entre valores medidos y calculados
Cloruro	1858	1974	-5.8%
Boro	13.9	14.4	3.5%

Finalmente, entre las muestras PSG y PSH (Figura 7.4 y Figura 7.5) se evidencia una disminución de la concentración de los elementos conservativos analizados, lo cual resulta ser incoherente para la evaporación de 100 l/s estimada en el balance hidrogeológico, debido a que esta evaporación tendería a aumentar la concentración del cloro y el boro. Sin embargo, como ocurre lo contrario se piensa que la interacción del río San Salvador con la unidad Calama-Sichal, propuesta en la caracterización hidrogeológica, sería la responsable de la disminución de las concentraciones de estos elementos. Afirmación que no es posible cuantificar, pero sí sugerir con un cierto grado de incertidumbre.

8. Modelo numérico

En función de la caracterización hidrogeológica y considerando los resultados obtenidos del balance hídrico se realiza a través del código Visual Modflow un modelo numérico representativo del modelo conceptual propuesto con la finalidad de validar numéricamente el funcionamiento hidrogeológico entre Calama y María Elena.

Para cumplir con este objetivo, se modela en un estado estacionario el sistema comprendido entre los ríos Loa y San Salvador, por lo cual se realiza un modelo de tres capas coherente con la geometría del sistema hidrogeológico propuesto y que representa de base a techo a las unidades Calama - Sichal, Jalquinche - El Batea y Opache - Quillagua (Figura 8.1).

Este modelo numérico tiene una extensión de 894 km² con un refinamiento de la grilla de 100 m x 100 m.

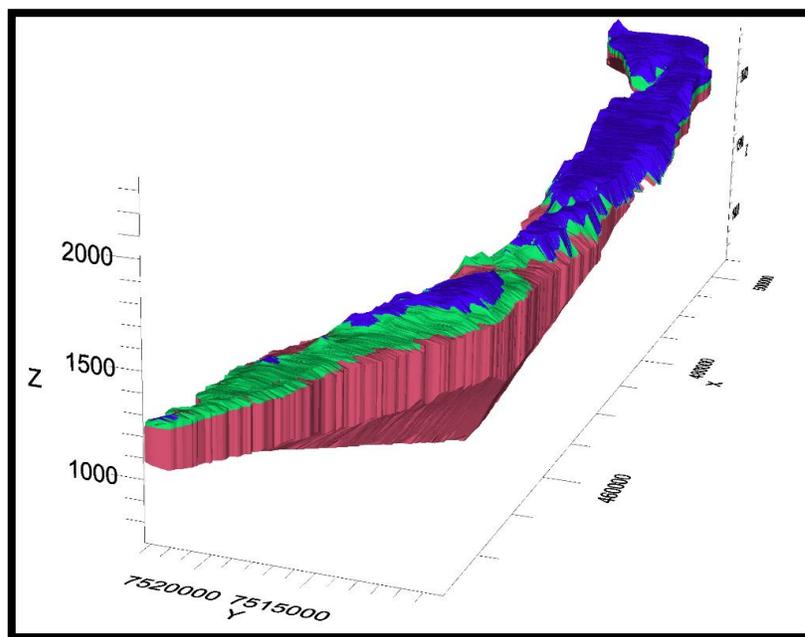


Figura 8.1 Representación 3D de las capas definidas en el modelo numérico.
Fuente: Elaboración propia.

8.1. Condiciones de borde

Con la finalidad de representar el funcionamiento correcto de este sistema hidrogeológico en todos los bordes del dominio de modelación, se definen cuidadosamente como principales condiciones de contorno, las condiciones de río, de no flujo y de nivel fijo (Figura 8.2), las que son explicadas con mayor detalle a continuación.

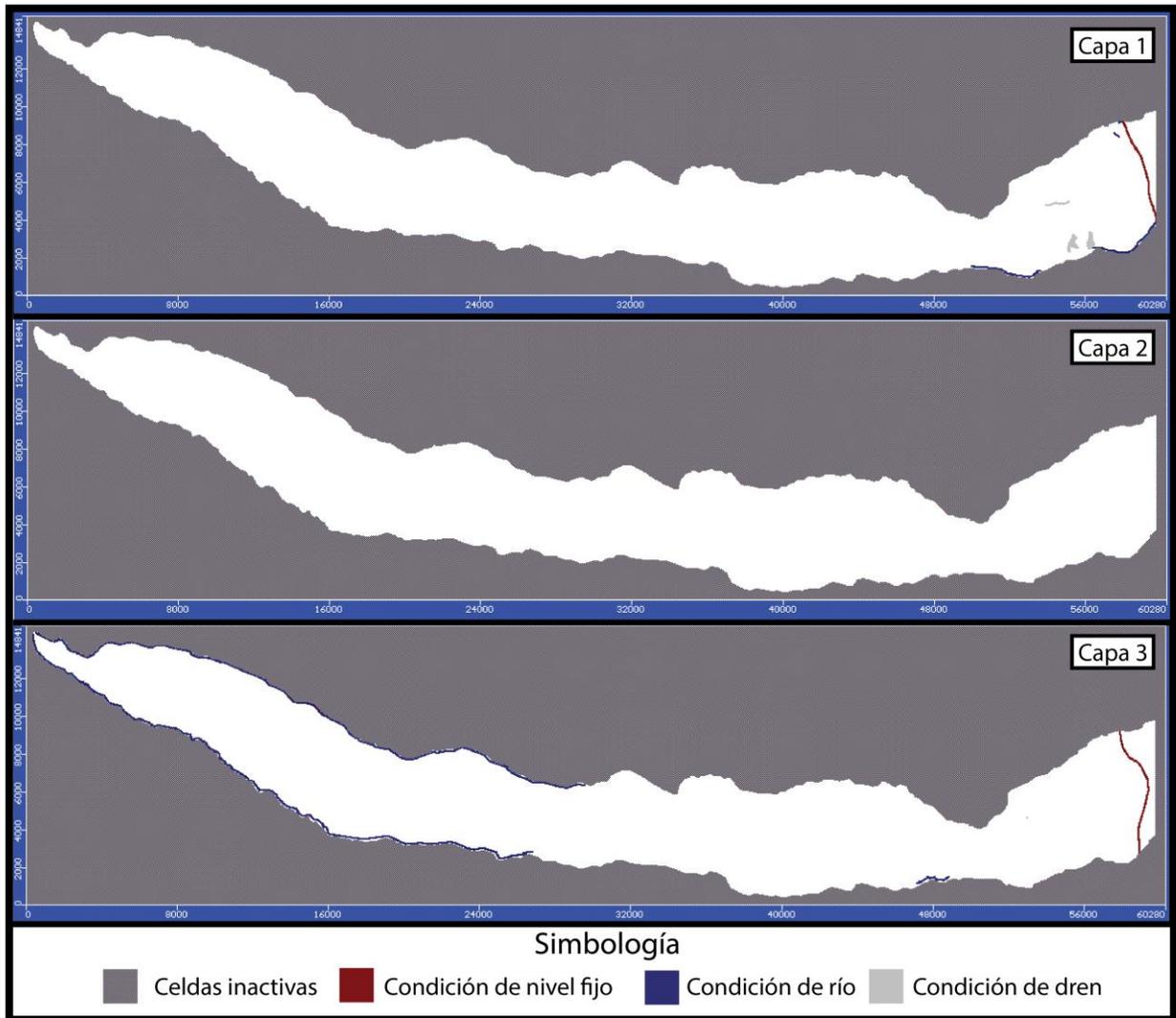


Figura 8.2 Condiciones de borde consideradas para las capas del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, como se conoce que el flujo de agua subterránea de ambas unidades acuíferas entra por el este del sistema subterráneo con una dirección de flujo de orientación este oeste, se define en el borde oriental del modelo numérico una condición de nivel fijo para la capa superior e inferior, cuyo valor y disposición espacial se obtiene de acuerdo a las isopiezas 2250 y 2260 de la piezometría realizada para las unidades Opache – Quillagua y Calama Sichal respectivamente (Figura 5.20 y Figura 5.21).

Esta condición de nivel fijo es definida en este sector porque la incertidumbre que presenta el nivel piezométrico en este lugar es menor a la que presenta el caudal estimado en el borde oriental, en otras palabras, la permeabilidad de las unidades en cuestión es una variable que está pobremente definida actualmente, por lo cual determinar un caudal o considerar una condición de caudal fijo en oriente es inconsecuente en esta ocasión.

En segundo lugar, se considera como condición de borde, al sur y al norte del modelo, los ríos Loa y San Salvador respectivamente, atribuyendo a la capa que corresponda la consecuente condición de río (Figura 8.2), de acuerdo a la interacción río acuífero definida a través de la caracterización hidrogeológica (Figura 5.5 y Figura 5.20 y Figura 5.21).

Esta condición de río es definida en este modelo con el objeto de poder calibrar más adelante el flujo de agua que entra y sale por esta condición con la interacción del sistema superficial y subterráneo definido en el balance hidrogeológico. Es por esta razón que no se considera como condición de borde una condición de nivel fijo o de caudal constante.

Por otro lado, para esta condición de río, se considera un ancho promedio, para los ríos Loa y San Salvador, de 15 y 10 metros respectivamente, con una permeabilidad y espesor del lecho estimada en aproximadamente 1.1 m/día y 1 m respectivamente, cuyos valores se estiman de acuerdo con la caracterización hidrogeológica y las observaciones de terreno.

Además, para esta condición de borde se fija el nivel de agua de los ríos tomando en cuenta la elevación obtenida de los mapas de elevación digital, cuya desviación con los valores reales inferior a los 5 m permite lograr, para la escala de estudio, una certera aproximación de la elevación real.

En tercer lugar, también se considera como condición de contorno, una condición de no flujo en aquellos bordes en que el basamento limita el sistema, como por ejemplo en el tramo 2 de la caracterización hidrogeológica, donde los ríos Loa y San Salvador escurren sobre el basamento.

Adicionalmente, se integra en el modelo a través de la condición de dren, aquellos lugares en que se identificaron afloramientos de las unidades Opache – Quillagua y Calama – Sical, ubicados en la quebrada de Ojos de Opache y al sur de esta misma.

Para estas condiciones de dren se considera una conductancia similar a la permeabilidad de la capa que se viera afectada por este proceso y se le asigna un nivel de elevación del dren de acuerdo con el mapa de elevación digital de la zona.

8.2. Parametrización

En función de la caracterización hidrogeológica realizada, se realizó la zonificación y parametrización de la conductividad hidráulica en el modelo numérico.

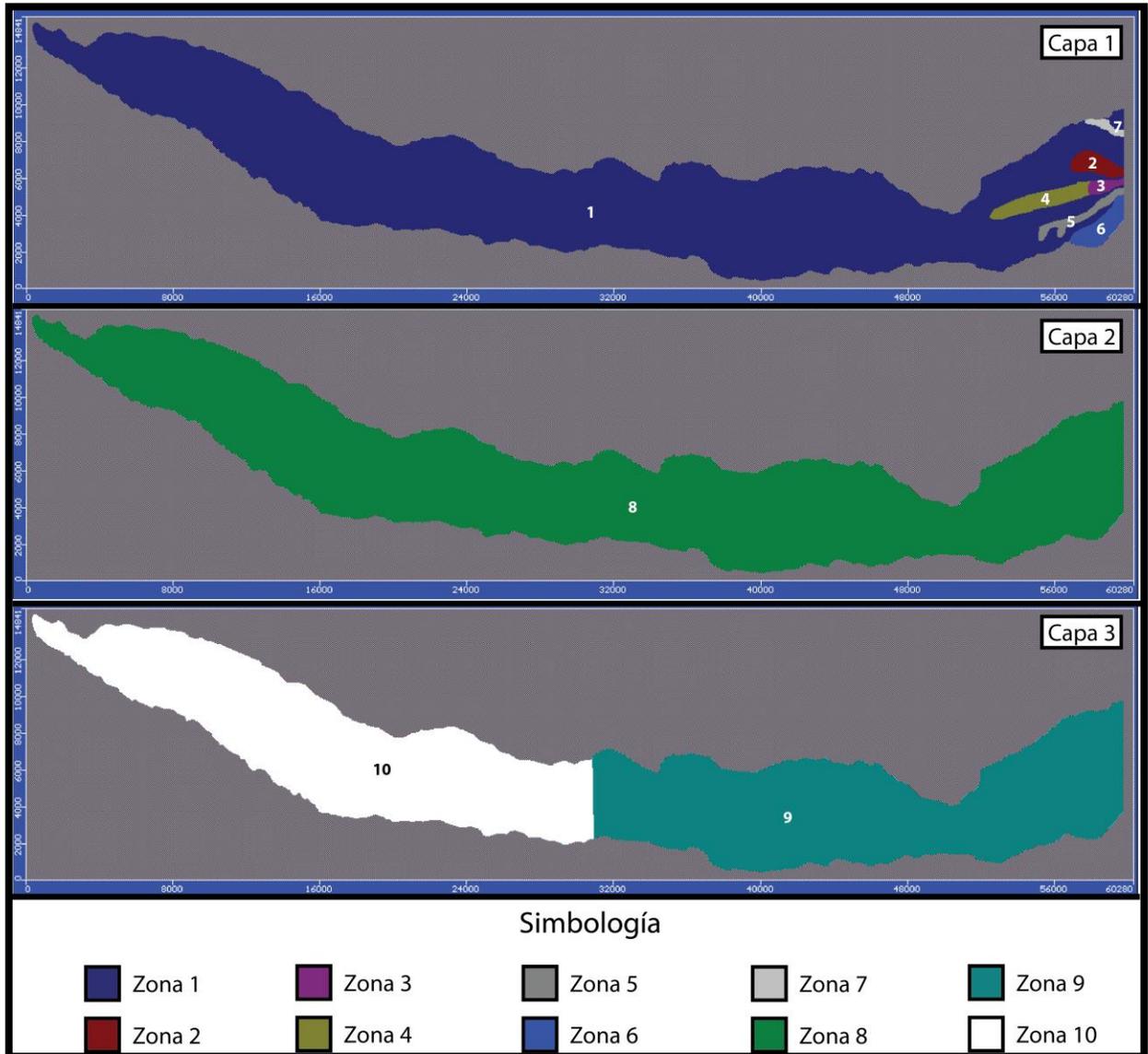


Figura 8.3 Parametrización de las capas del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.

Para la unidad Opache – Quillagua o capa 1, cuya permeabilidad se ha determinado heterogénea en este trabajo, se definen en base a la geomorfología y observaciones de terreno 7 zonas de permeabilidades distintas; la zona 1 considera la permeabilidad representativa del flujo regional; las zonas 2 y 3 representan la permeabilidades observada en los pozos de la ciudad de Calama (Anexo E), la zona 4 corresponde a la zonificación de la permeabilidad que permite el afloramiento caudaloso en la vertiente

Ojos de Opache; la zona 5 presenta una disposición espacial que posibilita el afloramiento de esta unidad al sur de la quebrada Ojos de Opache; la zona 6 representa la interacción río-acuífero sobre el río Loa y finalmente la zona 7 muestra la zonificación que permite los afloramientos en las nacientes del río San Salvador.

Por otro lado, para la unidad Jalquinche – El batea o capa 2, dado su carácter impermeable se define una permeabilidad homogénea a lo largo de toda su extensión (zona 8). Mientras que para la unidad Calama – Sichal o capa 3, se zonifica la permeabilidad entre oriente (Zona 9) y occidente (zona 10), de acuerdo con la variación estimada en el balance hidrogeológico y considerando la diferencia litológica de la unidad.

8.3. Calibración del modelo numérico

La calibración del modelo numérico se realiza considerando variable la conductividad hidráulica de las zonas previamente definidas, lo cual permite ajustar los caudales de entrada y salida del balance hidrogeológico del modelo conceptual (Figura 8.4) junto a los niveles observados en pozos y sondajes (Anexo E).

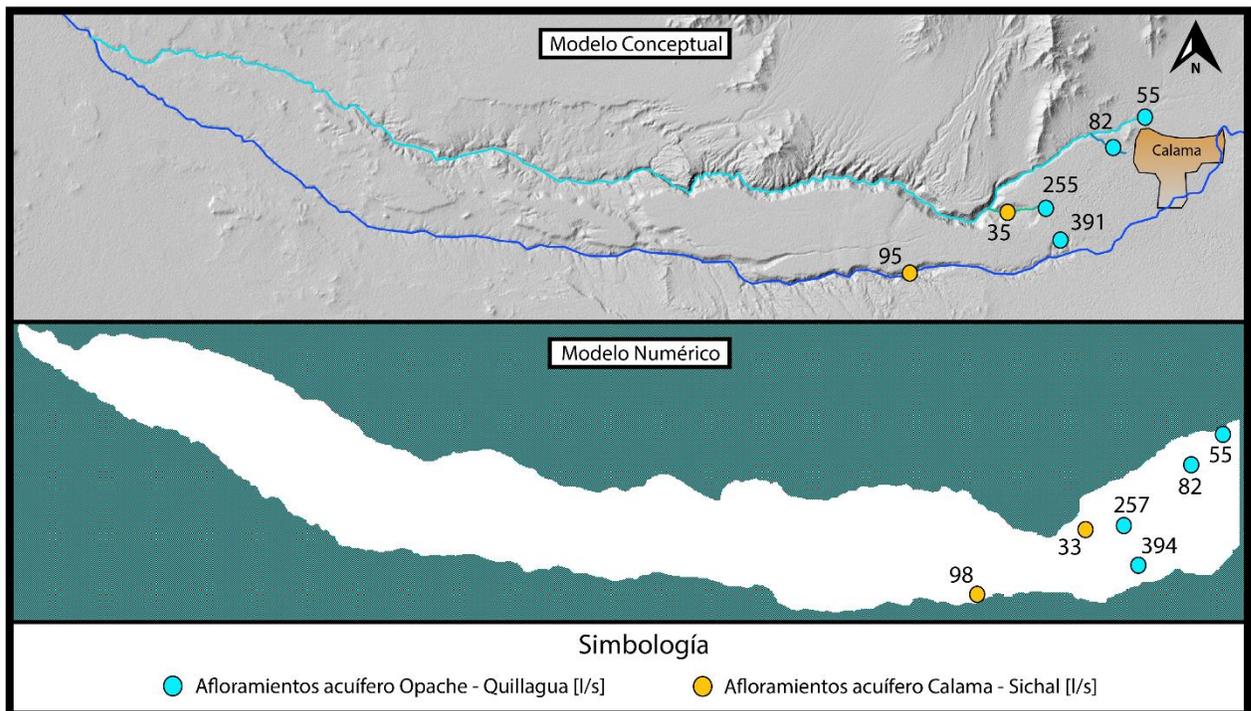


Figura 8.4 Comparación de los caudales obtenidos del balance hidrogeológico y los calculados por el modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.

Estos caudales calculados en el modelo numérico y que se ajustan al balance hidrogeológico del modelo conceptual (Figura 8.4), se obtienen considerando las permeabilidades de la Tabla 8.1, las cuales resultan ser coherentes con la caracterización de la conductividad hidráulica de las unidades acuíferas, que en efecto para la capa 1 oscila entre los 0.5 y 188 m/día, para la capa 2 toma un valor único de 0.01 y para la capa 3 toma valores que van de los 0.6 a los 1.1 m/día.

Tabla 8.1 Parametrización de las zonas de permeabilidad del modelo numérico, coherentes con el modelo conceptual. Fuente: Elaboración propia.

	Kx [m/día]	Ky [m/día]	Kz [m/día]
 Zona 1	3.48	3.48	3.48
 Zona 2	150	150	150
 Zona 3	20	20	20
 Zona 4	188	188	188
 Zona 5	54	54	54
 Zona 6	0.5	0.5	0.5
 Zona 7	13	13	13
 Zona 8	0.01	0.01	0.01
 Zona 9	1.1	1.1	1.1
 Zona 10	0.6	0.6	0.6

Por otro lado considerando los niveles piezométricos observados en los pozos y sondajes ubicados al este de la zona de estudio, se desprende del gráfico de la Figura 8.5, que los resultados entregados por el modelo numérico, dadas las permeabilidades de la Tabla 8.1, se ajustan a los valores observados, obteniendo un valor residual promedio de 4,8 metros, un coeficiente de correlación de 0,97 y una desviación estándar de 1,7 metros, los cuales dada la escala de estudio son admisibles para realizar un análisis fehaciente de los resultados entregados por el modelo numérico .

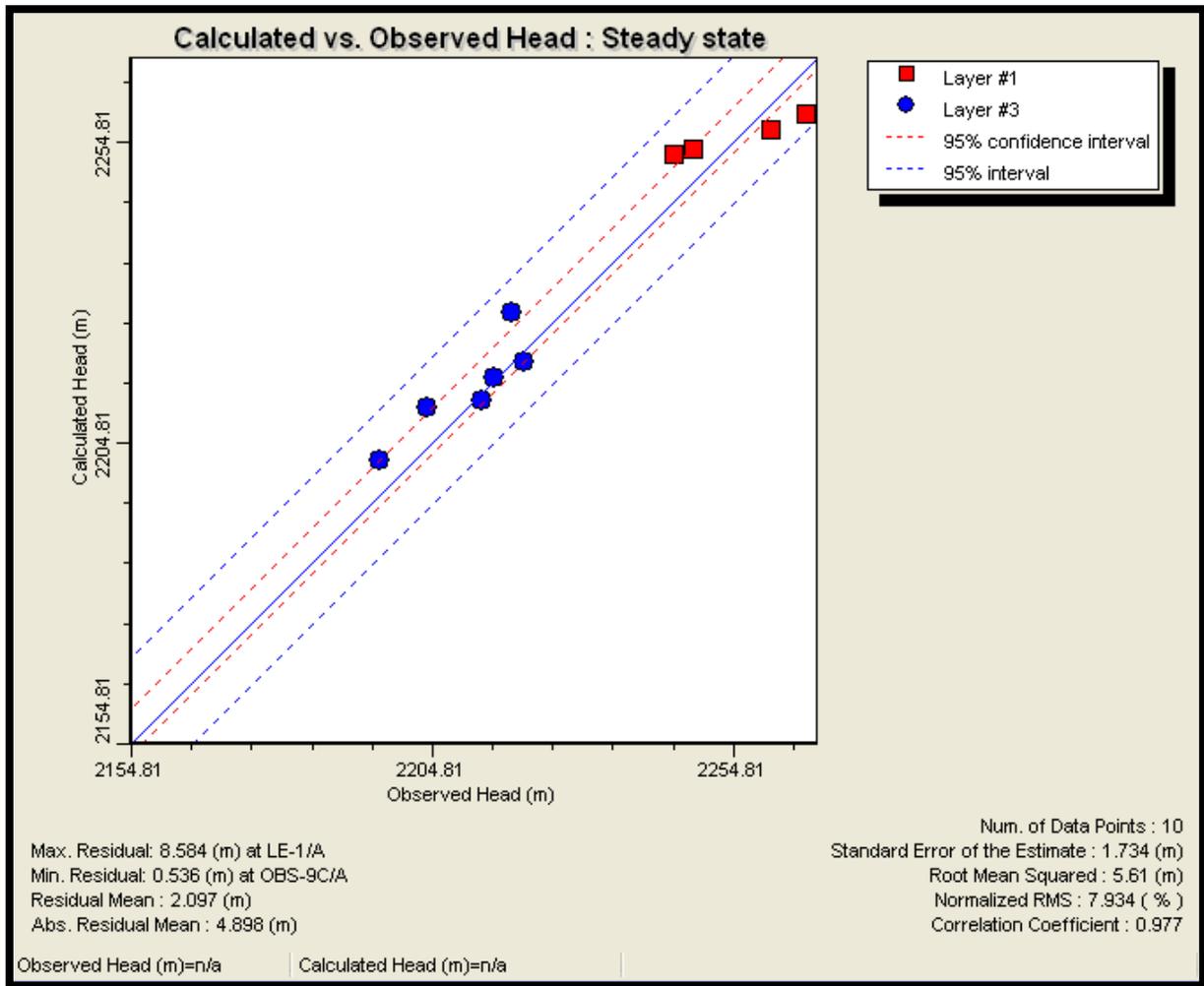


Figura 8.5 Valores calculados por el modelo numérico vs valores observados.
Fuente: Elaboración propia.

8.4. Análisis de sensibilidad

De la calibración del modelo numérico con los caudales de entrada y salida del modelo conceptual, se identifica que existe una correlación de los caudales con los valores que toma la permeabilidad.

En primer lugar, se identifica en las nacientes del río San Salvador y en la quebrada Quetena, que el caudal que fluye por ambas condiciones de río es sensible a los valores de permeabilidad de las zonas 1 y 7.

En segundo lugar, en la quebrada Ojos de Opache, se distingue que el caudal vertido por los drenes de la capa 1 y 3, exhiben una fuerte correlación con la permeabilidad de las zonas 1 y 4, presentando una mayor sensibilidad de los resultados con la zona 1.

En tercer lugar, hacia el sur de la quebrada de ojos de Opache y sobre el río Loa, se identifica que el caudal total que sale por los drenes y las condiciones de río de la capa 1

en el río Loa dependen principalmente de los valores de permeabilidad de las zonas 1, 5 y 6, sin embargo, la sensibilidad de este caudal es mayor a la conductividad hidráulica de zona 6.

En cuarto lugar, hacia el oeste de la ubicación anterior, se distingue que el caudal vertido por la condición de río de la capa 3, es sensible a la diferencia de la conductividad hidráulica de la zona 9 y 10, requiriendo como condición principal que la permeabilidad de la zona 9 sea mayor.

En quinto lugar, hacia el extremo occidental de la zona de estudio, los caudales de entrada y salida de las condiciones de río de la capa 3, dependen únicamente de la magnitud de la permeabilidad de la zona 10, cuyos valores menores a 1 m/día se ajustan de mayor manera al balance hidrogeológico del modelo conceptual.

Finalmente, se distingue que el balance del modelo numérico es sensible a cualquier variación de la permeabilidad, que en otras palabras indica que existe un bajo grado de variabilidad de las conductividades hidráulicas definidas para esta parametrización.

Por lo tanto, dado que los valores de conductividad hidráulica considerados en la calibración minimizan las diferencias entre los resultados calculados y observados, se puede afirmar que las permeabilidades consideradas en este modelo son una representación aproximada de las permeabilidades esperadas para las unidades hidrogeológicas en cuestión considerando la parametrización dada.

8.5. Resultados

De acuerdo con las consideraciones realizadas en el modelo, se obtiene como resultado que el flujo de agua subterránea de la capa 1 (Figura 8.6) ingresa al sistema por oriente con una dirección noreste-suroeste y fluye hacia occidente paralelamente a los ríos Loa y San Salvador.

Sin embargo, se identifica que existen variaciones locales en el flujo subterráneo que estarían correlacionadas con la heterogeneidad de las permeabilidades de la capa, los afloramientos y la interacción río-acuífero, identificando en particular hacia el este de la isopieza 2240 la presencia de un domo cuyos niveles piezométricos elevados son generados por las altas permeabilidades definidas en la zona 2 y 3.

Junto a lo anterior, cabe destacar que la piezometría obtenida de esta capa reproduce los afloramientos de la unidad Opache – Quillagua definidos en el modelo conceptual y además exhibe que esta misma unidad se encuentra prácticamente drenada al oeste de la quebrada de Ojos de Opache, lo cual se ve reflejado en el modelo numérico con la presencia de las celdas secas obtenidas hacia occidente.

Comparando estos resultados con los obtenidos en la caracterización hidrodinámica (Figura 5.20) se identifica que las isopiezas del modelo numérico presentan una variación de 5 a 10 metros con respecto a las obtenidas en esta caracterización, lo cual valida numéricamente la piezometría de la unidad Opache – Quillagua del modelo conceptual propuesto.

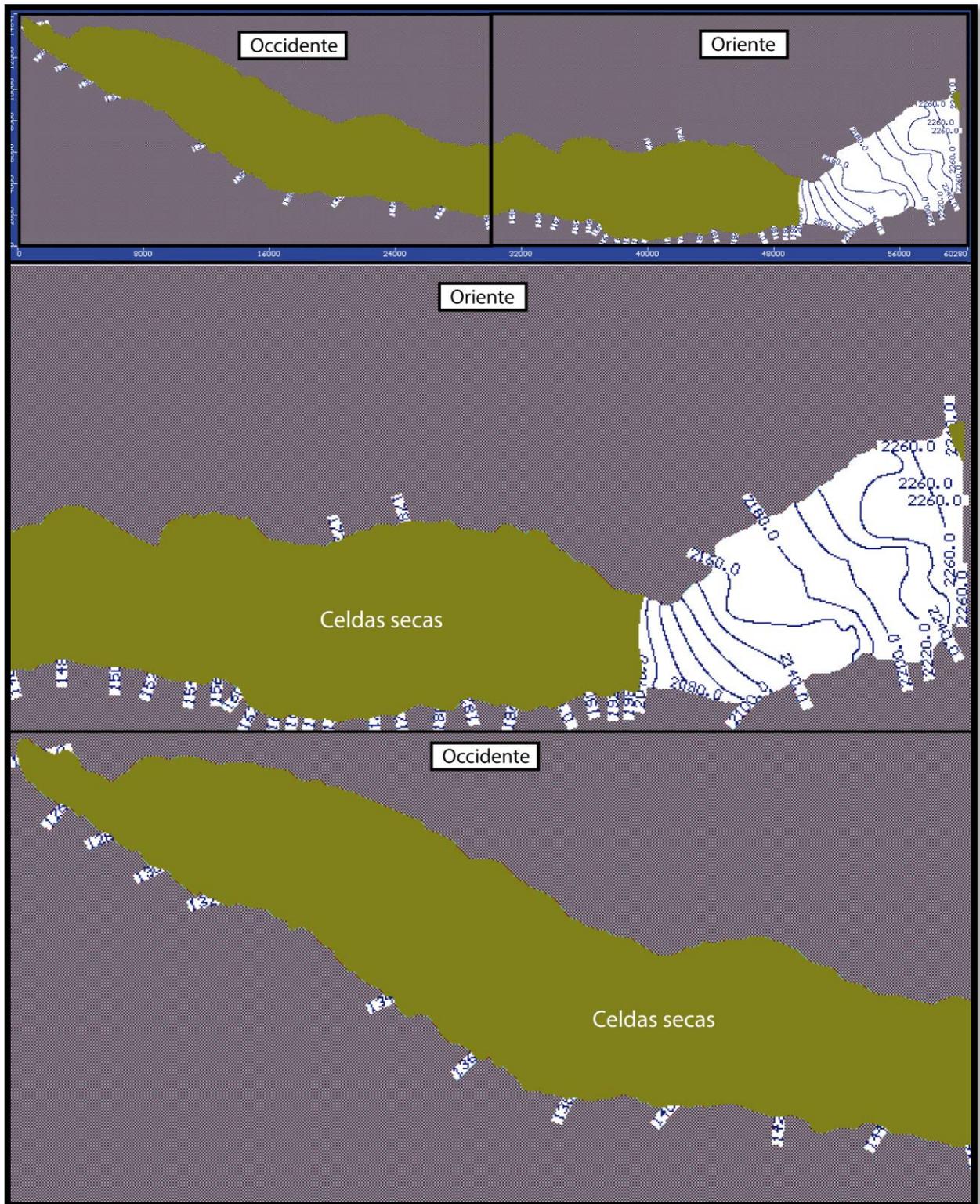


Figura 8.6 Piezometría de la capa 1, obtenida del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los resultados obtenidos de la capa 3 (Figura 8.7), se observa que el flujo de agua de la unidad Calama – Sichal ingresa al sistema por oriente con una dirección

noreste-suroeste y fluye paralelo a los ríos Loa y San Salvador hacia occidente, sin embargo la dirección del flujo varía gradualmente hacia el norte en el sector occidental del área de estudio, generando de esta manera un flujo de agua subterráneo que fluye desde el río Loa hacia el río San Salvador.

Esta variación del flujo hacia el norte se genera debido a que los resultados de la piezometría son dependientes de las condiciones de río definidas al oeste de la capa 3, las cuales presentan un nivel fijo de los ríos que está dado por la geomorfología de la región.

Además, se identifica al este de la isopieza 2200 la presencia de un domo cuyos niveles piezométricos se encuentran notoriamente elevados y se encuentra espacialmente ubicado bajo la misma anomalía observada para la capa 1, lo cual sugiere que la heterogeneidad de la unidad Opache – Quillagua (capa 1) afecta los niveles piezométricos tanto de la capa 1 como de la capa 2.

Finalmente comparando estos resultados con la piezometría de la caracterización hidrodinámica de la unidad Calama – Sical se observa una variación al igual que para la capa 1 que oscila entre los 5 y 10 m, la cual es plausible para el objetivo de esta investigación, validando de esta manera numéricamente el funcionamiento hidrodinámico del acuífero Calama – Sical del modelo conceptual.

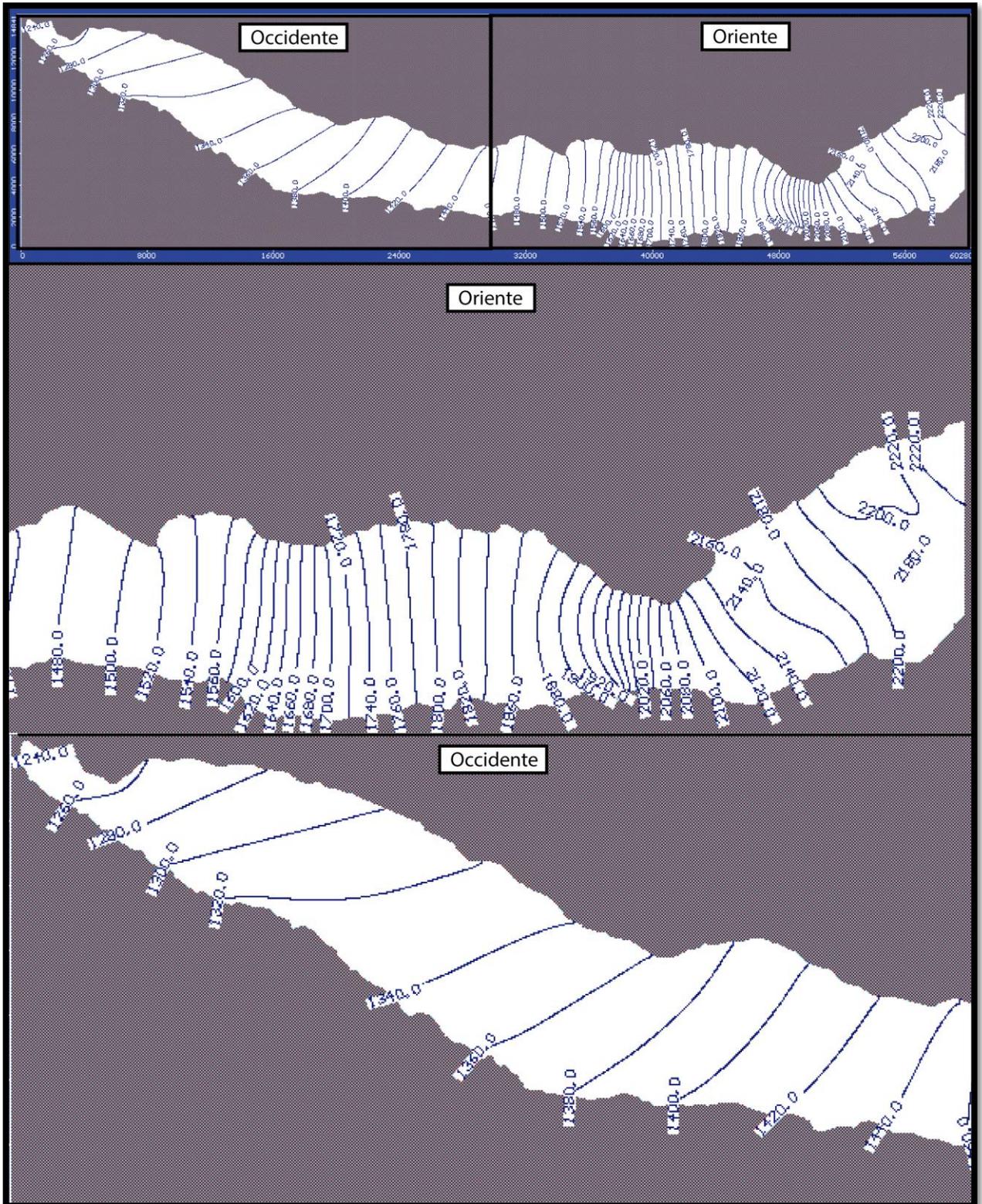


Figura 8.7 Piezometría de la capa 3, obtenida del modelo numérico. Fuente: Elaboración propia.

9. Discusión

El sistema hidrogeológico entre Calama y María Elena es definido de acuerdo a la geomorfología, estratigrafía y geología como un sistema de tres capas relativamente continuas entre oriente y occidente, las cuales de base a techo son definidas como las unidades Calama – Sichal, Jalquinche – el Batea y Opache – Quillagua.

La unidad Calama – Sichal se define litológicamente como una unidad de alto potencial hidrogeológico dado que se encuentra constituida principalmente por gravas y arenas, que permiten la circulación del agua, cuyo contenido y circulación se valida a través de sondajes y estudios de transiente electromagnético.

Este potencial hidrogeológico también se ve reflejado en el balance hidrogeológico realizado, en el cual se exhibe que esta unidad es explotada en la ciudad de Calama y además vierte caudales de agua significativos al sistema superficial en cuestión, que incluso son validados numéricamente demostrando que esta unidad transporta de oriente a occidente un caudal de 20 l/s de agua subterránea.

Por otro lado, en cuanto a la caracterización de los parámetros hidráulicos de la unidad Calama – Sichal, de acuerdo con la recopilación bibliográfica los valores de permeabilidad obtenidos resultan ser amplios y de baja precisión, dejando en gran incertidumbre el verdadero potencial de esta unidad. Sin embargo, a través de la resolución del balance hidrogeológico se define que la permeabilidad de esta capa es variable entre oriente y occidente tomando valores que van entre los 0.72 y 2.71 m/día, afirmación que a su vez es validada a través del modelo numérico, que corrobora la diferencia de la permeabilidad de oriente y occidente que oscila entre los 0.6 y 1.1 m/día.

Por lo tanto, como la permeabilidad estimada en el balance hidrogeológico presenta valores similares a los calculados por el modelo numérico se afirma que la permeabilidad de la unidad Calama – Sichal se encuentren en el orden de los 0,5 y 3 m/día. Sin embargo, cabe destacar que esta aseveración alude al comportamiento regional y no descarta encontrar a escala local valores distintos para la permeabilidad de la capa.

La unidad Jalquinche – el Batea se define litológicamente como una unidad impermeable debido a su alto contenido de limos y arcillas que impiden el flujo de agua, sin embargo, de acuerdo a las observaciones realizadas de los expedientes de los sondajes se identifica que hacia occidente existe una mayor concentración de materiales gruesos que podrían permitir el flujo de agua subterránea.

Esta posible permeabilidad de la unidad no se ve evidenciada en otros ámbitos de la investigación, dado que el balance hidrogeológico y el modelo numérico entregan valores coherentes a las observaciones al considerar esta capa intermedia de carácter impermeable, sin embargo, se aconseja para una investigación futura tomar en cuenta la variación litológica presente entre oriente y occidente.

Por otro lado, en cuanto a la magnitud de la permeabilidad de esta unidad, de antecedentes se conoce que esta variable oscila entre los 0.01 m/día y se ratifica

numéricamente al considerar este valor en el modelo numérico que arrojo resultados cercanos a los estimados en el modelo conceptual.

La unidad Opache – Quillagua, se define litológicamente como una unidad compuesta por sedimentos carbonaticos, que al encontrarse en el techo de la columna estratigráfica es fuertemente afectada por los agentes erosivos, los cuales cortan la continuidad estratigráfica y generan en superficie estructuras geomorfológicas características de un sistema acuífero Kárstico, tales como dolinas, uvalas, poljes y sumideros.

Este sistema acuífero al ser de tipo kárstico, es de esperar que presente particularidades como la heterogeneidad en la permeabilidad, la doble porosidad y la presencia de flujos preferencial que permiten el afloramiento de grandes caudales de agua. Lo cual en efecto se valida en el balance hidrogeológico en el que se evidencia afloramientos de esta unidad que alcanzan los 255 l/s en la vertiente de Ojos de Opache.

Por otro lado, la heterogeneidad del sistema se corrobora a través del modelo numérico, en el cual es elemental considerar una heterogeneidad en la unidad Opache – Quillagua para representar numéricamente el modelo conceptual, sugiriendo al menos 7 valores de permeabilidades distintas cuya zonificación es validada geomorfológicamente a través de las observaciones en terreno y de imágenes satelitales.

Estos valores que toma la permeabilidad según los antecedentes son amplios sugiriendo valores que van de los 0.0015 y 309 m/día, lo cual se valida a través del modelo numérico en el cual se evidencia el mismo comportamiento. Sin embargo, de todas formas, es inadmisibile caracterizar los parámetros hidráulicos de esta unidad hidrogeológica a estos rangos amplios, dado que la gran heterogeneidad que caracteriza a este tipo de sistemas implica intrínsecamente este comportamiento variable de la permeabilidad.

En otras palabras, la caracterización del acuífero Opache-Quillagua debe ser analizado a través de otros métodos menos convencionales, como por ejemplo a través de isotopos, pruebas de seguimiento o métodos geofísicos que permitan caracterizar la geometría del acuífero e identificar el origen del agua, los tiempos de tránsito y los procesos de mezcla.

Además, cabe destacar que una mala caracterización de este sistema acuífero kárstico puede sobreestimar caudales o subestimar el avance de los procesos de contaminación que podrían estar afectando a la ciudad de Calama, por lo tanto es de suma importancia que la unidad Opache – Quillagua se estudie en detalle y desde otro punto de vista considerando las particularidades de heterogeneidad y doble porosidad que caracteriza a un acuífero kárstico.

Considerando las afirmaciones realizadas en los párrafos anteriores se infiere que el sistema acuífero entre Calama y María Elena está compuesto por dos capas permeables que permiten el flujo de agua de este a oeste y se definen como los acuíferos Calama – Sichal y Opache – Quillagua.

El acuífero Calama-Sichal albergado en la unidad del mismo nombre, estratigráficamente se encuentra confinado por la unidad Jalquinche - el Batea, sin embargo, a través de la piezometría este comportamiento se ve reflejado solo en el tramo 1 de la zona de estudio,

lo cual se valida a través de la geología y geomorfología dado que la unidad Calama Sichal en los tramos 2 y 3 es cortada por los ríos loa y San Salvador permitiendo la interacción entre el acuífero y el sistema superficial que generan el desconfinamiento del acuífero.

Por otro lado, en cuanto al funcionamiento hidrodinámico del acuífero Calama - sichal, según la piezometría obtenida, se afirma que el flujo de agua regional de la unidad acuífera proviene desde el este con dirección oeste, fluye paralelo a los ríos Loa - San Salvador y se desvía gradualmente en el tramo 3 hacia el norte. Cuya afirmación es corroborada a través del modelo numérico que arrojó como resultado el mismo comportamiento hidrodinámico propuesto, cuya diferencia entre las isopiezas propuestas y calculadas es menor a los 10 metros, y dada la escala de estudio es aceptable para validar el modelo conceptual.

Ademas, cabe destacar que, tanto en la piezometría propuesta como por la calculada en el modelo numérico, se identifica al oeste de la ciudad de Calama un domo cuyos niveles piezométricos se encuentran notoriamente elevados, lo cual, según la calibración del modelo numérico, estaría relacionado con la heterogeneidad y la piezometría de la unidad Opache – Quillagua que afecta los niveles de la unidad Calama – Sichal.

En otras palabras, la presencia de zonas de mayor permeabilidad en la unidad Opache Quillagua genera alzamientos del nivel piezométrico de esta unidad, que aumenta el gradiente hidráulico entre el acuífero superior e inferior y provoca un flujo de agua de la unidad Opache – Quillagua a la unidad Calama Sichal, que a su vez alza el nivel piezométrico del acuífero inferior como un domo.

El acuífero Opache – Quillagua albergado en la unidad del mismo nombre, es considerado, dada su disposición estratigráfica, como un acuífero libre, cuyo comportamiento hidrodinámico propuesto en la carta piezométrica, afirma que el flujo de agua regional proviene desde el noreste con dirección suroeste y fluye paralelo a los ríos loa y San Salvador hasta unos kilómetros al oeste de la quebrada de Ojos de Opache, lugar en que el acuífero kárstico se encuentra completamente drenado.

Este comportamiento hidrodinámico es corroborado a través del modelamiento numérico, que muestra una similitud de la carta piezométrica y además exhibe el secado de las celdas hacia el oeste de la quebrada Ojos de Opache que valida el drenado de esta unidad a occidente.

Por otro lado, cabe destacar que el drenado del acuífero también se ve reflejado en la resolución del balance hidrogeológico propuesto, en el cual se evidencia que los caudales de entrada de este sistema acuíferos son eliminados por la acción de afloramientos y extracciones antrópicas, que imposibilitan el flujo de agua hacia occidente de la quebrada Ojos de Opache.

Junto a este análisis del funcionamiento hidrodinámico, también se afirma en esta investigación que existe una interacción entre el sistema subterráneo y superficial, el cual se enfoca principalmente en el río San Salvador.

Esta interacción se evidencia primeramente a través de la estratigrafía, geología y geomorfología de la zona, que en conjunto con la piezometría muestran la dirección y sentido de la interacción entre el sistema superficial y las unidades hidrogeológicas propuesta.

Por esta razón desde las nacientes del río San Salvador hasta la confluencia con el río Loa se definen a través de la estratigrafía y geomorfología tres tramos de particular interacción entre el sistema superficial y subterráneo, de los cuales el tramo 1 se caracteriza por la interacción de los ríos con la unidad Opache - Quillagua, el tramo 2 por la escasa interacción entre ambos sistemas y el tramo 3 por la interacción con la unidad Calama – Sichal.

La interacción en el tramo 1 de la unidad Opache – Quillagua con el río San Salvador, se ve reflejada principalmente en la piezometría de esta unidad, la cual exhibe la existencia de un aporte del sistema subterráneo al superficial, que mediante la ley de Darcy es cuantificado (Figura 9.1) y posteriormente corroborado con los puntos de aforo, el balance hidrogeológico, la caracterización hidroquímica y el modelo numérico.

En cuanto al tramo 2, la interacción se caracteriza por ser escasa entre ambos sistemas debido a que el río San Salvador escurre únicamente por el basamento, sin embargo, se evidencia en los perfiles estratigráficos un afloramiento de la unidad Calama – Sichal en la base la quebrada de Ojos de Opache.

Este afloramiento de acuerdo con la caracterización hidrogeológica y la ley de Darcy presenta un caudal de 35 l/s, el cual es coherente con el balance hidrogeológico y además es corroborado hidroquímicamente a través del análisis de elementos conservativos que exhibe distintas proveniencias del agua de la quebrada de Ojos de Opache.

En el tramo 3 según la estratigrafía y piezometría existe una interacción entre la unidad Calama-Sichal y el río San Salvador, lo cual se corrobora con la resolución del balance hidrogeológico que señala la infiltración de 118 l/s y que se valida con los resultados obtenidos de las pruebas de infiltración realizada en terreno.

Finalmente, de acuerdo con la hidroquímica del río San Salvador se conoce que el agua de este curso superficial es del tipo Clorurada sódica exhibiendo diferencias químicas antes y después del vertido de agua de la quebrada de Ojos de Opache.

Esta variación se debe a que aguas arriba de la quebrada la composición química del agua es dominada por el vertido de aguas servidas de la quebrada Quetena, mientras que aguas abajo estaría fuertemente influenciada por la composición del agua subterránea aflorante en la quebrada de ojos de Opache, afirmación que a su vez se ve reflejada en el balance hidrogeológico por los altos caudales vertidos por la planta de tratamiento de aguas servidas en la quebrada Quetena y por los afloramientos de las unidades acuíferas Opache – Quillagua y Calama – Sichal en la quebrada de ojos de Opache.

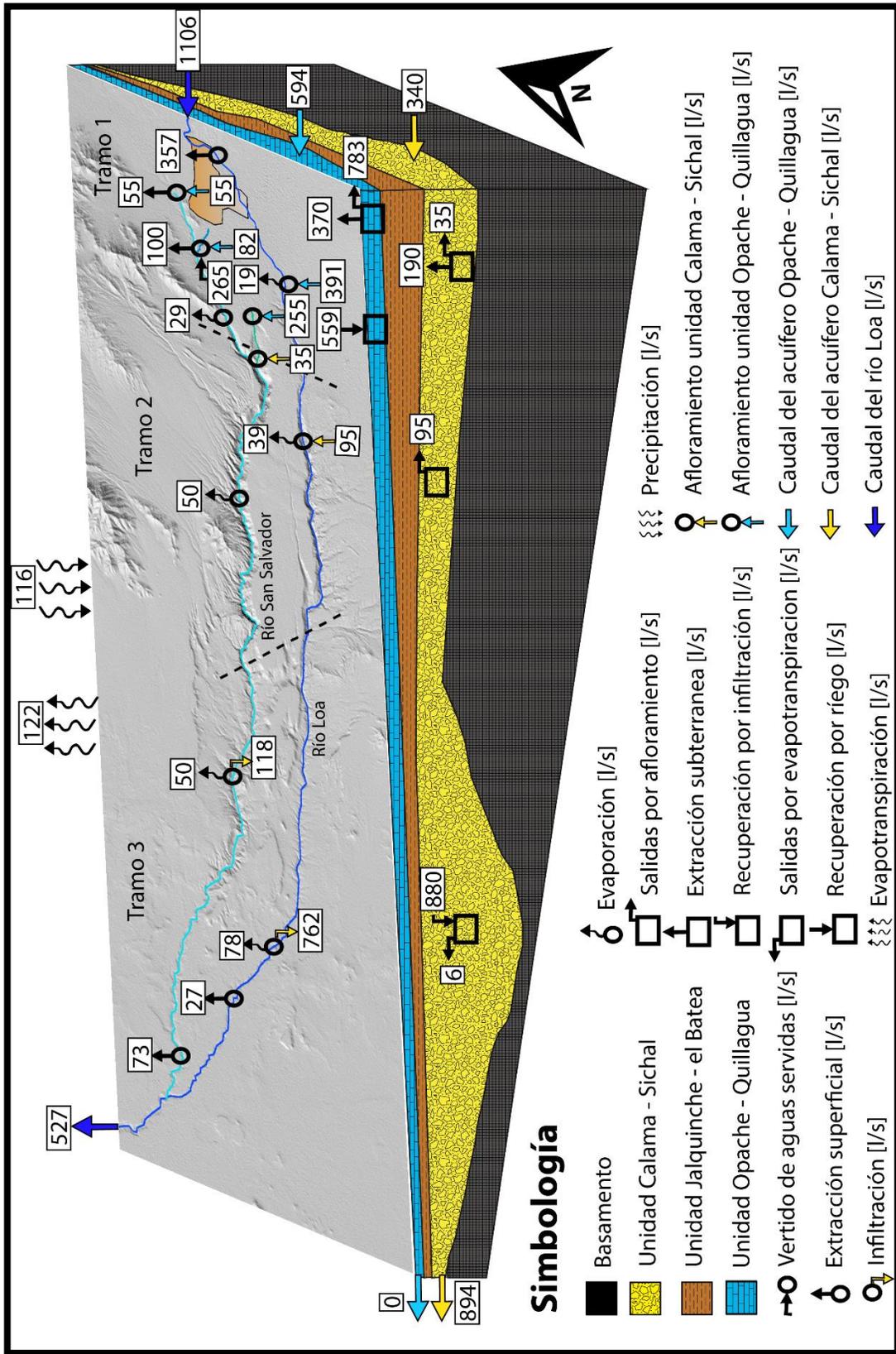


Figura 9.1 Balance Hidrogeológico. Fuente: Elaboración propia.

