

**Estudios Hidrogeológicos  
Complementarios Control Infiltraciones  
Depósitos de Arenas Quebrada  
Caserones  
Proyecto Caserones**

**Rev. A**

**Preparado para**

**Minera Lumina Copper Chile S.A.**

**Preparado por**



**Enero, 2011**

# **Estudios Hidrogeológicos Complementarios Control Infiltraciones Depósitos de Arenas Quebrada Caserones Proyecto Caserones Rev. A**

**Minera Lumina Copper Chile S.A.**

**Av. Andrés Bello 2687 Piso 4, Las Condes**

**Número de Proyecto 02-2161-03**

**SRK Consulting (Chile)**

Av. Apoquindo 4001, Piso 7º  
Las Condes, Santiago  
Chile

Tel: +(56 2) 4890 800

Fax: +(56-2) 4890 801

santiago@srk.cl

[www.srk.cl](http://www.srk.cl)

**Enero, 2011**

Autorizado por:



Beatriz Labarca  
Jefe de proyecto

Autores: Fernando Perez; Claudia Martinez

## Resumen Ejecutivo

El Proyecto Caserones de propiedad de Minera Lumina Copper Chile S.A (MLCC), obtuvo en enero de 2010 la aprobación de su Estudio de Impacto Ambiental mediante la Resolución de Calificación Ambiental 013/2010. En ella se comprometió a realizar algunos estudios complementarios para validar los diseños planteados a nivel de Ingeniería Básica y avanzar con la ingeniería de detalle para la construcción de este proyecto minero.

Dentro de los compromisos adquiridos con la autoridad ambiental, se encuentran los del ámbito hidrogeológico asociados con el control de las potenciales filtraciones desde los dos depósitos identificados como Depósito de Lamas (Quebrada La Brea) y Depósito de Arenas (Quebrada Caserones).

Para validar los diseños de los depósitos mencionados, se ha ejecutado una intensa campaña de terreno de colección de datos hidrogeológicos en los sectores agua abajo de las presas de cada depósito, lo que ha permitido complementar el modelo hidrogeológico anteriormente planteado y con ello diseñar una barrera hidráulica eficiente que garantice la colección de las aguas subterráneas con calidades anómalas que se infiltren y pudieran generar impacto hacia los cuerpos de agua en dirección aguas abajo.

### Trabajos de Terreno en sector de quebrada Caserones

Los trabajos de terreno consistieron en:

- Campaña geofísica con el Método Nano-TEM (1400 m en 5 perfiles) con sondeos espaciados cada 20 y 50 m;
- Perforación de 6 pozos para realizar pruebas de bombeo aguas abajo de la presa;
- Perforación de 4 pozos de observación aguas abajo de la presa;
- Perforación y habilitación de 2 piezómetros más la habilitación de 10 sondajes geotécnicos en las partes altas de la quebrada Caserones para controlar los niveles.
- Realización de pruebas de bombeo individuales, de caudal variable y constante, en los 5 pozos de bombeo perforados aguas abajo de la presa;
- Prueba de bombeo simultánea de larga duración en los 3 pozos de bombeo exploratorio;
- Control de niveles en forma periódica;
- Colección de muestras de agua para análisis químico;
- Control de niveles de agua en forma periódica;
- Verificación de rasgos estructurales en el área;

### Unidades Hidrogeológicas

Considerando esta información se ha complementado el modelo hidrogeológico en donde se reconocen 6 unidades hidrogeológicas en el sector de Quebrada Caserones:

**Qf - Depósitos fluviales:** Depósitos no consolidados compuestos por gravas y arenas pobremente consolidados, que se ubican principalmente en el curso del río Ramadillas y poseen potencias entre 30 y 40m con niveles de agua subterránea entre 3 y 18m de profundidad, en sectores muy cercanos al nivel del río. Las permeabilidades registradas son del orden de 10 a 30 m/d y las transmisividades varían entre 330 y 760 m<sup>2</sup>/d.

**Qa - Depósitos aluviales:** Se encuentran en las partes más bajas de las quebradas Caserones y sus afluentes interdigitándose con los depósitos del río Ramadillas. Los espesores varían entre 10m y 48m

y se encuentra agua subterránea entre 10 y 20m de profundidad. Las pruebas de permeabilidad realizadas indican valores entre  $1,73$  y  $3,46 \times 10^{-02}$  m/d.

**Qc - Depósitos coluviales:** Corresponden principalmente a sedimentos coluviales, de remociones en masa y otros depósitos no consolidados de baja permeabilidad. Poseen en general pocos metros de espesor, pero pueden alcanzar hasta 20m en sectores donde las quebradas son más anchas. Los niveles de agua subterránea se encuentran en la mitad inferior de esta unidad o más profundos que esta. La conductividad hidráulica, un poco menor que la de los aluvios, presenta valores entre  $1,21$  y  $4,15 \times 10^{-03}$  m/d.

**RSV - Rocas Sedimentarias y Volcánicas:** Correspondiendo a una serie de afloramientos dispersos de rocas volcánicas, sub-volcánicas y volcanoclásticas de permeabilidades bajas. Aparecen sólo en la parte norte de la quebrada Caserones.

**RIa - Rocas Intrusivas alteradas:** A esta unidad corresponden las rocas intrusivas meteorizadas, alteradas y/o fracturadas en distintos grados, que corresponden a la parte más superficial de los intrusivos. Se han encontrado coberturas de 20 a 40m sobre rocas más compactas, con permeabilidades entre  $8,64 \times 10^{-01}$  a  $6,39 \times 10^{-04}$ , y un promedio de  $1,52 \times 10^{-01}$  m/d.

**RI - Rocas Intrusivas:** Se agrupan en esta unidad las rocas intrusivas frescas, consideradas de permeabilidad muy baja a nula.

## Dinámica Hidrogeológica

El sistema subterráneo en el sector de la quebrada Caserones está constituido por un acuífero freático que parte desde las más altas cumbres en roca intrusivas alteradas y se va mezclando con depósitos coluviales y aluviales quebrada abajo, aumentando su permeabilidad.

La recarga del acuífero se produce por la infiltración directa de las precipitaciones caídas en el área de su cuenca hidrográfica, la que ocurre principalmente en forma de nieve. Los flujos están estrechamente relacionados a la topografía del sector; con pendientes altas en los cerros y más planas en las quebradas con más relleno y existe concordancia entre la cuenca hidrológica superficial y la subterránea.

## Modelo Numérico

Se ha construido un modelo numérico utilizando el código Modflow con la interface gráfica Visual Modflow 4.4, que representa la dinámica de las aguas subterráneas en el área del depósito de Arenas, considerando la información estratigráfica, de recarga, permeabilidades, direcciones de flujo, gradiente hidráulico, coeficientes de almacenamiento, etc. Para la calibración del estado transiente se ha utilizado los descensos obtenidos en múltiples puntos de observación durante la prueba de bombeo simultánea de larga duración.

El modelo fue construido a partir de los supuestos de infiltración señalados en el EIA, que entre otros aspectos estimaron que en la eventualidad de que hubiese un episodio de filtración, las aguas que no serían captadas por la zanja cortafuga serían de un caudal menor a 1 l/s (Ref.2). Por tanto, esta situación ha sido simulada mediante la inyección de este caudal distribuida en 3 pozos, por donde se ingresa una carga unitaria de contaminante. Se simularon escenarios de infiltración de 1 l/s y de 2 l/s.

Para capturar este flujo excedente, se ha simulado un campo de 2 pozos distribuidos en forma transversal al flujo que permite bombear un caudal total de 1 y 2 l/s, constituyendo una barrera



hidráulica con una eficiencia tal que permite la mantención de la calidad natural del agua antes de la confluencia de la quebrada Caserones en el río Ramadillas.