10. Conclusiones

El sistema hidrogeológico que une la ciudad de Calama y la localidad de María Elena está conformado por tres unidades hidrogeológicas definidas de base a techo como la unidad acuífera permeable de gravas y arenas Calama – Sichal, seguido de la unidad impermeable de arcillas Jalquinche – el Batea y la unidad acuífera permeable calcárea Opache – Quillagua.

La unidad acuífera Calama – Sichal, posee una permeabilidad que oscila entre los 0.5 y 3 m/día cuyo flujo de agua ingresa confinadamente por el extremo oriental de la zona de estudio, fluye hacia el oeste paralelo a los ríos Loa y San Salvador e interactúa con el sistema superficial vertiendo 35 l/s de agua en la quebrada de Ojos de Opache, 95 l/s en el río Loa al sur de la misma quebrada y recuperando 880 l/s por infiltración de los ríos Loa y San Salvador en el tramo 3 definido en esta investigación.

Es aquí en el tramo 3 en donde además se evidencia el desconfinamiento de esta unidad acuífera y la desviación del flujo subterráneo hacia el norte producto de la interacción de este sistema subterráneo con los ríos Loa y San Salvador.

La unidad Jalquinche – el Batea, presenta una permeabilidad que ronda los 0.01 m/día y además podría tomar valores más altos en occidente.

La unidad acuífera Opache – Quillagua, corresponde a un acuífero kárstico libre de permeabilidades heterogéneas que permite el flujo preferencial de agua subterránea de oriente a occidente e interactúa con el sistema superficial, vertiendo un caudal de 55 l/s de agua en las nacientes del río San Salvador, 82 l/s en la Quebrada Quetena, 255 l/s en la vertiente de ojos de Opache y 391 l/s sobre el río Loa al sur de la quebrada Ojos de Opache. Cuyos afloramientos drenan por completo el acuífero kárstico al oeste de la quebrada de Ojos de Opache.

Además, al oeste de la ciudad de Calama se evidencia un flujo de agua desde la unidad Opache – Quillagua a la unidad Calama - Sichal que eleva los niveles piezométricos de esta última unidad.

Por otro lado, el río San Salvador se sectoriza en 3 tramos, el primero de ellos, ubicado entre las nacientes del río San Salvador y la quebrada de ojos de Opache, se caracteriza por presentar aportes de la unidad Opache – Quillagua y por mostrar una hidroquímica dependiente del vertido de 260 l/s de aguas servidas en la quebrada Quetena.

El segundo tramo ubicado en los 15 km al oeste de la desembocadura de la quebrada de ojos de Opache, se caracteriza por presentar una escasa interacción con el sistema subterráneo y por mostrar una hidroquímica dependiente del aporte de agua subterránea de las unidades acuíferas Opache - Quillagua y Calama Sichal provenientes de la quebrada de ojos de Opache.

El tercer tramo que se extiende hasta la confluencia de los ríos Loa y San Salvador se caracteriza por presentar una interacción con el sistema acuífero Calama-Sichal que se refleja con la infiltración de 118 l/s del río San Salvador al sistema subterráneo.

En términos generales esta investigación es un aporte al conocimiento del sistema hidrogeológico entre Calama y María Elena aplicando una metodología que permite desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual coherente a partir de una información focalizada en los extremos de la zona de estudio y apartados a 70 Km entre sí.

Además, demuestra la importancia que presenta este sistema hidrogeológico bicapa, en el funcionamiento del flujo superficial de uno de los desiertos más áridos del mundo, cuyo sustento del curso de agua de los ríos Loa y San Salvador se debe principalmente a los aportes del sistema subterráneo.

Finalmente, dada la heterogeneidad del sistema acuífero Opache – Quillagua es de suma importancia realizar un estudio de detalle del funcionamiento hidrogeológico de este acuífero para evitar una sobreexplotación o una contaminación caótica de las aguas.

11. Bibliografía

- **Alvarado C. y Barahona M. 2016.** Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la cuenca del río Suquiapa, El Salvador. UNED Research Journal. Pp. 23-33. ISSN: 1659-4266.
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP272786740 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP272786730 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP272786720 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP270306740 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP270306730 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP270306720 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP265346740 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP265346730 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP261116740 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].

- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP261116730 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **ASF DAAC, 2011.** ALPSRP261116720 Hi-Res Terrain Corrected. ALASKA SATELLITE FACILITY. <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>> [consulta: 28 Diciembre 2017].
- **B. de Wet, C. et al. 2015.** Sedimentology and stable isotopes from a lacustrine-to-palustrine limestone deposited in an arid setting, climatic and tectonic factors: Miocene-Pliocene Opache Formation, Atacama Desert, Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, ISSN: 0031-0182, Vol: 426, Page: 46-67.
- **Blanco, N. et al. 2003.** Formación Calama, Eoceno, II Región de Antofagasta (Chile): estratigrafía e implicancias tectónicas. En: X CONGRESO Geológico Chileno. Chile Universidad de Concepción.
- **Blanco, N. y Tomlinson, A. 2006.** FM. Sical: sedimentación aluvial (Eoceno-Oligoceno) sintectónica al evento orogénico incaico, II región de Antofagasta Chile. En: XI CONGRESO Geológico Chileno. Antofagasta, Chile, Universidad Católica del Norte. Actas, Vol. 2, p 29-32.
- **Bonacin A. 2008.** Río Loa, II Región, Chile. Google Earth Pro. [fotografía] 1 foto, color.
- **Bouwer, H. 1986.** Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. U.S. Water Conservation Laboratory, ARS, USDA. Phoenix Arizona.
- **Bouwer, H. 1961.** A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil in situ above a water table. *Soil Sci. Soc. Proc.:* 334-339.
- **Bouwer, H. 1962.** field determination of hydraulic conductivity above a water table with the double-tube method. *Soil Sci. Soc. of Am. Proc.*, 26 (4 July-Agost): 330-335.
- **Bouwer, H. et al. 1999.** Predicting Infiltration and GroundWater Mounds for Artificial Recharge. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 2, No. 4, Octubre, 1999.
- **Brüggen, J. 2014.** Informe geológico sobre el agua subterránea de la región de Calama. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, (4), Pág. 214-231, láms. fots.
- **Bruning J. 2015.** Geoglifos. Google Earth Pro. [fotografía] 1 foto, color.
- **Bugueño, M. 2014.** Differential arsenic binding in the sediments of two sites in Chile`s lower Loa River basin. *Science of the Total Enviroment*, 466, 387-396.

- **Cade-Idepe. 2004.** Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad, Cuenca Río Loa.
- **Carballo, H. 1979.** Evolución salina del río Loa. En: SEGUNDO CONGRESO geológico chileno. Arica, Chile.
- **CPH Consultores Ltda. 2003.** Estudio hidrogeológico preliminar en los entornos de Calama. Santiago, Chile.
- **Custodio, E. y Llamas, M. 1996.** Hidrología Subterránea. Barcelona, Omega. Volumen I.
- **Custodio, E. y Llamas, M. 1996.** Hidrología Subterránea. Barcelona, Omega. Volumen II.
- **Departamento administración recursos hídricos, 2003.** Determinación de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea factibles de construir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del río Loa, II región. Santiago, Chile.
- **Departamento de recursos hídricos. 2005.** Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Loa. Santiago.
- **DGA, 2003.** Evaluación de los recursos hídricos sectores Calama y Llalqui cuenca del río Loa. Chile.
- **Durán D. 2013.** Remanso del río Loa, afueras de Calama. Google Earth Pro. [fotografía] 1 foto, color.
- **Fuentes, F. 2009.** Simulación hidrogeológica de la explotación del acuífero freático ubicado en la formación Opache, II región, norte de Chile. Memoria para optar al título de geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- **García, M. 2011.** Late Miocene-Holocene canyon incisión in the western Altiplano, northern Chile: tectonic or climatic forcing?. Journal of the Geological Society, London, Vol. 168, p. 1047-1060. doi: 10.1144/0016-76492010-134.
- **GHD, 2018.** Declaración de impacto ambiental. Chile.
- **Houston, J. 2006.** The great Atacama flood of 2001 and its implications for Andean hydrology. Hydrol. Process., 20: 591-610. doi:10.1002/hyp.5926.
- **Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea** [en línea] < <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes> > [consulta: 25 febrero 2019].

- **Jensen, A. 2009.** Organización de la estratigrafía cenozoica de Quillagua. En: XII CONGRESO Geológico Chileno. Santiago, Chile, Universidad de Chile.
- **Jordan et al. 2015.** Architecture of the aquifers of the Calama Basin, Loa catchment basin, northern Chile. *Geosphere*, Vol. 11, no. 5, p. 1438-1474, doi:10.1130/GES01176.1.
- **Knight Piésold S.A. 2014.** Sectorización de los acuíferos de la cuenca del río Loa. Santiago, Chile.
- **Knight Piésold S.A. 2014.** Análisis integrado Río Loa región de Antofagasta. Santiago, Chile.
- **Maksaev, V. 1978.** Cuadrangulo Chitigua y sector occidental del cuadrángulo Cerro Palpana, Region de Antofagasta. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. Chile*, N° 31, 55 p.
- **Marinovic, S. y Lahsen A. 1984.** Hoja Calama: Región de Antofagasta, escala 1:250.000. Santiago, carta geológica de Chile N° 58.
- **Matraz Consultores Asociados s.a. 2012.** Estudio acuífero de Calama sector medio del Río Loa, región de Antofagasta. Universidad Politécnica de Cataluña.
- **Matraz Consultores Asociados Limitada, 2014.** Caracterización hidrogeoquímica de la cuenca del Loa Alto, región de Antofagasta, Chile.
- **May, G. et al. 1996.** Oligocene-recent sedimentary and tectonic evolution of the Calama basin, N. Chilean Forearc. *Third ISAG*, Francia. P. 435-437.
- **May, G. 1997.** Oligocene to Recent evolution of the Calama Basin, northern Chile. Tesis Doctoral. University of Aberdeen. 274 pp.
- **May, G. et al. 1999.** Tectonic signatures in arid continental basins: An example from the upper Miocene-Pleistocene, Calama basin, Andean forearc, northern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 151, p. 55-77.
- **May, G. et al. 2005.** Eocene to Pleistocene lithostratigraphy, chronostratigraphy and tectono-sedimentary evolution of the Calama Basin, northern Chile. *Revista geológica de Chile*, Vol. 32, No. 1, p. 33-58.
- **Mayco Consultores, 2013.** Levantamiento información hidrogeológica región de Antofagasta. Santiago, Chile.
- **Medina, E. et al. 2012.** Cartas Tocopilla y María Elena, región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Basica 141-142: 51 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

- **Montgomery & Associates Consultores Limitada, 2016.** Acuífero artesiano de Quillagua (QAA). Santiago, Chile.
- **Mortimer, C. 1980.** Drainage evolution in the Atacama Desert of northernmost Chile. Inst. Geol. Sciences, Overseas Division, London.
- **Naranjo, J. y Paskoff, R. 1981.** Estratigrafía de los depósitos Cenozoicos de la región de Chiuchiu-Calama, desierto de Atacama. Revista Geológica de Chile, N° 13-14. P. 79-85.
- **Naranjo, J. y Paskoff, R. 1982.** Estratigrafía de las unidades sedimentarias cenozoicas de la cuenca del río Loa en la Pampa del Tamarugal, región de Antofagasta, Chile. Revista Geológica de Chile, No. 15, p. 49-57.
- **Naranjo, J. et al. 1994.** Morphostratigraphic evolution of the northwestern margin of the Salar de Atacama basin (23°S-68°W). Revista Geológica de Chile, Vol. 21, No. 1, p. 91-103.
- **Orellana, G. 1985.** Hidrogeoquímica del río Loa: un prototipo para el estudio de hoyas hidrográficas en el norte de Chile. En: IV CONGRESO Geológico Chileno. Antofagasta, Chile, Universidad del Norte.
- **Pizarro, J. 2011.** Exploración con sondajes proyecto Puluktur distrito Codelco norte. Memoria para optar al título de geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- **Rieu, M. 1975.** Les formations sédimentaires de la Pampa del Tamarugal et le río Loa. (Norte Grande Du Chili). Cah. O RSTOM, sèr. Gèol., vol. VII, No 2, p. 145-164.
- **Rojas, C. y Bembow, M. 2006.** Generación de información geológica complementaria en la elaboración de la norma secundaria de las aguas del río Loa. En: XI CONGRESO Geológico Chileno. Antofagasta, Chile, Universidad Católica del Norte.
- **Romero, L. et al. 2003.** Arsenic enrichment in Waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile). Applied Geochemistry, 18, 1399-1416.
- **Sanjuán, N. et al. 2016.** Caracterización geofísica y mineralógica de las formaciones superficiales de la cuenca del río Loa (desierto de Atacama, Chile). Geo-Temas, 16 (1). pp. 577-580. ISSN 1567-5172.
- **SERNAGEOMIN, 2003.** Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago. Escala 1:1.000.000.
- **Simicic, Y. 2015.** Distribución del espesor de la cobertura sedimentaria oligo-Neógena de la Pampa del Tamarugal, Norte de Chile (20°45' A 21°30'S). Memoria

para optar al título de geólogo. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

- **Skarmeta, J. 1982.** Análisis estructural de pliegues que afectan a la formación Sihal (Terciario Medio), Sierra de Moreno, región de Antofagasta. Revista Geológica de Chile, N° 15. P. 3-25.
- **Skarmeta, J. y Chapple, W.M. 1968.** Wavelengths of single layer folds : a comparison between theory and observation. Am. J. Sci., Vol. 266, N° 3, p. 167-179.
- **Skarmeta, J. y Marinovic, N. 1981.** Geología de la Hoja Quillagua, Región de Antofagasta. Escala 1:250.000.

12. Anexos

- **Anexo A:** Registro de las precipitaciones entre 1993 – 2017.
- **Anexo B:** Información Estratigráfica de occidente.
- **Anexo C:** Información Estratigráfica de oriente.
- **Anexo D:** interpretación de estudios de transiente electromagnético (TEM).
- **Anexo E:** Información piezométrica y de parámetros hidráulicos.
- **Anexo F:** Antecedentes estación río Loa en Escorial (DGA)
- **Anexo G:** Derechos de agua registrados en la DGA.
- **Anexo H:** Resultado hidroquímico de muestras superficiales.
- **Anexo I:** Resultado hidroquímico de muestras subterráneas.

Anexo A

Registro de las precipitaciones entre 1993
- 2017.

GOBIERNO DE CHILE		Fecha Emisión: 25/02/2019											
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS		PRECIPITACIONES MENSUALES (mm)											
DIRECCION GENERAL DE AGUAS		PERIODO: 01/01/1993 - 01/01/2005											
Estación: CALAMA		Altitud 2300		UTM Norte (mts): 7517059		UTM Este (mts): 509639		Latitud S: 22° 27' 10"		Longitud 68° 54' 23"		Área de Drenaje (km2): 0.00	
Código BNA: 02110013-7		W:											
Cuenca: RIO LOA		Subcuenca: RIO LOA MEDIO (ENTRE RIO SALADO Y QUEBRADA AMARGA)											
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	I
1993	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1996	0	0	2	0	0	0	0	5.3	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0.5	0	0	0	0
1998	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	1.5	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	0	11.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	0.7	0.1	0	0	0	3.9	0	0	0	0	0	0
2003	0	0	0	0	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	1.5	1.5	3.5	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0
INDICADORES:													
* : 1 - 10 Días con Información en el Mes													
@ : 11 - 20 Días con Información en el Mes													
% : Más de 20 Días con Información en el Mes													

Fuente: Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

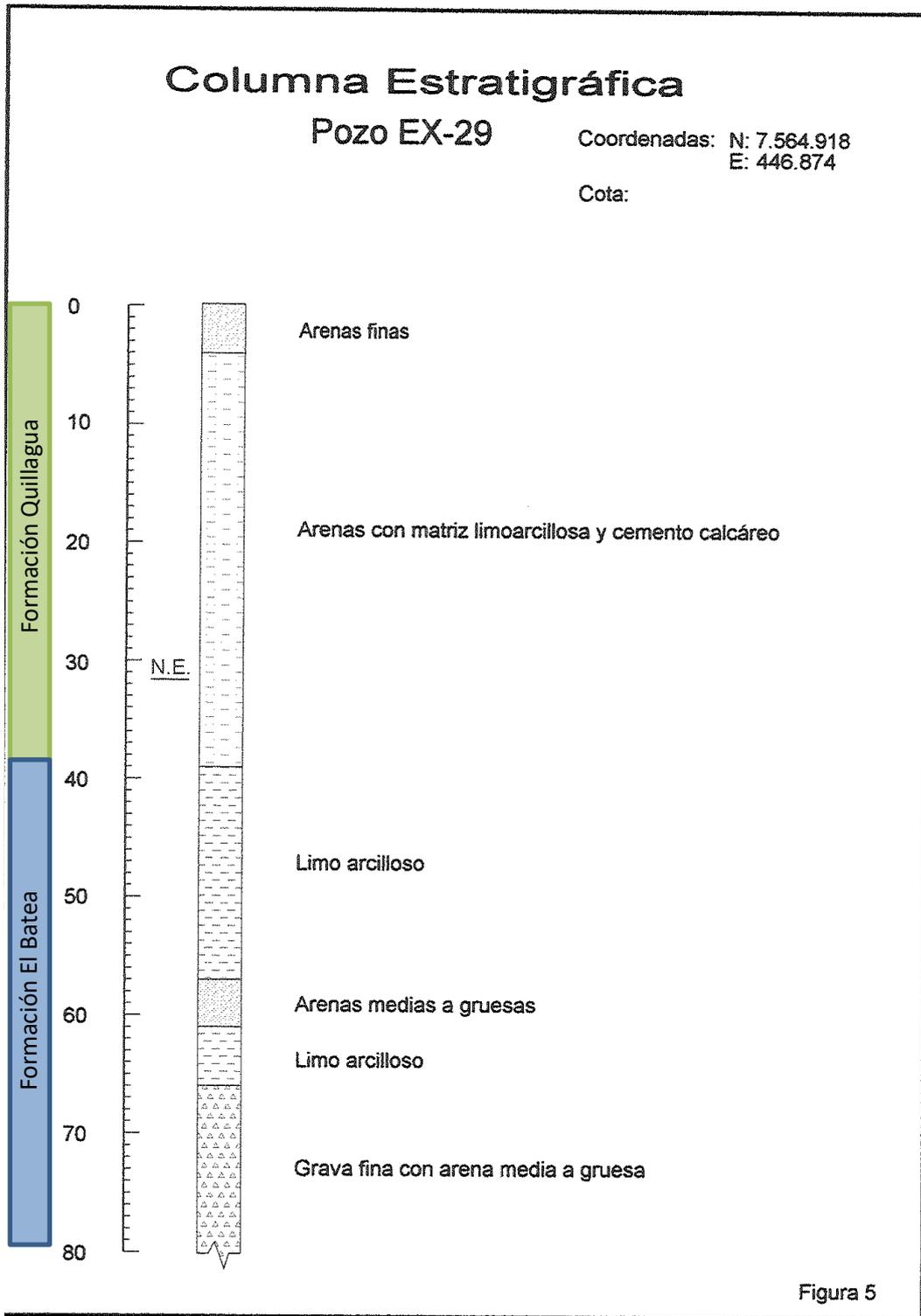
GOBIERNO DE CHILE MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS DIRECCION GENERAL DE AGUAS		Fecha Emisión: 25/02/2019											
PRECIPITACIONES MENSUALES (mm) PERIODO: 01/01/2006 - 01/01/2017													
Estación: CALAMA Código BNA: 02110013-7		Altitud 2300 (msnm): Latitud S: 22° 27' 10"											
Cuenca: RIO LOA		UTM Norte 7517059 (mts): UTM Este 509639 (mts): Área de Drenaje (km2): 0.00											
Subcuenca: RIO LOA MEDIO (ENTRE RIO SALADO Y QUEBRADA AMARGA)													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	I
2006	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2009	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	0	0	0	0	0	0	6.7	0	0	0	0	0	0
2012	0	3.5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	0	0	0	0	1.5	1.7	0	2	0	0	0	0	0
2014	0.1	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	0.2	0	11.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	0	0	0	0.1	0.4	2.1	0	0	0	0	0	0	0
INDICADORES:													
* : 1 - 10 Días con Información en el Mes @ : 11 - 20 Días con Información en el Mes % : Más de 20 Días con Información en el Mes													

Fuente: Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Anexo B

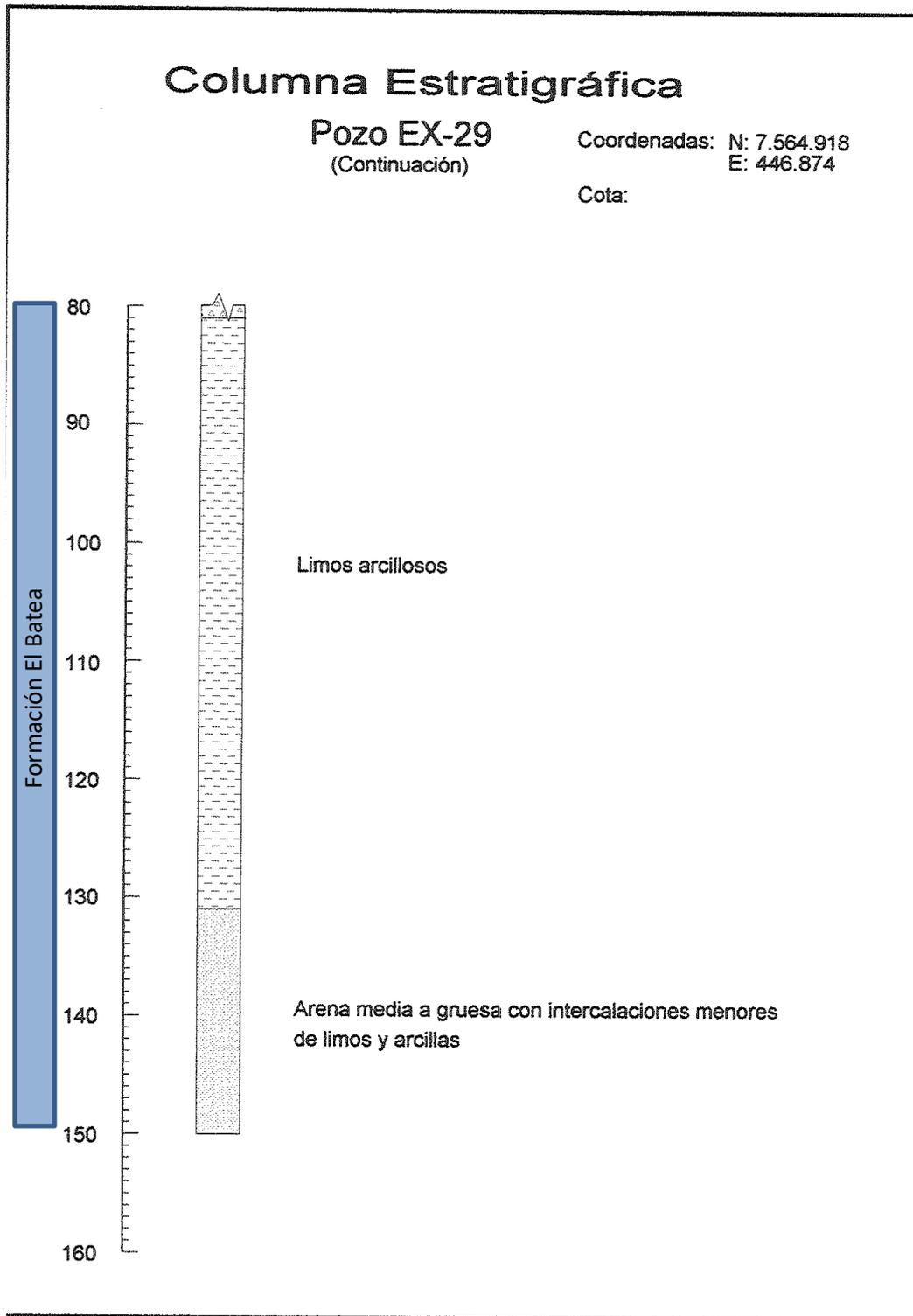
Información estratigráfica de Occidente.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 29



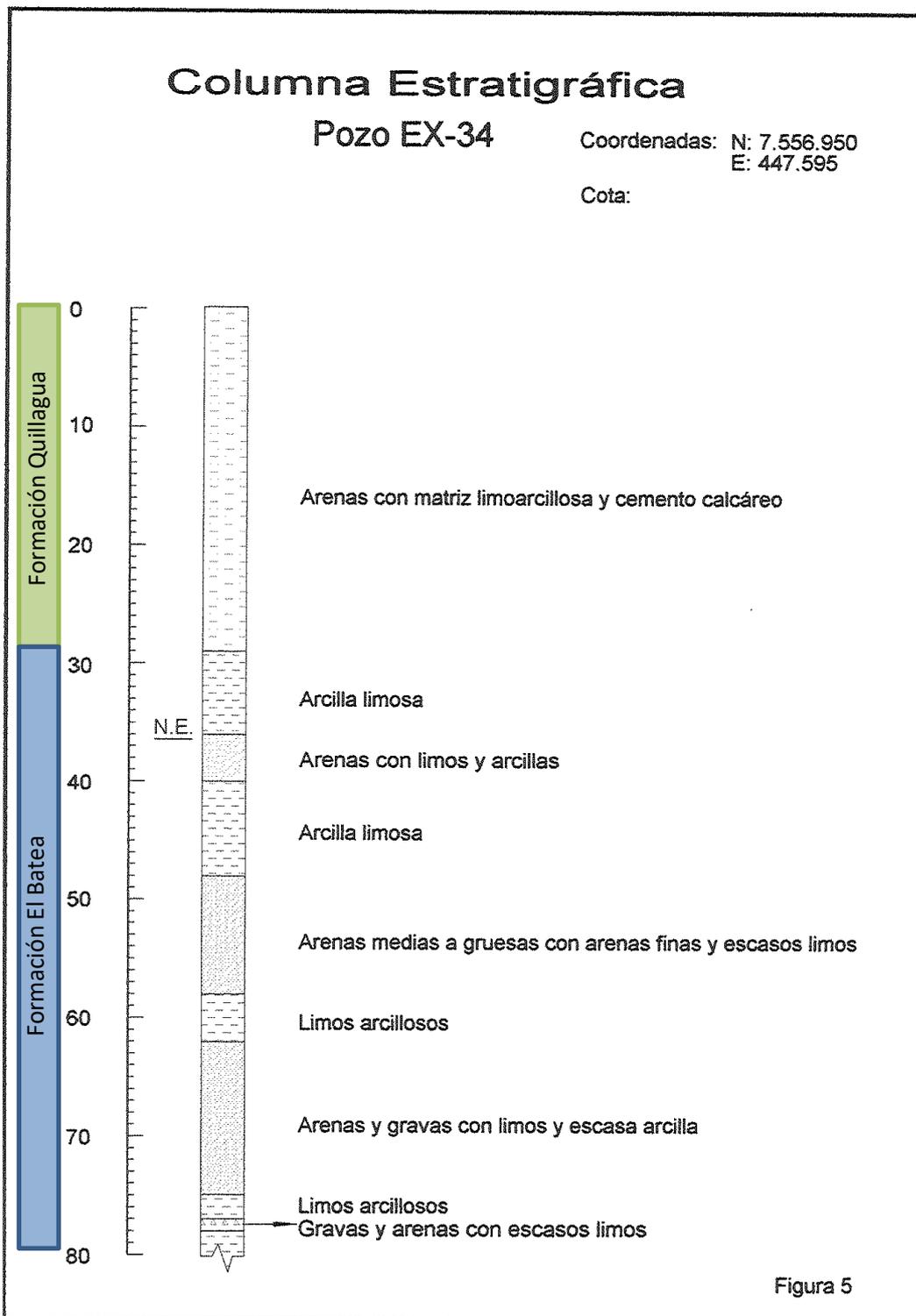
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1290.

ESTRATIGRAFIA POZO EX – 29 (CONTINUACIÓN)



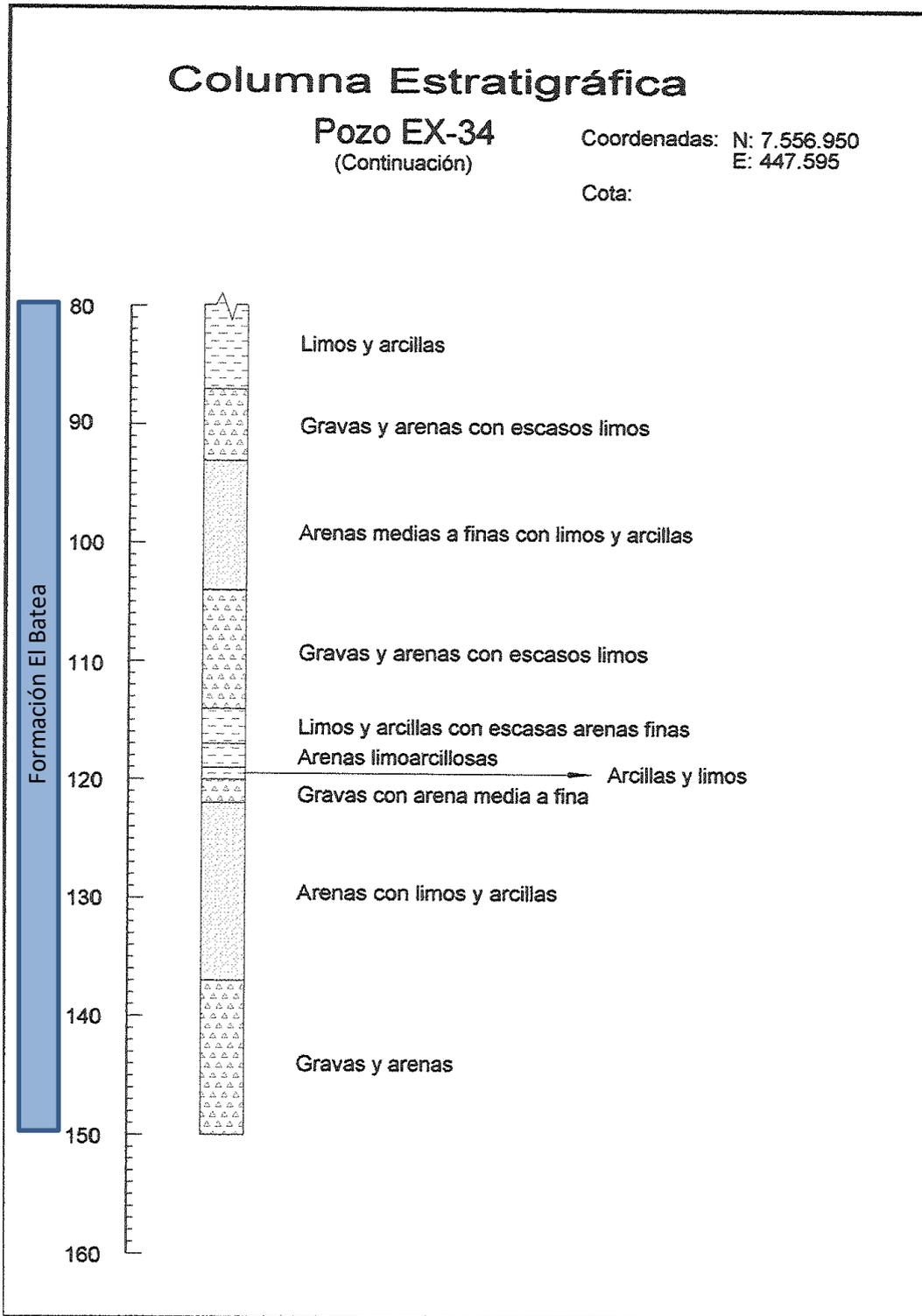
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1290.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 34



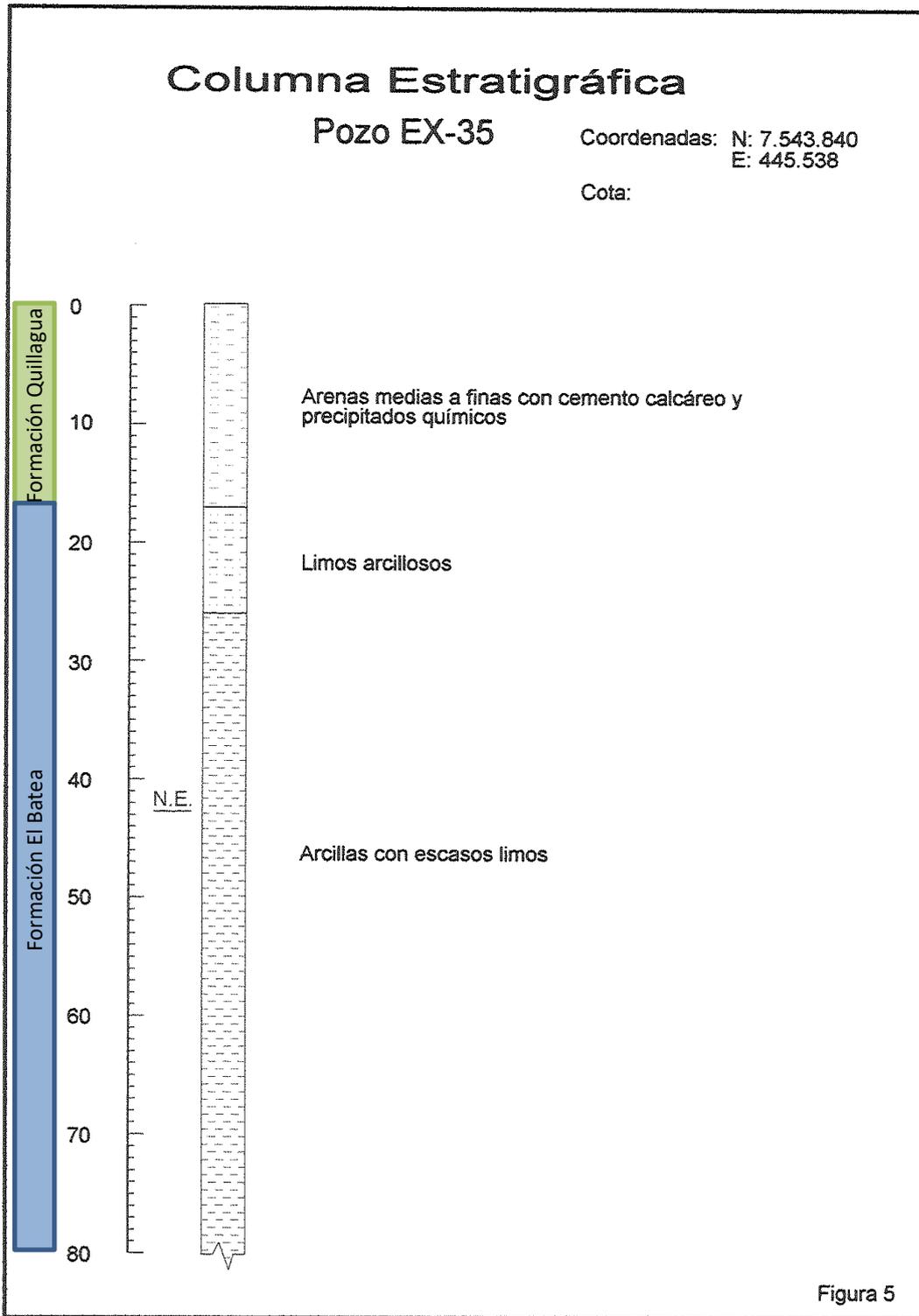
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1291.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 34 (CONTINUACIÓN)



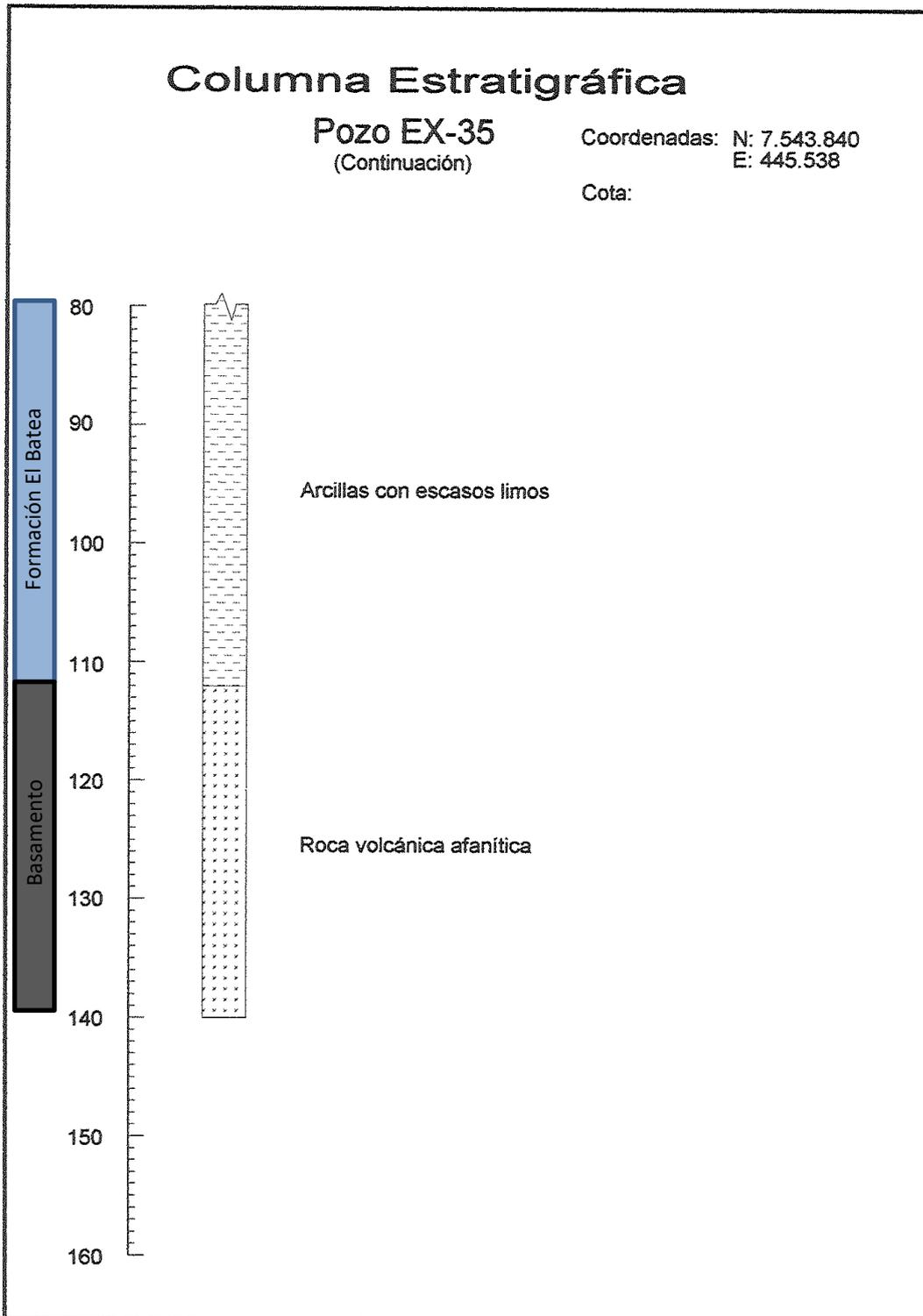
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1291.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 35



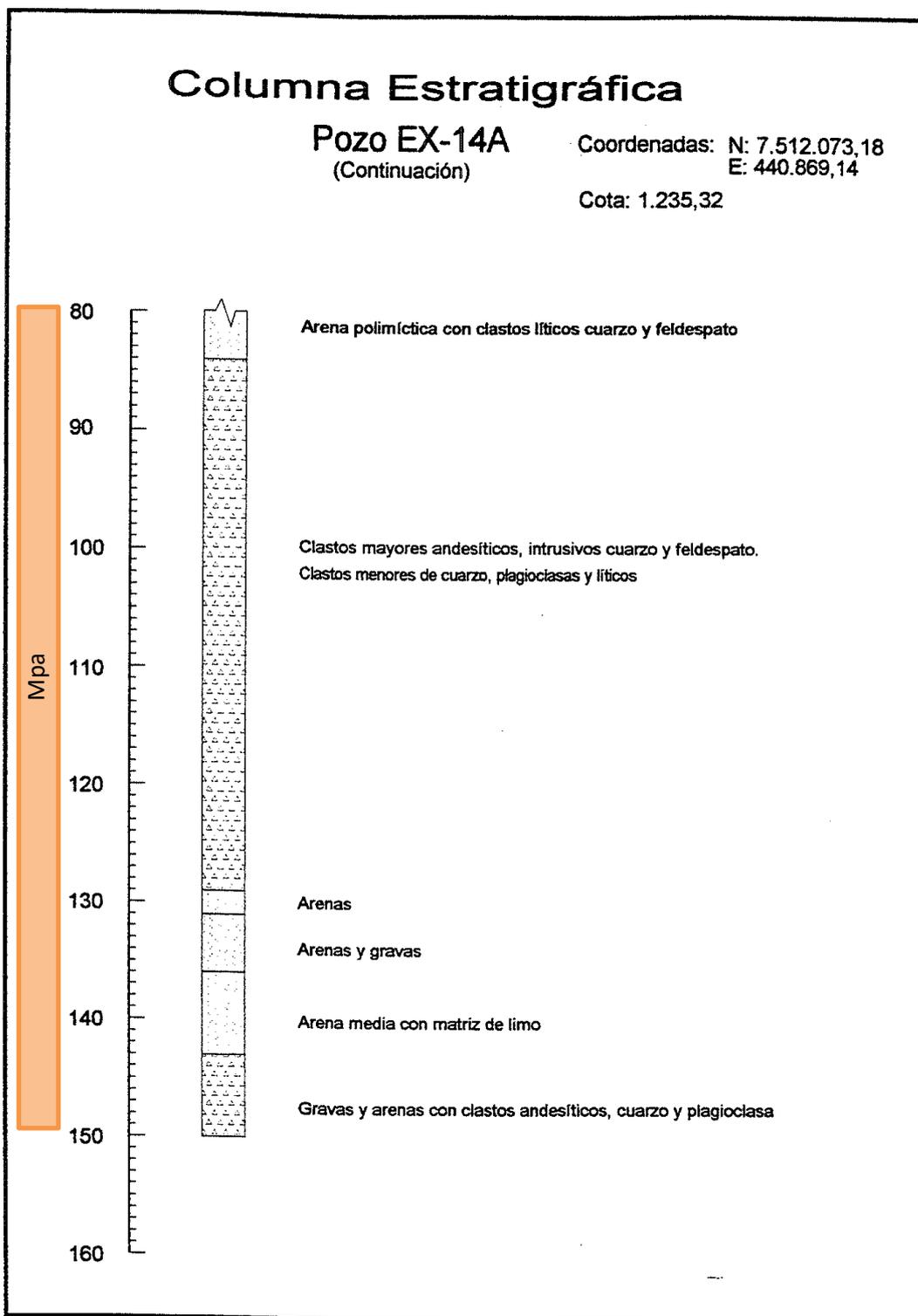
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1292.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 35 (CONTINUACIÓN)



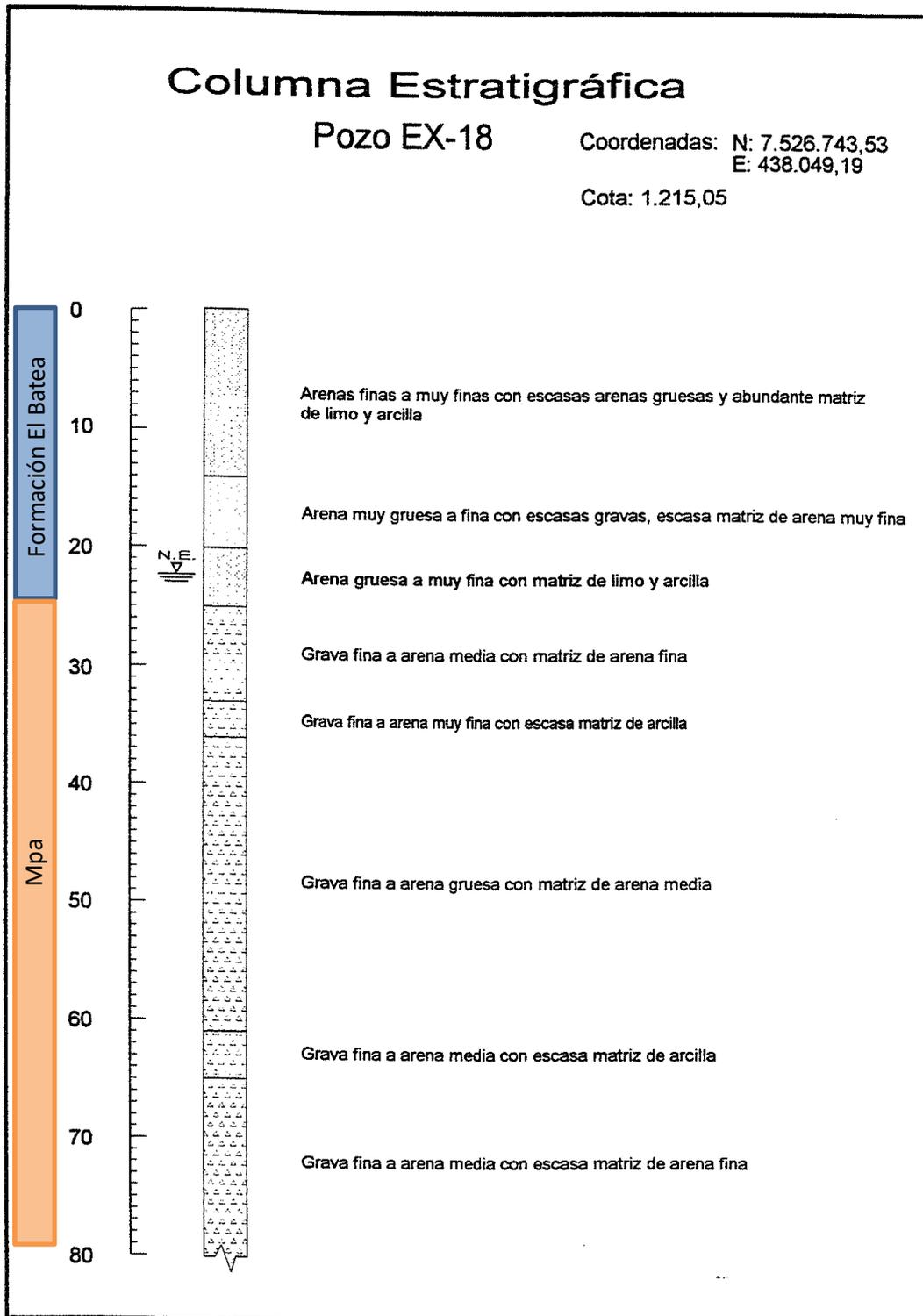
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1292.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 14A (CONTINUACIÓN)



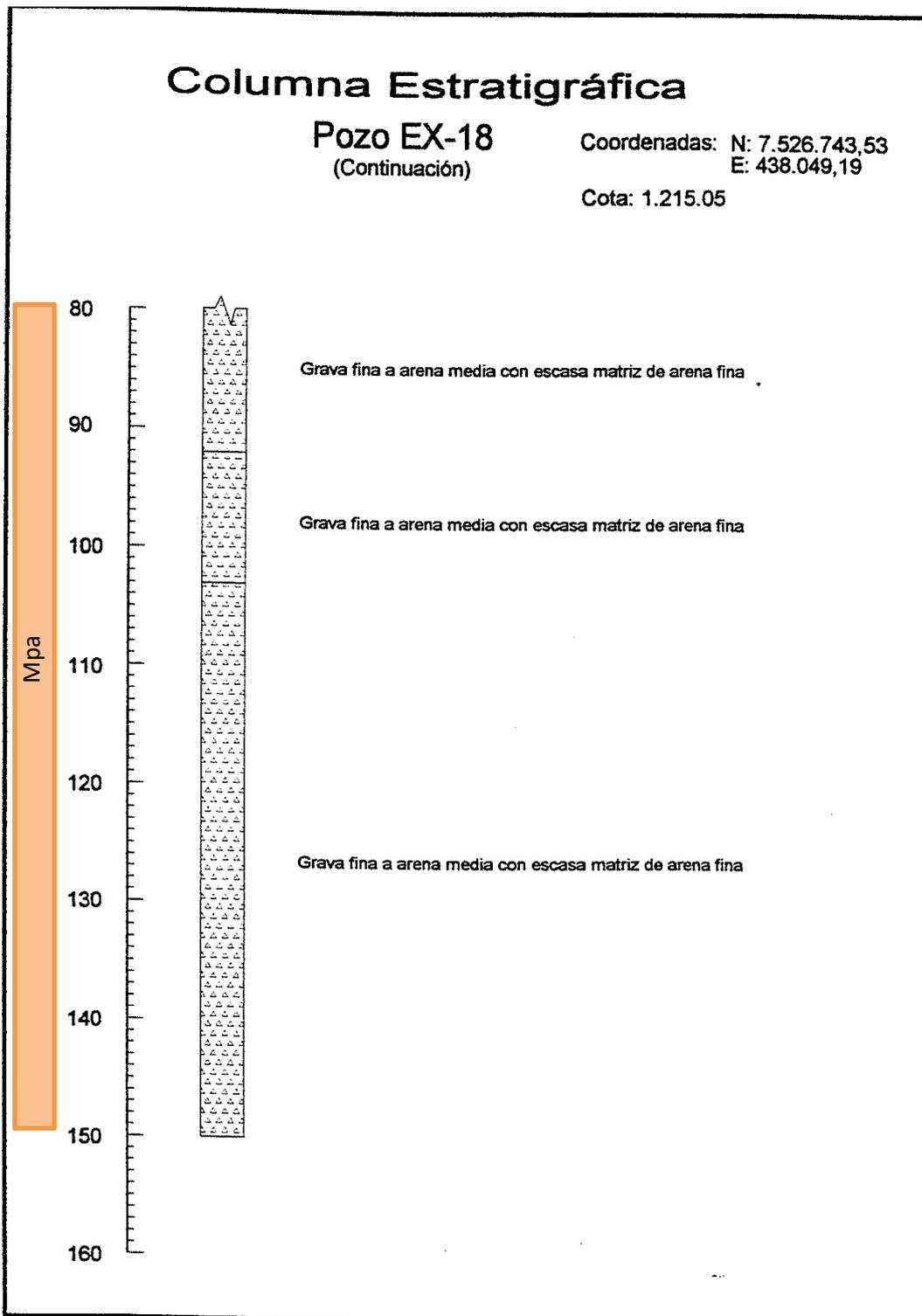
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 18



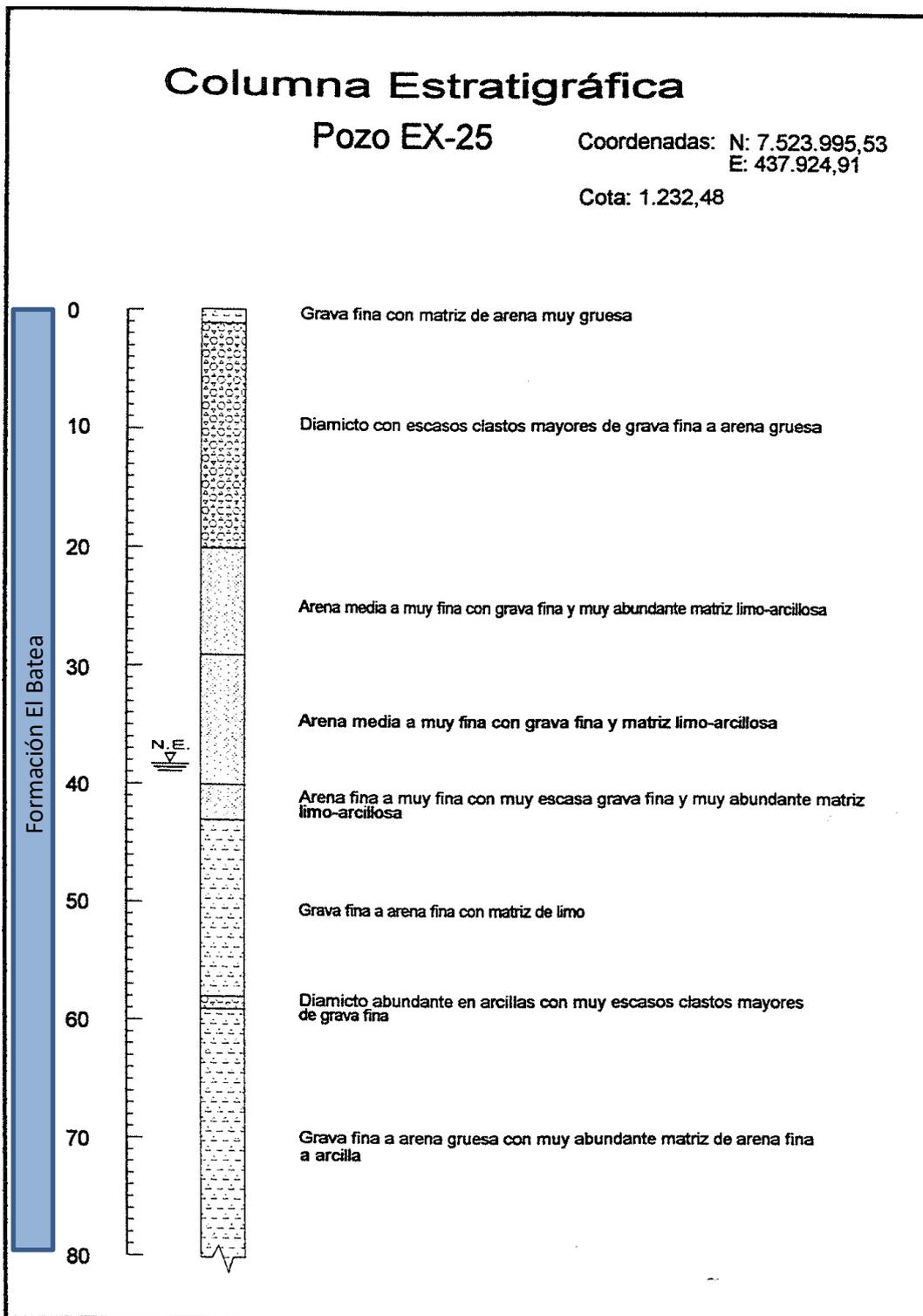
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 18 (CONTINUACIÓN)



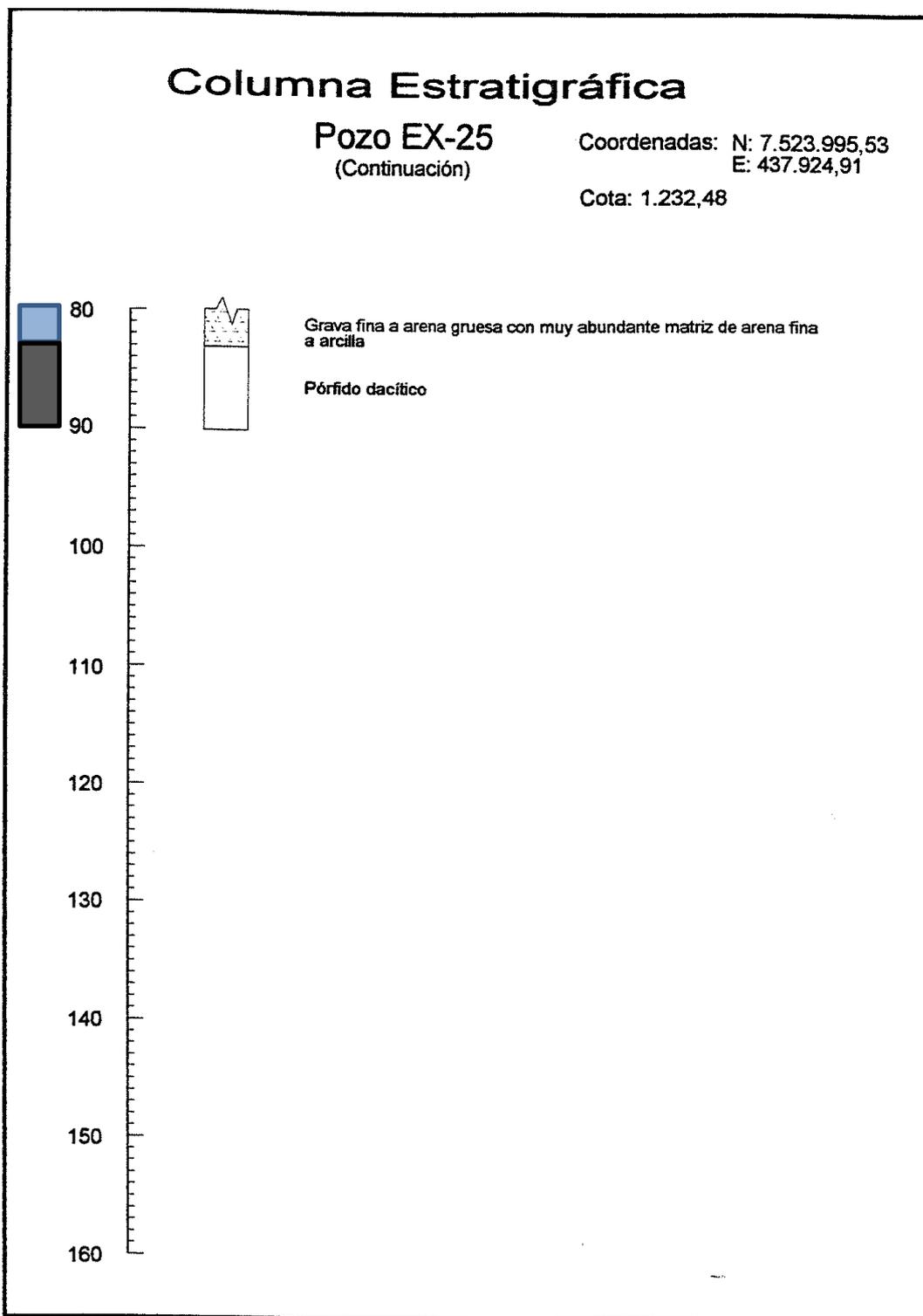
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 25



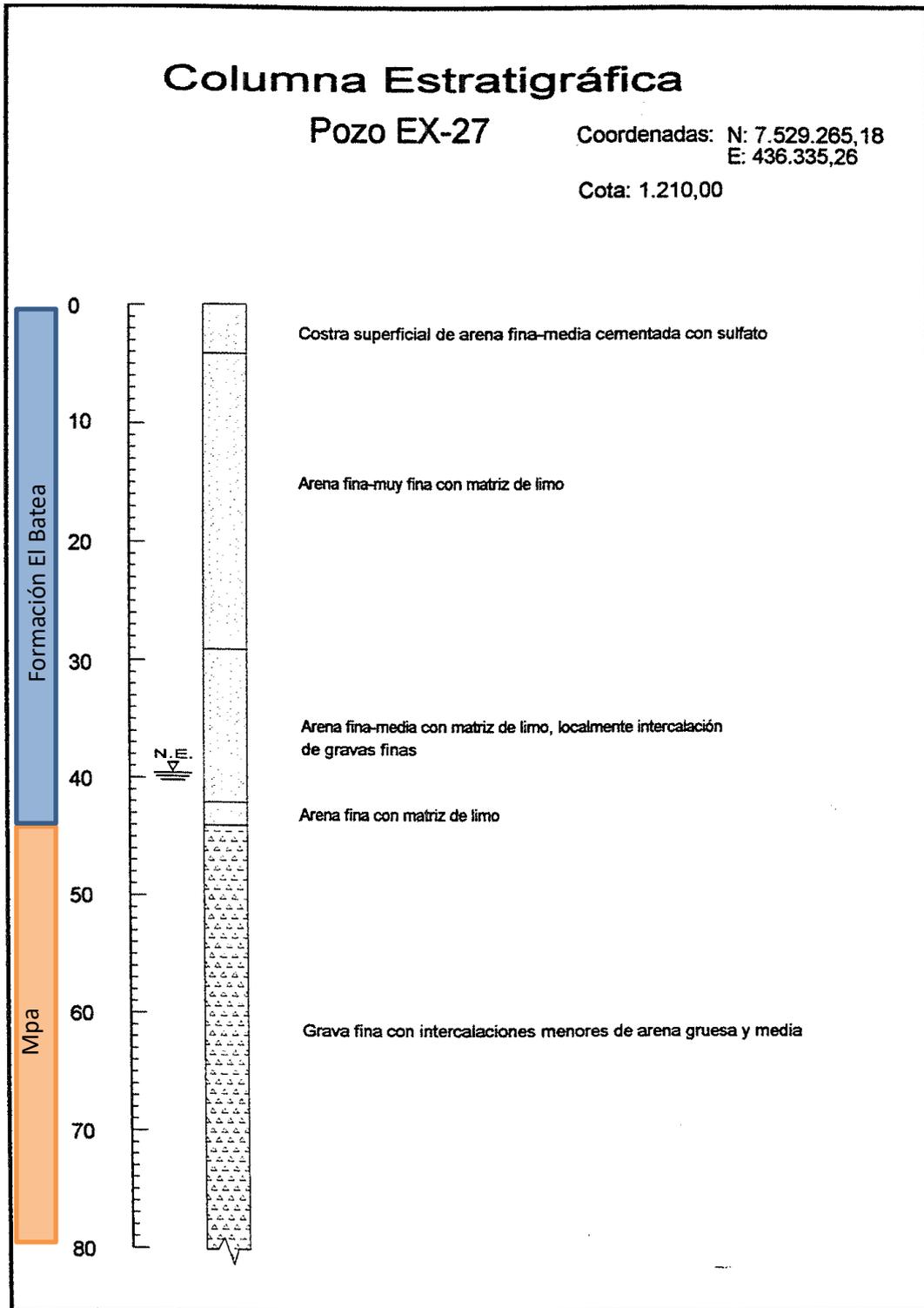
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 25 (CONTINUACIÓN)



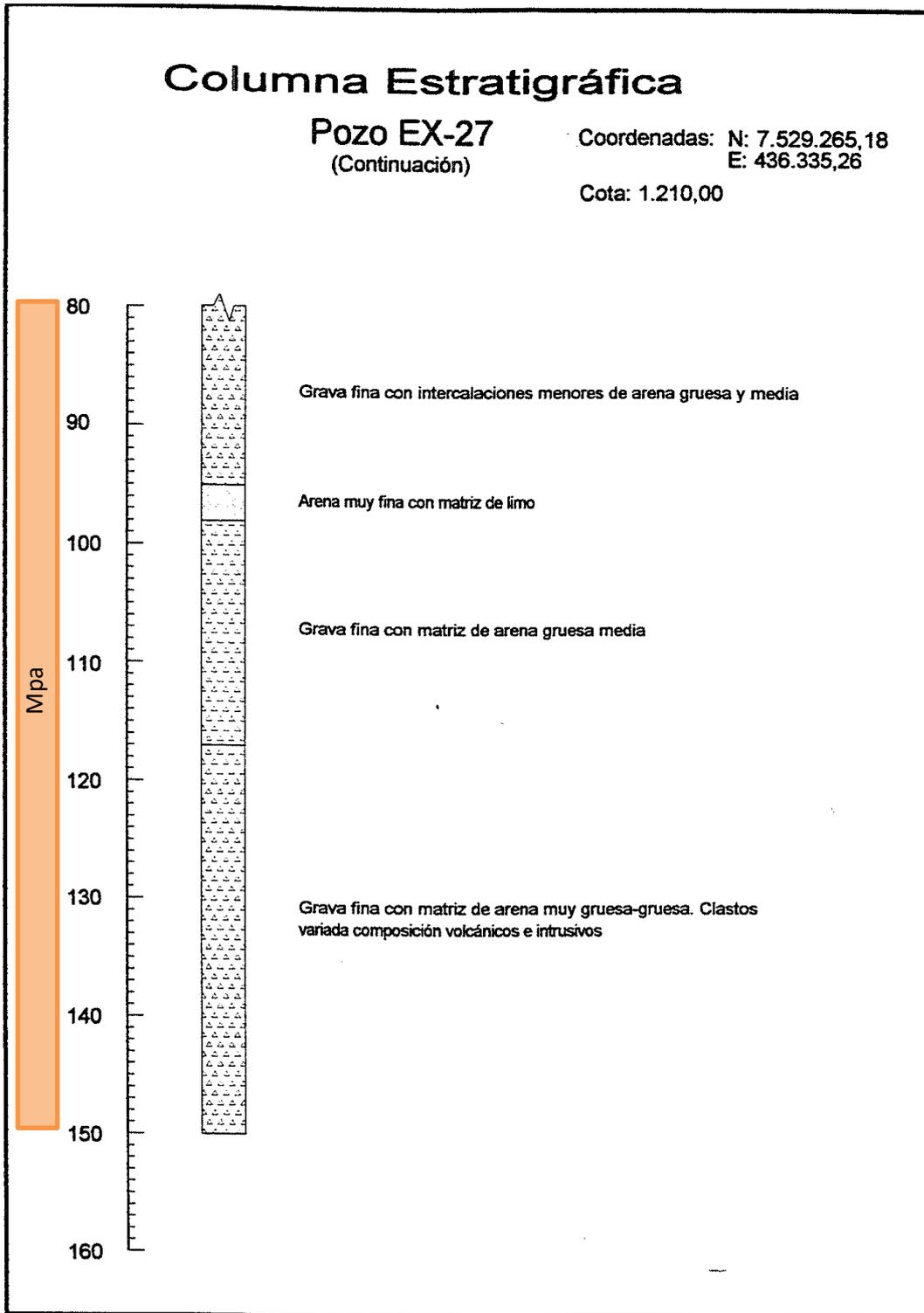
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 27



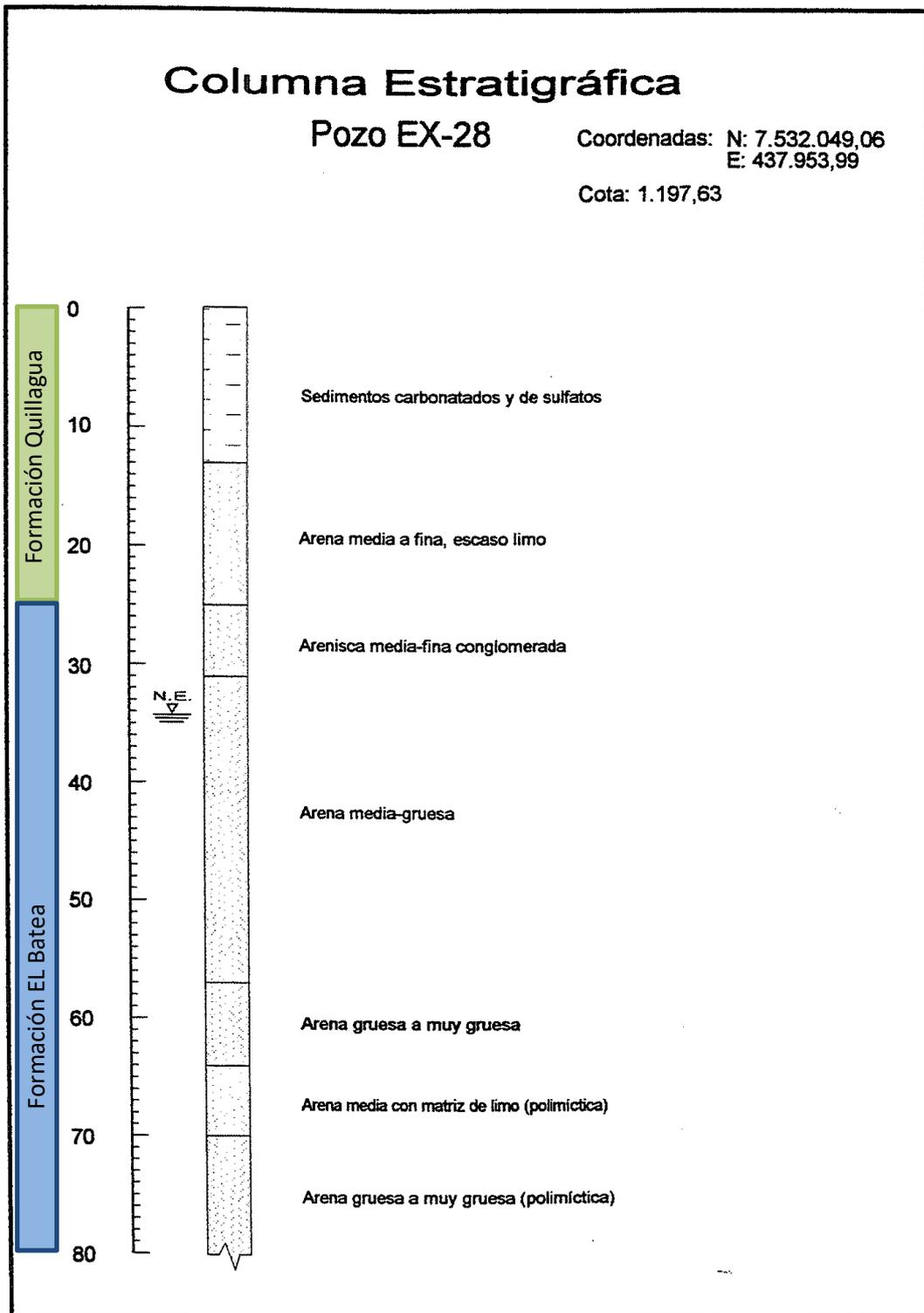
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX – 27 (CONTINUACIÓN)



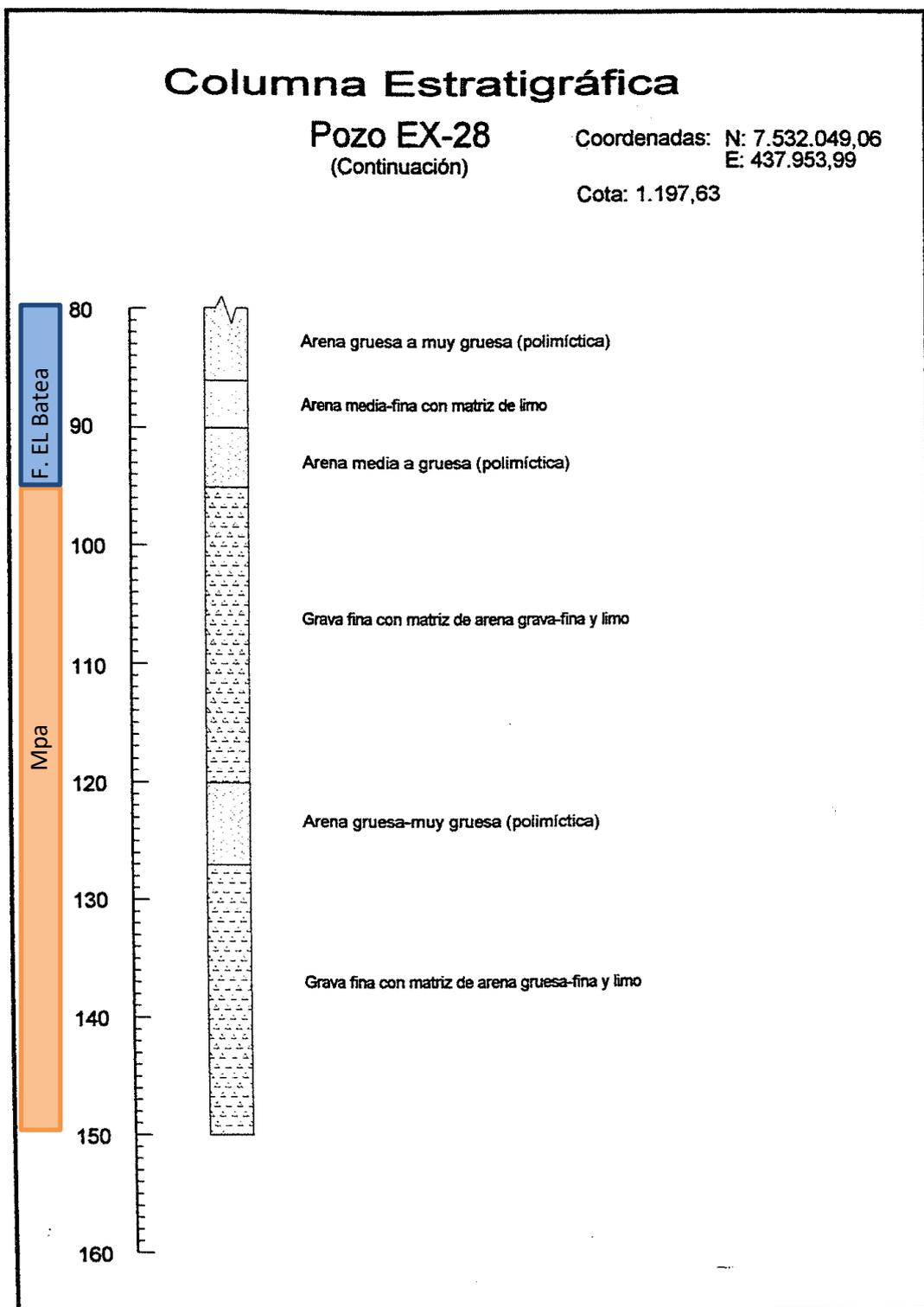
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 28



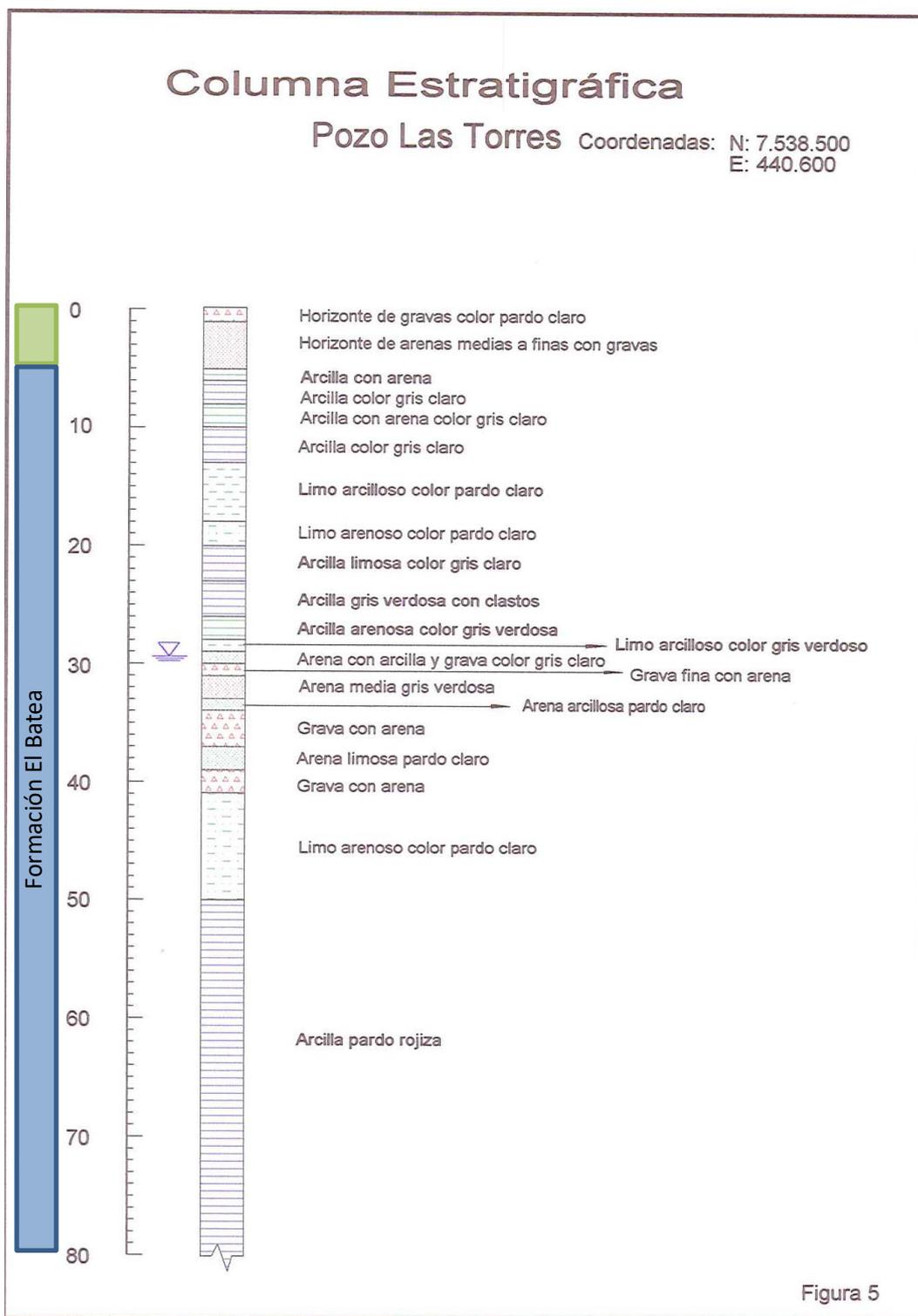
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO EX – 28 (CONTINUACIÓN)



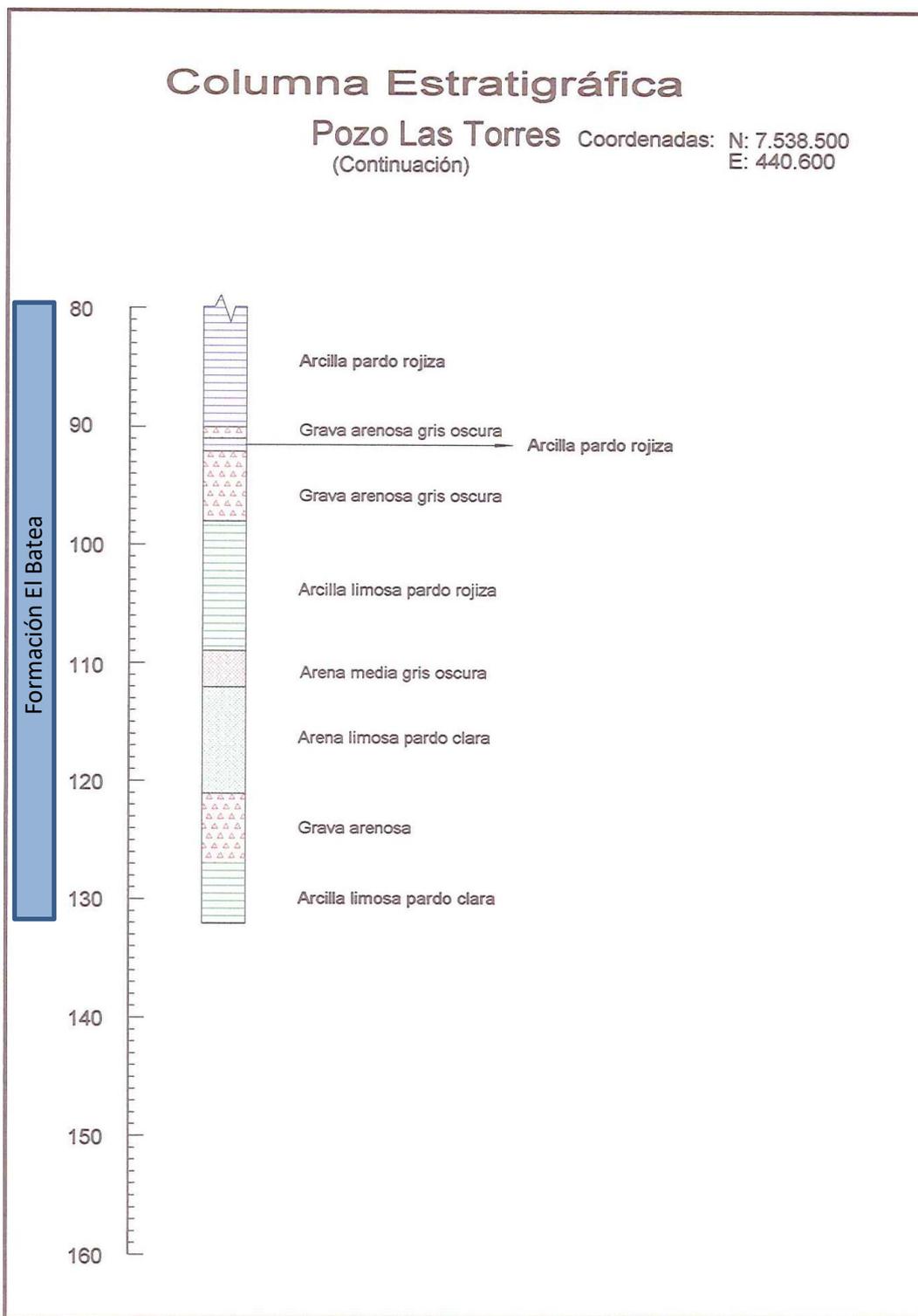
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1396.

ESTRATIGRAFIA POZO LAS TORRES



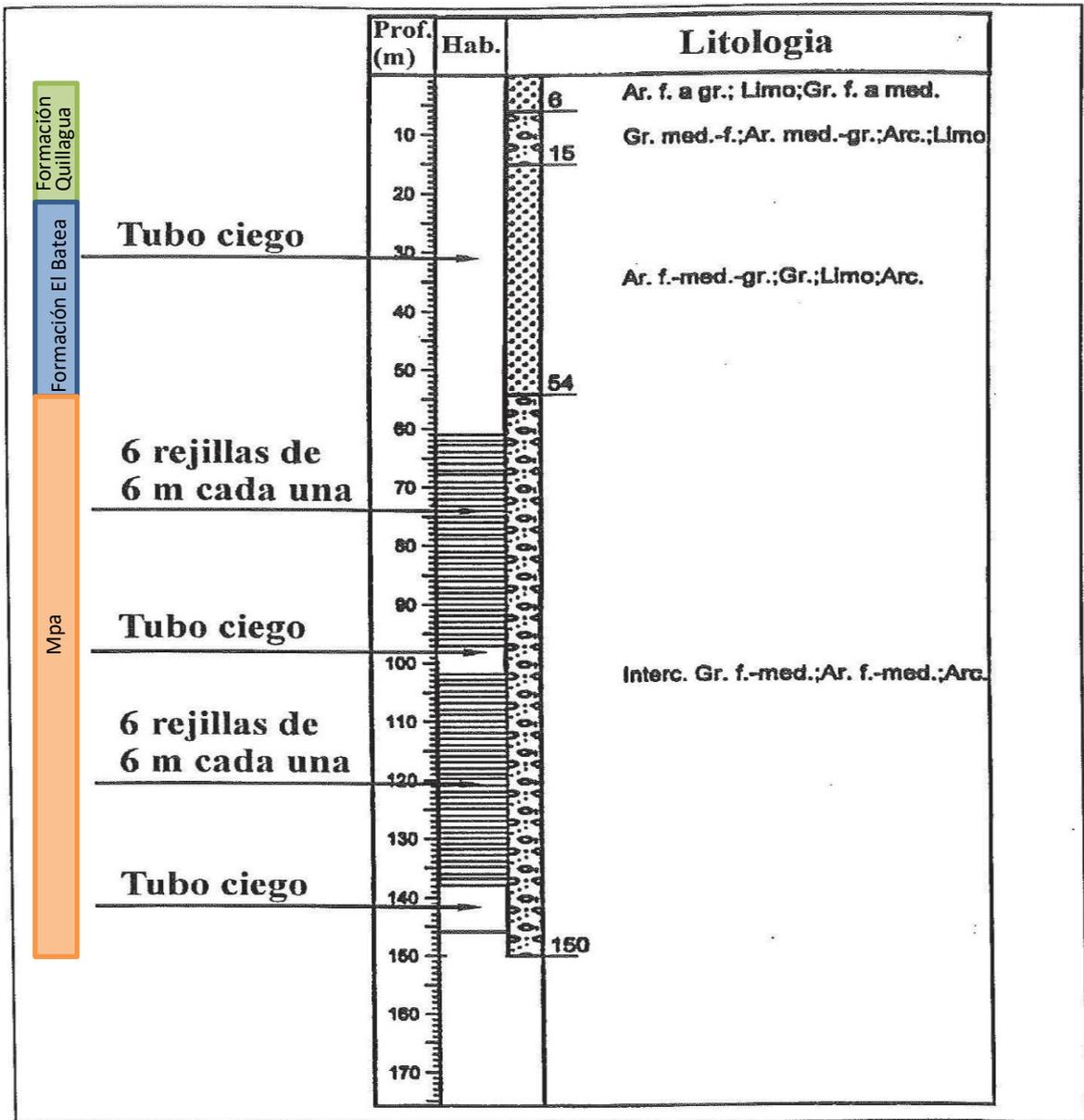
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1401.

ESTRATIGRAFIA POZO LAS TORRES (CONTINUACIÓN)



Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1401.

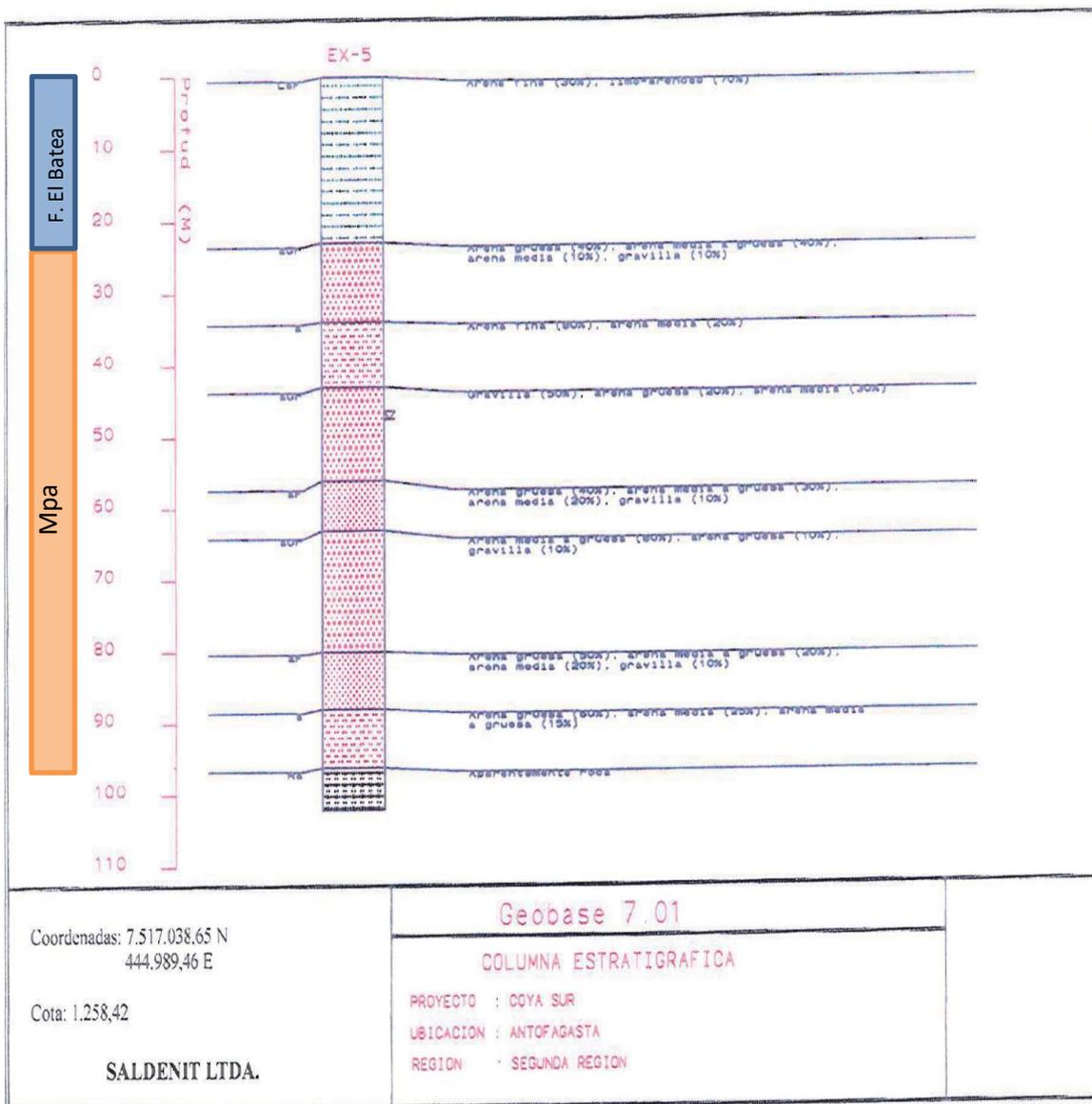
ESTRATIGRAFIA POZO MELISSA



PERFIL DE HABILITACION POZO PRODUCCION MELISSA

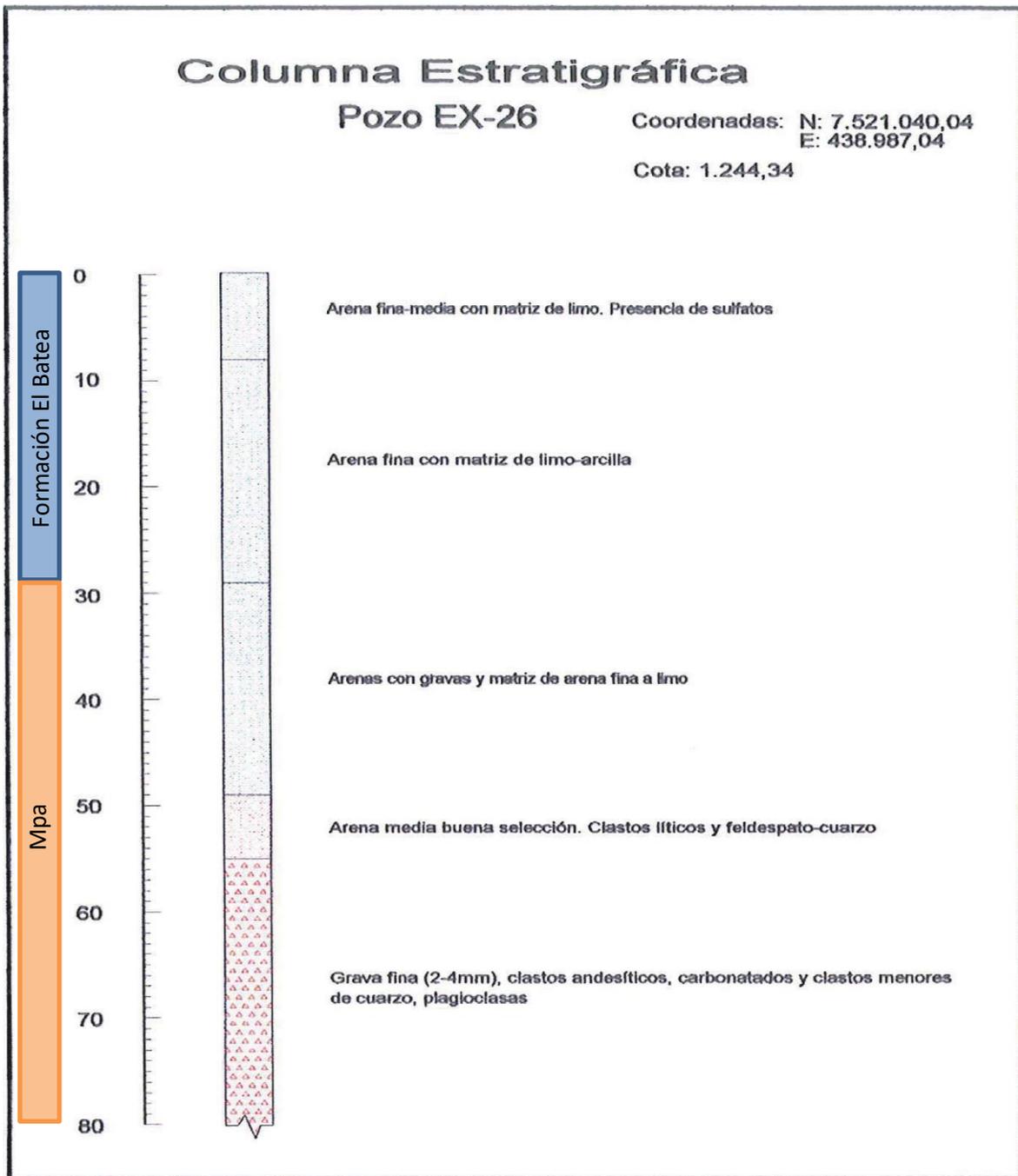
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1628.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 5



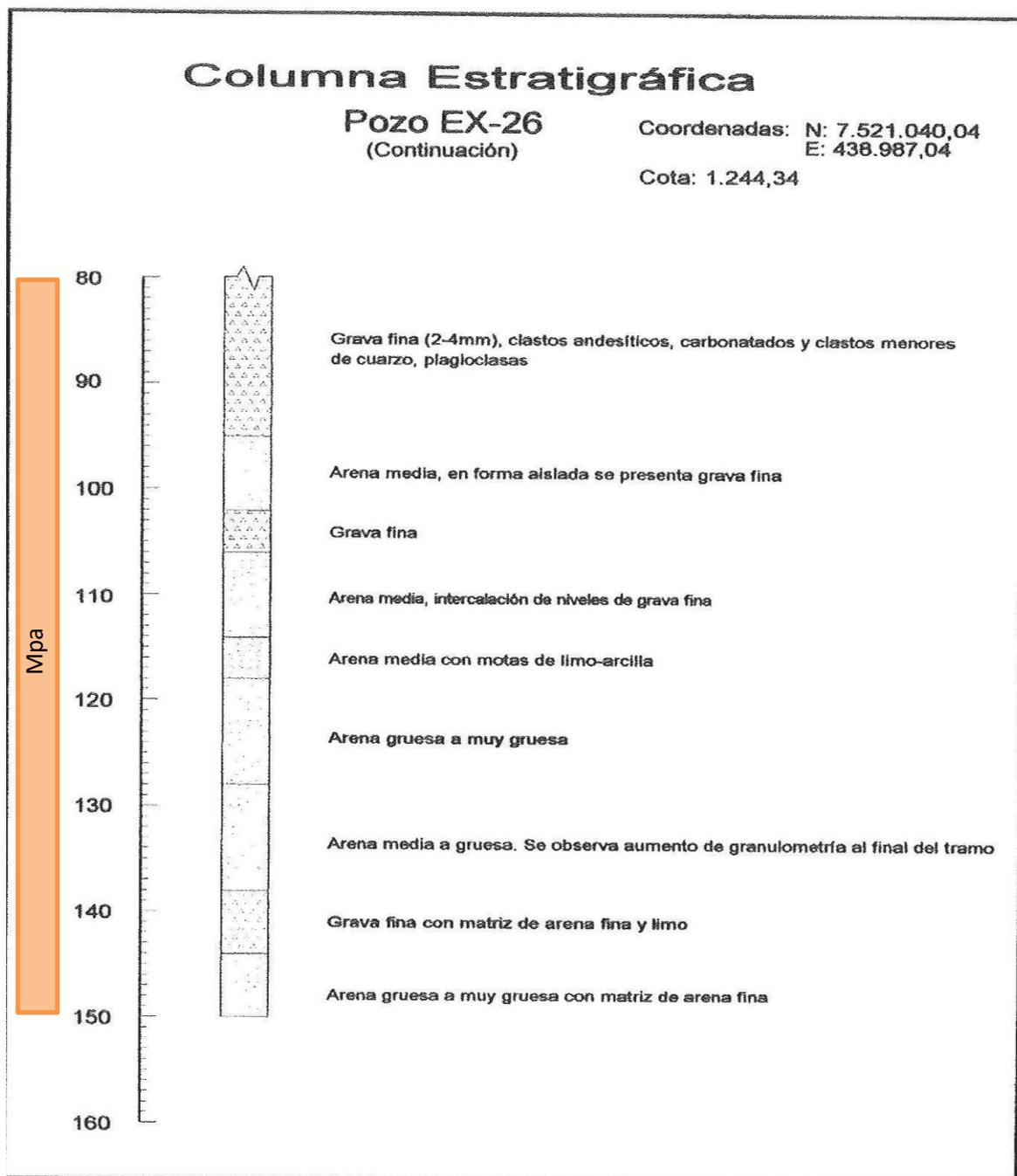
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1628.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 26



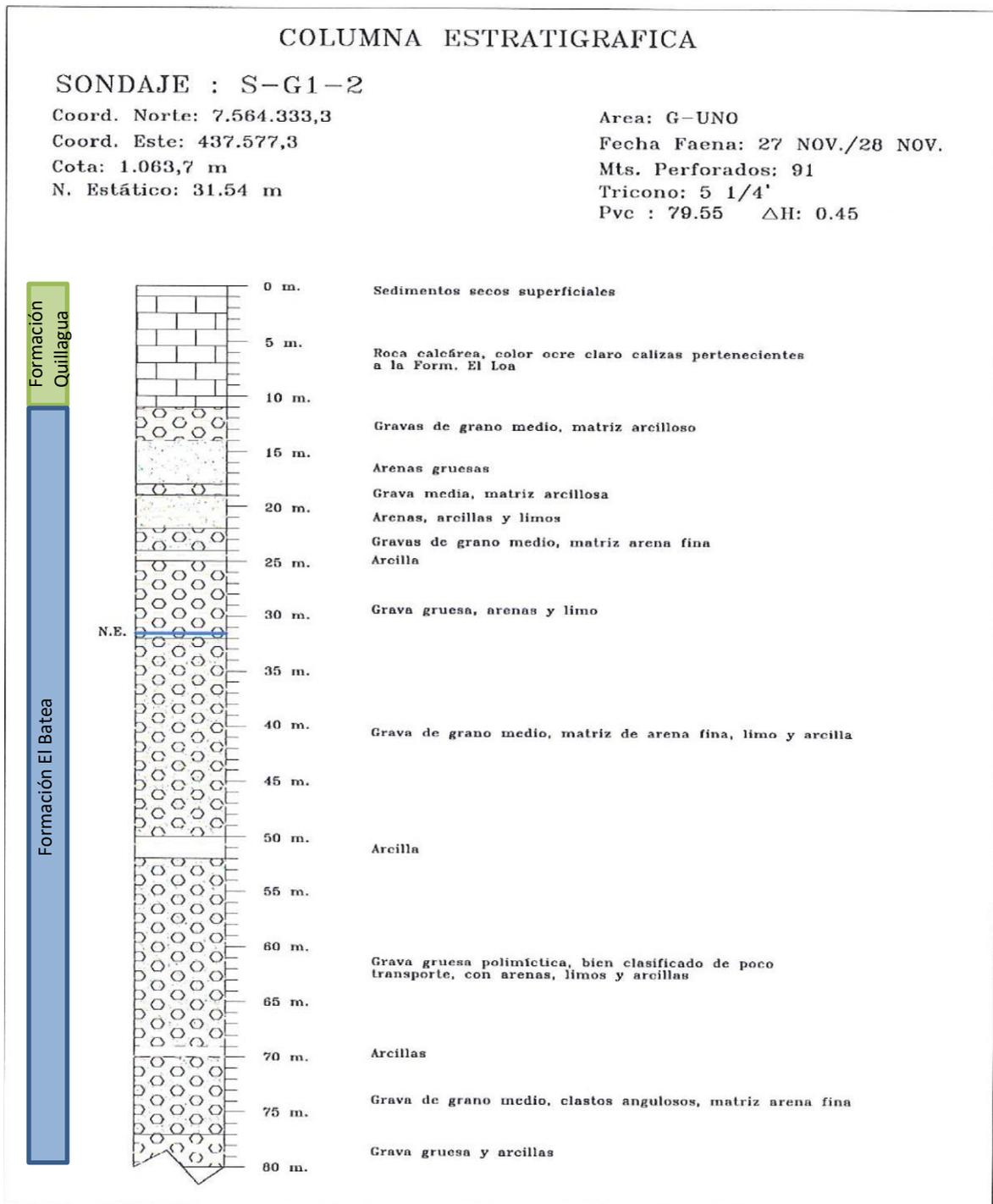
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1628.