## Conclusiones

Este modelo conceptual no difiere de los datos ya presentados en el EIA. Por otra parte, MLCC ha propuesto una nueva ubicación para la barrera hidráulica, que al estar inmediatamente aguas abajo de la zanja cortafuga, hace más eficiente el sistema de captura de las filtraciones. Estos dos puntos indicarían que el sistema es adecuado para la captura de las eventuales filtraciones.

La información recopilada en la presente campaña es consistente con lo encontrado en los trabajos de terreno anteriores, por lo que la conceptualización hidrogeológica del sistema no sufre grandes variaciones sino que se complementa y refina.

Además el levantamiento estructural permite señalar que no existen fallas estructurales mayores que pudieran generar canales preferenciales de flujo hacia otras quebradas.

El compromiso de mantener las condiciones naturales de las aguas del sector implica que en el caso de que la calidad natural del agua cumpla la norma de agua para riego (NCh 1.333), esta se mantenga bajo la norma. En el caso de que naturalmente se excedan dichos límites, el sistema garantiza que ante eventuales infiltraciones, las concentraciones sean menores o igual al promedio de línea base de estos parámetros.

La conceptualización actualizada del sistema hidrogeológico, permitió refinar los límites horizontales y verticales de las unidades y mejorar la estimación de los parámetros hidráulicos, con lo cual se pudo reformular un modelo numérico más actualizado.

El modelo presentado en este informe representa el sistema acuífero en cuanto a sus características hidráulicas, condiciones de borde, recargas y niveles, tanto en situación estacionaria como al reproducir de bombeo. Consecuentemente, las simulaciones predictivas que se presentan son altamente confiables.

Se simularon 4 escenarios de contaminación, con inyección de 1 y 2 l/s de solución contaminada por 1 y 3 años, y, extrayendo 1 y 2 l/s con la barrera hidráulica. En todos los escenarios simulados se cumple con el objetivo de cero contaminación. Esto ocurre antes de la confluencia de la quebrada Caserones con el río Ramadillas, es decir antes que ocurra dilución por la adición de las aguas subterráneas del río Ramadillas.

Finalmente, la conjunción y actualización del Modelo Conceptual, el Modelo Numérico, el diseño del Depósito de Arenas con el Sistema de Monitoreo y Plan de Remediación ya mencionado, más la nueva y más eficiente ubicación de la barrera hidráulica permite señalar que ante un episodio de infiltración simulada durante 1 año, el bombeo en la barrera permite cumplir el objetivo de mantener las condiciones naturales del sistema.

Todo lo anterior permite, por un lado, validar las premisas con las que se ha diseñado el Sistema de Monitoreo y Plan de Remediación del Depósito de Arenas y por otro, garantizar que ante eventuales episodios de infiltración desde el depósito de Arenas, no se generará impacto ambiental sobre la componente calidad de las aguas.