ESTRATIGRAFIA POZO EX - 26 (CONTINUACIÓN)



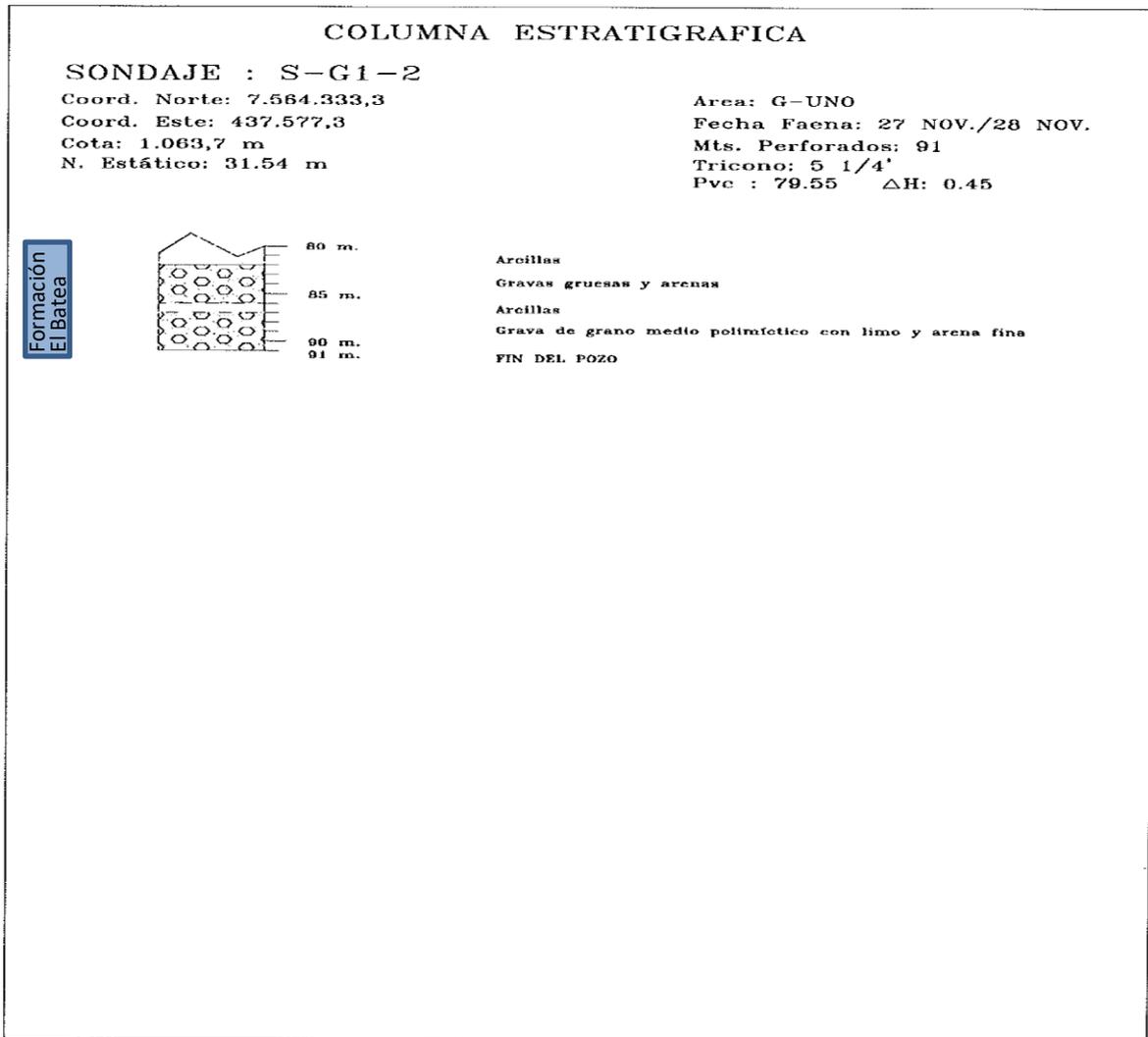
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1628.

ESTRATIGRAFIA POZO S-G1-2



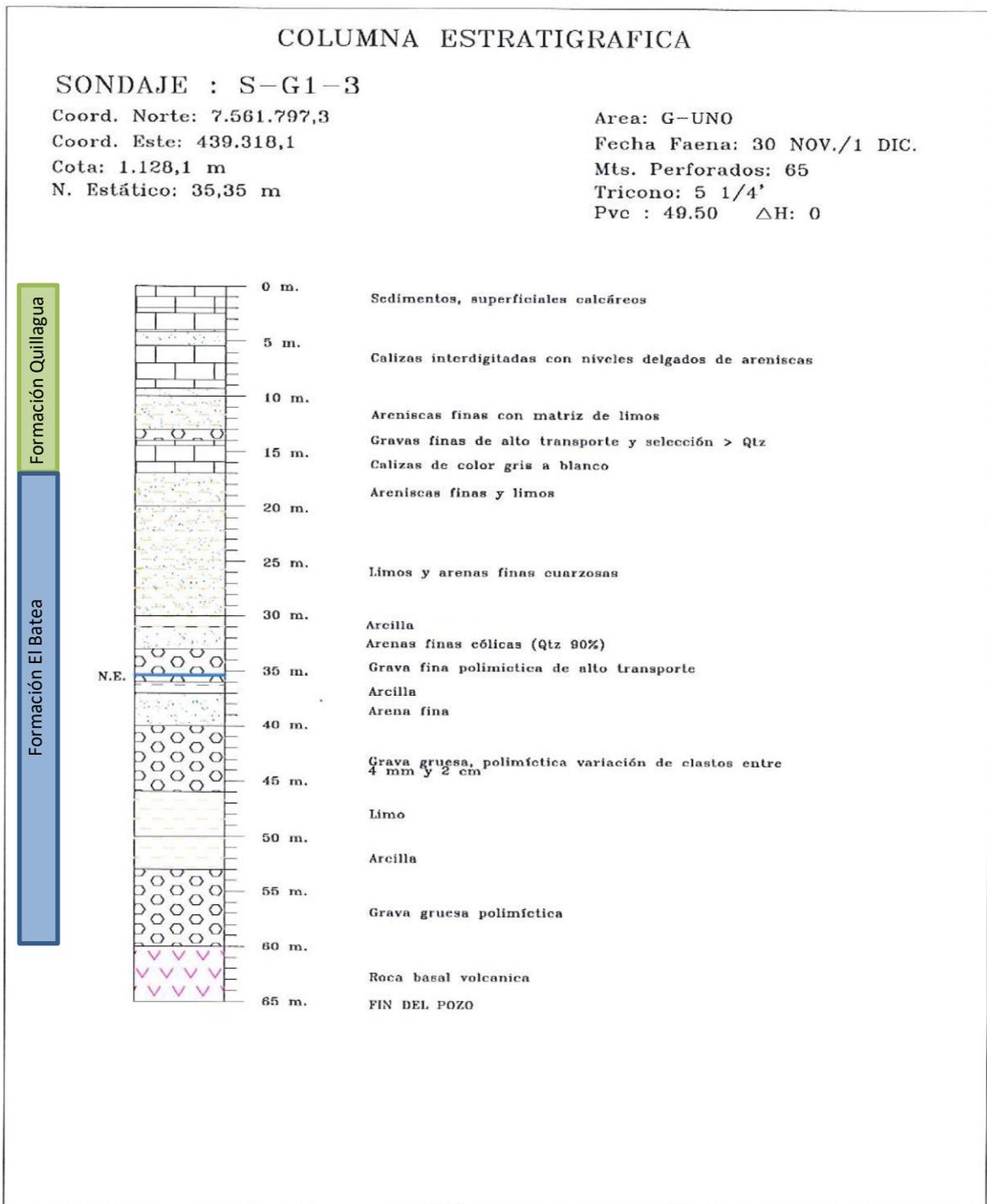
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1664.

ESTRATIGRAFIA POZO S-G1-2 (CONTINUACIÓN)



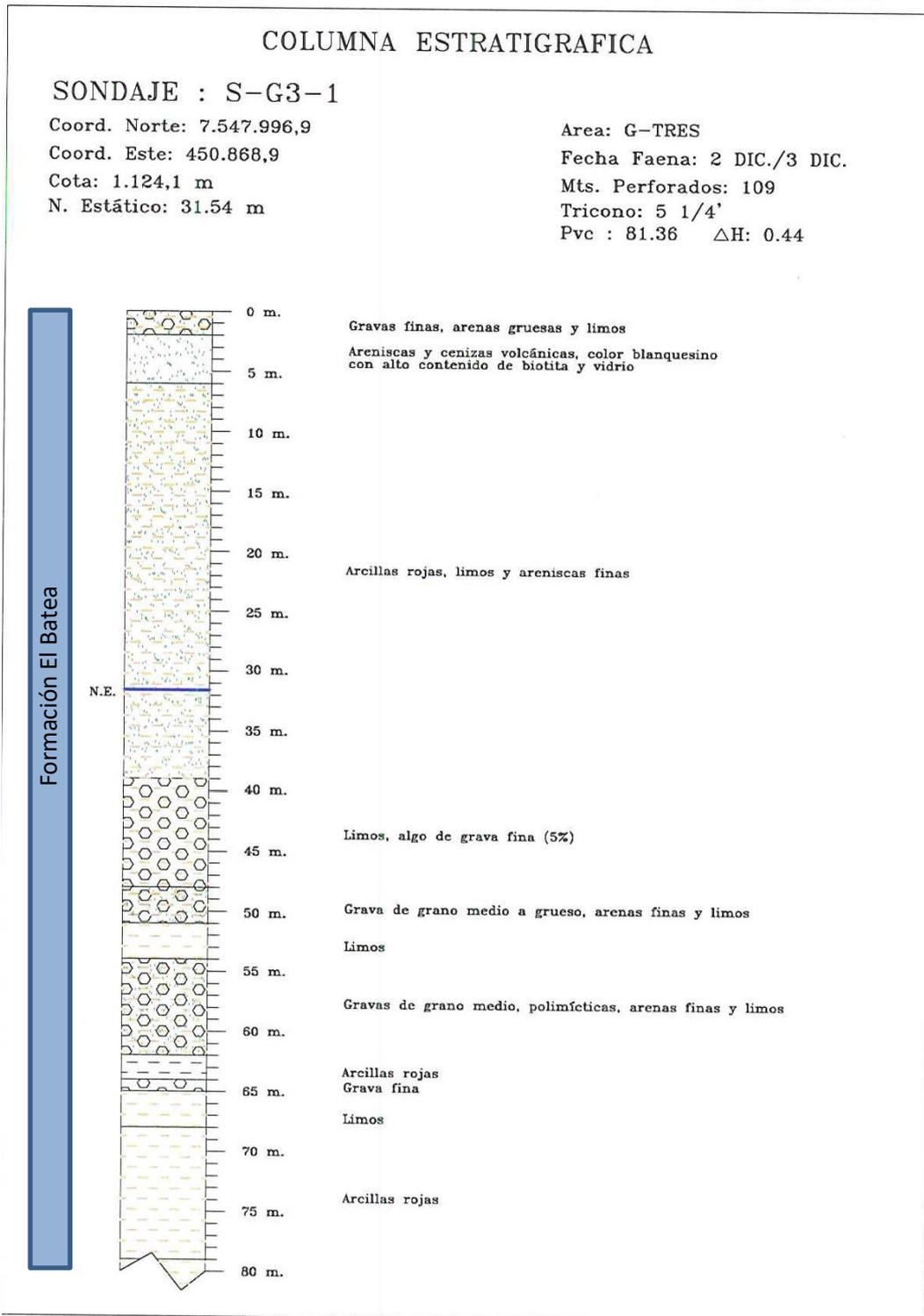
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1664.

ESTRATIGRAFIA POZO S-G1-3



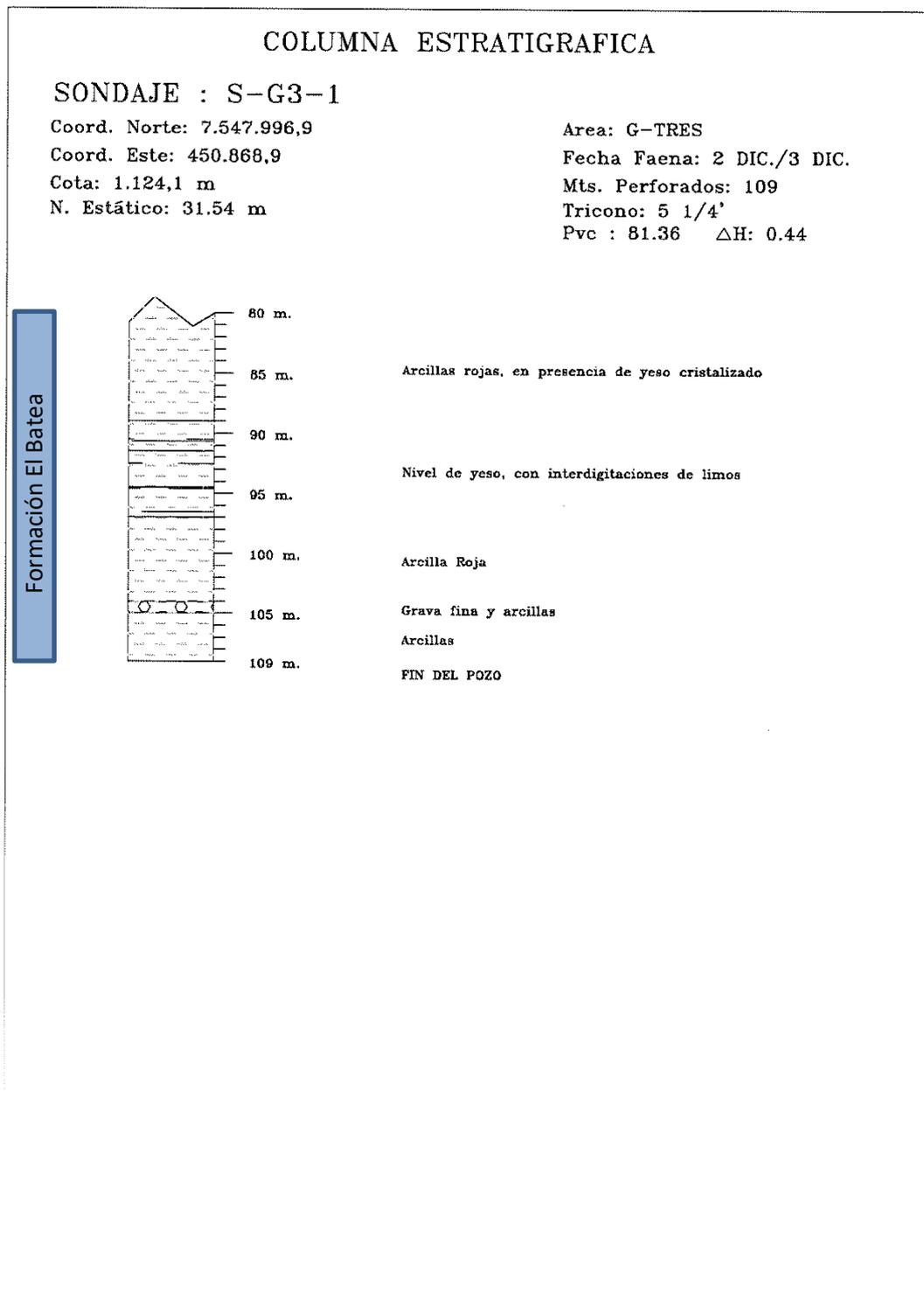
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1664.

ESTRATIGRAFIA POZO S-G3-1



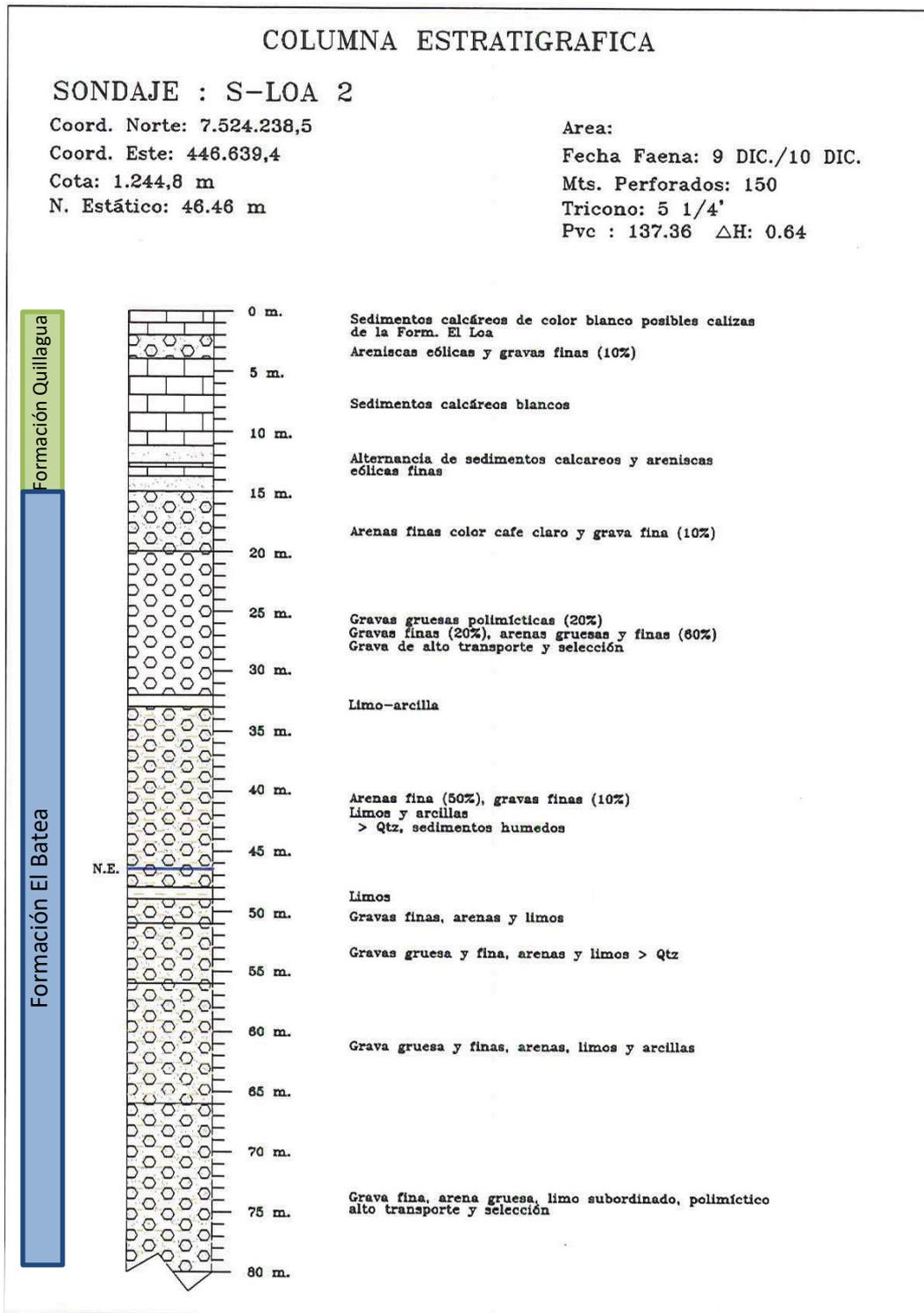
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1665.

ESTRATIGRAFIA POZO S-G3-1 (CONTINUACIÓN)



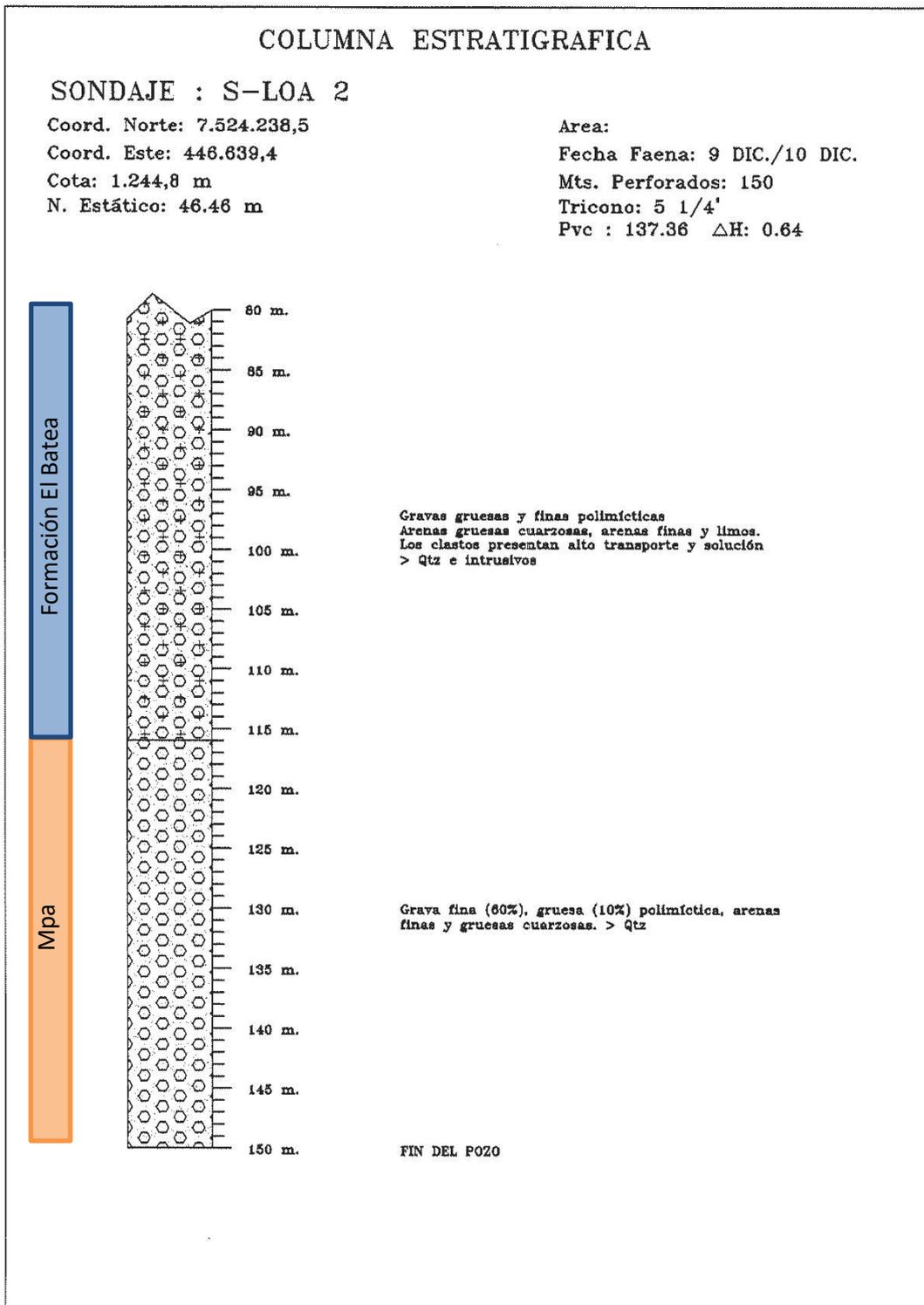
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1665.

ESTRATIGRAFIA POZO S-LOA 2



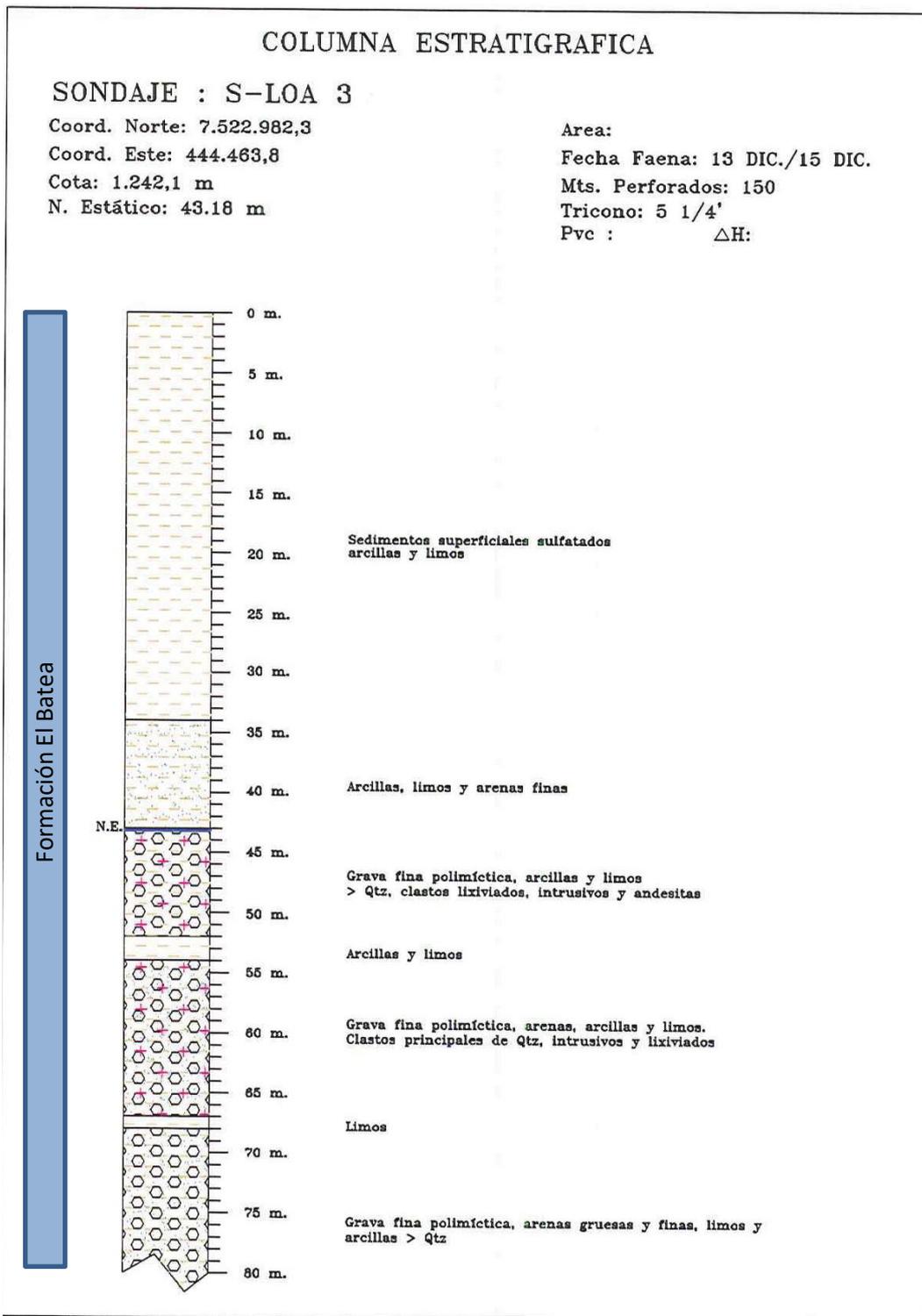
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1670.

ESTRATIGRAFIA POZO S-LOA 2 (CONTINUACIÓN)



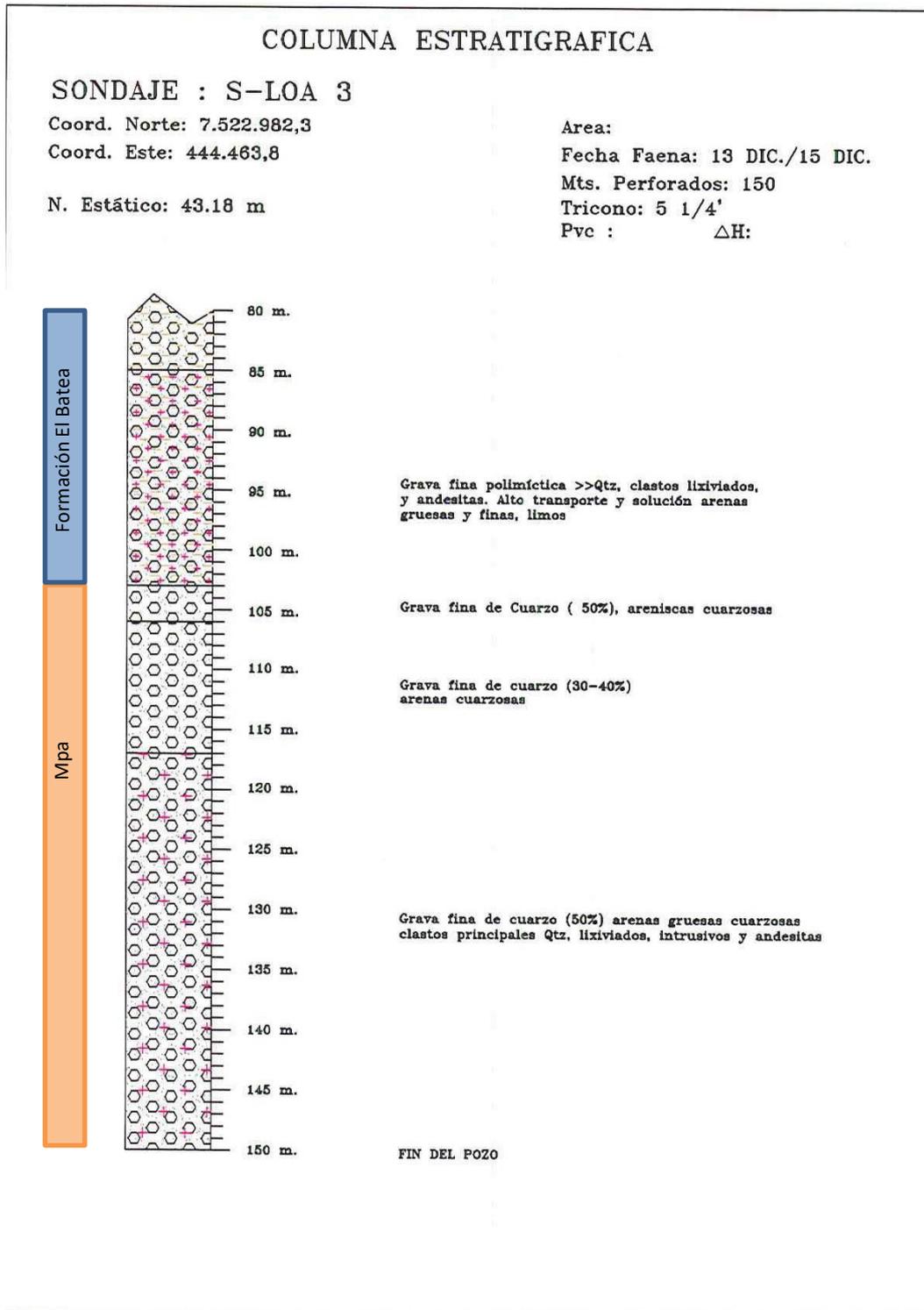
Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1670.

ESTRATIGRAFIA POZO S-LOA 3



Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1670.

ESTRATIGRAFIA POZO S-LOA 3 (CONTINUACIÓN)

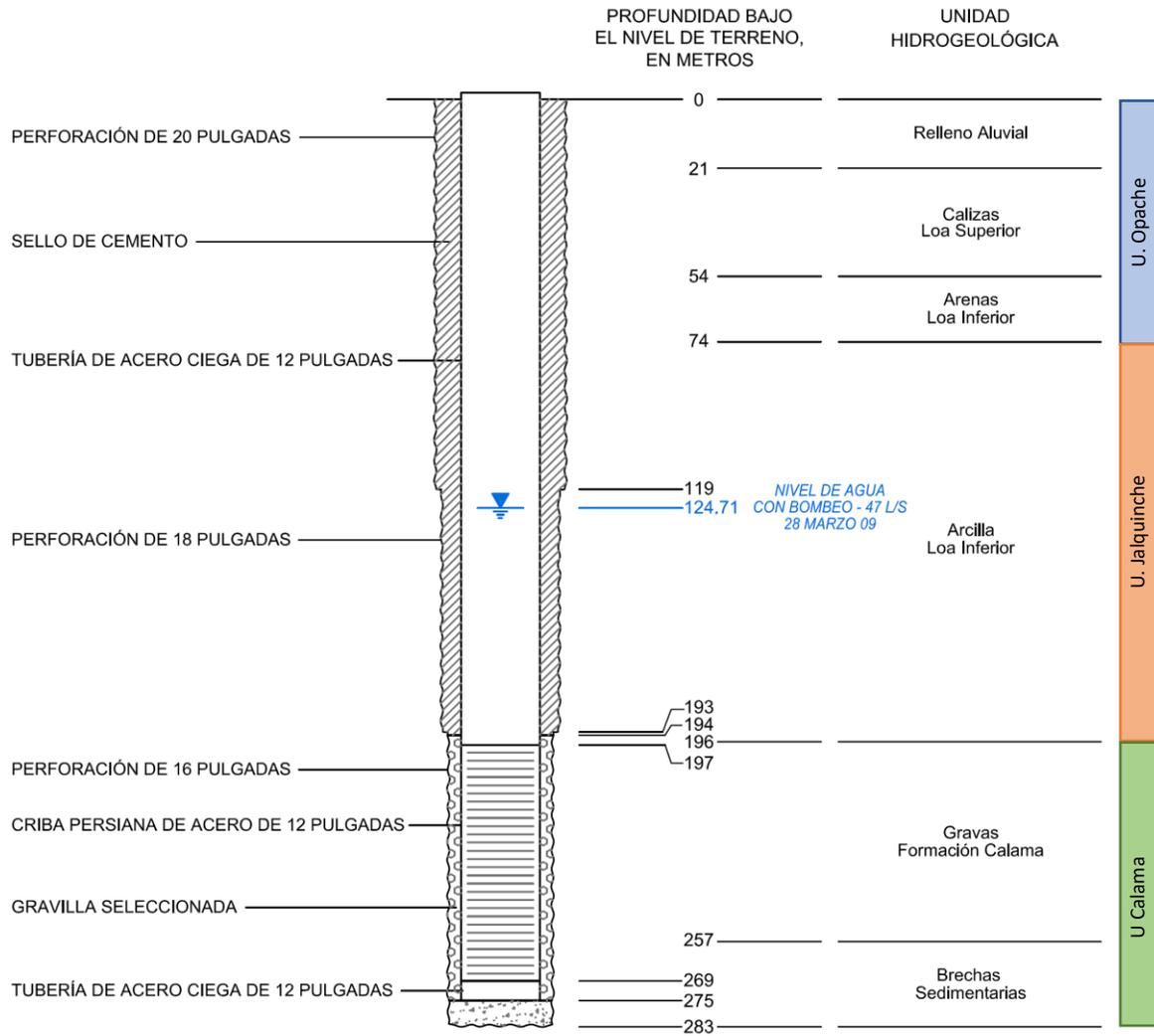


Fuente: Expediente DGA de Exploraciones NE-0201-1670.

Anexo C

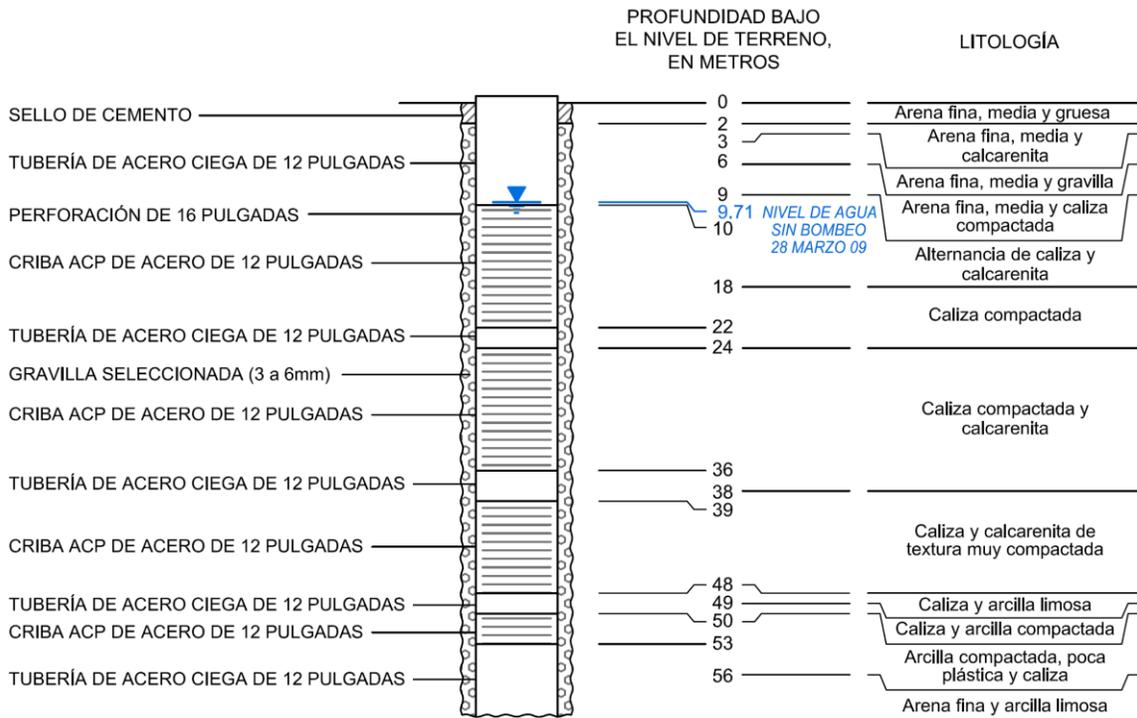
Información estratigráfica de oriente.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE BOMBEO PPR-2



Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

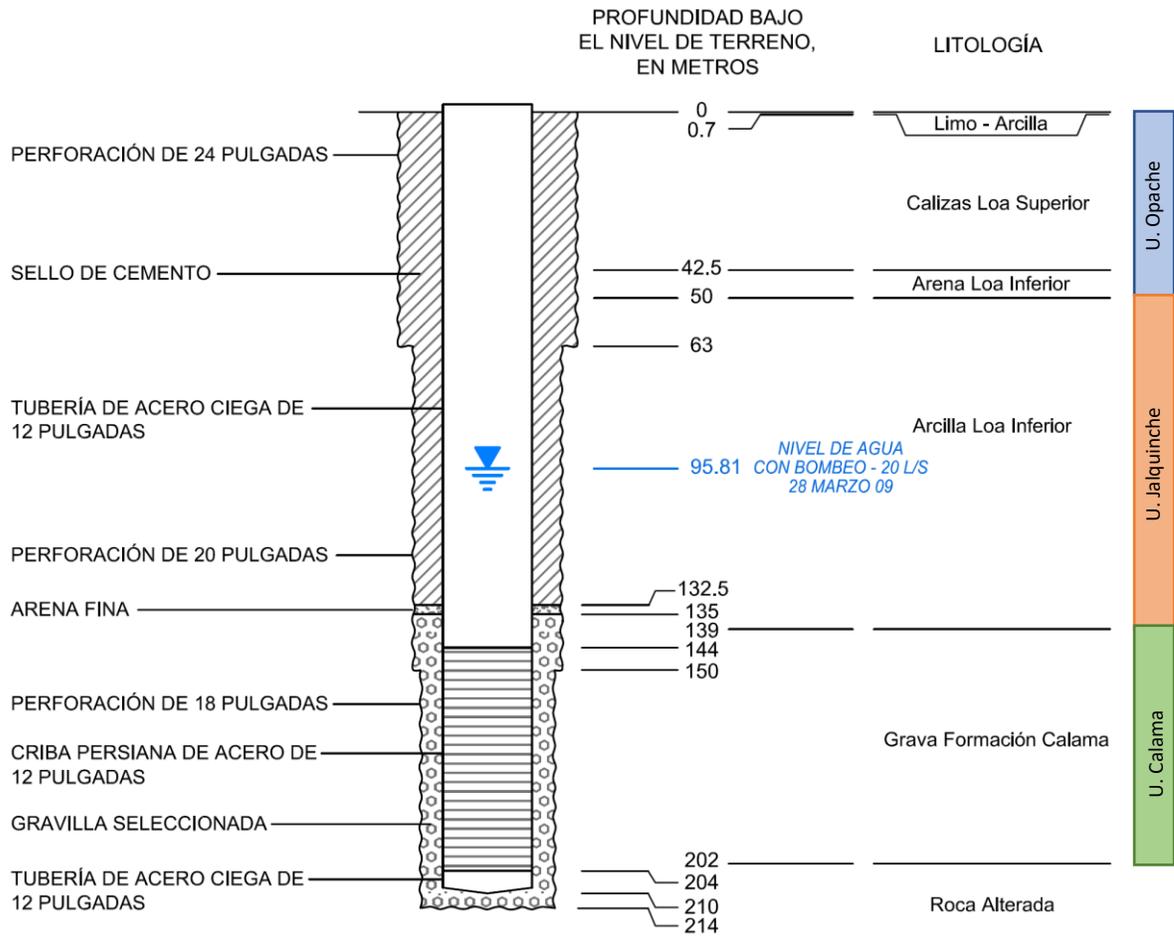
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE BOMBEO PPR-3



U. Opache
U. Jalquinche

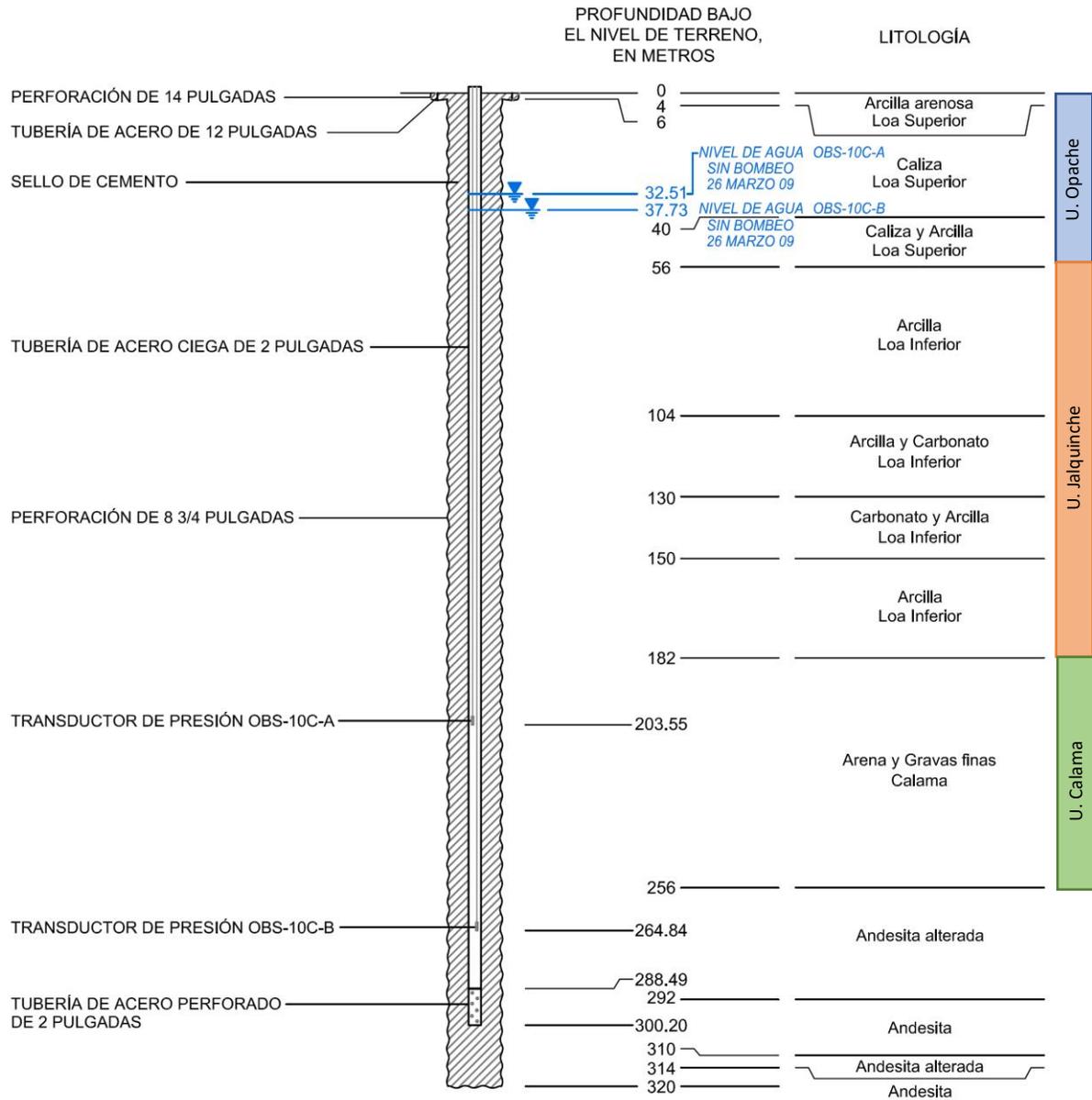
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE BOMBEO PPR-5



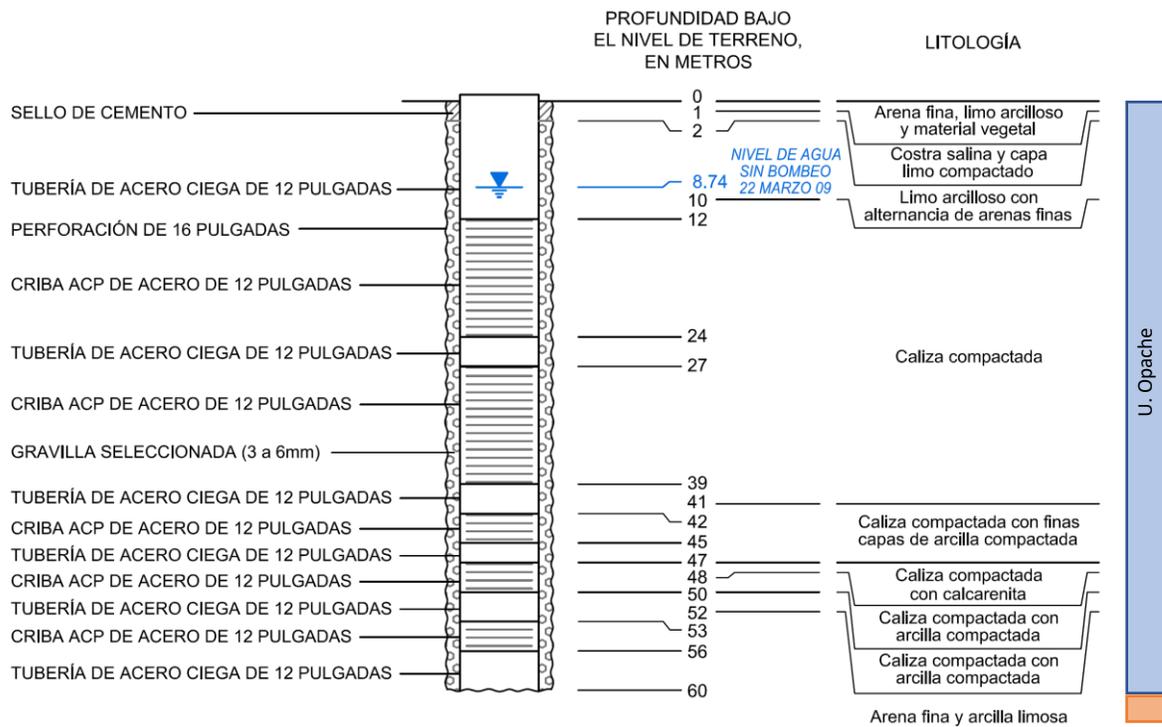
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO CON PIEZÓMETROS OBS-10C



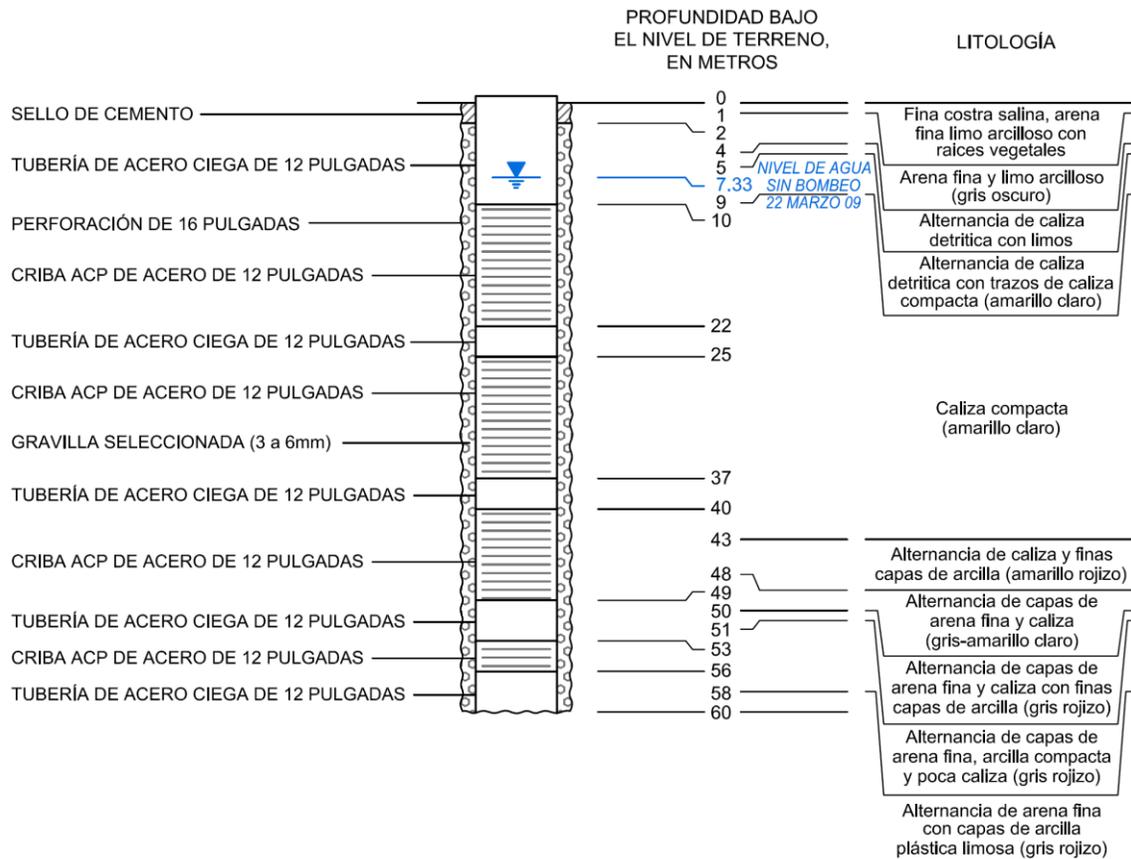
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN P-27



Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

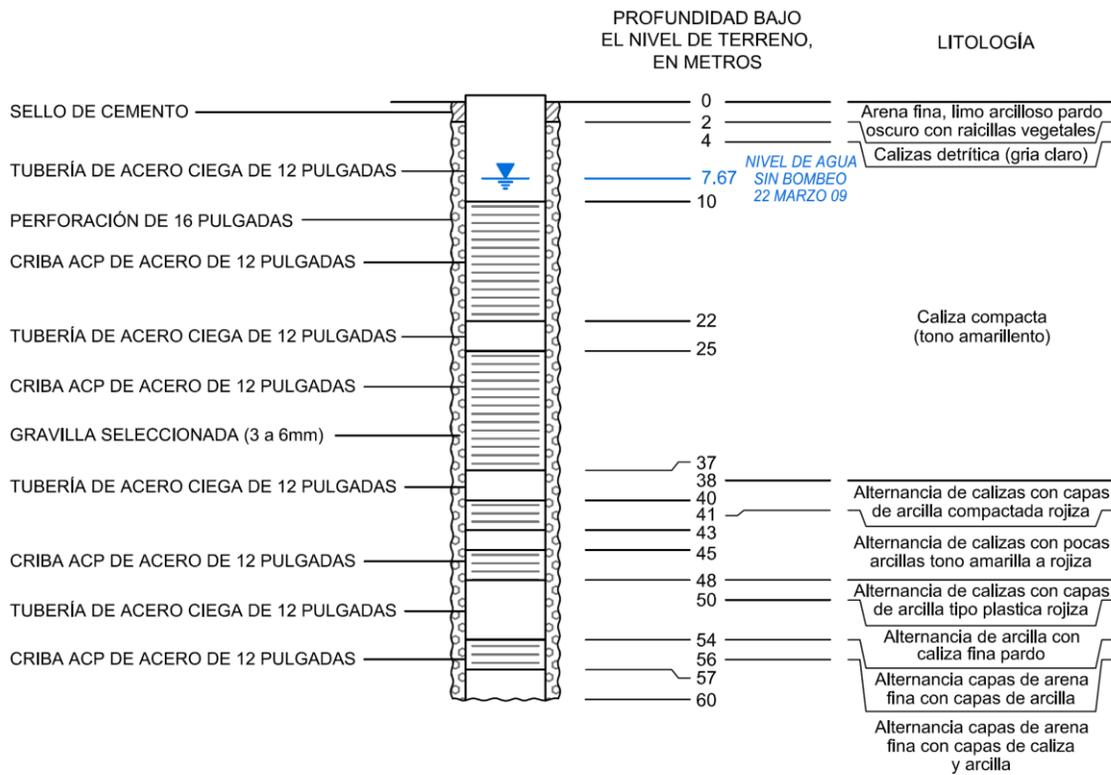
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN P-25