# Tabla de Contenido

RESUMEN EJECUTIVO.....	II
TABLA DE CONTENIDO .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABLAS .....	VIII
APÉNDICES .....	VIII
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	3
1.2 ANTECEDENTES.....	3
1.3 ESTRUCTURA DEL INFORME .....	3
<b>2 VISIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>5</b>
<b>3 MARCO FÍSICO .....</b>	<b>9</b>
3.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO .....	9
3.2 CLIMA Y METEOROLOGÍA.....	11
3.2.1 <i>Clima</i> .....	11
3.2.2 <i>Meteorología</i> .....	12
3.3 GEOMORFOLOGÍA .....	13
3.3.1 <i>Geomorfología Regional</i> .....	13
3.3.2 <i>Geomorfología Local</i> .....	14
3.4 HIDROLOGÍA .....	15
3.4.1 <i>Red Hidrográfica</i> .....	16
3.4.2 <i>Pluviometría</i> .....	16
3.4.3 <i>Fluviometría</i> .....	17
3.4.4 <i>Análisis Hidrológico sector Caserones</i> .....	19
3.5 GEOLOGÍA REGIONAL.....	21
3.5.1 <i>Rocas Estratificadas</i> .....	21
3.5.2 <i>Rocas Intrusivas</i> .....	22
3.5.3 <i>Depósitos No Consolidados</i> .....	23
3.5.4 <i>Geología Estructural</i> .....	25
3.5.5 <i>Fallas</i> .....	26
3.5.6 <i>Fracturas y Diaclasas</i> .....	27
3.6 ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS .....	30
3.6.1 <i>Pozos de Exploración SITAC</i> .....	30
3.6.2 <i>Sondajes Geotécnicos Arcadis</i> .....	30
3.6.3 <i>Sondajes Schlumberger</i> .....	31
3.6.4 <i>Unidades Hidrogeológicas y Flujo Subterráneo</i> .....	31
3.7 CALIDAD QUÍMICA DE LOS RELAVES .....	32
3.7.1 <i>Metodología de Análisis</i> .....	32
3.7.2 <i>Resultados</i> .....	32
<b>4 TRABAJOS DE TERRENO.....</b>	<b>35</b>
4.1 SONDajes.....	36
4.1.1 <i>Generalidades</i> .....	36
4.1.2 <i>Estratigrafía</i> .....	40
4.2 PRUEBAS DE BOMBEO.....	41
4.2.1 <i>Diseño de las Pruebas</i> .....	41
4.2.2 <i>Ejecución Pruebas Individuales</i> .....	42
4.2.3 <i>Ejecución Prueba Simultánea</i> .....	47
4.2.4 <i>Interpretación de las Pruebas de Bombeo</i> .....	49

4.3	GEOFÍSICA .....	59
4.3.1	<i>Metodología</i> .....	59
4.3.2	<i>Resultados e Interpretación</i> .....	59
4.4	LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL .....	63
4.4.1	<i>Metodología</i> .....	63
4.4.2	<i>Resultados</i> .....	63
4.5	CONTROL DE NIVELES .....	65
4.6	HIDROQUÍMICA .....	70
4.6.1	<i>Tomas de muestra y validación de los análisis</i> .....	70
4.6.2	<i>Análisis de información hidroquímica</i> .....	73
4.6.3	<i>Conclusiones hidroquímica</i> .....	75
<b>5</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA .....</b>	<b>76</b>
5.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	76
5.1.1	<i>Qf Depósitos fluviales</i> .....	76
5.1.2	<i>Qa Depósitos aluviales</i> .....	76
5.1.3	<i>Qc Depósitos coluviales</i> .....	77
5.1.4	<i>RSV Rocas Sedimentarias y Volcánicas</i> .....	77
5.1.5	<i>RI/Rla Rocas Intrusivas</i> .....	77
5.2	PIEZOMETRÍA .....	78
5.3	SÍNTESIS MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL .....	79
<b>6</b>	<b>MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>83</b>
6.1	DOMINIO Y GRILLA .....	83
6.2	SIMULACIÓN DE CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS .....	85
6.2.1	<i>Simulación de Unidades Hidrogeológicas</i> .....	85
6.2.2	<i>Simulación de Entradas y Salidas por Flujos Subterráneos</i> .....	89
6.2.3	<i>Simulación de Recarga por Precipitación</i> .....	89
6.2.4	<i>Simulación de Pozos de Bombeo</i> .....	90
6.3	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	90
6.3.1	<i>Calibración Estacionaria</i> .....	90
6.3.2	<i>Calibración Transiente</i> .....	94
6.4	SIMULACIONES PREDICTIVAS Y MODELO DE TRANSPORTE.....	97
6.4.1	<i>Simulación del caudal infiltrado</i> .....	97
6.4.2	<i>Simulación de las concentraciones químicas en el flujo</i> .....	97
6.4.3	<i>Escenarios de Simulación</i> .....	99
6.4.4	<i>Resultados Modelo Transporte</i> .....	101
6.5	CONCLUSIONES DEL MODELO NUMÉRICO .....	107
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>110</b>

## Lista de Figuras

Figura 2-1	Ubicación de Quebradas La Brea y Caserones (Ref.15) .....	5
Figura 2-2	Barrera Hidráulica en sector Caserones.....	7
Figura 3-1	Ubicación General del Proyecto.....	9
Figura 3-2	Ubicación de las Instalaciones Principales y Áreas del Proyecto .....	10
Figura 3-3	Subunidades Geomorfológicas para la Región de Atacama .....	14
Figura 3-4	Cuencas Hidrográficas y Morfología Distrital.....	15
Figura 3-5	Ubicación de Estaciones Pluviométricas.....	16
Figura 3-6	Relación entre altitud y precipitación media anual (Ref. 11).....	17
Figura 3-7	Ubicación de Estaciones Fluviométricas.....	18
Figura 3-8	Caudal Medio Anual por Estación.....	18
Figura 3-9	Mapa Geológico Regional .....	28
Figura 3-10	Diagramas de Schmidt y de Roseta del patrón estructural del sector Caserones (Ref.9).....	29
Figura 4-1	Esquema ubicación pozos de bombeo y observación en Sector Quebrada Caserones.....	38
Figura 4-2	Esquema ubicación piezómetros (color verde) en Sector Quebrada Caserones. ....	39
Figura 4-3	Equipo de bombeo instalado durante bombeo constante de pozo PBC-01. ....	42
Figura 4-4	Descenso en pozo PBC-01 durante su bombeo constante del 1 de noviembre. ....	44
Figura 4-5	Descenso en pozo PBC-01 durante su bombeo constante del 14 de noviembre. ....	44
Figura 4-6	Descenso en pozo PBC-02 durante su bombeo constante. ....	45
Figura 4-7	Descenso en pozo PBC-03 durante su bombeo constante. ....	46
Figura 4-8	Descenso en pozo PBC-08 durante su bombeo constante. ....	47
Figura 4-9	Caudales bombeados durante la prueba simultánea. ....	48
Figura 4-10	Descenso en pozos de bombeo, durante el bombeo simultáneo. ....	49
Figura 4-11	Descenso en pozos de observación, durante el bombeo simultáneo. ....	57
Figura 4-12	Descensos relativos ocurridos en los pozos durante el bombeo simultáneo.....	58
Figura 4-13	Planta de perfiles geofísicos sector Caserones.....	61
Figura 4-14	Secciones de resistividad en sector Caserones, de las líneas obtenidas con los modelos de capas múltiples de la inversión ‘smooth model’ .....	62
Figura 4-15	Ubicación de Puntos de Control en Quebrada Caserones.....	63
Figura 4-16	Estereograma de polos y roseta de orientación para los puntos de control en el sector Caserones y Ramadillas64	
Figura 4-17	Niveles Piezométricos en Sector Caserones .....	65
Figura 4-18	Niveles freáticos en pozo construidos en sector Caserones.....	66
Figura 4-19	Ubicación pozos geotécnicos en Sector Caserones. ....	67
Figura 4-20	Ubicación Niveles Piezométricos en Pozos Geotécnicos Sector Caserones.....	68
Figura 4-21	Diagrama de Piper .....	73
Figura 4-22	Diagramas de Stiff .....	74
Figura 5-1	Mapa Hidrogeológico .....	80
Figura 5-2	Perfil Hidrogeológico 1 .....	81
Figura 5-3	Perfil Hidrogeológico 2 .....	82
Figura 6-1	Grilla y Dominio del Modelo.....	84
Figura 6-2	Distribución de de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 1 .....	86
Figura 6-3	Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 2 .....	87
Figura 6-4	Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 3 .....	88
Figura 6-5	Ubicación de condiciones de borde para las tres capas. ....	89
Figura 6-6	Ubicación de pozos de observación de niveles.....	91
Figura 6-7	Gráfico Calibración Niveles Estado Estacionario.....	92
Figura 6-8	Curvas Equipotenciales Estado Estacionario.....	93
Figura 6-9	Calibración del Caudal de Bombeo Simultánea de Larga Duración .....	94
Figura 6-10	Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación cercanos a batería de bombeo ....	95
Figura 6-11	Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación distantes a batería de bombeo....	96
Figura 6-12	Ubicación pozos inyección, remediación y de observación de calidad Modelo de Transporte.....	100
Figura 6-13	Concentración vs Tiempo Escenario 1 – Línea 2 y Línea 3 .....	102
Figura 6-14	Concentración vs Tiempo Escenario 2 – Línea 2 y Línea 3 .....	103