U. Opache

Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero – Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

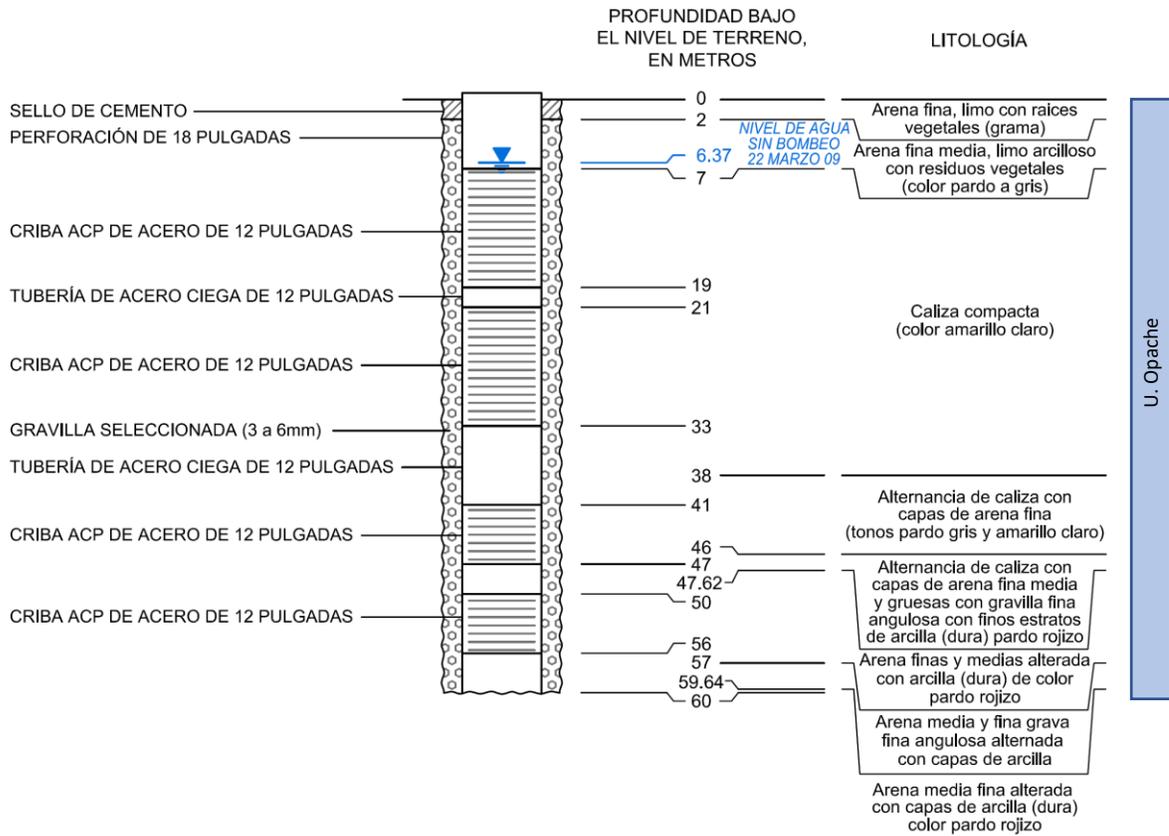
DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN P-24



U. Opache
U. Jalquinche

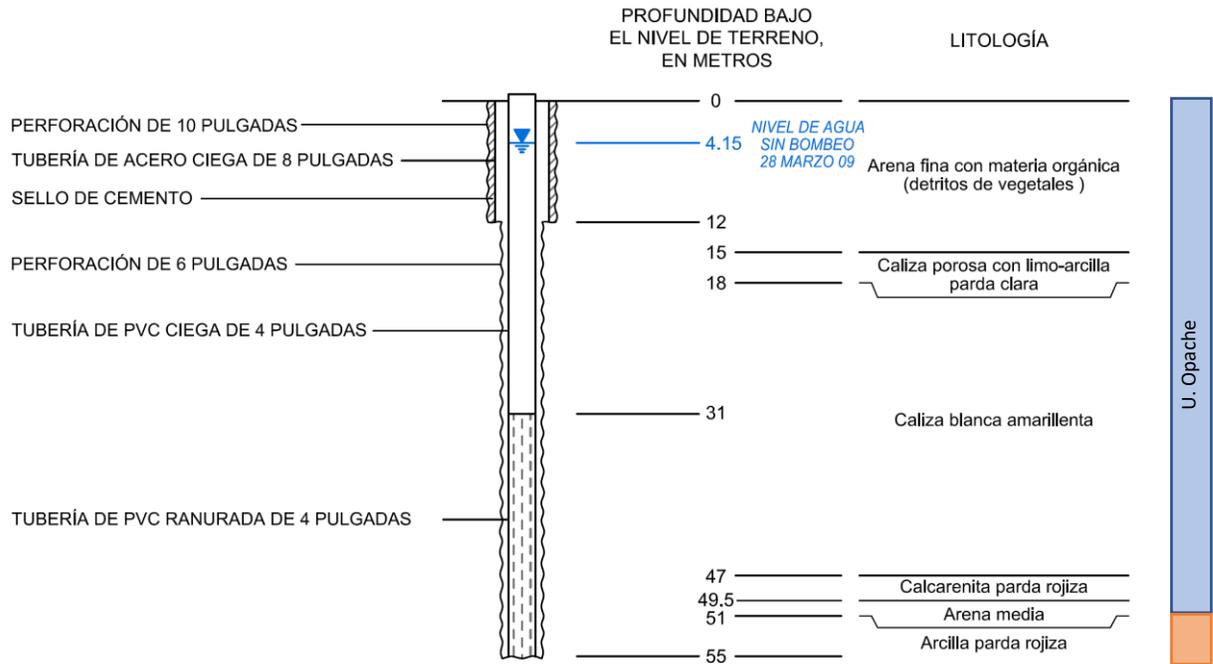
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN P-19



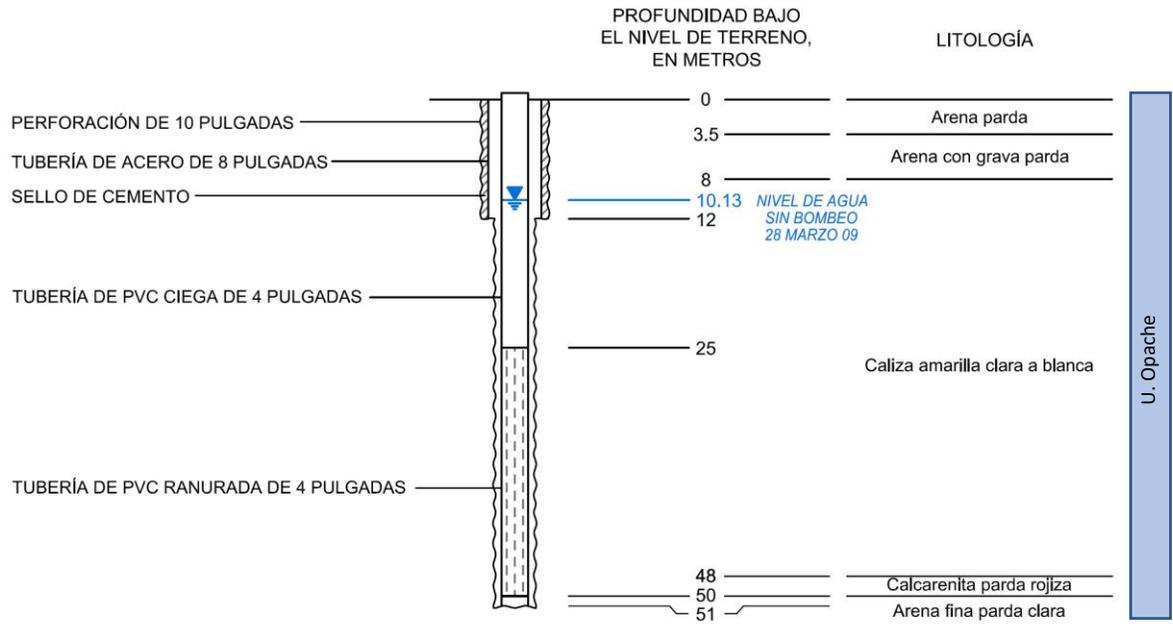
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN LE-7



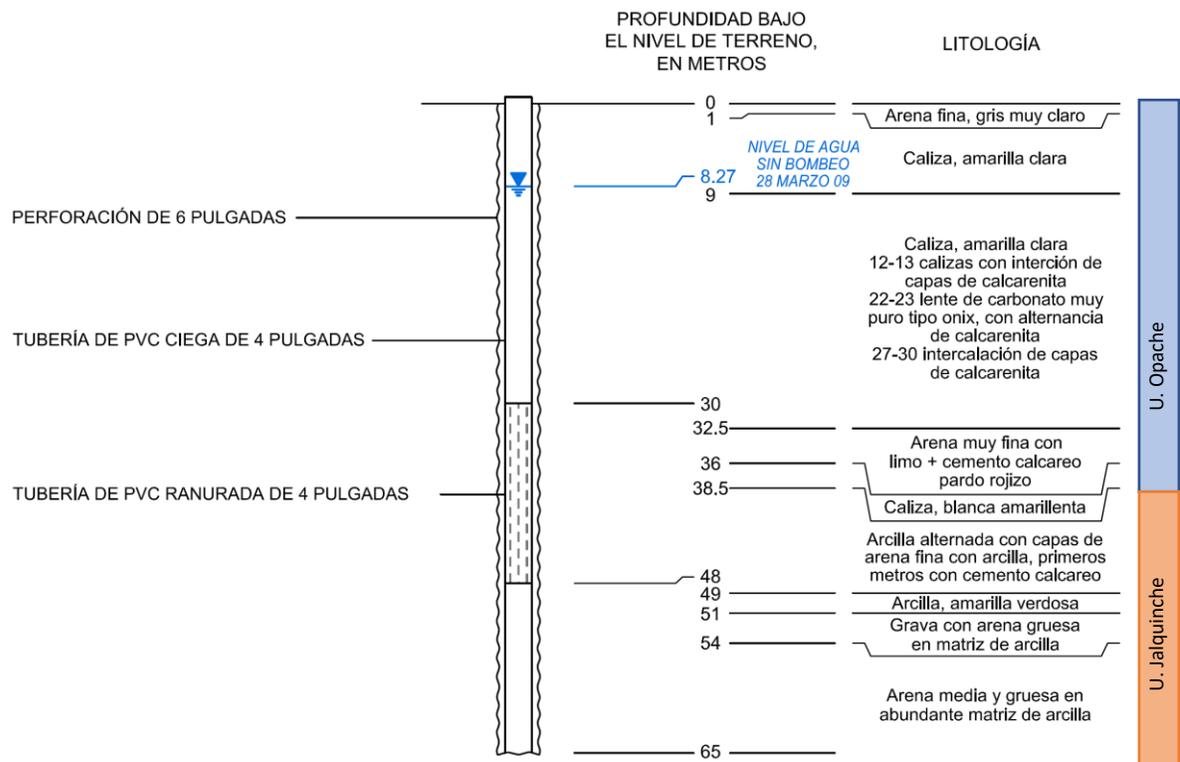
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN LE-6



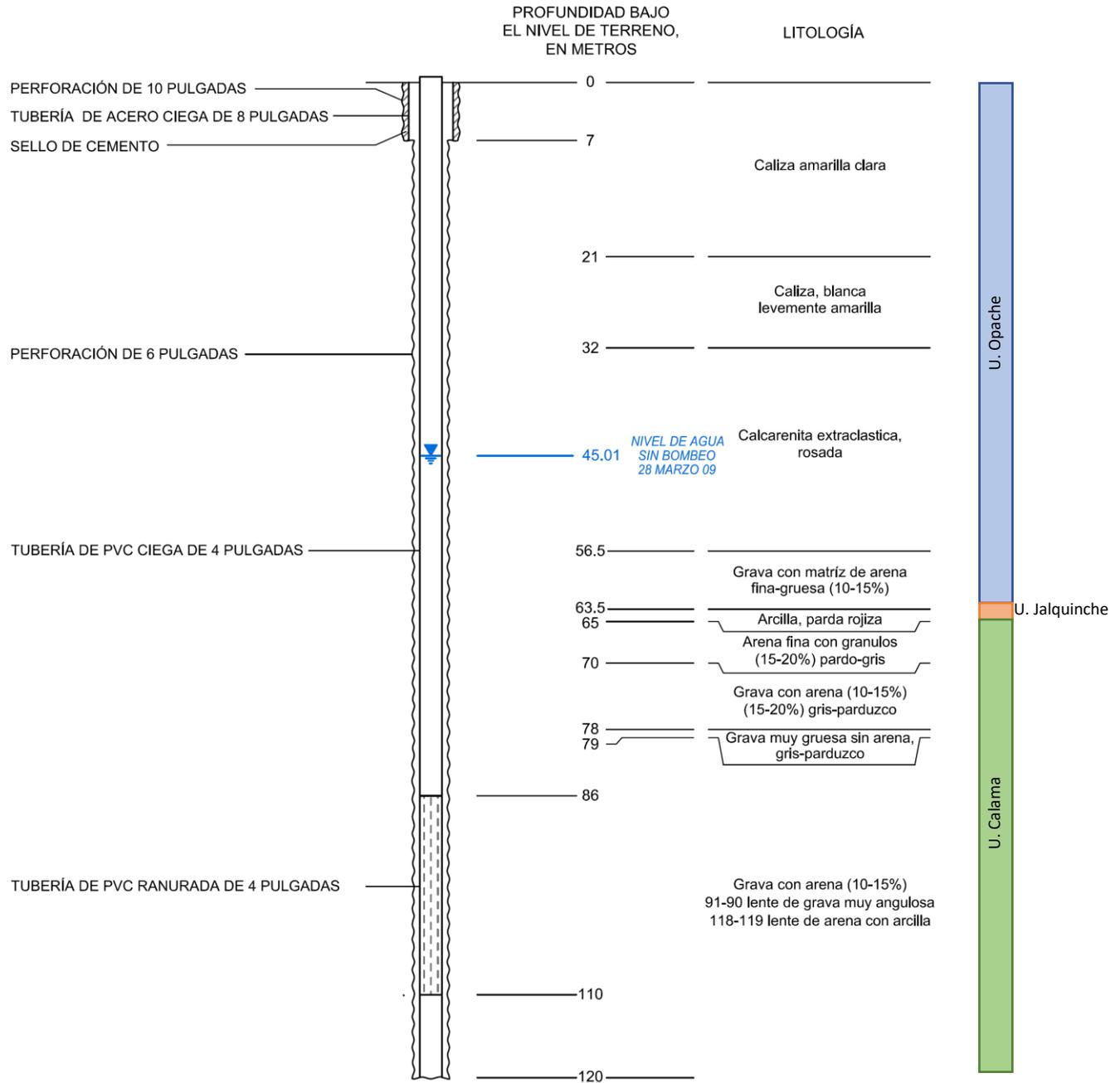
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN LE-4



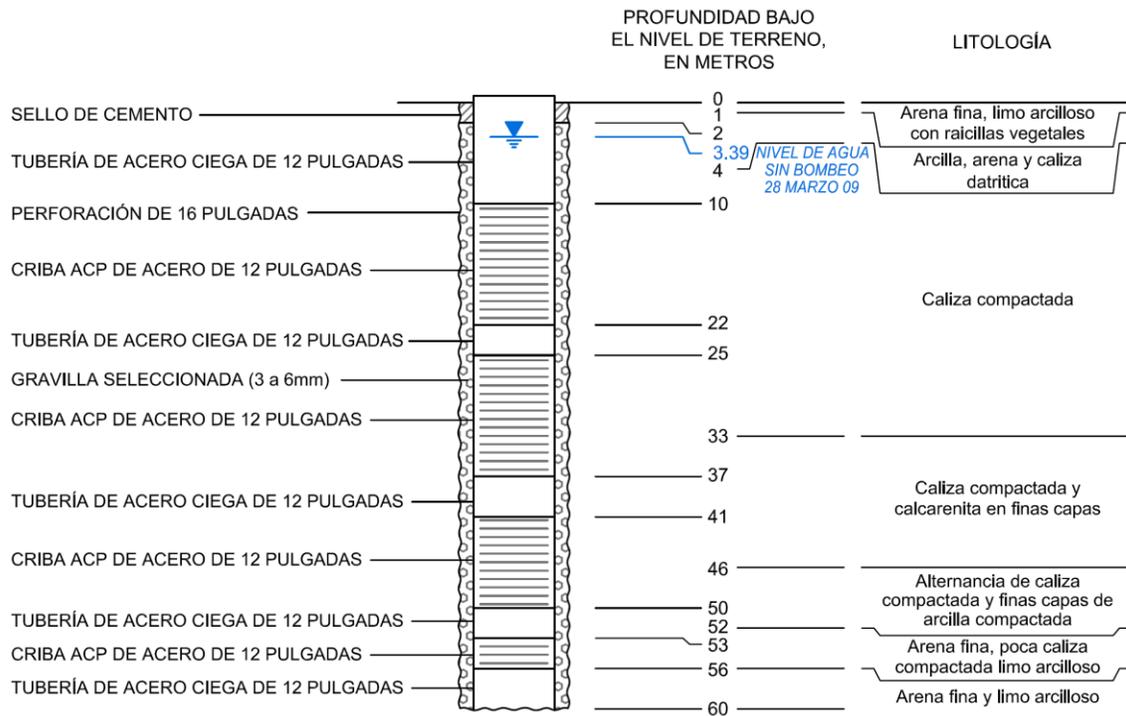
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN LE-2



Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN PPR-4

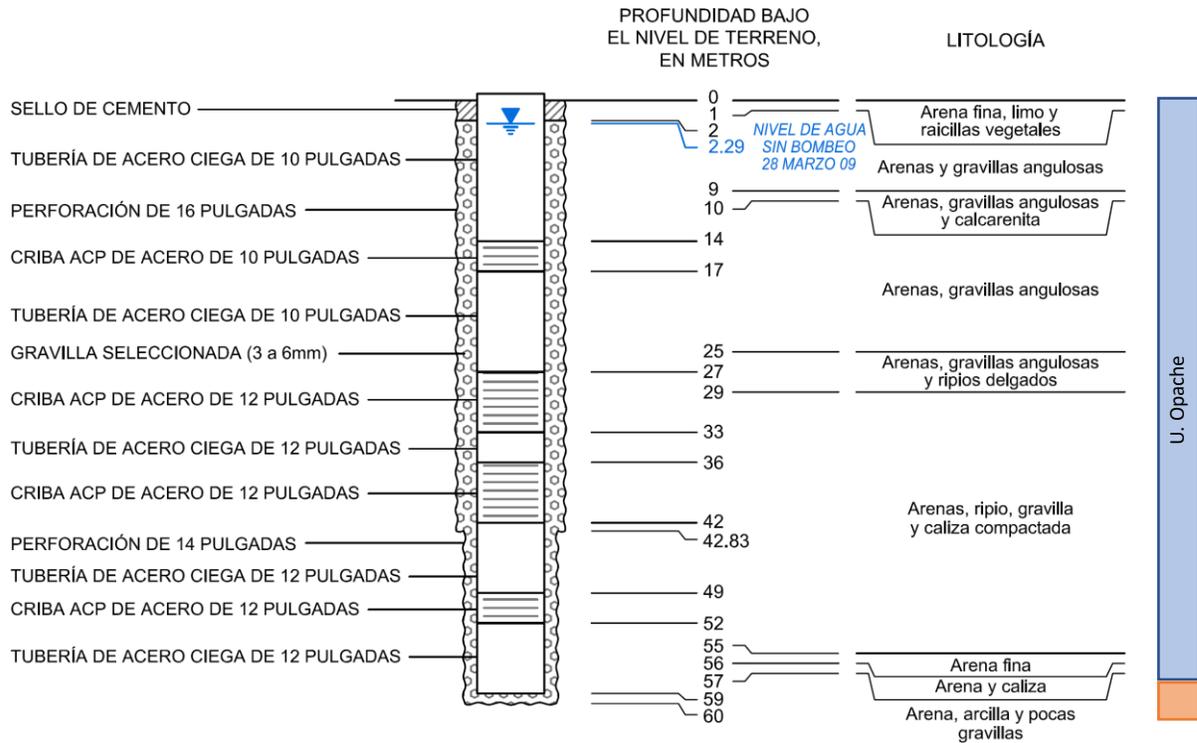


U. Opache

U. Jalquimche

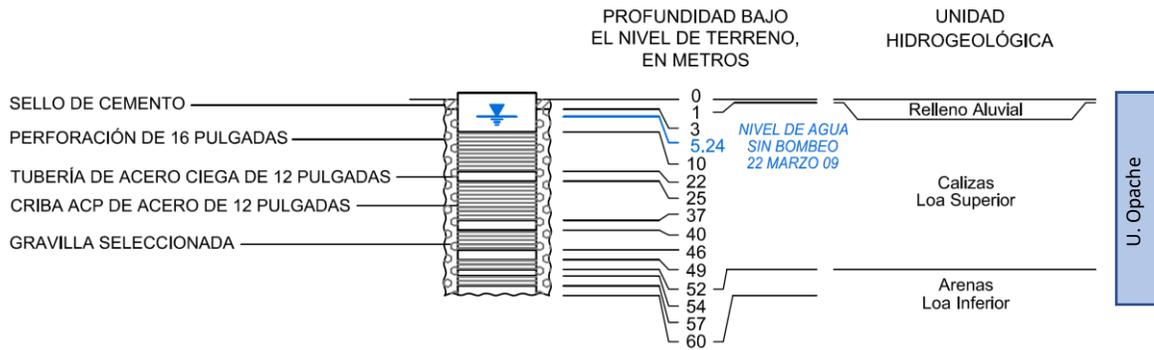
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN PPR-1



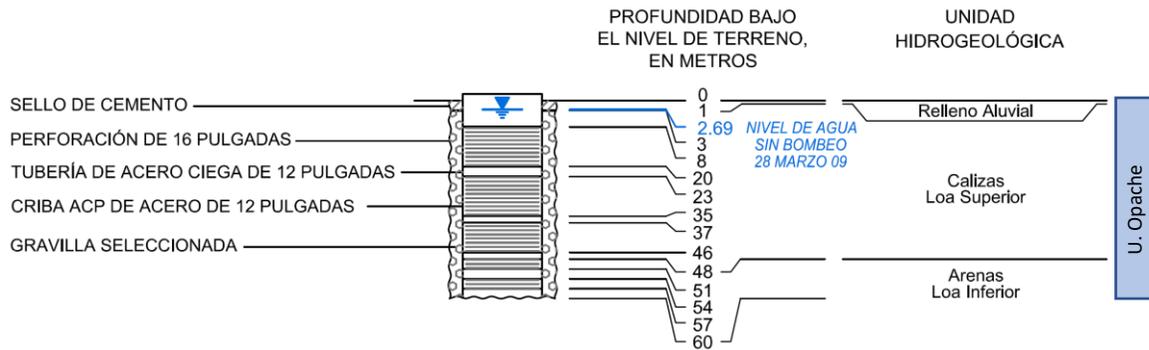
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN P-7



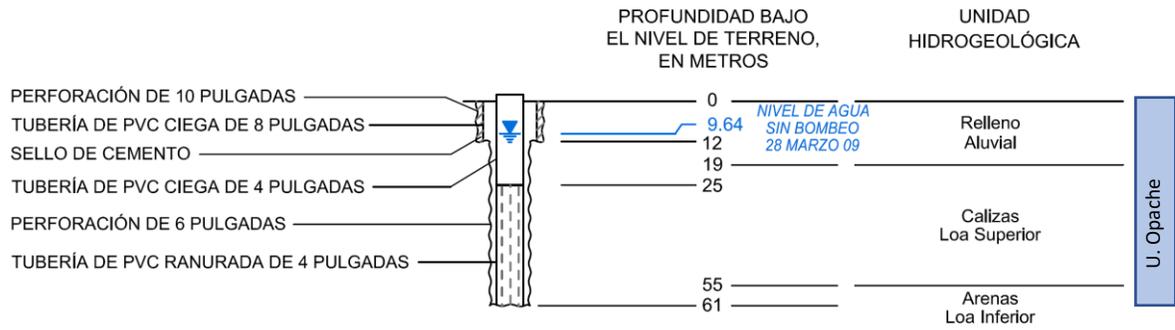
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN P-18



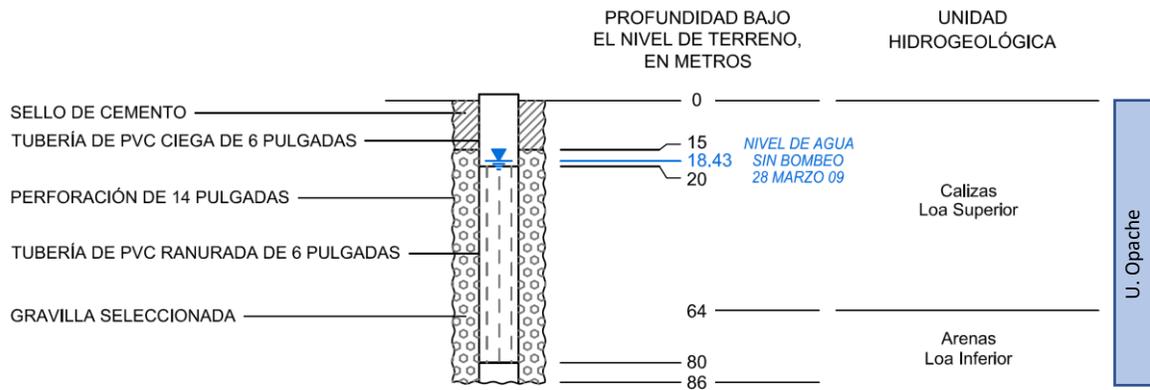
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN LE-9



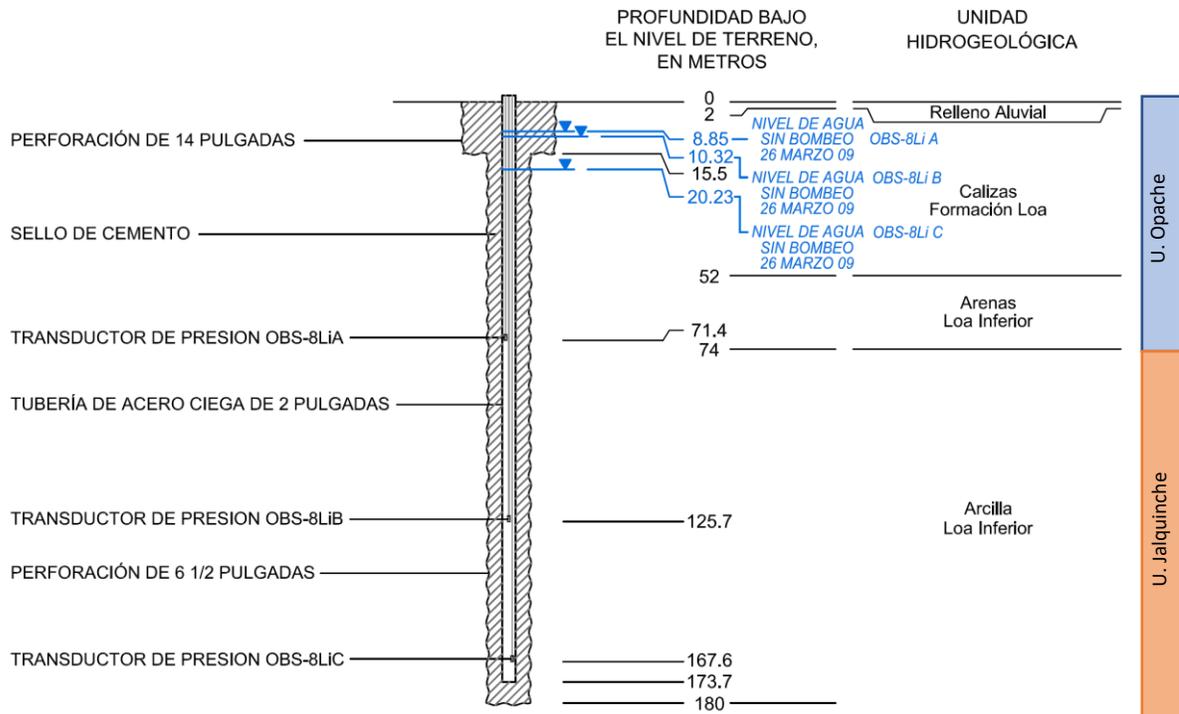
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN OBS-7L



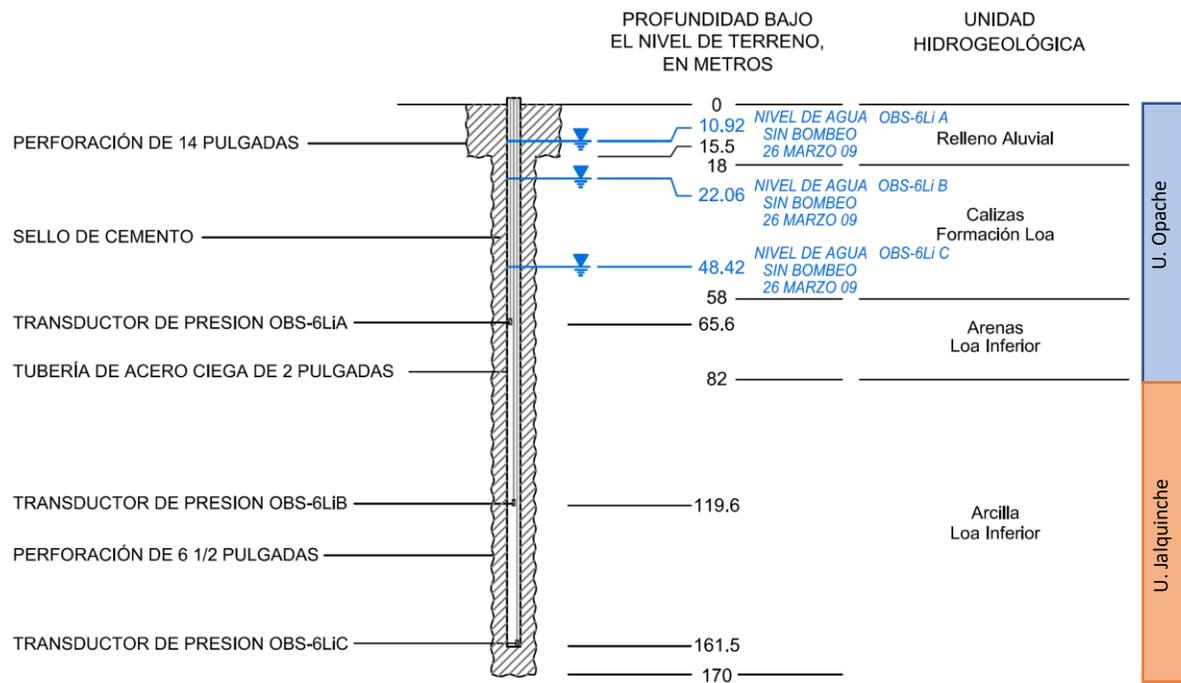
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO CON PIEZÓMETROS OBS-8Li



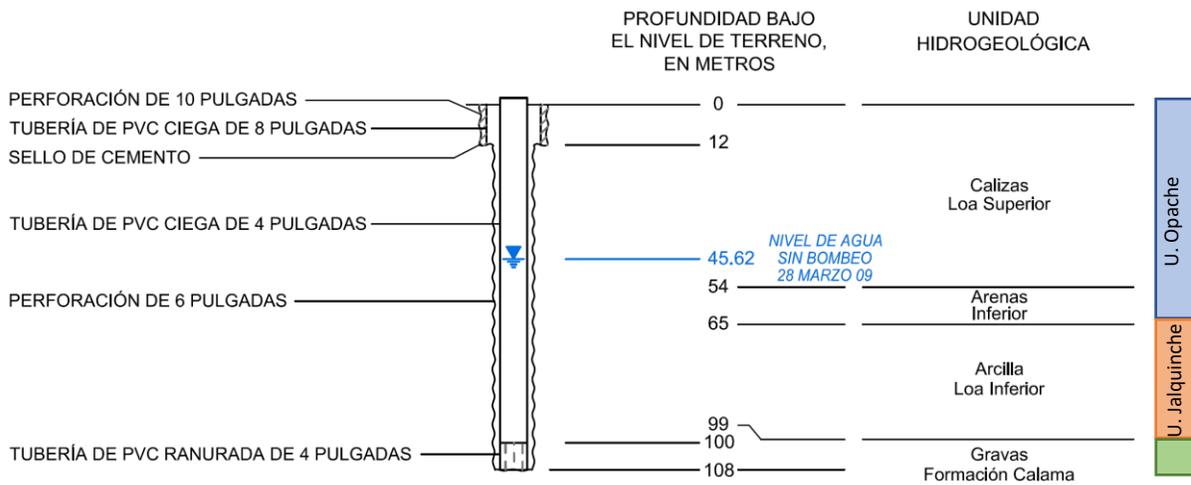
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO CON PIEZÓMETROS OBS-6Li



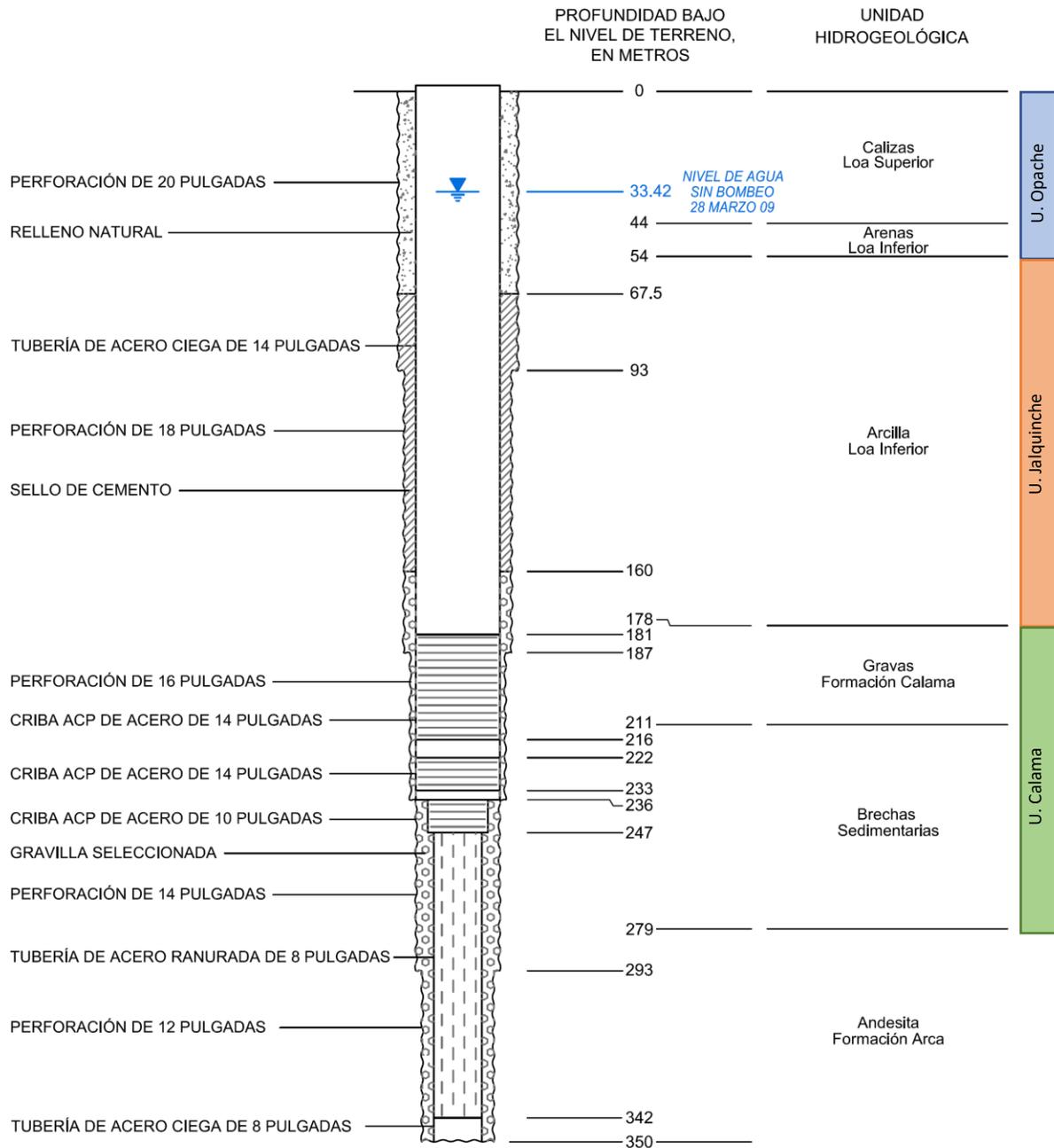
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN LE-1



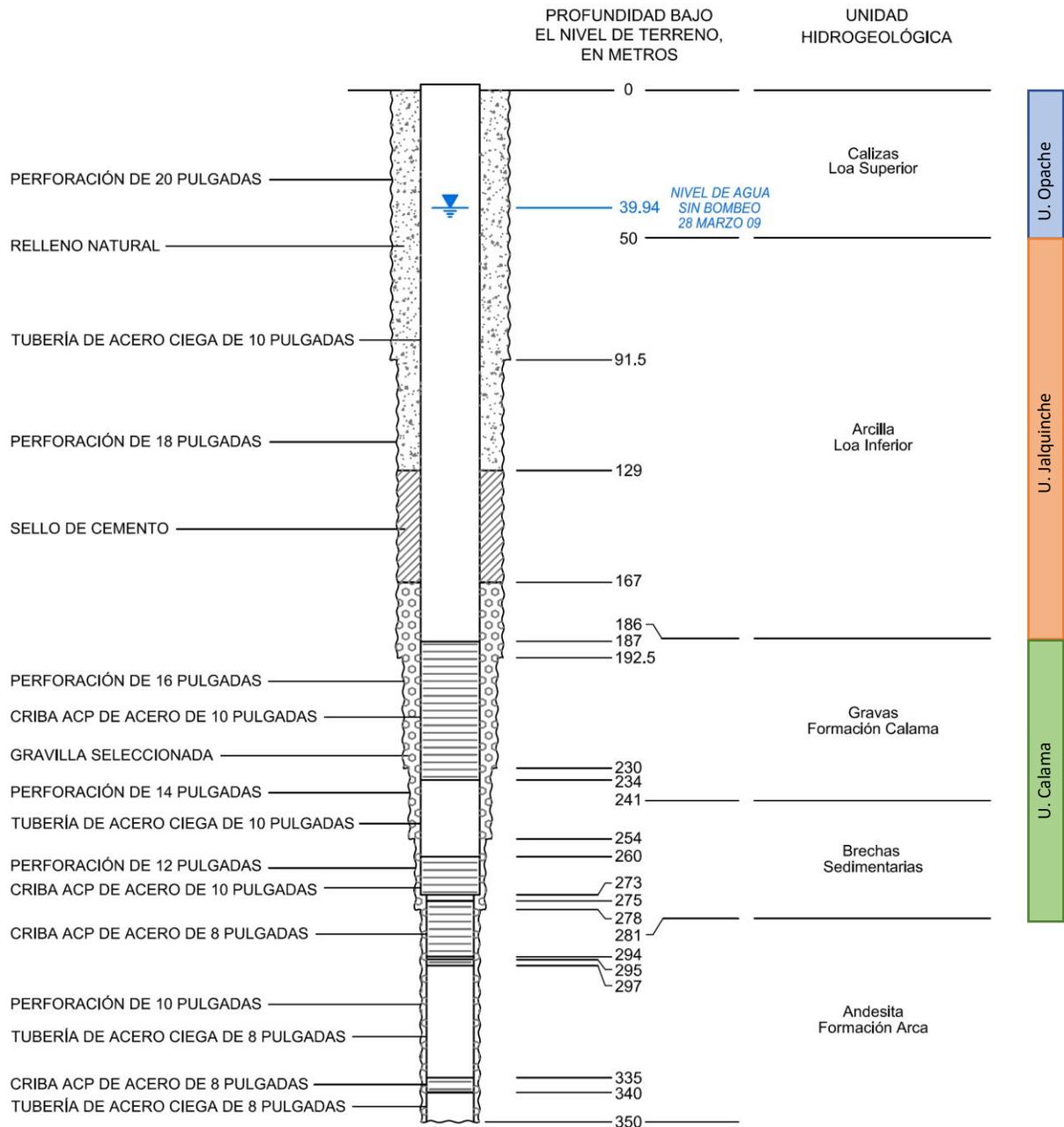
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN PBC-2



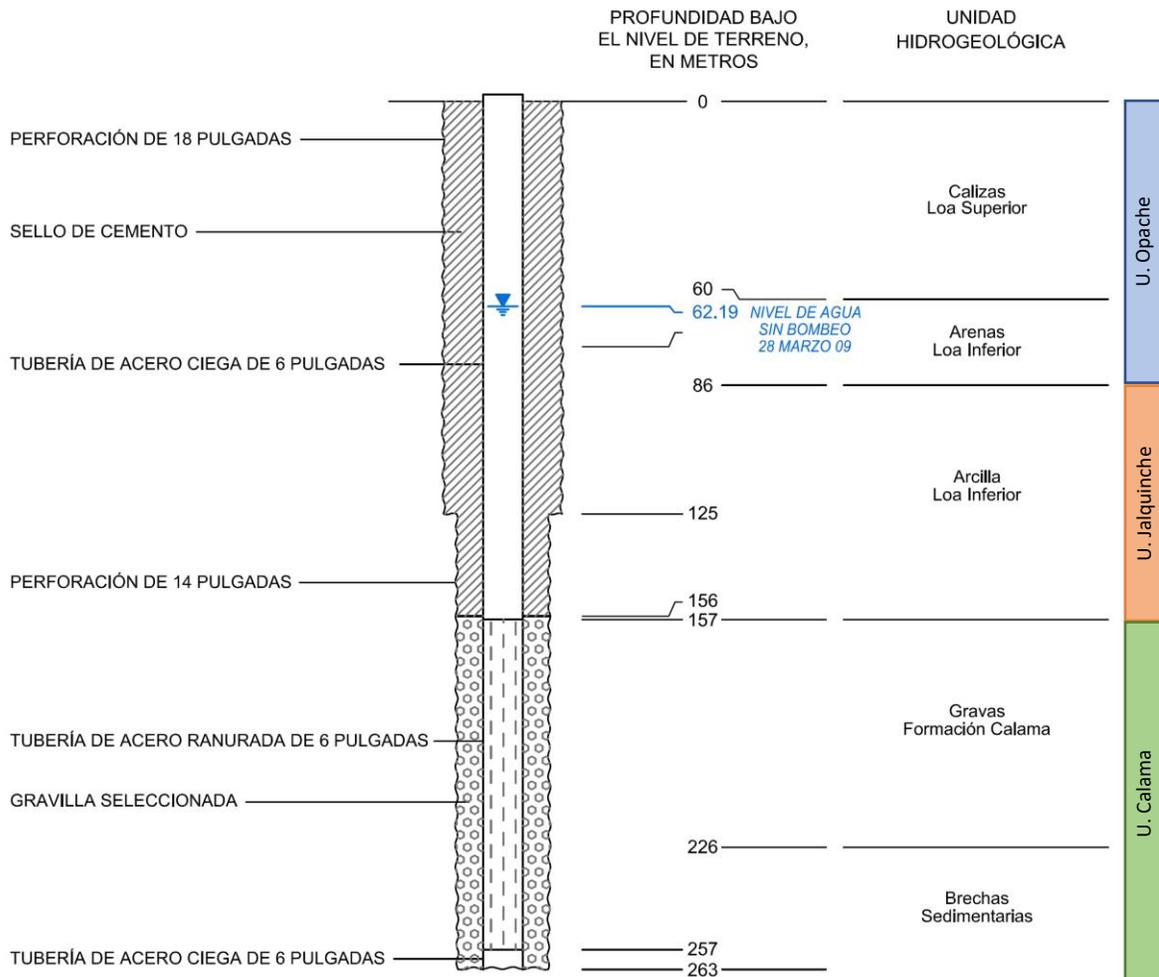
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN PBC-1



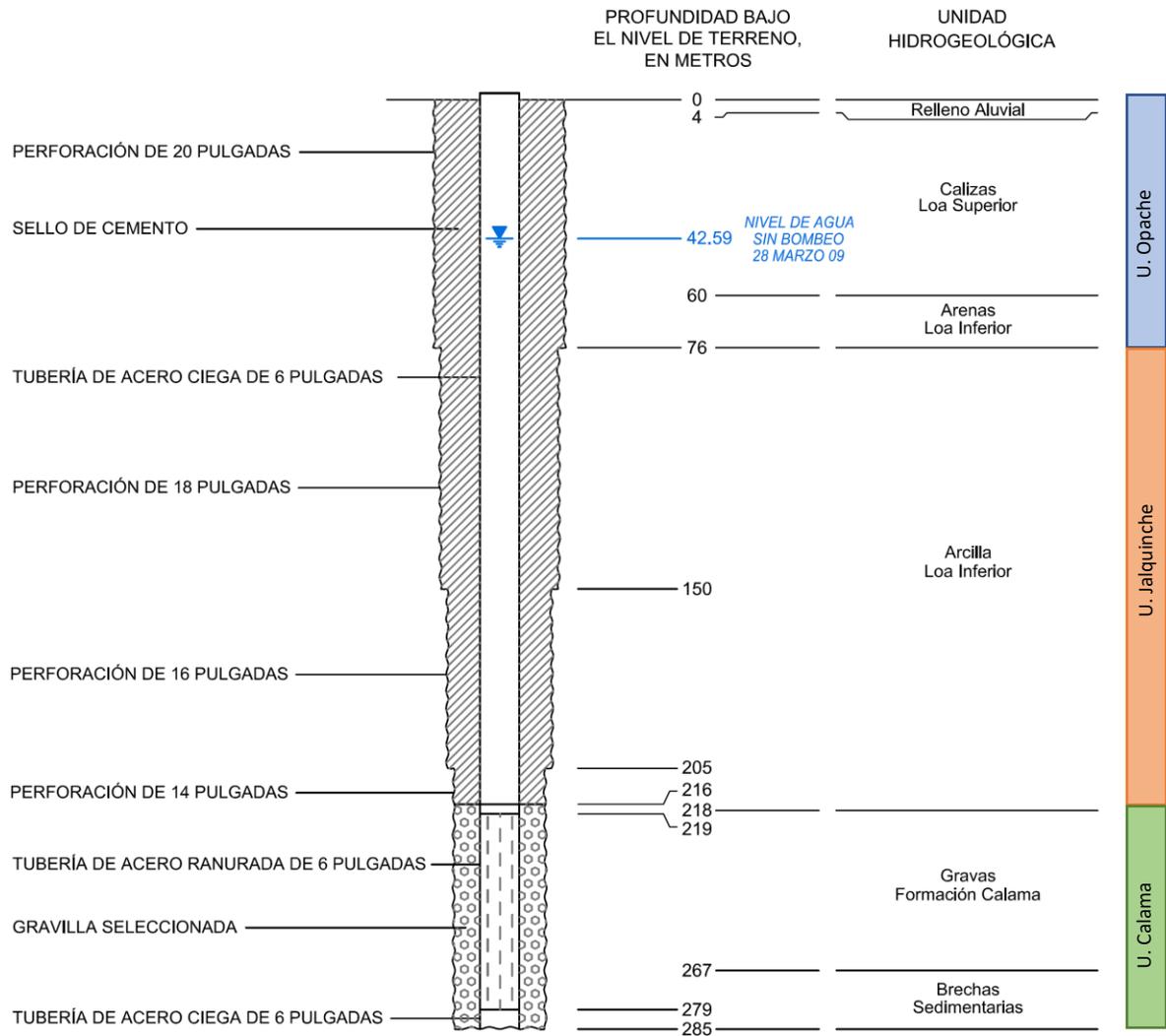
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN OBS-7C



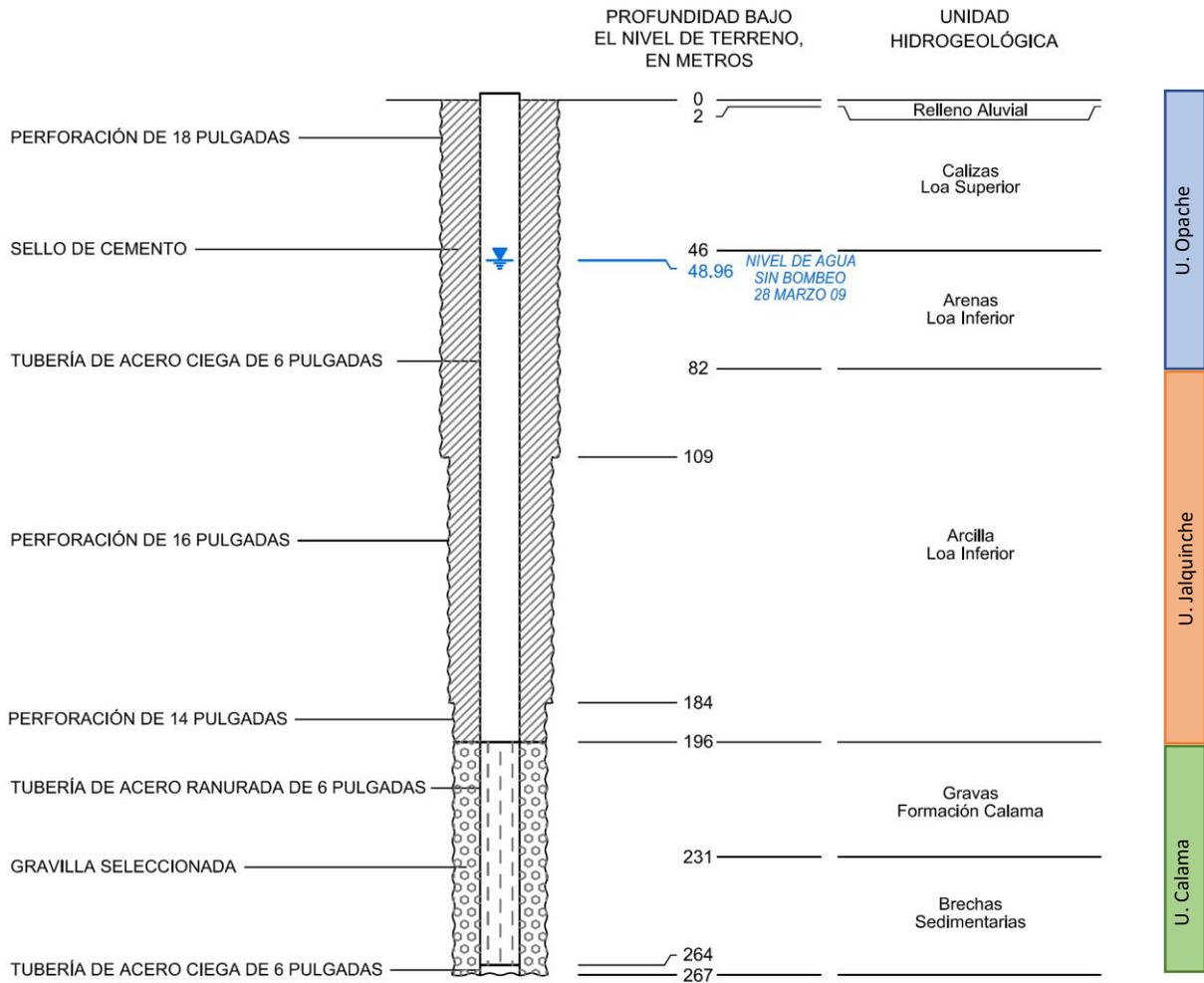
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN OBS-8C