Figura 6-15	Concentración vs Tiempo Escenario 3 – Línea 2 y Línea 3 .....	104
Figura 6-16	Concentración vs Tiempo Escenario 4 – Línea 2 y Línea 3 .....	105

## Lista de Tablas

Tabla 2-1	Resumen cumplimiento RCA.....	8
Tabla 3-1	Coordenadas Rajo Minero (Polígono) (PSAD 56) .....	9
Tabla 3-2	Variables Meteorológicas Estación Curva Negra.....	12
Tabla 3-3	Variables Meteorológicas Estación Campamento .....	13
Tabla 3-4	Parámetros Morfológicos en cuencas del área del Proyecto .....	15
Tabla 3-5	Precipitación Media Anual y altitud asociada (Ref.11).....	17
Tabla 3-6	Caudales Medios Diarios Máximos T = 10, 20, 50, 100 y 200 años [m <sup>3</sup> /s].Quebrada Caserones aguas arriba confluencia río Ramadillas (Ref.11) .....	19
Tabla 3-7	Calidad de Aguas del Relave.....	33
Tabla 3-8	Balance Iónico de las muestras .....	34
Tabla 4-1	Pozos Perforados en Sector Quebrada Caserones .....	37
Tabla 4-2	Resumen Perforación y Habilitación Pozos Sector Quebrada Caserones.....	37
Tabla 4-3	Resumen Pruebas de Bombeo Realizadas .....	43
Tabla 4-4	Bombeo simultaneo del 22 de noviembre de 2010. ....	48
Tabla 4-5	Parámetros hidráulicos obtenidos en bombeo constante del PBC-01. ....	51
Tabla 4-6	Parámetros hidráulicos obtenidos en bombeo constante del PBC-02. ....	52
Tabla 4-7	Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba constante del PBC-03. ....	53
Tabla 4-8	Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba constante del PBC-06. ....	54
Tabla 4-9	Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba constante del PBC-08. ....	55
Tabla 4-10	Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba simultánea. ....	56
Tabla 4-11	Valores de T (m <sup>2</sup> /día) y K (m/día) obtenidos por pozo.....	57
Tabla 4-12	Descensos máximos durante bombeo simultaneo del 22 de noviembre de 2010. ....	58
Tabla 4-13	Pozos con registro histórico de niveles en Caserones.....	65
Tabla 4-14	Pozos geotécnicos campaña 2010 en Caserones .....	67
Tabla 4-15	Mediciones de nivel en sondajes geológicos. ....	69
Tabla 4-16	Parámetros de Calidad de Agua In Situ en pozos durante sus pruebas constantes. ....	70
Tabla 4-17	Parámetros de Calidad de Agua In Situ en pozos durante prueba simultánea. ....	70
Tabla 4-18	Resultados Hidroquímicos de Laboratorio .....	71
Tabla 4-19	Resultados Balance Iónico de análisis hidroquímicos. ....	73
Tabla 5-1	Resumen parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica .....	78
Tabla 5-2	Niveles estáticos considerados para Isopiezas.....	79
Tabla 6.1	Conductividad Hidráulica Calibrada .....	85
Tabla 6-2	Balance de Masa Global.....	94
Tabla 6.3	Calidad de las Aguas usadas en el Modelo .....	98
Tabla 6-4	Calidad de las aguas usadas en el Modelo.....	106

## Apéndices

Apéndice I	Aspectos Relevantes de la RCA Comprometidos.
Apéndice II	Antecedentes Hidrológicos e Hidrogeológicos.
Apéndice III	Estratigrafía y Habilitación de pozos campaña 2010.
Apéndice IV	Pruebas de Bombeo.
Apéndice V:	Estudio Geofísico.
Apéndice VI	Control de Niveles.
Apéndice VII	Certificados Laboratorio de la Calidad de las Aguas.
Apéndice VIII	Permeabilidades Unidades Hidrogeológicas.

# 1 Introducción

El 13 de enero de 2010, se dio la aprobación al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) asociado con el proyecto minero Caserones perteneciente a Minera Lumina Copper S.A (MLCC), mediante la Resolución Exenta 013/2010 de la COREMA de la Región de Atacama.

El proyecto minero Caserones, se ubica en la cordillera de la región de Atacama (ver **Figura 3-1**), en las nacientes del río Copiapó. Es un yacimiento tipo pórfido cuprífero en donde se proyecta la producción de cobre mediante proceso de lixiviación y de flotación. La producción estimada es de 1.047 millones de toneladas con ley de cobre de 0,34 % y 126 ppm de Molibdeno.

El proyecto considera las siguientes obras de infraestructura minera:

- Rajo
- Chancado y Molienda
- Planta de concentrado
- Planta de SX-EW
- Depósito de Lastre
- Pilas de Lixiviación
- Depósito de Arenas y Lamas del Relave
- Lamaducto
- Caminos
- Campamento
- Etc.

En la actualidad el proyecto se encuentra en la etapa de ingeniería de detalle, para lo cual se ha programado algunos trabajos complementarios de terreno que permitirán validar los diseños anteriores.

Los relaves provenientes del proceso de flotación, serán cicloneados para separar la fracción fina (lamas) de la fracción gruesa (arenas). Las arenas descargadas con una concentración de sólidos en peso del 70%, serán dispuestas gravitacionalmente en la quebrada Caserones conformando el denominado Depósito de Arenas. Las lamas descargadas posteriormente a un proceso de espesamiento, con una concentración de sólidos en peso del 65%, serán transportadas gravitacionalmente por tuberías y canaletas que atravesarán un túnel para ser dispuestas en la quebrada La Brea conformando el Depósito de Lamas. De este modo, el proyecto Caserones contará con un depósito en cada quebrada, el de lamas en Quebrada La Brea y el de arenas en Quebrada Caserones. (Ver **Figura 3-2**).

El diseño a nivel básico de estas obras contempla una serie de medidas para el manejo de las potenciales infiltraciones que percolarían hacia el sistema acuífero infra yacente. Algunas de estas medidas son:

- Sistemas de clasificación de los relaves provenientes del proceso de flotación y de espesamiento de manera de recuperar el máximo de agua en la planta y así disponer los relaves en su lugar de depositación con la menor agua posible.
- Diseño de un sistema de desvío con captaciones en las quebradas correspondientes orientadas a captar aguas superficiales y sub superficiales, de manera de evitar el contacto de aguas naturales con los depósitos de relaves.

- Diseño de un robusto sistema de drenes en el muro del embalse de lamas y un sistema similar en el depósito de arenas que permitirán colectar aguas hacia un sistema de sentinas que recirculará el agua captada a los procesos.
- Carpeta impermeable en la cara aguas arriba del muro en el depósito de lamas.
- Diseño de una zanja cortafuga excavada en todo el material no consolidado (aluvios) y que atraviesa toda la sección de la quebrada, de manera de que sea capaz de interceptar cualquier flujo que pase los sistemas anteriores y por lo tanto impida que estos puedan migrar fuera de las zonas de control del proyecto.

Sin embargo, anteponiéndose a la ocurrencia de eventos que se escapen a todas las medidas de control mencionadas, MLCC considera como obras de contingencia la construcción de pozos de monitoreo para controlar la calidad de las aguas que escurren subterráneamente en dirección aguas abajo de cada depósito y la construcción de una barrera hidráulica conformada por una batería de pozos que se activará con ocasión a dicha contingencia. Esto permitirá la captura de las aguas que pudieran tener consecuencias ambientales adversas en términos de la calidad en dirección aguas abajo del proyecto.