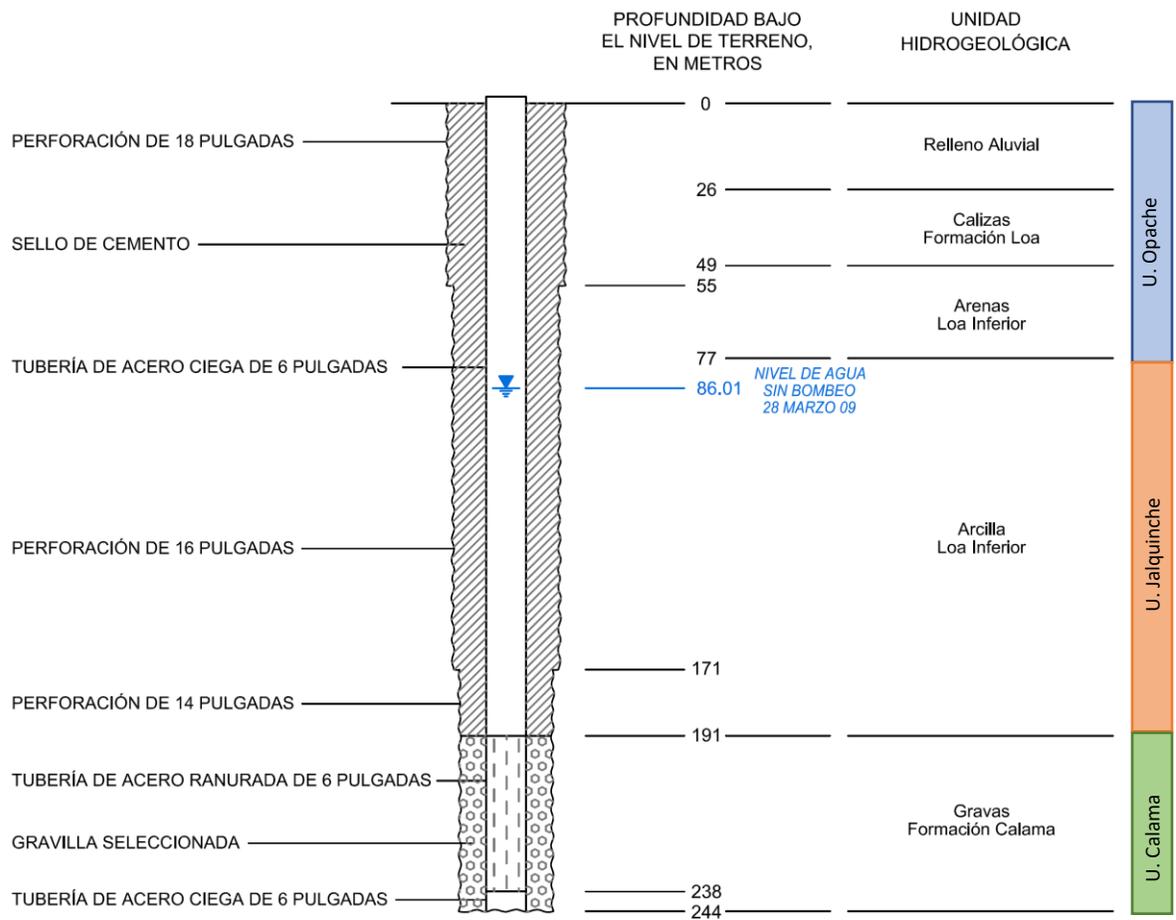
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN OBS-9C



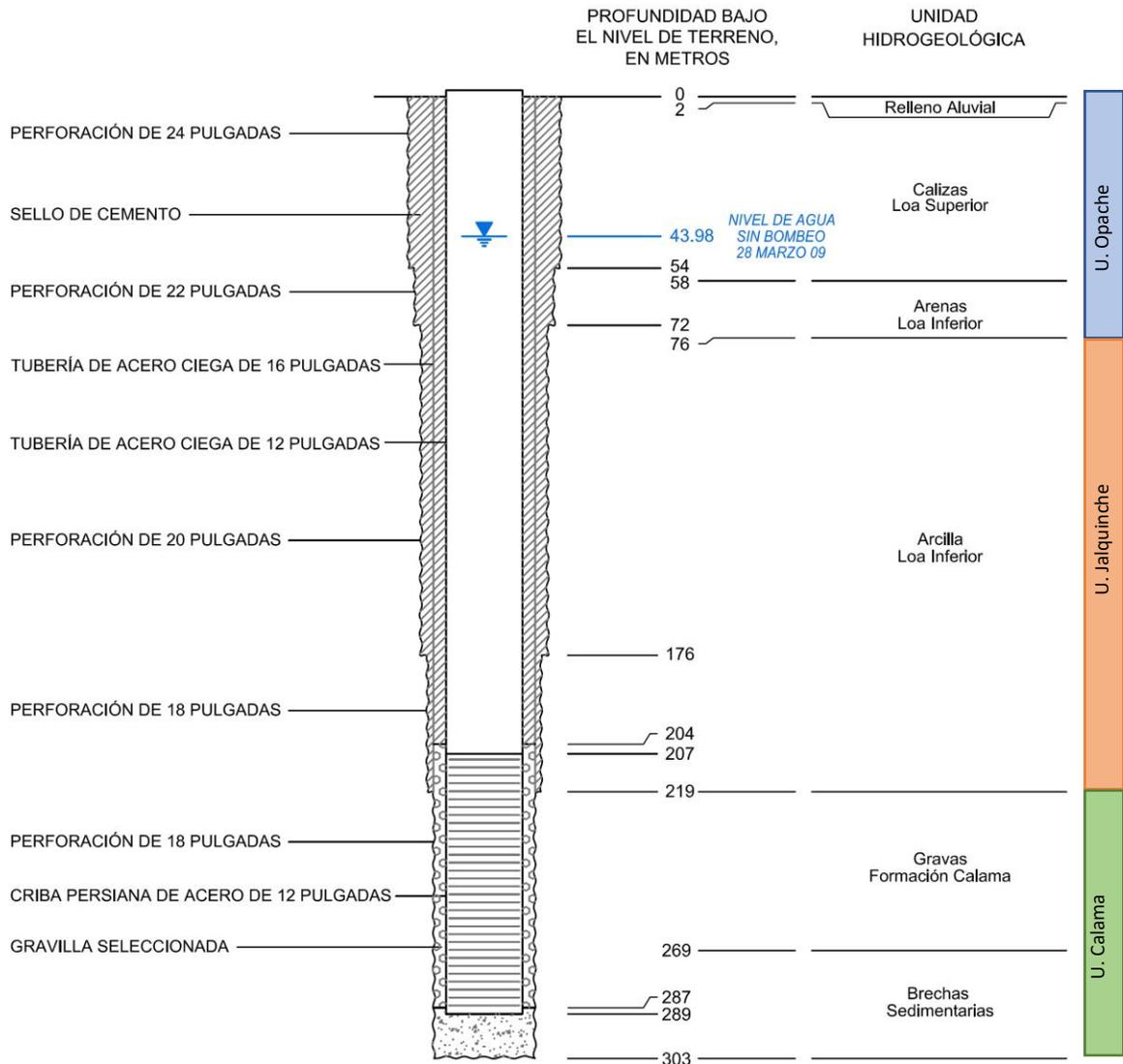
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN OBS-6C



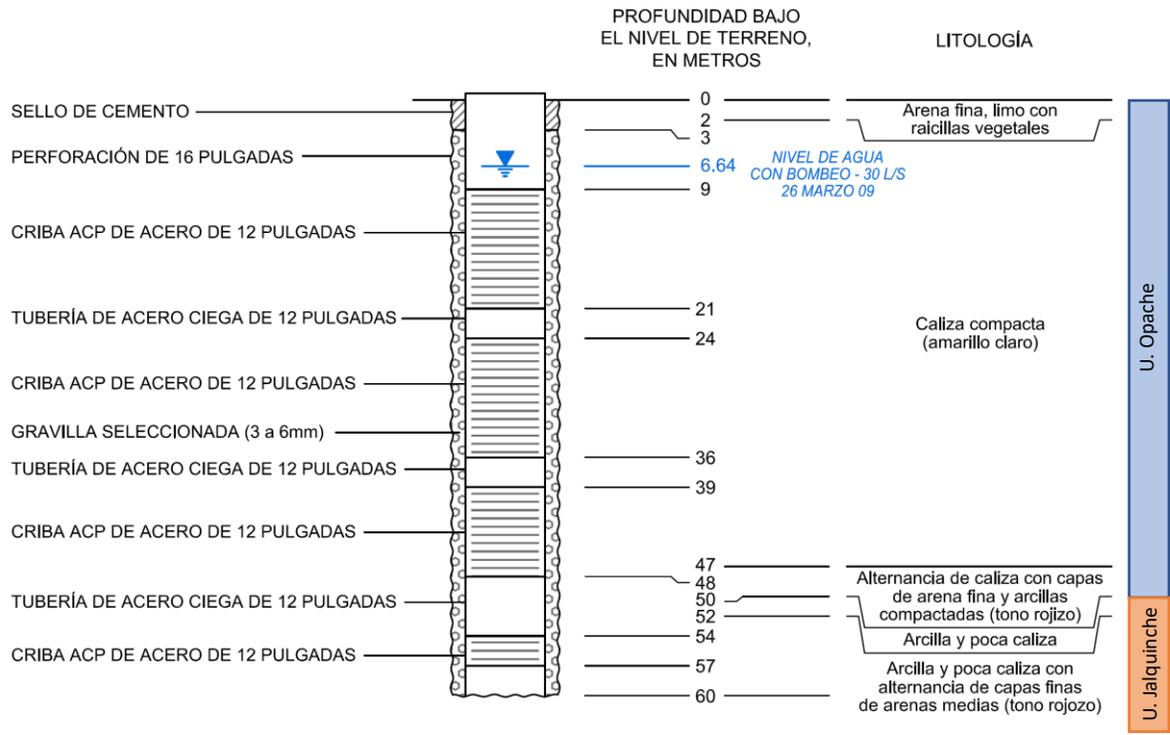
Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE OBSERVACIÓN P-10



Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE BOMBEO P-21



Fuente: "Informe Trimestral Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera El Tesoro, Período Enero - Marzo 2009". Errol L. Montgomery & Associates, Ltda, Minera El Tesoro. 2009.

DESCRIPCIÓN DE SONDAJES DDH-2578, DDH-2579, DDH-2580, DDH-2581, DDH-2978, DDH-2979, DDH-2988, DDH-2989, DDH-2990, DDH-2991.

DDH-2578 (S4-06): *Pozo exploratorio en sector N de Pulucktur, con antecedentes de alineamiento de pórfidos NW, vetillas de Qz, brechas en entorno y anomalía geoquímica de 300 ppm abierta y en borde de anomalía geofísica favorable.* Largo 270 m; Techo de Roca (inicio del sustrato rocoso compactado): 77.40 m; Techo de sulfuros (primera aparición de sulfuros): 159.8m. Las rocas corresponden a monzodioritas cortadas por apófisis de pórfido tonalítico tardío en varios tramos, entre 151m y 256m. La alteración corresponde a sericita y arcillas hasta los 143,5m, sericita-clorita a sericita entre 143,5 a 177,2m y clorita a clorita-sericita hasta el fondo (con epidota hasta 204m). La mineralización corresponde entre 118,5-121m y 155,4-155,7m a zonas limonitizadas con presencia puntual y débil de óxidos de cobre negros (LOX). Desde los 159,8m hasta el fondo, pirita débil y patinas de calcosina, con zonas intercaladas de parcial lixiviado y mineralización hipógena con pirita débil a moderada, magnetita moderada, trazas puntuales de calcopirita, trazas de calcosina en patina y trazas de goethita. Las leyes obtenidas son menores de 0,1%Cu, tanto para las zonas de limonitas con trazas de óxidos de cobre, zonas de enriquecimiento secundario con trazas de calcosina y zonas de mineralización hipógena con trazas de calcopirita.

DDH-2579 (GQ-6A): *Pozo exploratorio en sector N de Pulucktur, con antecedentes favorables de geoquímica.* Largo 250,5m. Techo de roca: 46,5m, Techo de sulfuros: 135,75m y Piso de oxidación:143,4m. La sobrecarga es de calizas hasta 22,5m y luego limolitas hasta el techo de roca. Desde el techo de roca y hasta 212,6m predominan dacitas con intercalaciones menores de andesitas y localmente brecha hidrotermal (189,3 a 192m). Desde 212,6m hasta el fondo se presentan tufitas e intercalaciones menores de andesitas, con alteración dominante consistente en argilización fuerte y menor sericita hasta 110,65 m; luego continua alteración sericitica a clorita-sericita hasta 141,45m y posteriormente alteración propilitica con clorita y epidota hasta el fondo. La mineralización consiste en lixiviación, abundante hematita, desde el techo de roca hasta 122,4m; entre 122,4 y 135,75m zona lixiviada de hematita-goethita con trazas de óxidos negros y arcillas con cobre. Posteriormente, hasta 139,25 m zona mixta que presenta localmente óxidos verdes y arcillas con cobre coexistiendo con trazas de calcosina (730 ppm Cu) Bajo 139,25m y hasta el fondo del pozo, ocurre mineralización hipógena de pirita, con intensidad moderada, a excepción de tramo con brecha hidrotermal que presenta pirita abundante en matriz. Localmente, asociada a brecha de falla entre 236,3 y 236,7m, ocurre un apófisis de pórfido tonalítico con trazas de calcosina y galena (0.13% Cu).

Fuente: "Exploración con sondajes proyecto Pulucktur distrito Codelco norte". Memoria para optar al título de Geólogo, Pizarro, 2011.

DDH-2580 (S4-02): *Pozo exploratorio en sector N de Pulucktur, con antecedentes favorables de geología, vetillas de cuarzo y pórfidos cercanos.* Largo 258m; Techo de roca: 90m, Techo Sulfuros: 172,4m, Piso Oxidación: 177,5m. La sobrecarga es de calizas hasta 22,5m, luego limos calcáreos hasta 49,5m, posteriormente 3m de arena, 25m de calizas y 12m de limos arcillosos hasta el techo de roca. Desde el techo de roca hasta 122,5m ocurren dacitas, seguidas de pórfido tonalítico tardío hasta 203,8m, luego brecha ígnea con matriz de pórfido hasta 224,6m y finalmente, entre 224,6m y el fondo ocurre nuevamente pórfido tonalítico tardío. La alteración dominante es argílica hasta 104m, luego sericitica hasta 172,4m y posteriormente clorítica hasta 192m; entre 192 y 233m la alteración dominante es sericitica moderada; entre 233m y 240m se presenta alteración argílica, asociada a zona de falla y luego alteración clorita-sericitica débil hasta el fondo del pozo. Inmediatamente bajo el techo de roca ocurre mineralización exótica que consiste en arcillas con cobre coexistiendo con hematita hasta los 103,8m (13,8 m con 0,2%Cu), seguida de fuerte lixiviación con abundante hematita hasta 172,35m, con algunas ocurrencias menores de arcillas con cobre. Entre 172,4 y 177,5m se presenta una zona enriquecida en calcosina sobre pirita y trazas de arcillas con cobre (4.5m con 0,34%Cu). Entre 177,5 y 190.5 m ocurre mineralización hipógena de pirita moderada. Entre 190.5 y 203,8 m se encuentra una zona de enriquecimiento donde coexiste pirita y calcosina como pátinas (13.5m con 0,24%Cu). Posteriormente, asociada a brecha, se presenta una zona lixiviada hasta 220m con hematita abundante. Entre 220 y 233m se presenta nuevamente una zona de enriquecimiento con calcosina sobre pirita (12 m con 0,1% Cu). Entre 233 m y el fondo del pozo, ocurre mineralización hipógena de pirita con trazas de calcosina y ley menor que 0,1% Cu.

DDH-2581 (S4-01): *Pozo exploratorio en sector central-este de Pulucktur, con antecedentes favorables de geología y geofísica.* Largo 224,50m; Techo de roca: 136,55m; Techo de sulfuros: 203.6m. La sobrecarga es de calizas hasta 30m, luego sigue un tramo sin recuperación hasta los 106,5m; continúan limos arcillosos con intercalaciones de yeso hasta 119,5 m, seguido de gravas negras hasta el techo de roca. Desde el techo de roca hasta 185,7 m ocurren andesitas levemente cloritizadas y argilización supérgena sobreimpuesta que presentan lixiviación débil, con mineralización de goethita y óxidos de manganeso en planos de fracturas. Luego se presentan tobas de lapilli, con alteración de clorita y, en tramos, epidota (propilitico); sericitica local (débil a moderada) asociada a estructuras. La mineralización se desarrolla entre un lixiviado débil a moderado, para pasar a un parcial lixiviado con trazas de calcosina entre 203,6 y 220,65m, sin anomalías geoquímicas; sigue mineralización hipógena de pirita hasta el fondo.

Fuente: "Exploración con sondajes proyecto Pulucktur distrito Codelco norte". Memoria para optar al título de Geólogo, Pizarro, 2011.

DDH-2978 (PLK-02): *Pozo exploratorio en sector central-oeste de Pulucktur con antecedentes favorables de geofísica y pórfidos cercanos.* Largo 318m; Techo de roca: 197.6m; Techo de sulfuros: 236.4m. Presenta una sobrecarga bastante superior a los pozos cercanos al N y NE (el pozo más cercano es el DDH-2581, situado a 750 m al NNE, tiene 90 m de sobrecarga). La sobrecarga corresponde a una capa superior de 75 m de calizas con intercalaciones menores de areniscas, seguida de una secuencia de casi 90 m de espesor entre limos y arcillas. Los últimos metros de esta secuencia arcillosa presentan mineralización exótica

compuesta de óxidos negros diseminados en limos arenosos y cúmulos de crisocola (165 m/4.5 m con 0.44%Cu). Bajo los limos ocurre un pequeño espesor de gravas rojas, de alrededor de 25m cementadas con limonitas (ferricretas). El techo de rocas se presenta a los 197.6 m y corresponde a una secuencia volcano-sedimentaria de tobas y tufitas asignadas a la Fm. Collahuasi, la que se mantiene hasta el fondo del pozo. La alteración corresponde a un fondo biotítico de intensidad moderada, al que se sobre-impone alteración argílica en la parte superior, hasta los 250 m, pasando gradualmente a alteración biotita-sericita hasta los 280 m, desde donde domina una zona biotita-clorita hasta el fondo. Los primeros metros bajo el techo de roca presentan mineralización exótica bien desarrollada, correspondiente a óxidos negros que rellenan un intenso fracturamiento de la roca (196.5 m/7.5 m con 0.58%Cu). Luego, la mineralización exótica va decreciendo gradualmente, dando paso a una zona lixiviada con presencia local de óxidos negros y arcillas con cobre, que se extiende hasta los 254 m, exceptuando el tramo entre 237 y 244 m, donde ocurren sulfuros parcialmente preservados en una veta piritosa, con contenidos hasta 10% de pirita y trazas de calcosina en pátinas (234 m/10,5 m con 0.31% Cu). Bajo los 254 m y hasta los 276 m se presenta una zona de enriquecimiento débil con calcosina en fracturas y vetillas (255 m/21 m con 0.23% Cu), la que gradúa a una zona hipógena con 2 a 4% de pirita y trazas de calcopirita. Destaca en toda la secuencia bajo el techo de rocas, un penetrativo stockwork de vetillas de sulfuros (Py) y cuarzo tipo "D" (Figura 11).

Fuente: "Exploración con sondajes proyecto Pulucktur distrito Codelco norte". Memoria para optar al título de Geólogo, Pizarro, 2011.

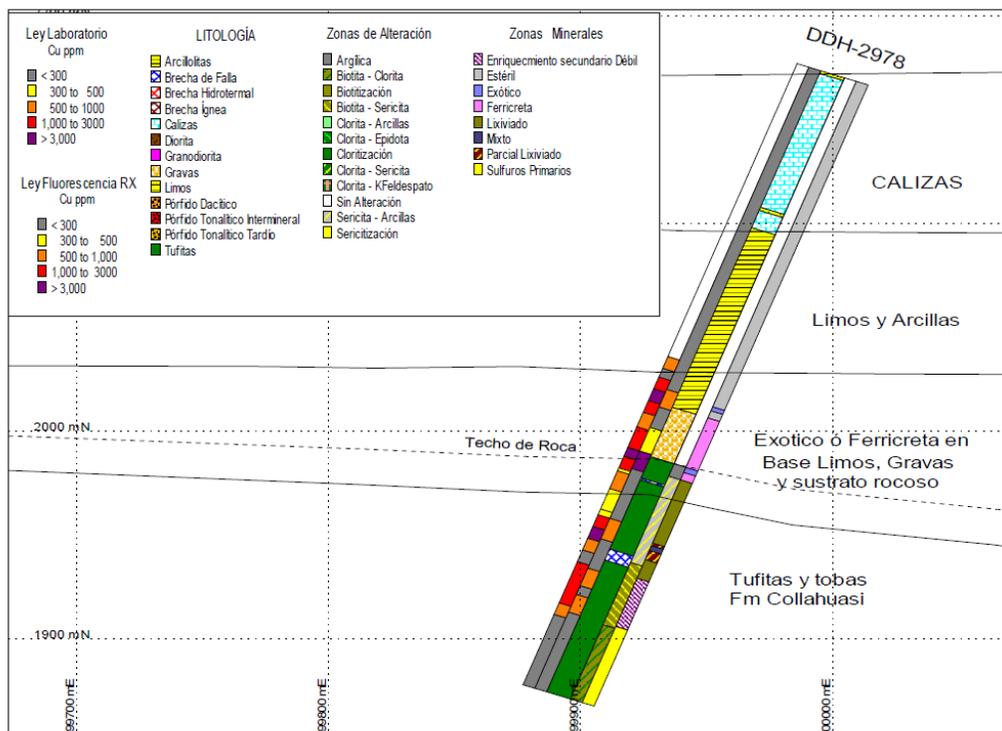


Figura 11: DDH-2978 mostrando de izquierda a derecha: Ley de laboratorio, Ley FRX, Litología, Alteración y Zona Mineral

DDH-2979 (PLK-04): Pozo exploratorio en sector central de Pulucktur, con antecedentes favorables de geología y geofísica. Largo 483m; Techo de roca: 156m; Techo de sulfuros: 226.2m. La sobrecarga consiste en una capa superior de 6,85 m de arena, seguida de calizas oquerosas hasta los 56m y luego limos con intercalaciones menores de calizas hasta los 153.5m, desde donde ocurren gravas rojas hasta el techo de roca (Fig. 12). En torno al techo de roca se presenta mineralización exótica débil (148.5-157.5 m, 9 m con 0.23%Cu) de óxidos negros diseminados en el limo o en el cemento de las gravas y en fracturas bajo el techo de rocas. Desde el techo de rocas hasta los 242m la litología dominante corresponde a tobas y areniscas lixiviadas con digitaciones de pórfido tonalítico y alteración sericita-arcillas. Localmente ocurren sulfuros colgados, entre 226 y 227m en apófisis de 1m de brecha hidrotermal que corta a las tobas. El techo de sulfuros se presenta a los 245.1m en cuerpo de brecha hidrotermal. Entre 242 y 363 m ocurre una zona de brechas hidrotermales e ígneas con intercalaciones de tufitas con alteración sericita-arcillas y en zona mineral hipógena a parcialmente lixiviada hasta los 297m, seguida de una zona de enriquecimiento débil con pátinas de calcosina sobre pirita. Desde los 363m y hasta el fondo del pozo a los 483m, ocurre únicamente pórfido tonalítico tardío con vetillas de cuarzo tipo "D" sobrepuestas sobre vetillas "B" preexistentes y hacia el fondo hay mayor ocurrencia de vetillas tempranas. Este tramo presenta alteración sericita-arcillas y enriquecimiento secundario débil de calcosina sobre pirita hasta el fondo del pozo con leyes de 0,26% Cu y localmente (408-425 m) 0,61% Cu.

Fuente: "Exploración con sondajes proyecto Pulucktur distrito Codelco norte". Memoria para optar al título de Geólogo, Pizarro, 2011.

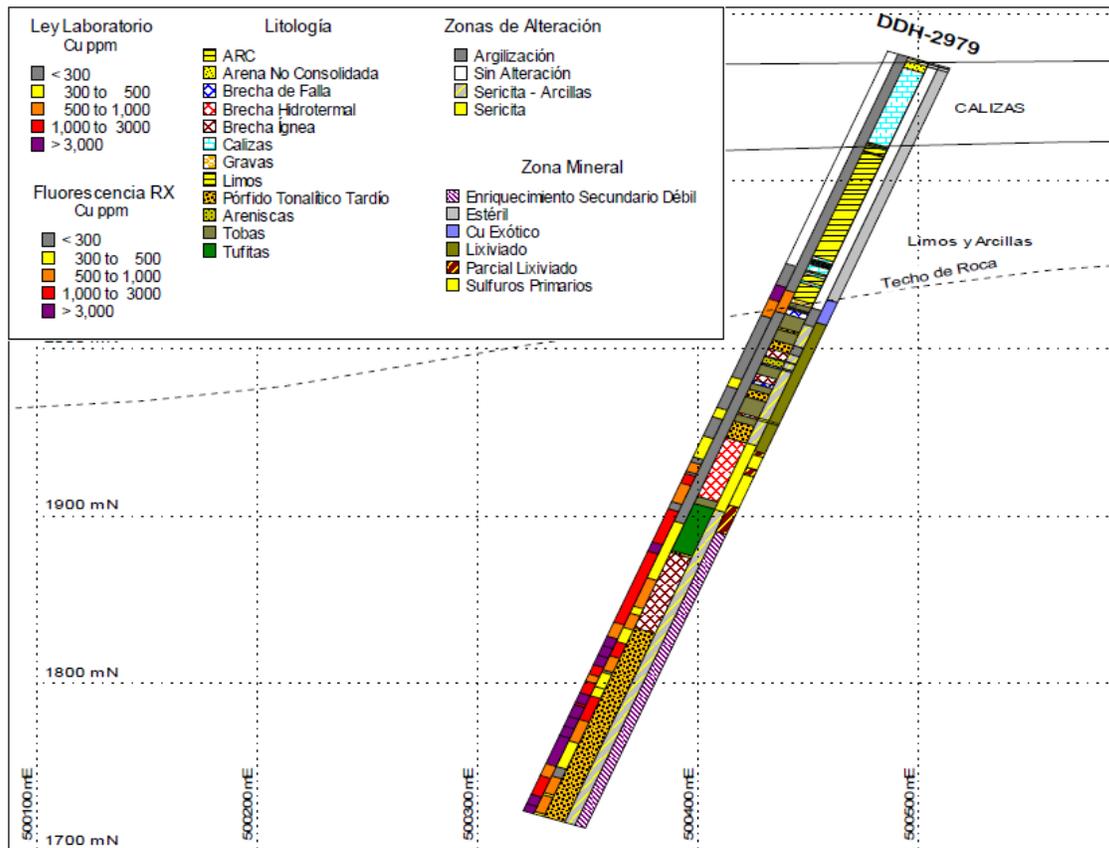


Figura 12: DDH-2979 mostrando de izquierda a derecha: Ley Laboratorio, Ley FRX, Litología, Alteración y Zona Mineral

Fuente: "Exploración con sondajes proyecto Puluktur distrito Codelco norte". Memoria para optar al título de Geólogo, Pizarro, 2011.

DDH-2988 (PLK-05): Pozo exploratorio en sector central de Pulucktur, con antecedentes favorables de geología y geofísica. Largo 330m; Techo de roca: 169.81m; Techo de sulfuros: 246.8. Bajo la sobrecarga, se encuentra una secuencia de rocas sedimentarias compuesta de Brechas sedimentarias, arcillolitas y menor lutitas, que se asignan a la Formación estratos de Quetena y se extienden hasta los 245.4 m. Esta secuencia sedimentaria se encuentra lixiviada con algunos tramos con minerales oxidados de cobre remanentes, consistentes en óxidos negros (Cu-Mn), arcillas con Cu y puntualmente crisocola, cuya mejor expresión la constituye el tramo 200 -239 m con un promedio de 0,19% Cu y un máximo de 0,6% Cu a los 204 m. Presenta una alteración dominante de sericita arcillas y menor cloritización, con presencia local de silicificación. En contacto por falla, desde los 245.4 m hasta el fondo del pozo ocurren rocas volcanosedimentarias asignadas a la Fm. Collahuasi, con variaciones entre tobas, tufitas y andesitas. Estas litologías gradan de un inicio argílico-sericítico a clorita-sericita/biotita-sericita, con epidota desde los 280 m. Desde los 246,8 m, ocurre pirita en vetillas parcialmente lixiviadas, fracturas y diseminada, sin mineralización de interés económico.

DDH-2989 (PLK-09): Pozo exploratorio en sector central de Pulucktur, con antecedentes favorables de geología y geofísica. Largo 309.3m; Techo de roca: 150.5m; Techo de sulfuros: 262.2. La sobrecarga presenta mineralización exótica entre 142.5 y 147 m (4.5 m con 0.67% Cu), bajo la que se encuentra una secuencia de rocas sedimentarias asignadas a la Formación Estratos de Quetena, que consisten en brechas sedimentarias con fragmentos de cuarzo subredondeados e intercalaciones de areniscas finas. Estas litologías se presentan sericitizadas con tramos biotita-sericita y en zonas de falla aumento de arcillas (argílico). La mineralización consiste en una lixiviación fuerte con hematita dominante sobre goethita y prácticamente sin jarosita hasta los 265 m, con anomalías del orden de 300 ppm Cu y el tramo 162.5-202.5 m, anómalo en molibdeno (39 m con 72ppm Mo). Bajo el techo de sulfuros a los 262.2 m ocurre pirita moderada en vetillas y diseminada, con trazas de calcosina muy sutil en patinas sobre pirita. Desde los 297 m hasta el fondo del pozo a los 309 m, se registra un leve aumento del contenido de cobre, con un promedio de 0,1% Cu y un máximo de 0,22% Cu en el último tramo perforado.

DDH-2990 (PLK-10): Pozo exploratorio en sector central de Pulucktur, con antecedentes favorables de geología y geofísica. Largo 507m; Techo de roca: 145.1m; Techo de sulfuros: 277m. Sobre el techo de rocas, en los últimos metros de limos y la delgada cubierta de gravas, presenta mineralización exótica poco intensa, de óxidos negros, con una ley de 0,14% Cu para un tramo de 10,5 m. Bajo el techo de rocas interceptó una alternancia entre pórfidos tonalíticos, granodioríticos y brechas hidrotermales. La zona superior, desde el techo de rocas hasta los 277 m se encuentra fuertemente lixiviada con dominio hematítico y alteración sericita-arcillas afectando brechas hidrotermales anómalas en Mo. Desde los 277 hasta los 447 m se encuentra un pórfido tonalítico flanqueado por brechas hidrotermales con enriquecimiento secundario y trazas de calcopirita y bornita que alberga una intersección mineralizada desde los 319,5m de 52,5 m con 0,41% CuT, incluyendo 10,5 m con 0,835% Cu. Bajo la zona enriquecida y

hasta los 478 m, ocurre un pórfido granodiorítico con clorita remanente y local epidota que presenta un aumento en el contenido de arcillas y un menor contenido de cobre, desde donde continua pórfido tonalítico hasta el fondo del pozo.

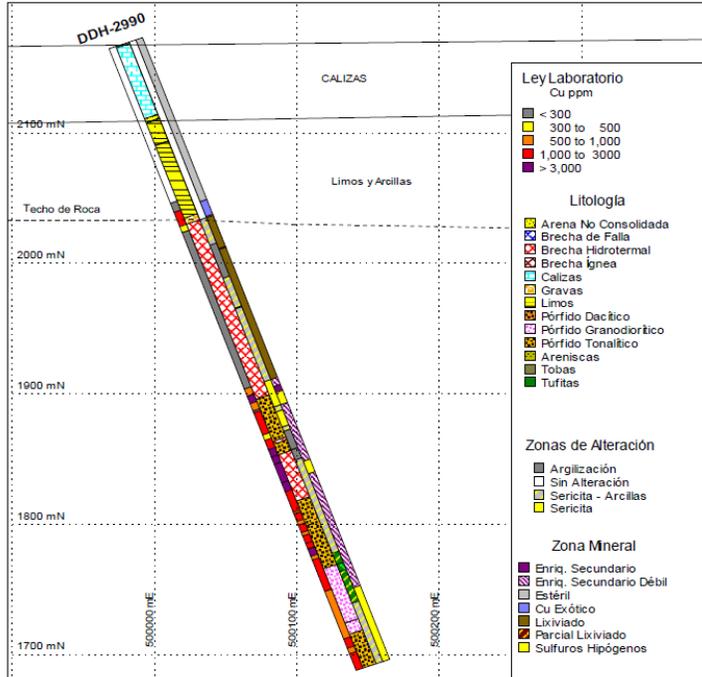


Figura 13: DDH-2990 mostrando de izquierda a derecha: Ley Laboratorio, Litología, Alteración y Zona Mineral

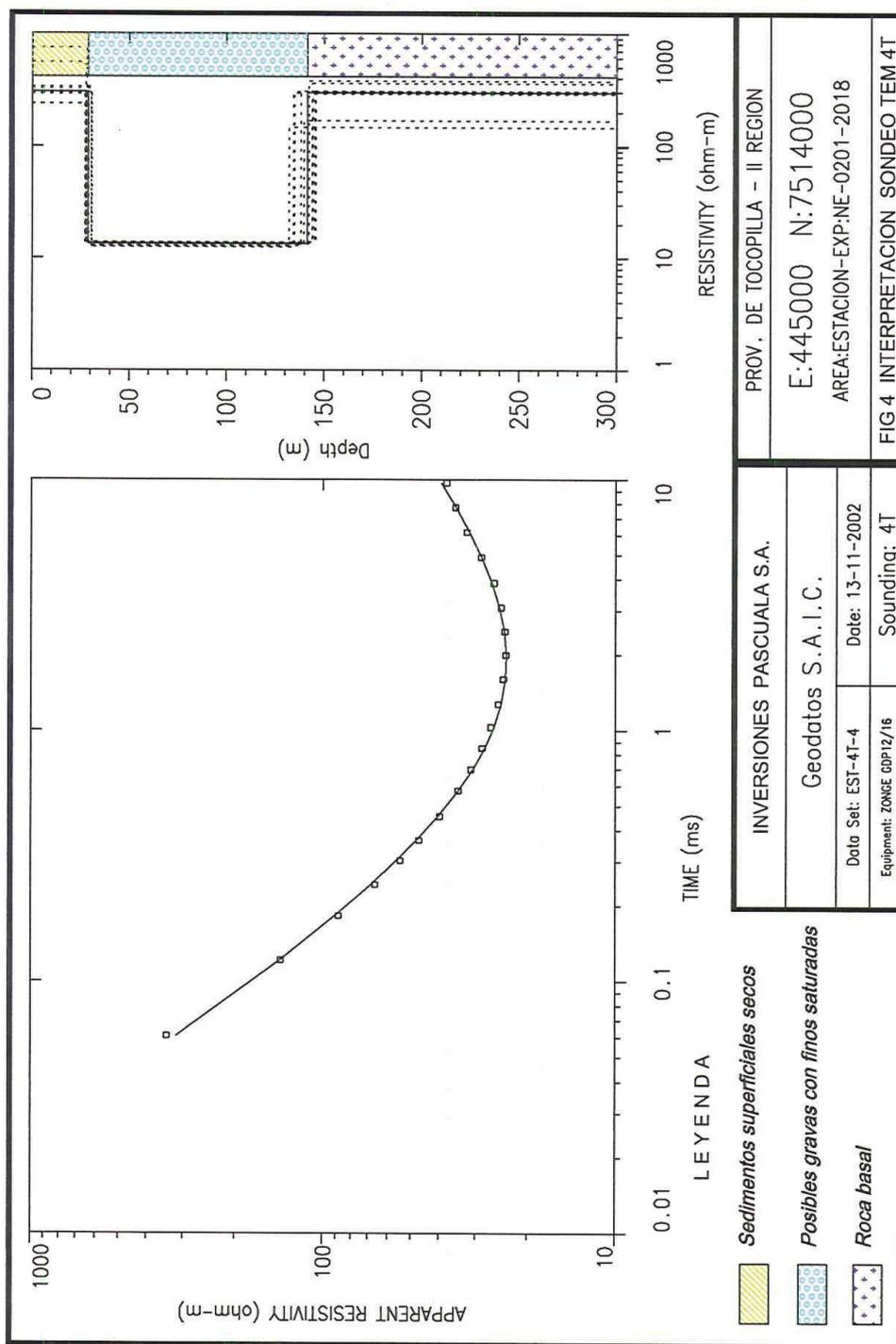
DDH-2991 (PLK-08): Pozo exploratorio en sector sur este de Pulucktur, con antecedentes favorables de geología y geofísica. Largo 570.4m; Techo de roca: 216.26m; Techo de sulfuros: 336m. Bajo la sobrecarga exhibe una secuencia volcánica andesítica interceptada por 20m de un pórfido tardío estéril que generó brechas ígneas en sus contactos y en zonas estructurales. La alteración observada corresponde a biotita de fondo con variaciones a biotita-sericita, biotita-clorita. Presenta mineralización exótica de óxidos verdes en las gravas y óxidos negros en los primeros metros de la andesita, bajo el techo de roca, con una ley de 0,18% Cu para 9m de gravas y 0,16% Cu para 25,5m de roca. Bajo la mineralización exótica ocurre lixiviación moderada, con presencia parcial de arcillas con cobre que registran un promedio de 870 ppm Cu y 45 ppm Mo, para un tramo de 100 m, hasta el techo de sulfuros. Bajo el techo de sulfuros, la mineralización consiste en un fondo pirítico diseminado en andesitas, parcialmente lixiviadas hasta los 465 m. Se exceptúa el tramo entre 385 y 451 m que corresponde a una apófisis de pórfido granodiorítico con desarrollo de brecha ígnea en ambos flancos. La parte superior de la brecha ígnea presenta un tramo mixto entre 385 y 405 m mineralizada con atacamita y calcopirita, que arroja leyes en torno a 0,1%. Bajo el piso de limonitas, la mineralización hipógena consiste en pirita con menor calcopirita en vetillas principalmente y diseminado, abundante magnetita y trazas de molibdenita. Este sondaje presenta un stockwork de vetillas de cuarzo con halos de sericita - clorita y otras sin halos, además presenta una zona de falla y fracturas a partir de los 556m hasta el fondo del pozo.

Fuente: "Exploración con sondajes proyecto Pulucktur distrito Codelco norte". Memoria para optar al título de Geólogo, Pizarro, 2011.

Anexo D

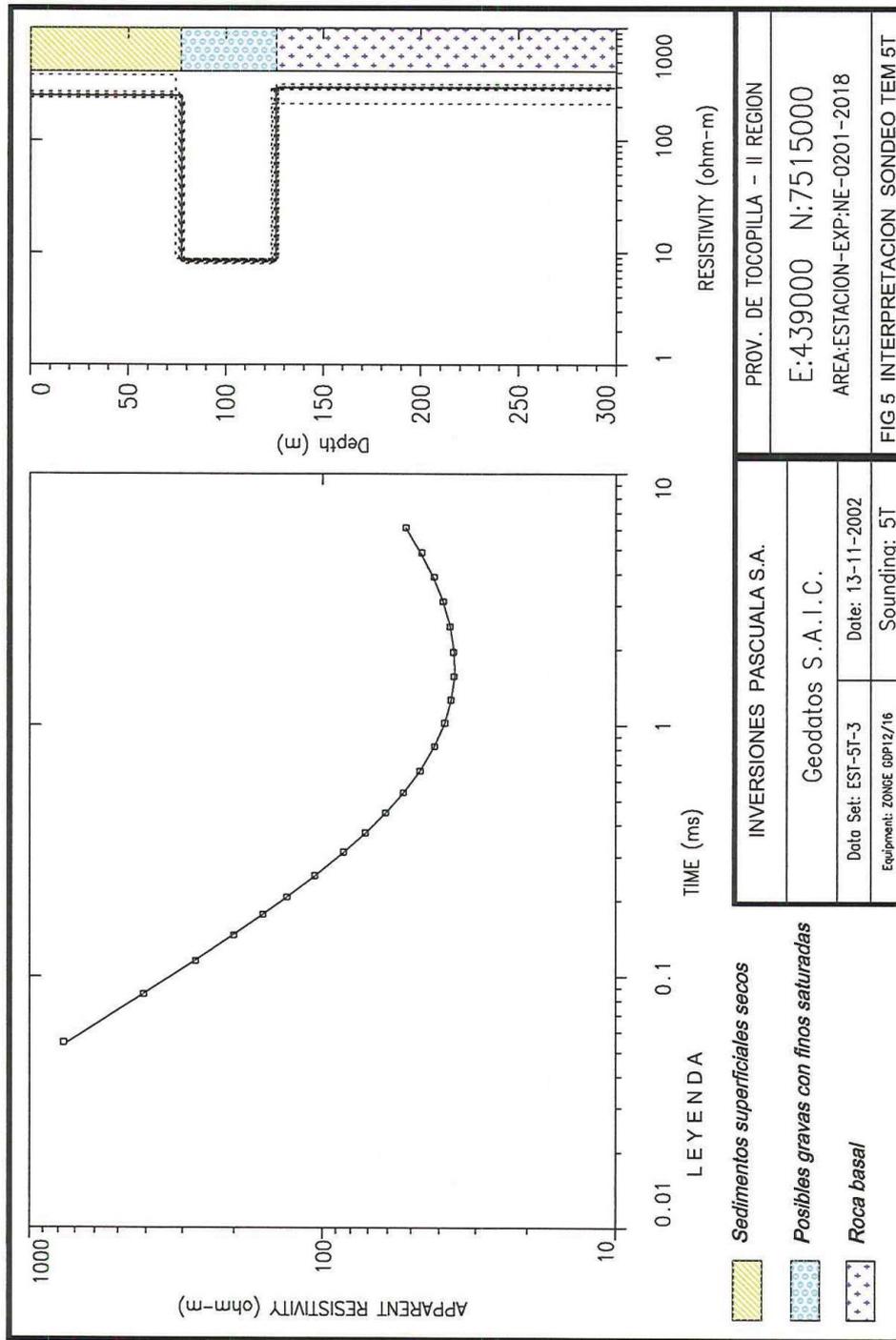
Interpretación de estudios de transiente electromagnético (TEM).

INTERPRETACIÓN TEM 4T



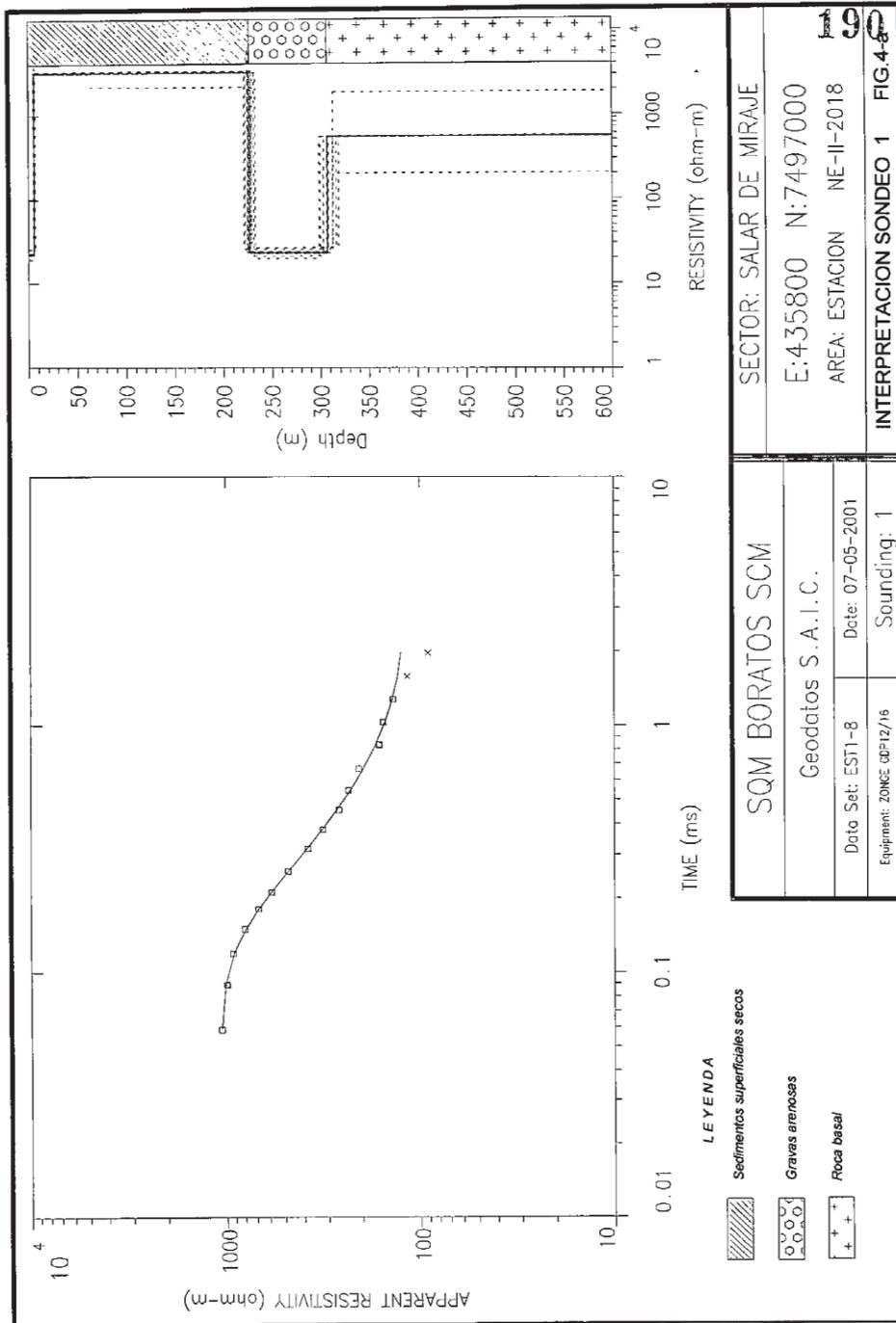
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2018.

INTERPRETACIÓN TEM 5T



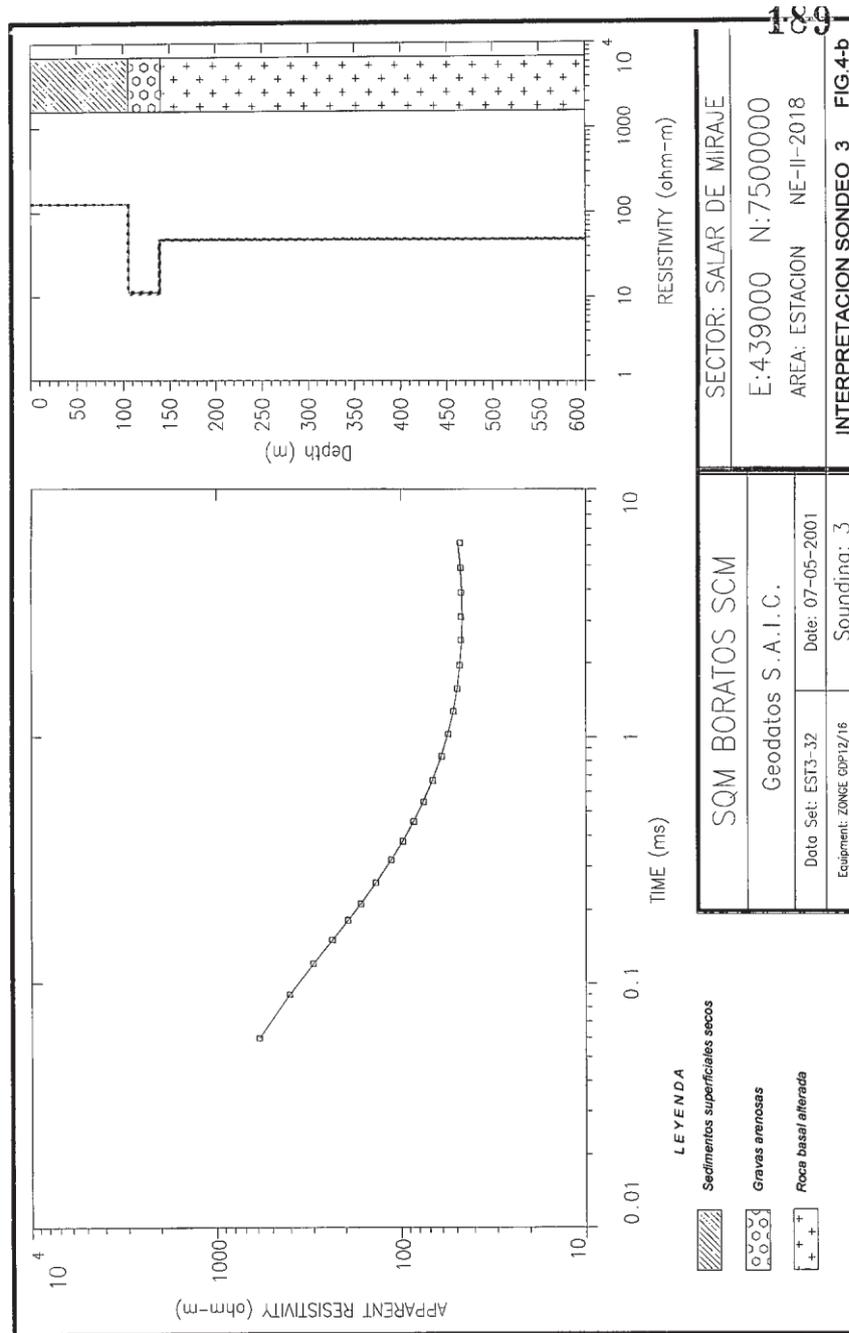
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2018.

INTERPRETACIÓN TEM 1



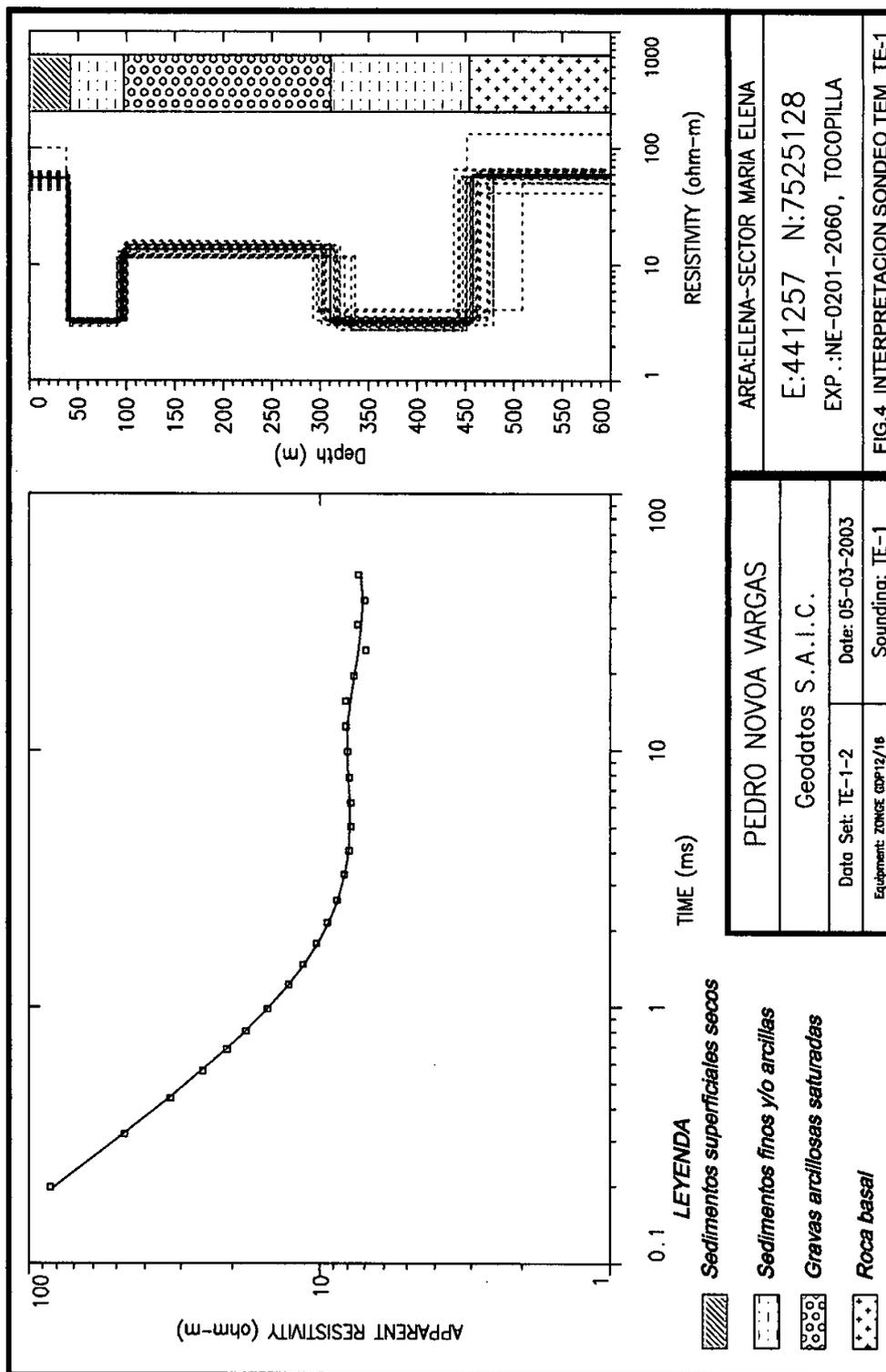
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2018.

INTERPRETACIÓN TEM 3



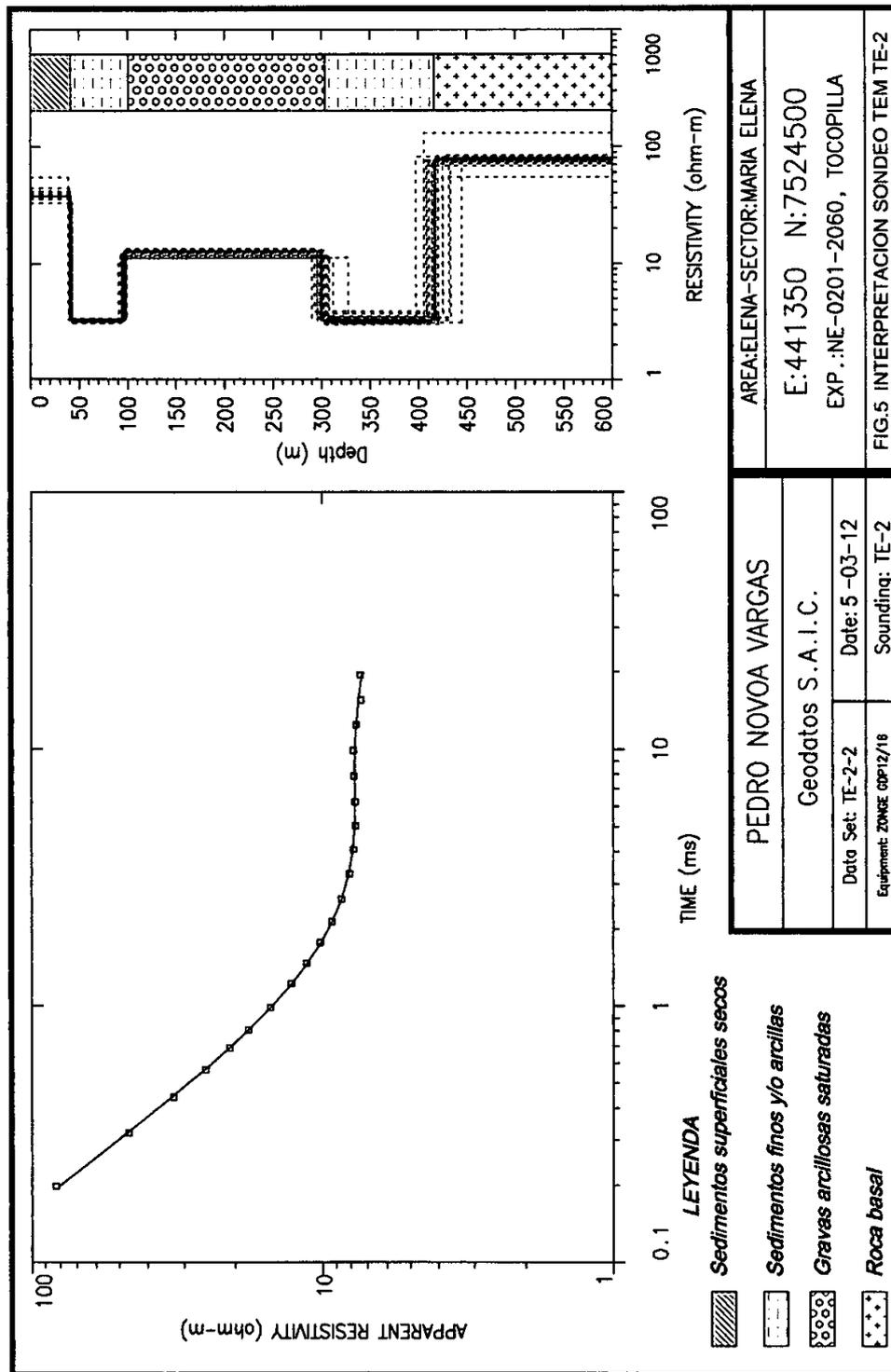
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2018.

INTERPRETACIÓN TEM TE-1



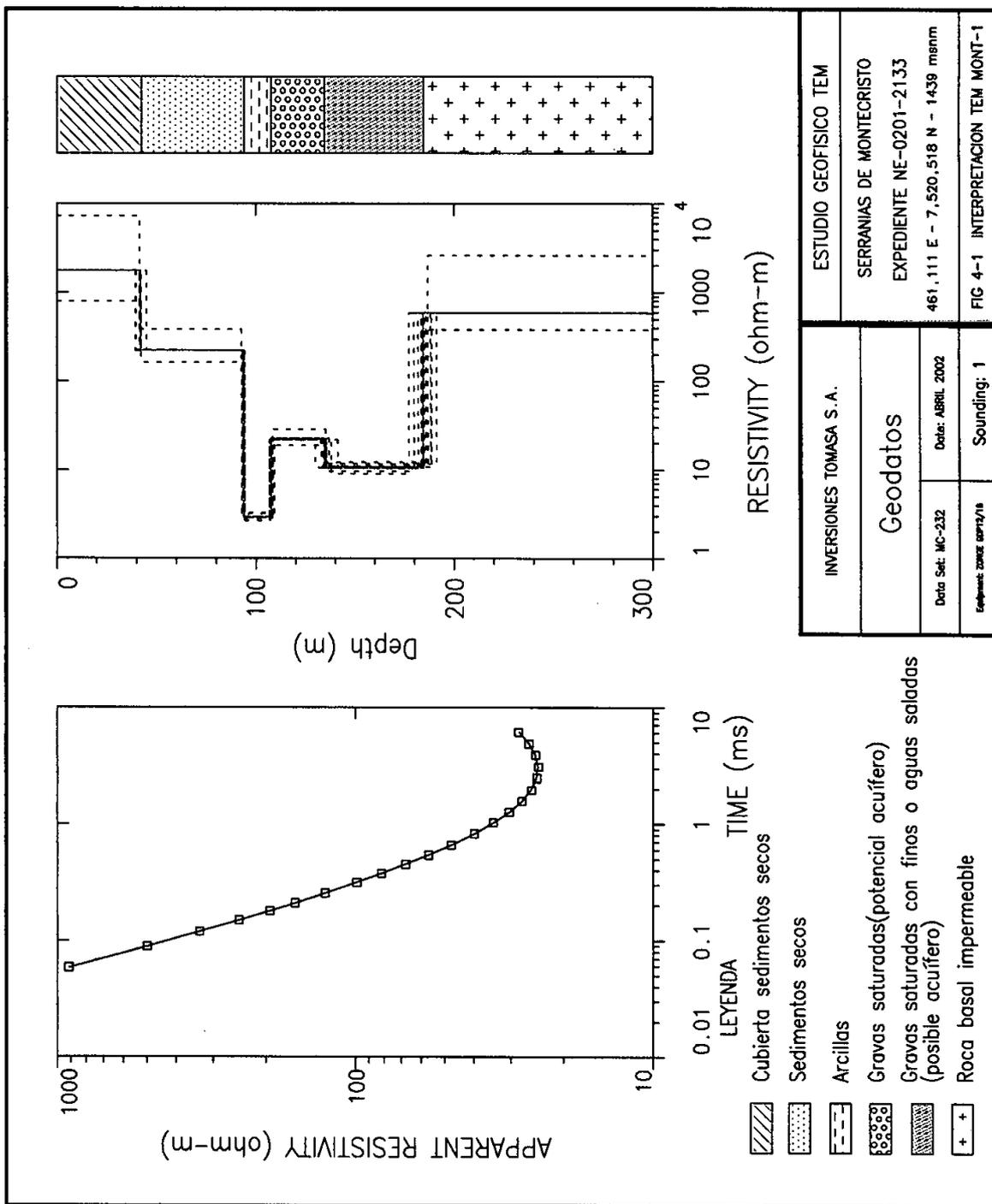
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2060.

INTERPRETACIÓN TEM TE-2



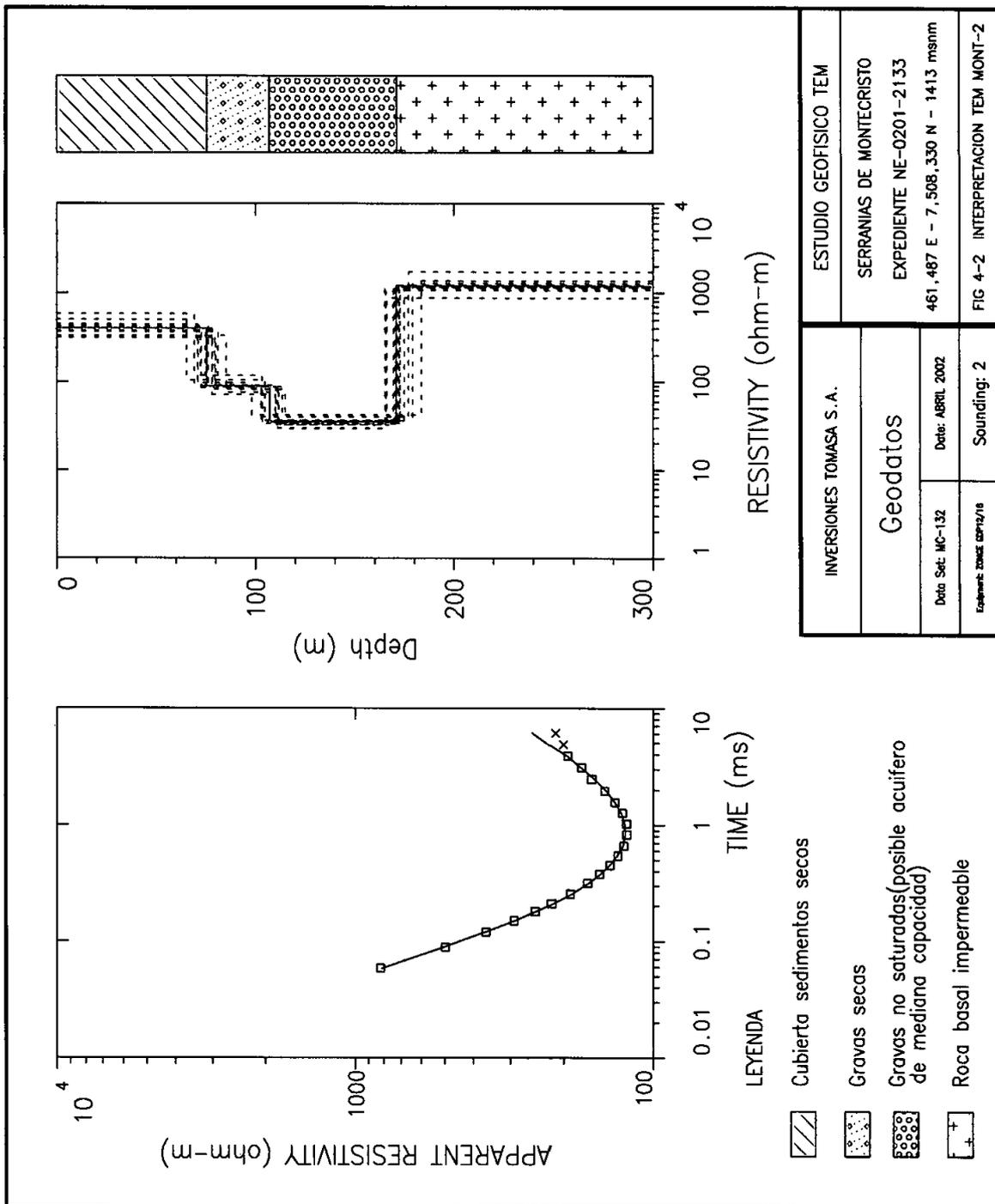
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2060.

INTERPRETACIÓN TEM MONT-1



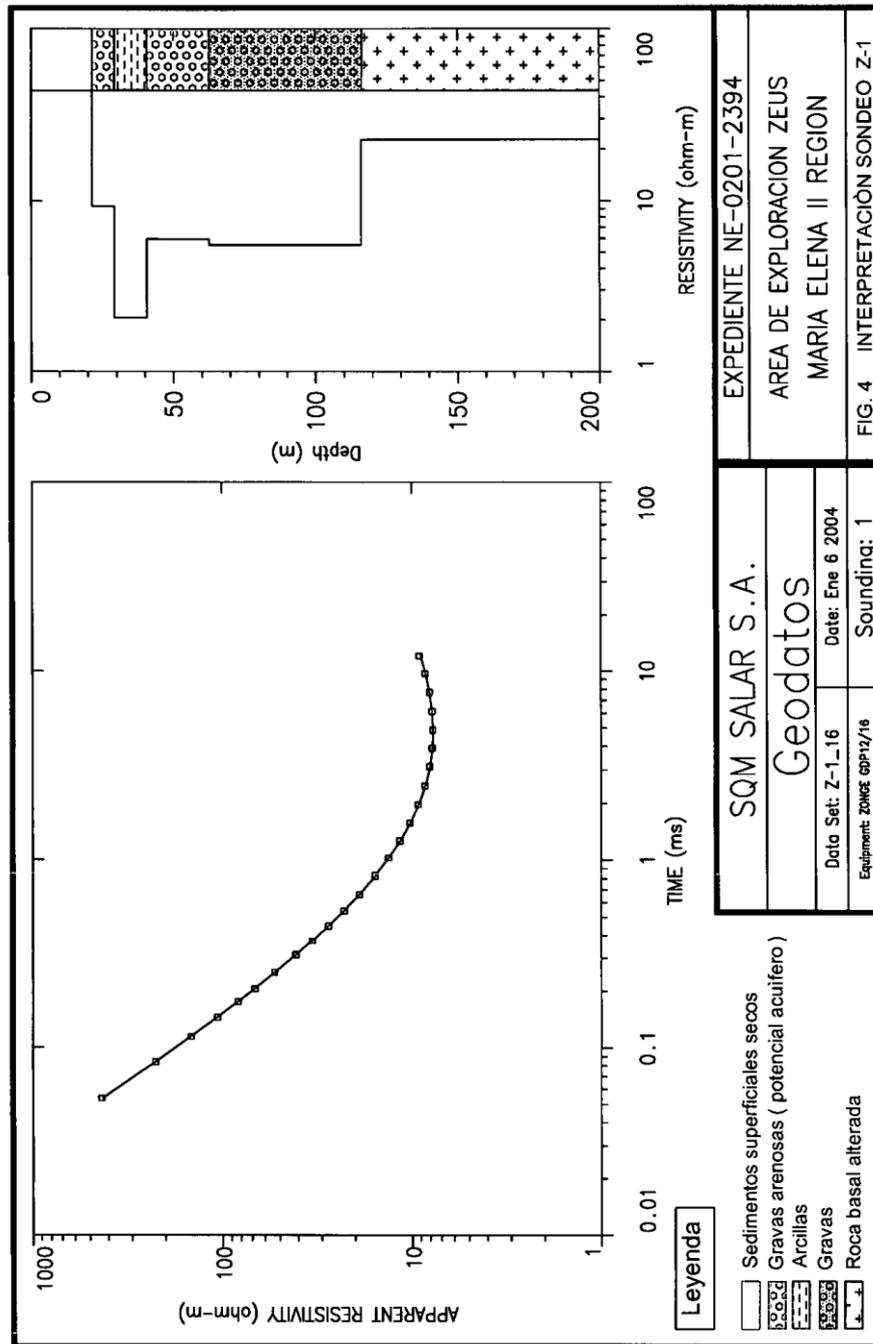
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2133.

INTERPRETACIÓN TEM MONT-2



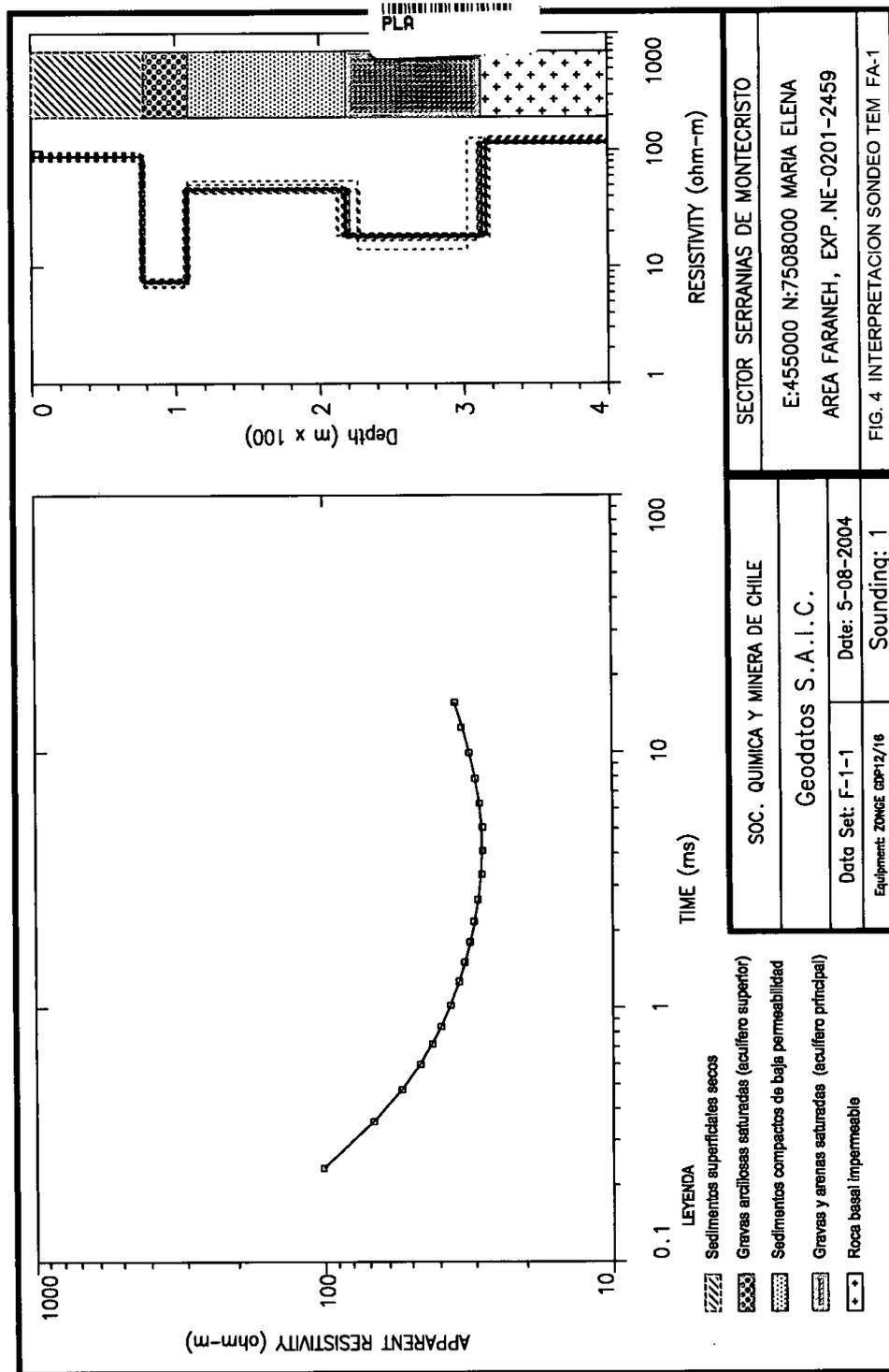
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2133.

INTERPRETACIÓN TEM Z-1



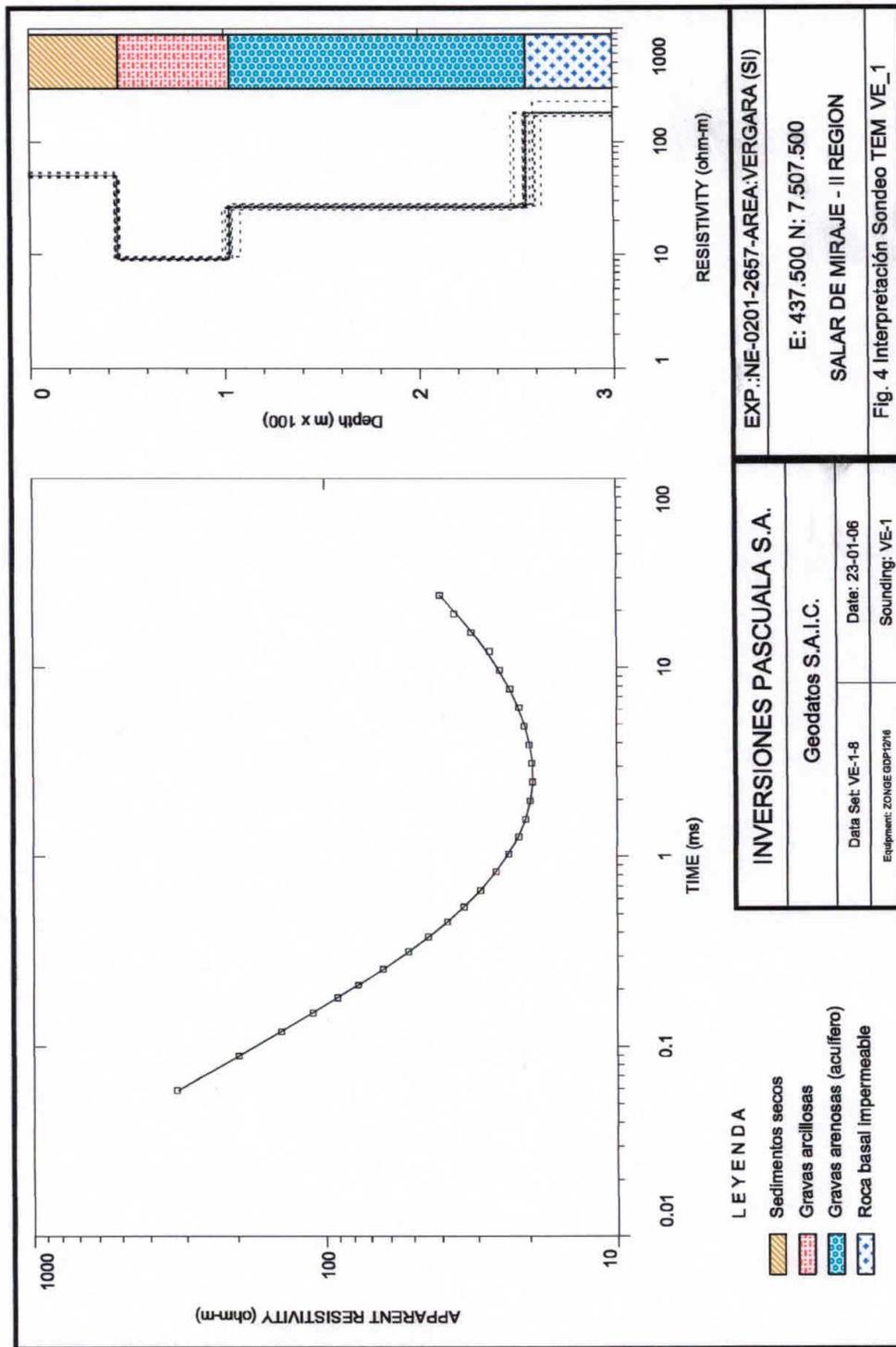
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2394.

INTERPRETACIÓN TEM FA-1



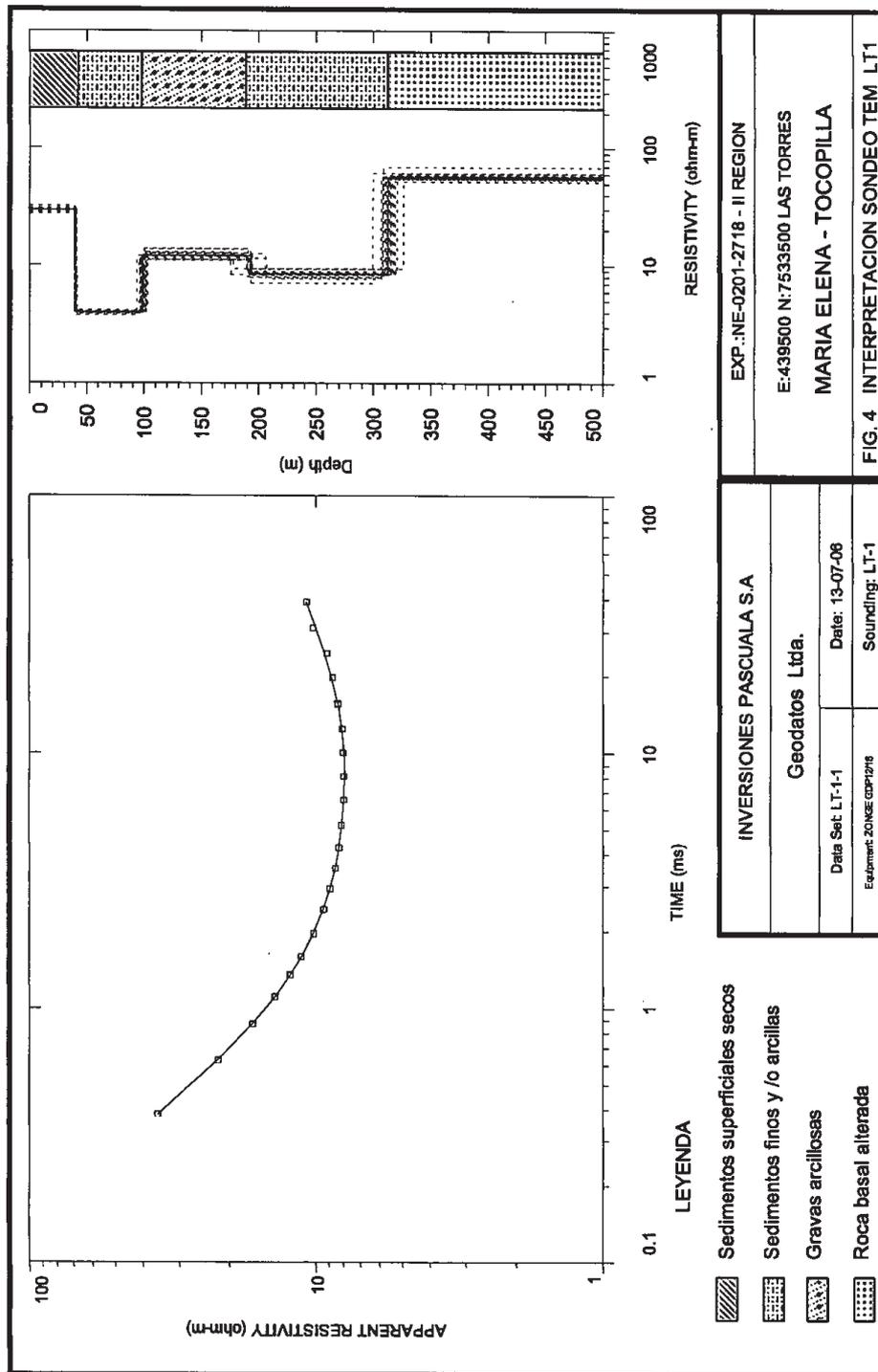
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2459.

INTERPRETACIÓN TEM VE_1



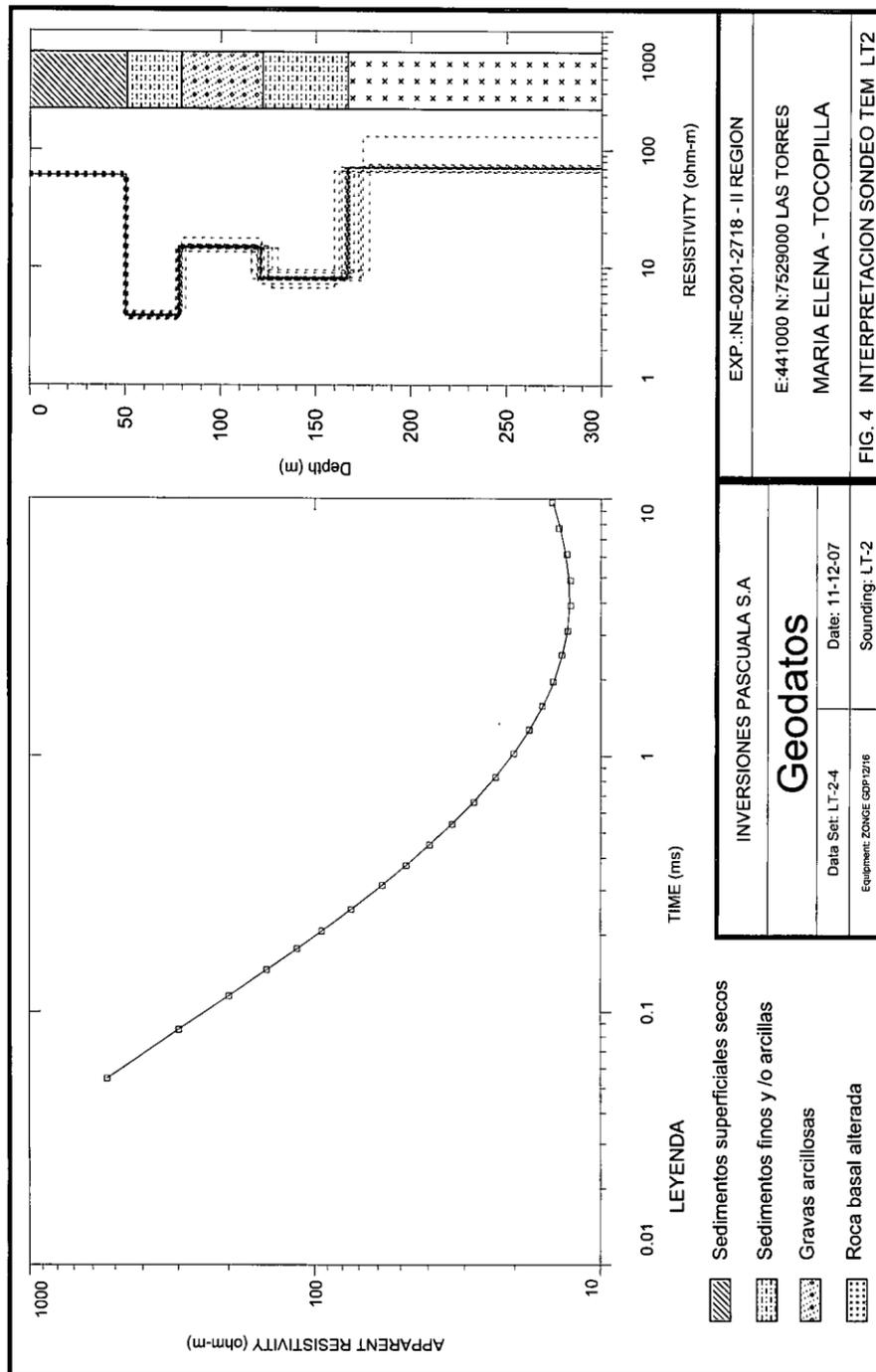
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2657.

INTERPRETACIÓN TEM LT1



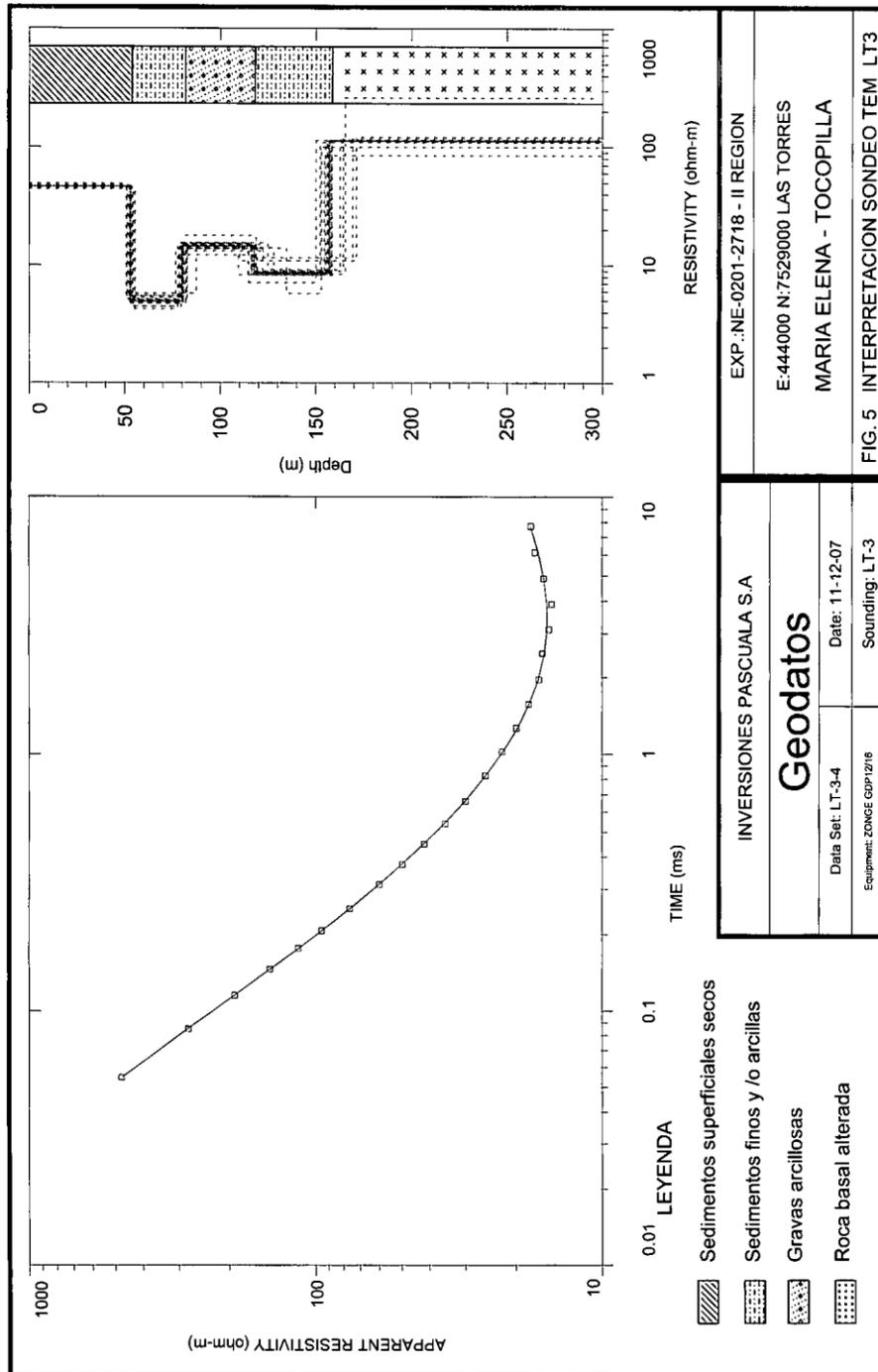
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2718.

INTERPRETACIÓN TEM LT2



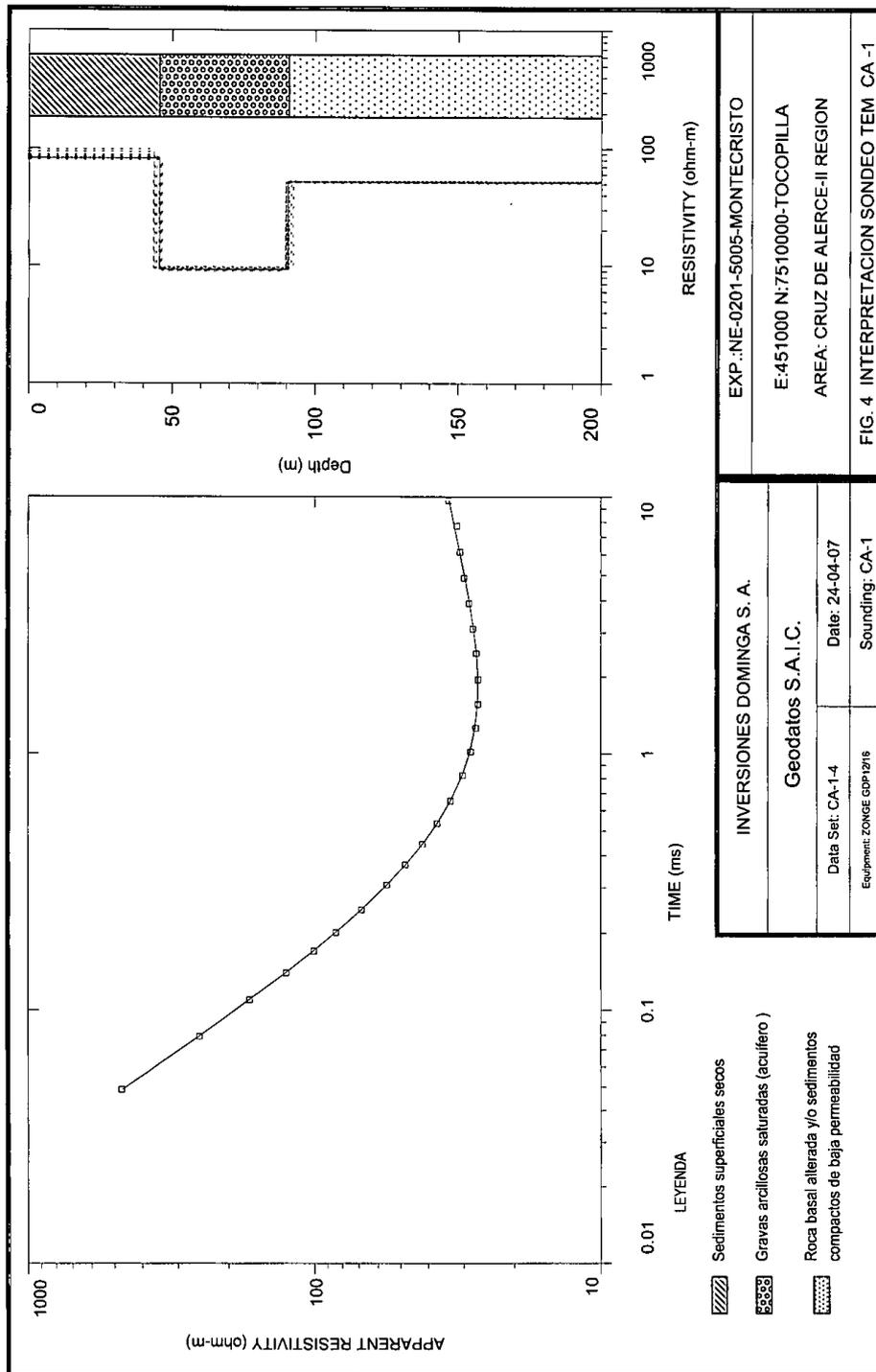
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2718.

INTERPRETACIÓN TEM LT3



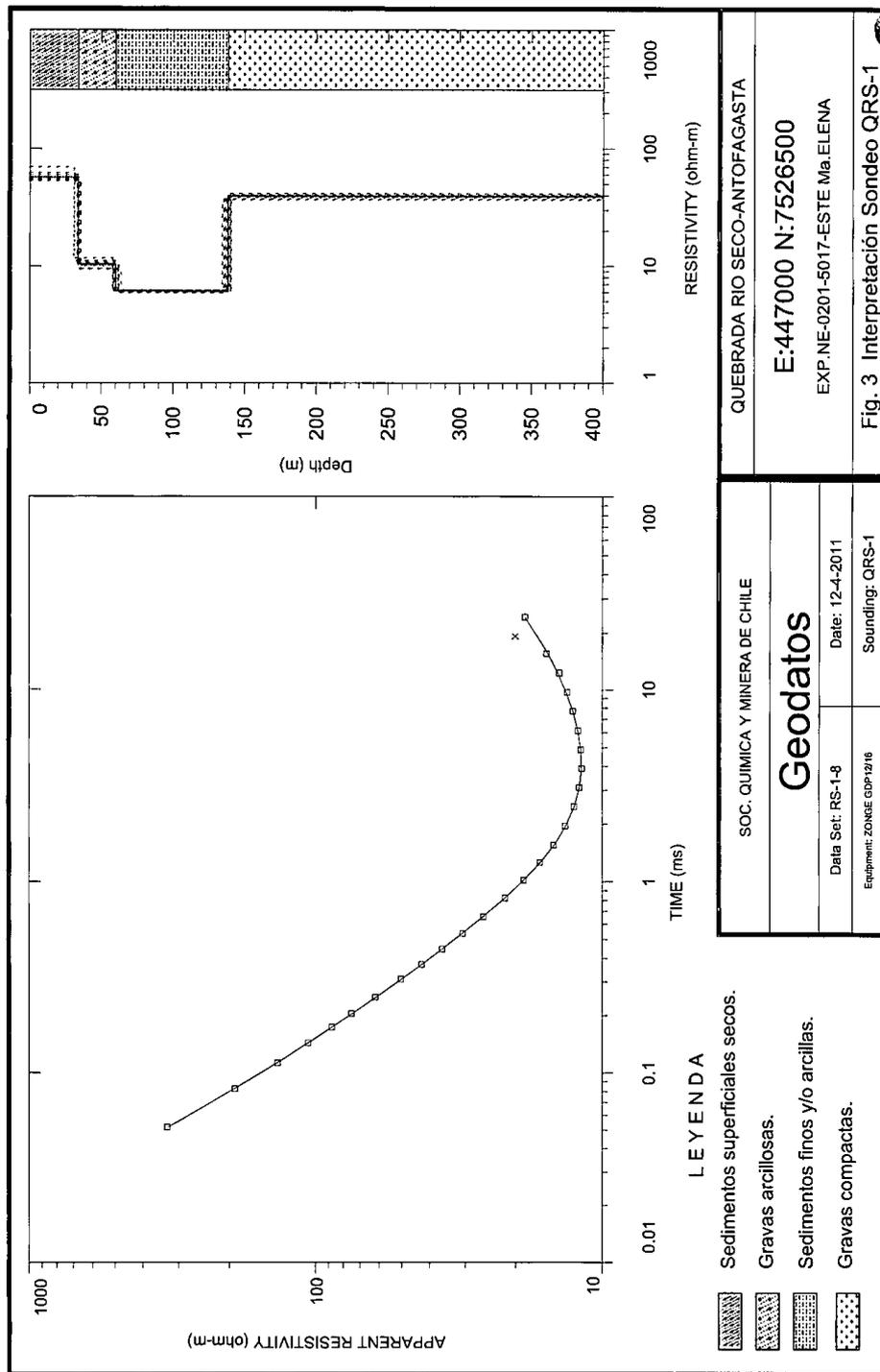
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2718.

INTERPRETACIÓN TEM CA-1



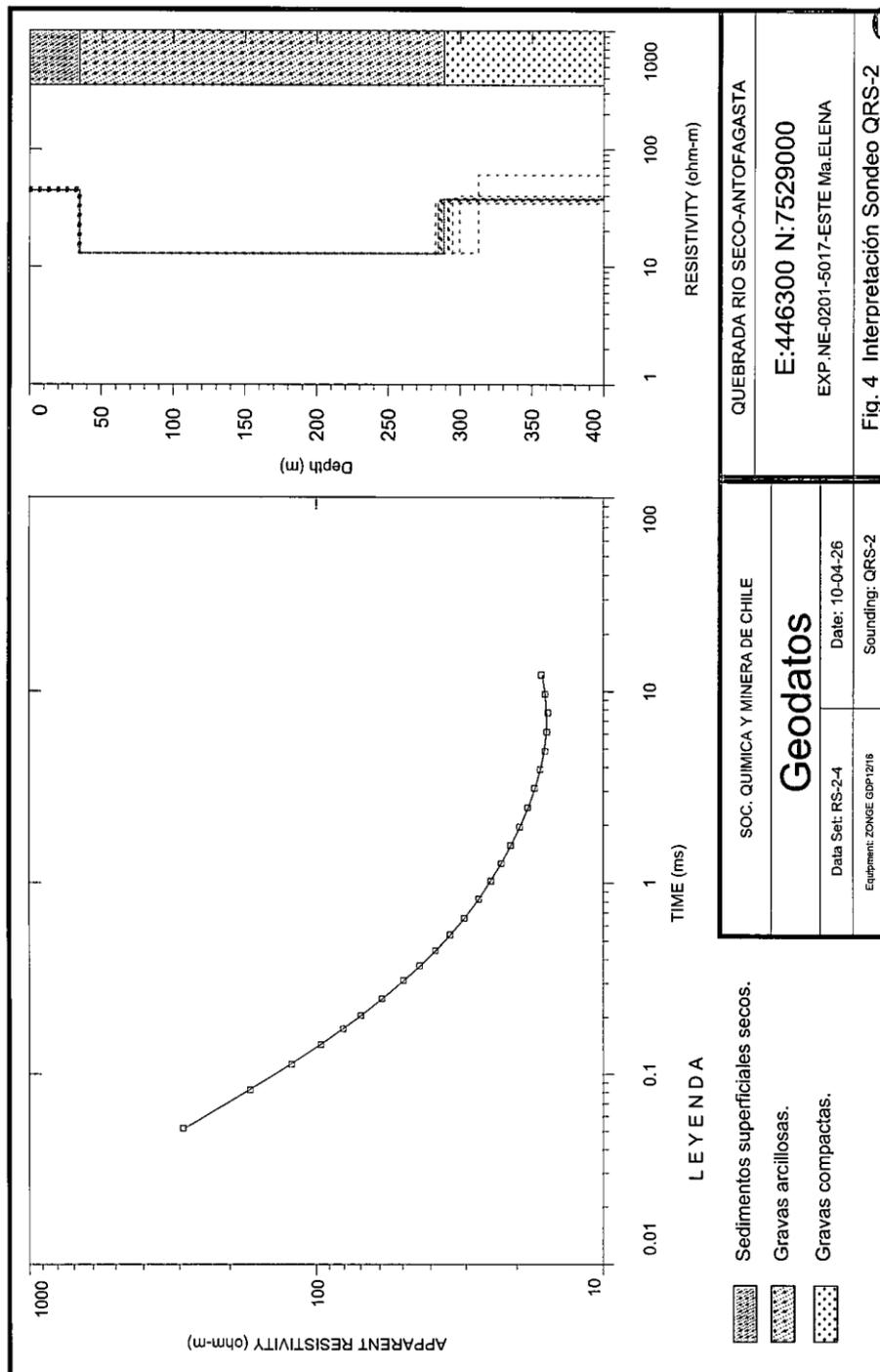
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-5005.

INTERPRETACIÓN TEM QRS-1



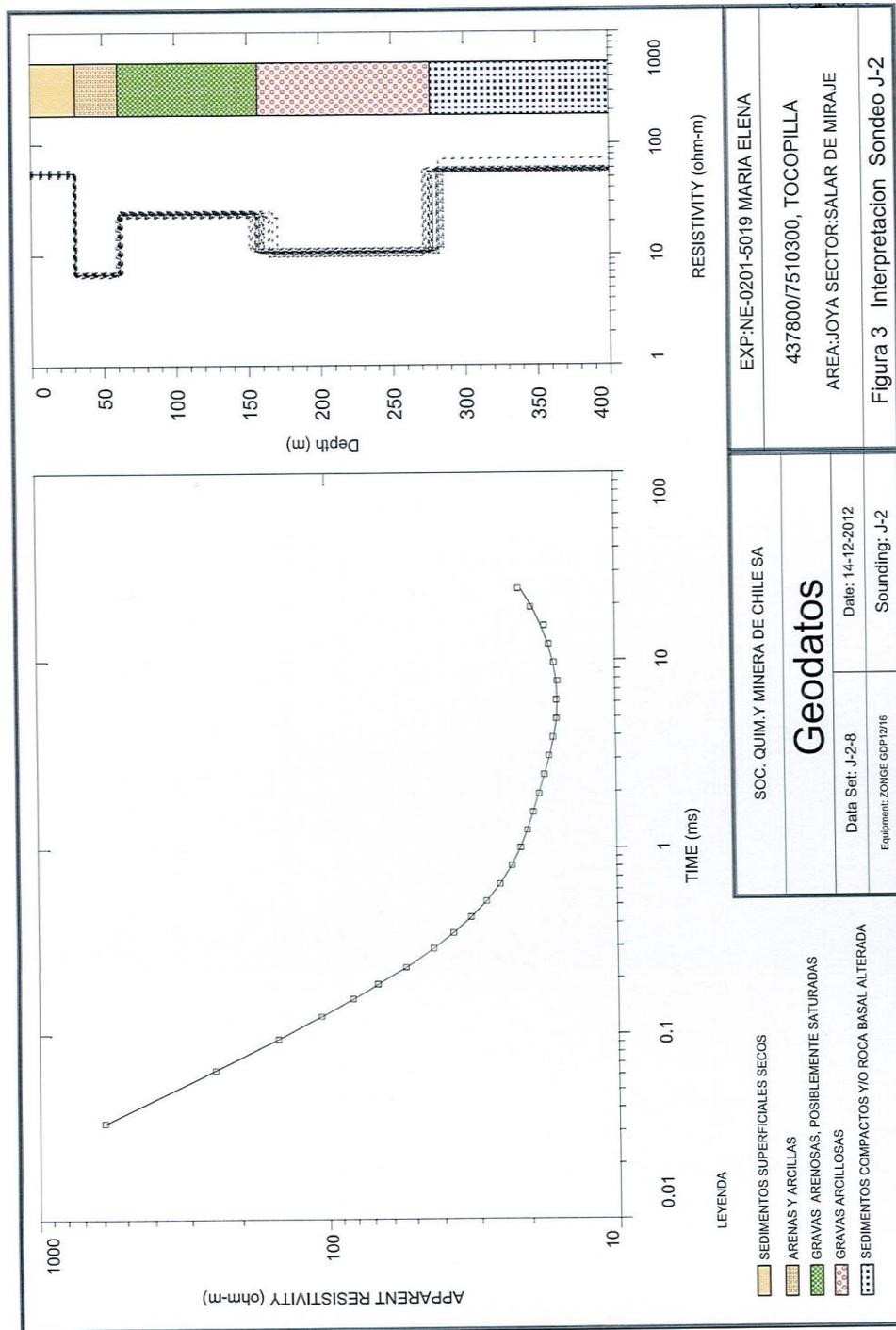
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-5017.

INTERPRETACIÓN TEM QRS-2



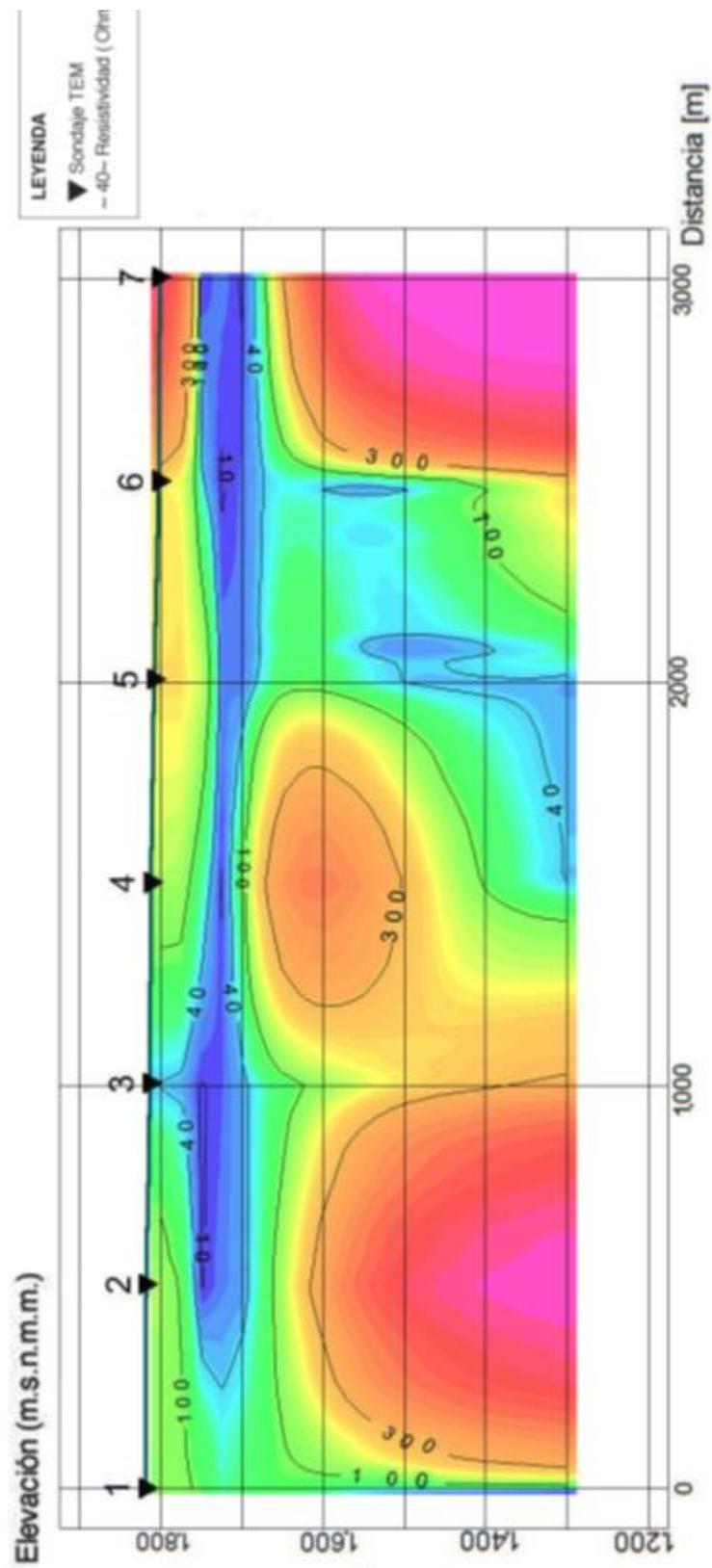
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-5017.

INTERPRETACIÓN TEM J-2



Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-5019.

Perfil TEM 5



Fuente: Mayco consultores, 2013. Levantamiento información hidrogeológica región de Antofagasta.

INTERPRETACIÓN TEM A51-1, A51-2 Y A51-3

088

7. ANÁLISIS DEL RESULTADO DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA.

Con el objeto de obtener un perfil estratigráfico del subsuelo, se realizaron sondeos geofísicos, mediante la técnica de mediciones del Transiente Electromagnético en función del tiempo (TEM), para ello se materializaron los sondeos A51- 1, A51- 2 y A51- 3. El resumen de sus resultados es el siguiente:

SONDAJE TEM : A51 – 1

UBICACION : N : 7.498.850 E : 437.700

PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (ohm-m)	LITOLOGÍA ASOCIADA
0-229	229	3481	Cubierta de sedimentos secos.
229-417	188	62	Gravas compactadas con bajo contenido de agua(¿)
> 417		823	Roca basal.

SONDAJE TEM : A51 – 2

UBICACION : N : 7.505.000 E : 440.000

PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (ohm-m)	LITOLOGÍA ASOCIADA
0 - 56	56	878	Sedimentos superficiales secos
56 – 68	12	4.1	Sedimentos finos y/o arcillas
68 - 103	35	8.4	Gravas arcillosas
103 - 218	115	4.9	Sedimentos finos arcillosos o gravas saturadas con aguas saladas.
> 218		22.4	Posible roca basal.

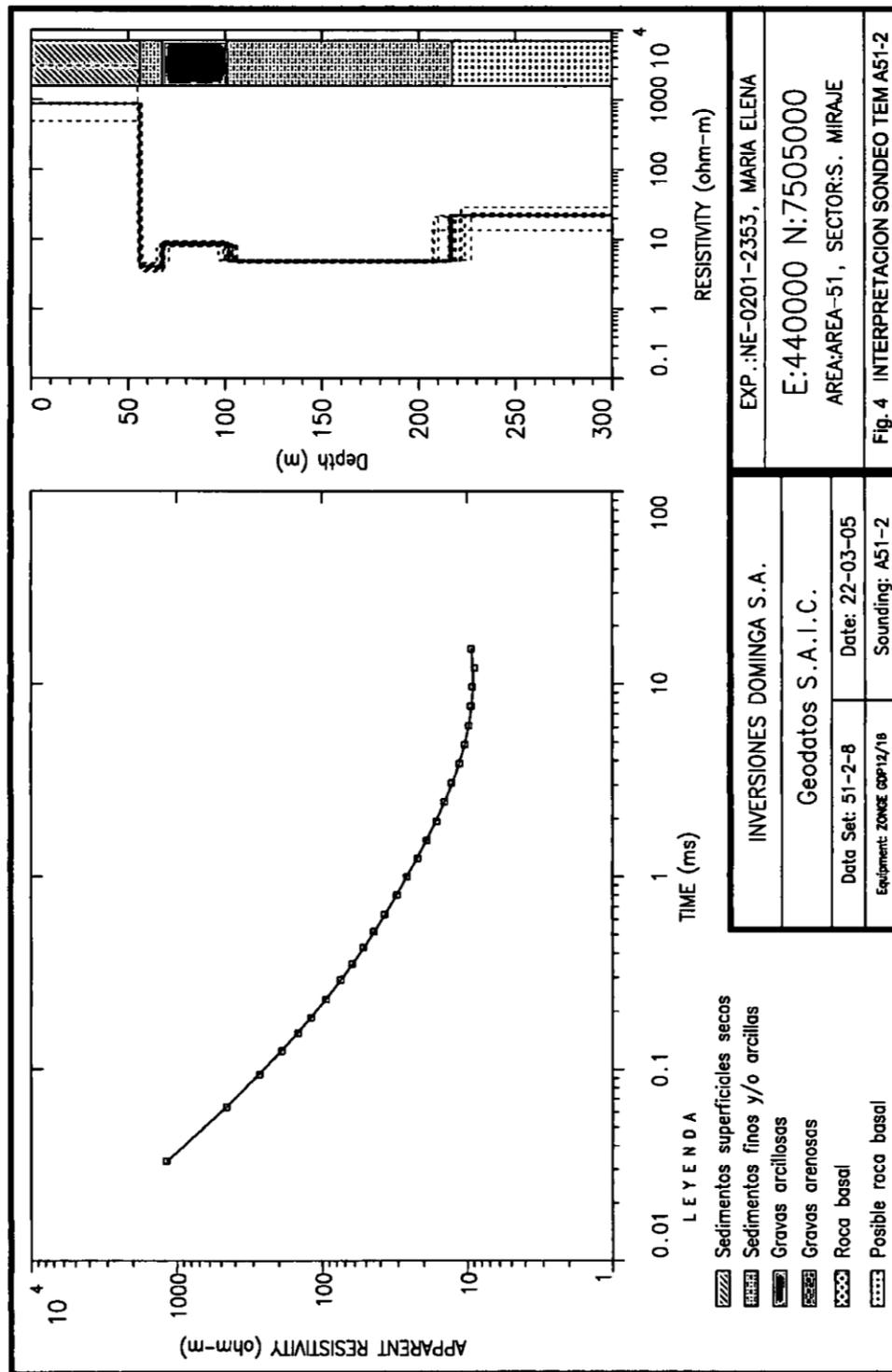
087

SONDAJE TEM : A51 – 3

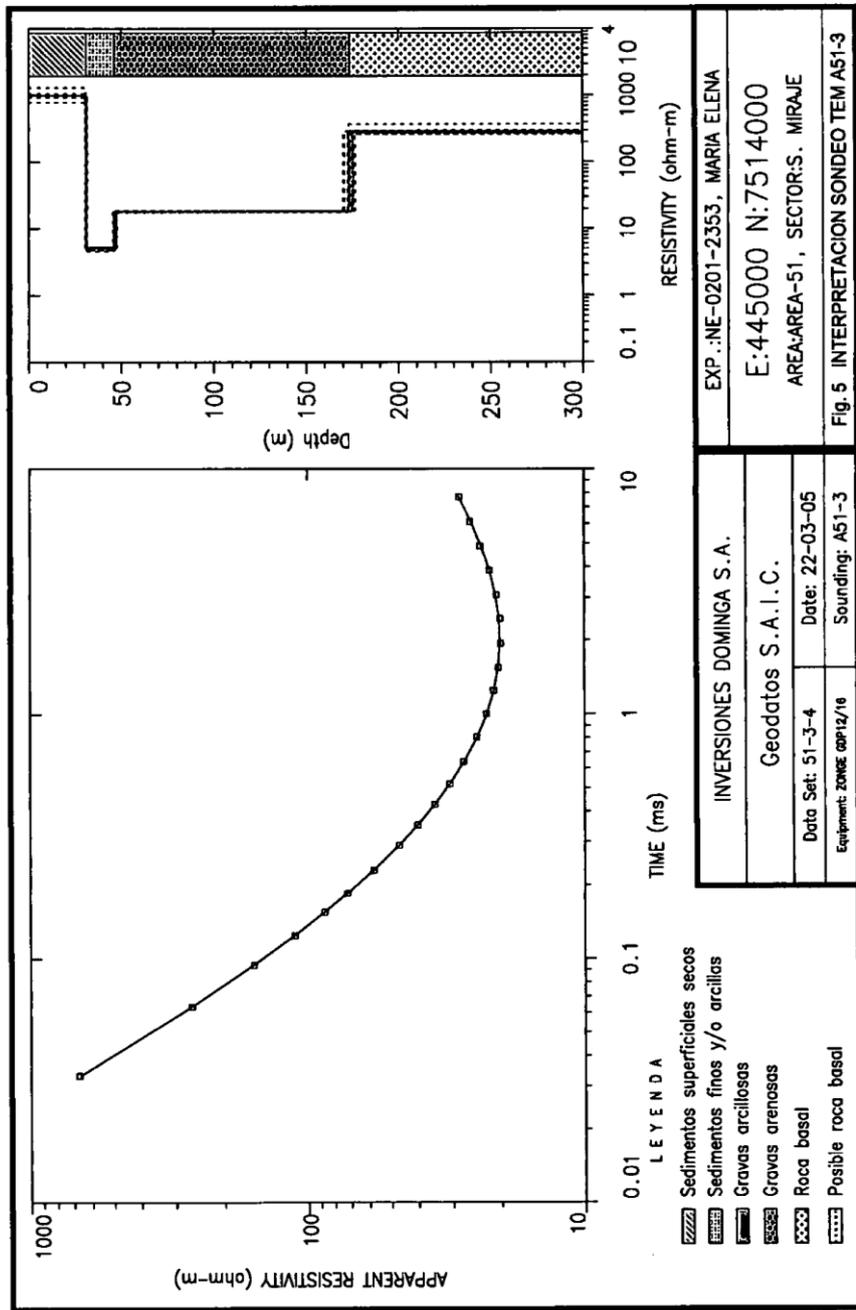
UBICACION : N : 7.514.000 E : 445.000

PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (ohm-m)	LITOLOGÍA ASOCIADA
0 – 31	31	991	Sedimentos superficiales secos
31 – 47	16	5.1	Sedimentos finos y/o arcillas
47 – 174	127	18.2	Gravas arenosas (acuifero)
>174		283	Roca basal.

Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2353



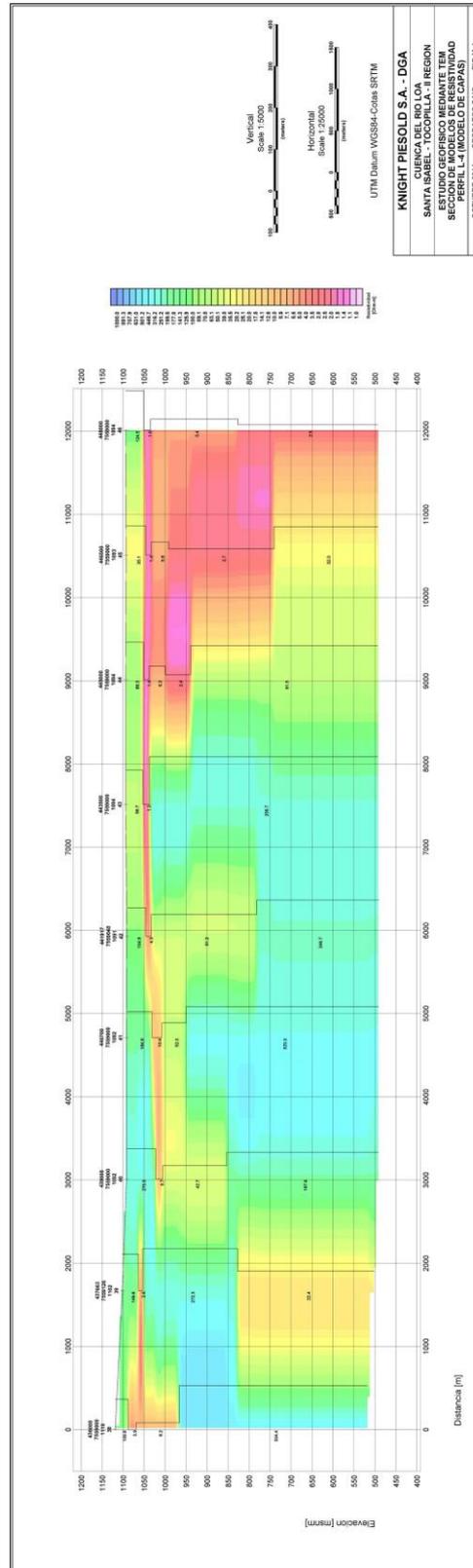
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2353



069

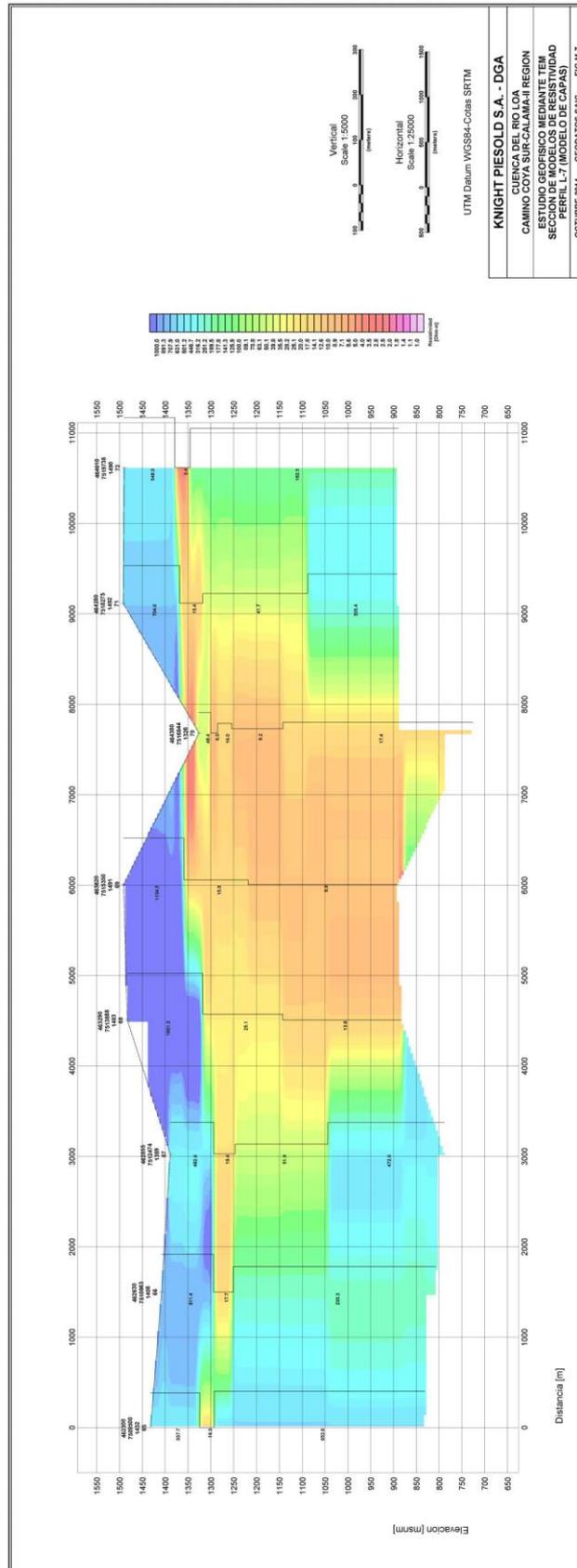
Fuente: Expediente DGA Zona de Exploración NE-0201-2353

INTERPRETACIÓN PERFIL TEM L4



Fuente: Geodatos, 2014. Estudio geofísico mediante TEM.

INTERPRETACIÓN PERFIL TEM L7



Fuente: Geodatos, 2014. Estudio geofísico mediante TEM.

Anexo E

Información piezométrica y de parámetros
hidráulicos.

x	y	id	Acuífero	profundidad nivel estatico (m)	Elevación (m)	nivel piezométrico (m)	transmisividad (m ² /día)	Almacenamiento	K (m/día)	Caudal (l/s)
503081	7515095	PBC-1	Calama - Sichal	39.94	2253	2213.06				
502513	7514927	PBC-2	Calama - Sichal	33.42	2238	2204.58				
503645	7514581	P-10	Calama - Sichal	43.98	2256	2212.02				73.2
502861	7516861	LE-1	Calama - Sichal	45.62	2264	2218.38				
503306	7517179	LE-2	Calama - Sichal	45.01	2266	2220.99				
505564	7516093	OBS-6C	Calama - Sichal	86.01	2279	2192.99				
500670	7514080	OBS-7C	Calama - Sichal	62.19	2219	2156.81				
503585	7514673	OBS-8C	Calama - Sichal	42.59	2255	2212.41				
504072	7515269	OBS-9C	Calama - Sichal	48.96	2264	2215.04				
501801	7514492	OBS-10C-A	Calama - Sichal	32.51	2229	2196.49				
501801	7514492	OBS-10C-B	Calama - Sichal	37.73	2229	2191.27				
449125	7577672	EX-32	Calama - Sichal	30.5	1072	1041.5				
447340	7572347	EX-33	Calama - Sichal	31.5	1090	1058.5				
446874	7564918	EX-29	Calama - Sichal	31.5	1111	1079.5				
445536	7568801	EX-30	Calama - Sichal	27.5	1099	1071.5				
447595	7556950	EX-34	Calama - Sichal	36.5	1137	1100.5				
445538	7543840	EX-35	Calama - Sichal	43	1185	1142				
451660	7584330	EX-31	Calama - Sichal	55.5	1060	1004.5				
438049	7526743	EX-18	Calama - Sichal	23	1255	1232				
437924	7523995	EX-25	Calama - Sichal	38.5	1268	1229.5				
436335	7529265	EX-27	Calama - Sichal	40	1247	1207				
437953	7532049	EX-28	Calama - Sichal	34.5	1236	1201.5				

x	y	id	Acuífero	profundidad nivel estatico (m)	Elevación (m)	nivel piezométrico (m)	transmisividad (m ² /dia)	Almacenamiento	K (m/dia)	Caudal (l/s)
440600	7538500	Las Torres	Calama - Sichal	29.5	1212	1182.5				
444989	7517038	EX-5	Calama - Sichal	47	1302	1255				
438987	7521040	EX-26	Calama - Sichal	48	1282	1234				
438173	7571531	S-G1-1	Calama - Sichal	35.94	1090	1054.06				
437577	7564333	S-G1-2	Calama - Sichal	31.54	1113	1081.46				
439318	7561797	S-G1-3	Calama - Sichal	35.35	1108	1072.65				
450868	7547996	S-G3-1	Calama - Sichal	31.54	1169	1137.46				
462680	7580515	S-G2-2	Calama - Sichal	48.55	1169	1120.45				
446639	7524238	S-LOA 2	Calama - Sichal	46.46	1284	1237.54				
444463	7522982	S-LOA 3	Calama - Sichal	43.18	1284	1240.82				
443480	7517660	pozo 1	Calama - Sichal	40.72	1288	1247.28	69.67		1.26	2.68
443470	7517760	pozo 2	Calama - Sichal	40.04	1287	1246.96	80.03		1.33	8
442436	7519102	melissa	Calama - Sichal	36.93	1283	1246.07	121.9	0.036%	0.99	5
443105	7520222	EX - 13A	Calama - Sichal	37.23	1284	1246.77				16
440879	7521081	EX - 14A	Calama - Sichal	37.45	1274	1236.55	42.87	0.03%	0.350	9.5
504770	7512280	CMG-1	Calama - Sichal	16.23	2264	2247.77	86	0.05%	0.33	35
504813	7512296	MGX-1A	Calama - Sichal	15.84	2263	2247.16	70	0.0005%	0.27	
507330	7513380	CMG-2	Calama - Sichal	38.21	2290	2251.79				
504582	7515527	PPR-1	Opache - Quillagua	2.29	2269	2266.71	1600	0.083%	23	0.5
505546	7516089	PPR-2	Opache - Quillagua	8.9	2279	2270.1	26000	0.740%	309	47
503224	7516369	PPR-3	Opache - Quillagua	9.71	2258	2248.29	10000	0.380%	412	45
504051	7515081	PPR-4	Opache - Quillagua	3.39	2263	2259.61	2500	0.194%	36	0.7

x	y	id	Acuífero	profundidad nivel estatico (m)	Elevación (m)	nivel piezométrico (m)	transmisividad (m ² /dia)	Almacenamiento	K (m/dia)	Caudal (l/s)
502772	7515863	PPR-5	Opache - Quillagua	5.58	2246	2240.42	1500	0.390%	44	50
503592	7514664	P-7	Opache - Quillagua	5.24	2254	2248.76				
504075	7515259	P-18	Opache - Quillagua	2.69	2264	2261.31				
503891	7514882	P-19	Opache - Quillagua	6.37	2255	2248.63				65
504277	7514962	P-24	Opache - Quillagua	7.67	2272	2264.33				46.8
503896	7514520	P-25	Opache - Quillagua	7.33	2261	2253.67				70
504023	7514329	P-27	Opache - Quillagua	8.74	2261	2252.26				65
502817	7515785	LE-4	Opache - Quillagua	8.27	2254	2245.73				
503231	7516371	LE-6	Opache - Quillagua	10.13	2257	2246.87				
504025	7515108	LE-7	Opache - Quillagua	4.15	2261	2256.85				
505562	7516084	LE-9	Opache - Quillagua	9.64	2279	2269.36				
505560	7516100	OBS-6Li A	Opache - Quillagua	10.92	2279	2268.08				
505560	7516100	OBS-6Li B	Opache - Quillagua	22.06	2279	2256.94				
505560	7516100	OBS-6Li C	Opache - Quillagua	48.42	2279	2230.58				
500675	7514075	OBS-7L	Opache - Quillagua	18.43	2219	2200.57				
503600	7514655	OBS-8Li A	Opache - Quillagua	8.85	2252	2243.15				
503600	7514655	OBS-8Li B	Opache - Quillagua	10.32	2252	2241.68				
503600	7514655	OBS-8Li C	Opache - Quillagua	20.23	2252	2231.77				
504813	7512276	MGX-1	Opache - Quillagua	3.59	2262	2258.41				
507489	7513508	MGX-2	Opache - Quillagua	6.99	2295	2288.01				
505880	7512898	MGX-3	Opache - Quillagua	4.77	2277	2272.23				

Anexo F

Antecedentes estación río Loa en Escorial
(DGA).

GOBIERNO DE CHILE		Fecha Emisión: 01/03/2019											
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS													
DIRECCION GENERAL DE AGUAS													
		CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/s)											
		PERIODO: 01/01/2012 - 01/01/2015											
Estación: RIO LOA EN ESCORIAL		Altitud (msnm): 2450			UTM Norte (mts): 7517871								
Código BNA: 02110001-3		Latitud S: 22° 26' 43"			UTM Este (mts): 511262								
Cuenca: RIO LOA		Longitud W: 68° 53' 25"			Área de Drenaje (km2): 9770.00								
Subcuenca: RIO LOA MEDIO (ENTRE RIO SALADO Y QUEBRADA AMARGA)													
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	I
2012	3.01	14.46	3.76	1.38	0.95	0.89	1.27	1.49	1.38	1.20	1.10	1.23	
2013	1.11	1.48	1.19	1.25	1.29	1.40	1.52	1.56	1.36	1.03	0.86	1.10	
2014	1.08	1.12	1.01	1.31	@ 1.20	*	1.20	1.22	1.19	1.00	%		
2015			1.54	@ 1.31	@ 1.22	1.15	1.16	1.16	1.31	1.30	1.07	0.99	
INDICADORES:													
* : 1 - 10 Días con Información en el Mes													
@ : 11 - 20 Días con Información en el Mes													
% : Más de 20 Días con Información en el Mes													

Fuente: Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Anexo G

Derechos de agua registrados en la DGA.

Código de Expediente	Región	Comuna	Tipo Derecho	Naturaleza del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom	UTM Norte Captación (m)	UTM Este Captación (m)	Huso	Datum	Año
ND-0202-800100	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	65.00	7514329.00	504023.00	18	1956	2015
ND-0202-800101	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	70.00	7514520.00	503895.00	18	1956	2015
ND-0202-800102	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	46.80	7514962.00	504277.00	18	1956	2015
ND-0202-800103	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	65.00	7514881.00	503891.00	18	1956	2015
ND-0202-800104	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	73.20	7514581.00	503644.00	18	1956	2015
ND-0202-5050	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	89.30	7553750.00	597565.00	19	1984	0
NR-0202-5008	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.00	7535419.00	537510.00	19	1956	0
NR-0202-5016	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.10	7531223.00	536103.00	19		2015
NR-0202-5002	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial	Permanente y Continuo	0.42	7535419.00	537510.00	19		2015
NR-0202-5005	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.14	7535419.00	537510.00	19		2015
NR-0202-5009	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.54	7535419.00	537510.00	19		2015
NR-0202-5014	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.30	7535419.00	537510.00	19		2015
NR-0202-5015	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.22	7535419.00	537510.00	19		2015
NR-0202-5013	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.00	7536035.00	537839.00	19	1956	2014
NR-0202-5010	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.63	7535419.00	537510.00	19	1956	2014
NR-0202-5035	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.65	7529692.00	536521.00	19	1956	0
NR-0202-5043	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	2.50	7528506.39	603966.31	19	1956	2017
JA-0201-3	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Superficial y Corriente	Eventual y Discontinuo	5.00	7523556.00	445851.00	19	1956	2009
ND-0202-800045	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	50.00	7515374.09	532640.77	19	1956	2008

Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Código de Expediente	Región	Comuna	Tipo Derecho	Naturaleza del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom	UTM Norte Captación (m)	UTM Este Captación (m)	Huso	Datum	Año
ND-0202-800046	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	35.00	7514189.06	535386.75	19	1956	2008
ND-0202-800047	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	40.00	7523060.73	542236.70	19	1956	2008
ND-0202-800048	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	40.00	7525516.00	543655.00	18	1956	2008
ND-0202-800049	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	20.00	7516119.09	537638.34	18	1956	2008
ND-0202-800050	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	34.00	7520852.32	539662.50	18	1956	2008
ND-0202-800051	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	30.00	7512629.20	530295.25	18	1956	2008
ND-0202-800052	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	50.00	7518293.34	545064.07	18	1956	2008
ND-0202-800053	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	20.00	7519133.11	537591.20	18	1956	2008
ND-0202-800061	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	30.00	7510700.00	507300.00	19	1956	2008
ND-0202-1191	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	2.00	7525654.00	509045.00	19	1956	2008
NR-0202-1979	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	119.00	7541900.00	574030.00	19		2007
NR-0202-1978	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	14.00	7530250.00	581250.00	19	1956	2007
NR-0202-1978	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	14.00	7530750.00	584000.00	19	1956	2007
NR-0202-1978	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	3.00	7521300.00	585150.00	19	1956	2007
NR-0202-1978	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	3.00	7521150.00	585200.00	19	1956	2007
NR-0202-1978	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.10	7521400.00	584700.00	19	1956	2006
NR-0202-1978	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	6.00	7521550.00	523300.00	19	1956	2007
UA-0201-2	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Superficial y Corriente	Eventual y Discontinuo	20.00	7528705.00	441928.00	19	1956	2005
UA-0201-2	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Superficial y Corriente	Eventual y Discontinuo	20.00	7528705.00	441928.00	19	1956	2005

Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Código de Expediente	Región	Comuna	Tipo Derecho	Naturaleza del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom	UTM Norte Captación (m)	UTM Este Captación (m)	Huso	Datum	Año
UA-0201-4	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Superficial y Corriente	Ejercicio y Discontinuo	27.00	7517941.00	454504.00	19	1956	2005
ND-0201-1735	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	5.00	7519102.57	442436.24	19	1956	2003
ND-0201-1751	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	0.58	7603649.00	447113.00	19	1956	2004
ND-0201-1819	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	9.50	7521081.43	440879.26	19	1956	2004
ND-0202-1169	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	30.00	7521343.00	508002.00	19	1956	2003
NR-0202-1382	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	30.00	7537350.00	587540.00	19		2004
NR-0202-1382	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	10.00	7537900.00	592750.00	19		2004
NR-0202-1382	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	25.00	7538430.00	593450.00	19		2004
NR-0202-1880	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	35.00	7537560.00	592090.00	19		2004
ND-0202-1880	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	35.00	7641335.00	521016.00	19	1956	2003
ND-0202-1880	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	110.00	7646475.00	521530.00	19	1956	2003
ND-0202-1880	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	50.00	7644159.00	521207.00	19	1956	2003
ND-0202-1880	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	50.00	7642786.00	521016.00	19	1956	2003
ND-0202-1880	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	50.00	7648125.00	521000.00	19	1956	2003
ND-0202-1880	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	5.00	7641281.00	518457.00	19	1956	2003
ND-0202-2068	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	9.00	7645239.00	521930.00	19		2003
ND-0202-2068	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	30.00	7647247.00	521927.00	19		2003
ND-0202-2068	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	60.00	7646220.00	520448.00	19		2003
ND-0202-800093	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	31.00	7522986.00	535302.00	19		2000

Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Código de Expediente	Región	Comuna	Tipo Derecho	Naturaleza del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom	UTM Norte Captación (m)	UTM Este Captación (m)	Huso	Datum	Año
ND-0201-1596	Antofagasta	María Elena	Consumitivo	Subterránea	Permanente y Continuo	7.00	7516203.72	447211.81	19	1956	2000
NR-0202-1494	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	5.00	7511622.00	503528.00	19	1956	2000
ND-0202-1454	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Subterránea	Permanente y Continuo	35.00	7512280.00	504770.00	19	1956	0
UA-0201-1	Antofagasta	María Elena	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Discontinuo	74.17	7528687.00	441941.00	19		2004
VT-0202-1591	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	10.47	7518024.00	510218.00	19	1956	0
ND-0202-1061	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Subterránea	Permanente y Continuo	45.00	7516370.00	503227.00	19	1956	1998
NR-0202-1494	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	4.00	7511622.00	503528.00	19	1956	2000
NR-0202-1494	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	5.00	7511622.00	503528.00	19	1956	2000
NR-0202-325	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	65.00	7516553.00	591480.00	19	1956	1991
NR-0202-1380	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.30	7572480.00	528270.00	19	1956	1997
NR-0202-1374	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.10	7551440.00	575760.00	19		1997
NR-0202-1374	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	2.80	7551010.00	575500.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	5.50	7536450.00	570270.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	3.00	7536480.00	570170.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	2.60	7536500.00	570400.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.20	7536500.00	570130.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	4.60	7536060.00	571780.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	7.20	7536000.00	572000.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consumitivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	12.00	7535930.00	572725.00	19	1956	1997

Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Código de Expediente	Región	Comuna	Tipo Derecho	Naturaleza del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom	UTM Norte Captación (m)	UTM Este Captación (m)	Huso	Datum	Año
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	5.10	7535860.00	572725.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	3.70	7536035.00	573530.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	1.40	7536480.00	570340.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.10	7536480.00	570380.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.10	7536240.00	569520.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.10	7536250.00	569640.00	19		1997
NR-0202-1377	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.10	7536220.00	569600.00	19		1997
NR-0202-1387	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	10.20	7556160.00	571170.00	19	1956	1997
NR-0202-1387	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	6.80	7555250.00	570920.00	19	1956	1997
VT-0202-844	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	9.06	7514358.00	508075.00	19	1956	0
VT-0202-1327	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	27.33	7518024.00	510218.00	19	1956	0
VT-0202-1328	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	14.80	7518024.00	510218.00	19	1956	0
NR-0202-994	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	2.07	7597925.00	551730.00	19	1956	1995
NR-0202-995	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	16.22	7596920.00	557670.00	19	1956	1995
NR-0202-996	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	18.25	7656230.00	568195.00	19	1956	1995
NR-0202-996	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	12.58	7614515.00	565885.00	19	1956	1995
NR-0202-996	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.39	7595800.00	558400.00	19	1956	1995
ND-0202-1057	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	0.70	7515083.00	504057.00	19	1956	1995
ND-0202-1058	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	50.00	7515864.00	502771.00	19	1956	1995

Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Código de Expediente	Región	Comuna	Tipo Derecho	Naturaleza del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom	UTM Norte Captación (m)	UTM Este Captación (m)	Huso	Datum	Año
ND-0202-1059	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	0.50	7515513.00	504530.00	19	1956	1995
ND-0202-1060	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	47.00	7516070.00	505550.00	19	1956	1995
ND-0202-692	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	150.00	7569678.00	571544.00	19	1956	1994
ND-0202-723	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	40.00	7568679.00	571553.00	19	1956	1993
ND-0202-466	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	60.00	7568759.00	574098.00	18	1956	1993
ND-0202-466	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	135.00	7571703.00	575185.00	18	1956	1993
ND-0202-466	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	100.00	7570239.00	574665.00	18	1956	1993
ND-0201-31	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	2.68	7517660.00	443480.00	19	1956	1905
ND-0201-31	Antofagasta	María Elena	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	8.00	7517760.00	443470.00	19	1956	1905
NR-0202-325	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	65.00	7522803.00	594026.00	19	1956	1991
NR-0202-325	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	65.00	7531009.00	581704.00	19	1956	1991
ND-0202-5035	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	41.00	7564400.00	596800.00	19	1956	0
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	58.00	7564078.00	589391.00	19	1956	1990
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	7.00	7570448.00	565523.00	19	1956	1990
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	30.00	7563157.00	572767.00	19	1956	1990
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	90.00	7569175.00	569693.00	19	1956	1990
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	200.00	7569187.00	569683.00	19	1956	1990
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	220.00	7569216.00	577122.00	19	1956	1990
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	220.00	7571988.00	574819.00	19	1956	1990

Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Código de Expediente	Región	Comuna	Tipo Derecho	Naturaleza del Agua	Ejercicio del Derecho	Caudal Anual Prom	UTM		Este Captación (m)	Huso	Datum	Año
							Norte Captación (m)	Este Captación (m)				
ND-0202-215	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	200.00	7571692.00	575157.00	19	1956	1990	
ND-0201-7	Antofagasta	María Elena	No Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	10.00	7599400.00	446330.00	19	1956	1988	
ND-0202-2743	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	20.00	7387925.00	615000.00	19	1956	0	
ND-0202-2742	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	0.90	7527500.00	584450.00	19	1956	0	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	33.90	7673130.00	554560.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	1.50	7671540.00	555350.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	49.30	7671450.00	555320.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	1.80	7670445.00	553650.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	11.20	7673924.00	553540.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	16.20	7673775.00	552640.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	1.50	7673630.00	556210.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	1.50	7673665.00	556210.00	19	1956	1984	
ND-0202-2736	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Subterránea	Permanente y Continuo	3.40	7672165.00	556576.00	19	1956	1984	
UA-0202-806159	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial	Permanente y Continuo	150.00	7602081.00	583367.00			0	
UA-0202-809028	Antofagasta	Calama	Consuntivo	Superficial y Corriente	Permanente y Continuo	237.00	7566250.00	600925.00	19	1956	1990	

Fuente: Modificado de Dirección General de Aguas, (2019). Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas: <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>.

Anexo H

Resultado hidroquímico de muestras
superficiales.

Muestra		PSA	PSC	Descarga	PSD	PSE
X		504690	504615	504274	504088	496970
Y		7518454	7516730	7516825	7516959	7513676
Bicarbonato	mg HCO ₃ ⁻	244	1457.9	207.4	196.42	244
Cloruro	mg Cl/L	1695	7735	284	295	671
Nitrato	mg NO ₃ -N/L	58.3	<0,20	<0,20	2.69	19.8
Sulfato	mg SO ₄ /L	796	3686	140	145	339
Litio Disuelto (Li)	mg/L	3.2316	30.1808	0.6924	0.7285	1.2633
Boro Disuelto (B)	mg/L	15.3942	121.104	3.3337	3.5118	7.4802
Berilio Disuelto (Be)	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Aluminio Disuelto (Al)	mg/L	0.0022	0.0149	0.0162	0.0062	0.0025
Fosforo Disuelto (P)	mg/L	0.0199	1.7635	1.5044	1.3254	1.6331
Titanio Disuelto (Ti)	mg/L	<0,0004	0.0022	0.0005	<0,0004	<0,0004
Vanadio Disuelto (V)	mg/L	0.0459	0.0199	0.001	0.0025	0.0148
Cromo Disuelto (Cr)	mg/L	0.0057	0.0074	0.0011	0.0012	<0,0005
Manganeso Disuelto (Mn)	mg/L	0.0012	4.9862	0.0313	0.0808	0.0047
Cobalto Disuelto (Co)	mg/L	<0,0002	0.0043	0.0002	0.0002	0.0006
Niquel Disuelto (Ni)	mg/L	0.0004	0.012	0.0032	0.0032	0.0047
Cobre Disuelto (Cu)	mg/L	0.0024	0.0058	0.0072	0.0036	0.0139
Zinc Disuelto (Zn)	mg/L	0.0081	0.0384	0.0737	0.0436	0.022
Arsénico Disuelto (As)	mg/L	0.8401	11.8831	0.0172	0.0642	0.2909
Selenio Disuelto (Se)	mg/L	0.0417	0.0109	0.0003	<0,0002	0.0026
Estroncio Disuelto (Sr)	mg/L	6.8203	25.1507	0.541	0.5892	1.6746
Molibdeno Disuelto (Mo)	mg/L	0.2157	0.1925	0.0024	0.0025	0.0684
Plata Disuelta (Ag)	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cadmio Disuelto (Cd)	mg/L	0.0002	0.0002	<0,0002	<0,0002	0.0002
Estaño Disuelto (Sn)	mg/L	0.0011	0.0004	0.0013	0.0007	0.0008
Antimonio Disuelto (Sb)	mg/L	0.0017	0.1442	0.004	0.0059	0.016
Bario Disuelto (Ba)	mg/L	0.0399	0.1897	0.0131	0.0134	0.0191
Cerio Disuelto (Ce)	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Mercurio Disuelto (Hg)	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Talio Disuelto (Tl)	mg/L	<0,0003	0.0012	0.0014	0.0006	0.0004
Plomo Disuelto (Pb)	mg/L	0.0008	0.0039	0.0029	0.0014	0.0005
Bismuto Disuelto (Bi)	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Torio Disuelto (Th)	mg/L	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
Uranio Disuelto (U)	mg/L	0.0063	0.1947	<0,0003	0.0006	0.0025
Sodio Disuelto (Na)	mg/L	1398.2072	7589.7297	216.5917	227.3107	374.2178
Magnesio Disuelto (Mg)	mg/L	152.4765	894.0407	14.6072	14.9243	36.4554
Potasio Disuelto (K)	mg/L	108.9484	563.5675	31.8049	31.9104	43.2077
Calcio Disuelto (Ca)	mg/L	300.392	989.51	50.8623	51.747	133.5222
Hierro Disuelto (Fe)	mg/L	0.0122	0.1387	0.0439	0.064	0.0113
Silicio Disuelto (Si)	mg/L	34.2618	50.4083	37.7866	38.2178	38.8964
Silice Disuelta	mg SiO ₂ /L	--	--	--	--	
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	9	--	--	10	
Conductividad	(us/cm)	10300	--	--	2151	

Muestra		PSF	PSG	PSH	PF*
X		497427	496040	446042	500349
Y		7513344	7512923	7523061	7513665
Bicarbonato	mg HCO ₃ ⁻	373.32	339.16	455.06	539
Cloruro	mg Cl/L	2750	1974	1842	2380
Nitrato	mg NO ₃ -N/L	3.38	7.51	2.44	3.3
Sulfato	mg SO ₄ /L	381	395	211	372
Litio Disuelto (Li)	mg/L	4.7171	3.2643	4.3337	8.634
Boro Disuelto (B)	mg/L	18.717	14.4391	12.314	42.4908
Berilio Disuelto (Be)	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Aluminio Disuelto (Al)	mg/L	0.0213	0.0027	0.0081	0.0189
Fosforo Disuelto (P)	mg/L	0.02	0.733	0.7223	0.0564
Titanio Disuelto (Ti)	mg/L	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0.0005
Vanadio Disuelto (V)	mg/L	0.0209	0.0163	0.01	0.0422
Cromo Disuelto (Cr)	mg/L	<0,0005	0.0005	<0,0005	0.0009
Manganeso Disuelto (Mn)	mg/L	0.0008	0.0039	0.0027	0.0031
Cobalto Disuelto (Co)	mg/L	<0,0002	0.0002	0.0002	<0,0002
Niquel Disuelto (Ni)	mg/L	0.0005	0.0021	0.0038	0.0013
Cobre Disuelto (Cu)	mg/L	0.0009	0.0059	0.0019	0.0049
Zinc Disuelto (Zn)	mg/L	0.0113	0.0145	0.0059	0.0155
Arsénico Disuelto (As)	mg/L	1.5106	1.0392	1.6326	3.1575
Selenio Disuelto (Se)	mg/L	0.0019	0.0025	0.0012	0.0048
Estroncio Disuelto (Sr)	mg/L	6.5063	4.6383	6.6537	12.6946
Molibdeno Disuelto (Mo)	mg/L	0.0122	0.0353	0.0336	0.0239
Plata Disuelta (Ag)	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cadmio Disuelto (Cd)	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Estaño Disuelto (Sn)	mg/L	0.0006	0.0005	0.0005	0.0015
Antimonio Disuelto (Sb)	mg/L	0.0677	0.0441	0.0315	0.1333
Bario Disuelto (Ba)	mg/L	0.0544	0.0426	0.0488	0.1175
Cerio Disuelto (Ce)	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Mercurio Disuelto (Hg)	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Talio Disuelto (Tl)	mg/L	0.0008	0.0004	0.0005	0.0012
Plomo Disuelto (Pb)	mg/L	0.0013	0.0008	0.0007	0.0046
Bismuto Disuelto (Bi)	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Torio Disuelto (Th)	mg/L	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
Uranio Disuelto (U)	mg/L	0.0099	0.0058	0.0048	0.0238
Sodio Disuelto (Na)	mg/L	1190.9928	868.2923	1242.9815	2394.8928
Magnesio Disuelto (Mg)	mg/L	122.3633	86.8601	127.0841	225.1174
Potasio Disuelto (K)	mg/L	85.4648	69.2153	91.9492	164.0491
Calcio Disuelto (Ca)	mg/L	248.9457	213.9794	287.6447	570.5333
Hierro Disuelto (Fe)	mg/L	0.0064	0.0081	0.0191	0.0159
Silicio Disuelto (Si)	mg/L	44.7713	42.9785	43.1658	84.5605
Silice Disuelta	mg SiO ₂ /L	--	--	--	117
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	<5,0	17	<5,0	5250
Conductividad	(us/cm)	8880	6810	9050	--

Anexo I

Resultado hidroquímico de muestras
subterráneas.

Muestra		PA	PC	PD	PH	PI	PJ
X		504228	504615	504088	446042	445586	445397
Y		7518079	7516730	7516959	7523061	7522958	7523404
Bicarbonato	mg HCO3-	1879	1354	2757	3684	2342	1196
Cloruro	mg Cl/L	2564	2510	721	2948	3229	6177
Nitrato	mg NO3-N/L	<0,20	60.8	0.88	<0,20	<0,20	<0,20
Sulfato	mg SO4/L	187	2495	219	353	290	747
Litio Disuelto (Li)	mg/L	4.3916	5.3185	1.571	5.3039	6.4313	11.9518
Boro Disuelto (B)	mg/L	28.9805	38.9913	10.8321	29.9599	34.1356	36.5678
Berilio Disuelto (Be)	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006
Aluminio Disuelto (Al)	mg/L	0.0035	0.1379	0.0034	0.0029	0.0023	0.0419
Fosforo Disuelto (P)	mg/L	0.3762	0.3051	0.1793	0.0901	0.0389	0.1607
Titanio Disuelto (Ti)	mg/L	<0,0004	0.0011	0.0004	0.0009	0.0005	0.0017
Vanadio Disuelto (V)	mg/L	0.0139	0.049	0.1887	0.0029	0.0064	0.0748
Cromo Disuelto (Cr)	mg/L	0.0005	0.002	0.0006	0.0005	<0,0005	0.0006
Manganeso Disuelto (Mn)	mg/L	0.4581	2.7632	1.4351	0.1791	0.7207	4.4765
Cobalto Disuelto (Co)	mg/L	0.0006	0.0064	0.0057	0.0002	0.0004	0.0042
Niquel Disuelto (Ni)	mg/L	0.0013	0.0166	0.0076	0.0027	0.0009	0.0069
Cobre Disuelto (Cu)	mg/L	0.0021	0.0528	0.0037	0.001	0.0007	0.0222
Zinc Disuelto (Zn)	mg/L	0.0087	0.0867	0.0192	0.008	0.0077	0.0336
Arsénico Disuelto (As)	mg/L	8.0964	1.0633	1.6085	3.1064	1.3709	5.8825
Selenio Disuelto (Se)	mg/L	0.0022	0.005	0.0017	0.0008	0.0006	0.0031
Estroncio Disuelto (Sr)	mg/L	9.7424	10.6408	2.0633	7.2612	9.0643	15.6008
Molibdeno Disuelto (Mo)	mg/L	0.0985	0.2181	0.0885	0.0056	0.0383	0.0202
Plata Disuelta (Ag)	mg/L	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cadmio Disuelto (Cd)	mg/L	<0,0002	0.0011	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0.001
Estaño Disuelto (Sn)	mg/L	0.0006	0.0004	0.0005	0.0005	0.0008	0.0006
Antimonio Disuelto (Sb)	mg/L	0.0028	0.1758	0.7549	0.0077	0.0243	0.1466
Bario Disuelto (Ba)	mg/L	0.155	0.0662	0.1214	0.1302	0.2013	0.166
Cerio Disuelto (Ce)	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Mercurio Disuelto (Hg)	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Talio Disuelto (Tl)	mg/L	0.0004	0.0026	0.0014	<0,0003	<0,0003	0.001
Plomo Disuelto (Pb)	mg/L	0.0005	0.0026	0.0044	0.0016	0.0009	0.0028
Bismuto Disuelto (Bi)	mg/L	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Torio Disuelto (Th)	mg/L	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,0010
Uranio Disuelto (U)	mg/L	0.0538	0.1015	0.0461	0.0017	0.0087	0.0035
Sodio Disuelto (Na)	mg/L	1622.5082	1418.7937	495.506	1413.8545	1815.8357	3334.9544
Magnesio Disuelto (Mg)	mg/L	210.5889	176.8659	50.3215	141.4576	173.1601	325.2129
Potasio Disuelto (K)	mg/L	127.2698	161.5687	43.5578	115.6797	140.0365	236.0668
Calcio Disuelto (Ca)	mg/L	363.9213	878.7692	121.388	300.9682	311.4317	607.5875
Hierro Disuelto (Fe)	mg/L	0.2248	0.0905	0.017	0.099	0.0604	0.0651
Silicio Disuelto (Si)	mg/L	39.7025	47.773	36.5734	46.9024	41.1025	41.5567
Silice Disuelta	mg SiO2/L	131	106	124	130	127	127
Solidos Disueltos Totales	mg/L	7850	7557	2650	8150	7950	13900
Conductividad	(us/cm)	10000	2700	3000	8780	--	27600