Para determinar la ubicación de los pozos de contingencia, MLCC desarrolló trabajos de exploración hidrogeológica, junto con la formulación de un modelo conceptual de la dinámica de las aguas subterráneas aguas abajo de cada depósito, lo que permitió formular un modelo numérico para evaluar la eficiencia de dicha batería de pozos, antecedentes presentados en el EIA.

En la resolución de calificación ambiental emitida por la autoridad, MLCC se comprometió a realizar algunos trabajos hidrogeológicos complementarios para validar algunos temas en donde aún concurrían algunas incertidumbres por parte de la autoridad. Es así que el objetivo principal de estos trabajos complementarios de hidrogeología es validar los diseños del sistema de pozos de contingencia para los depósitos del Proyecto.

Se ha confeccionado dos reportes independientes: uno para la quebrada La Brea – Depósitos de Lamas y otro para la quebrada Caserones – Depósito de Arenas, en donde se reúne los antecedentes de todos los trabajos complementarios realizados desde enero de 2010 a la fecha, para dar cumplimiento a lo comprometido con la autoridad en los temas hidrogeológicos.

El presente reporte corresponde a los estudios realizados en la quebrada Caserones.

## 1.1 Objetivos

El objetivo general es dar cumplimiento a los compromisos, en los temas hidrogeológicos de los depósitos de lamas y arenas del proyecto Caserones, que fueron hechos con ocasión de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA, resumen se encuentra en el **Apéndice I**) y finalmente validar los diseños presentados en el EIA para el control de infiltraciones y, en caso que se requieran, presentar las modificaciones respectivas.

En particular, se listan los alcances específicos principales de esta campaña complementaria de hidrogeología:

- Levantar información en terreno (geofísica, perforación de pozos, control de niveles, geología estructural, etc.)
- Actualizar el modelo hidrogeológico conceptual para el depósito de Lamas y el depósito de Arenas en el sector bajo la presa.
- Revisar y validar cada modelo de simulación numérico anteriormente planteado a la luz de los nuevos datos.
- Revisar los planes de contingencia asociados con las infiltraciones de los depósitos de relaves.
- Actualizar la piezometría del área del proyecto.

## 1.2 Antecedentes

La mayor cantidad de antecedentes hidrogeológicos corresponden a los estudios realizados por la empresa SITAC, los que constituyeron en forma íntegra parte del EIA. Dentro de estos datos se encuentra información estratigráfica, geofísica, pruebas de bombeo, niveles piezométricos, modelo numérico de flujo y transporte, etc.

Además, existen otros estudios geotécnicos realizados por ARCADIS en cada depósito que sustentan los diseños planteados para cada obra a nivel básico. La información relevante para efectos del presente estudio es la geología, la calidad de la roca, datos de permeabilidad (Le Franc y Lugeon), disposición de obras de manejo de agua, estudio hidrológico para caudales de diseño, etc.

MLCC, a través de otros consultores especialistas, cuenta con un estudio hidrogeológico del área de la mina (rajo, botaderos, pilas, planta, etc.) que también aporta información relevante a esta investigación (ver referencias), un informe hidrológico y monitoreo de datos hídricos actualizados.

Toda esta información se encuentra incluida en el EIA y en sus respectivas adendas.

## 1.3 Estructura del Informe

El presente informe se estructura en capítulos, según lo que se expone a continuación:

**Capítulo 1 Introducción:** Relación general del Proyecto Caserones y alcances y objetivos de este informe.

**Capítulo 2 Visión del Proyecto:** Marco conceptual general en el que se desarrolló este reporte.

**Capítulo 3 Marco Físico:** Resume los antecedentes pertinentes para este estudio.



**Capítulo 4 Trabajos de Terreno:** Detalla todas las actividades de terreno realizadas para el presente estudio (sondajes, geofísica, levantamiento estructural y control de niveles de agua), y se entregan sus resultados.

**Capítulo 5 Hidrogeología:** Corresponde al análisis de estos resultados, que permite elaborar el modelo conceptual de la zona de trabajo.

**Capítulo 6 Modelo Numérico:** Entrega la formulación del modelo numérico y los resultados de la modelación.

**Capítulo 7 Conclusiones.**

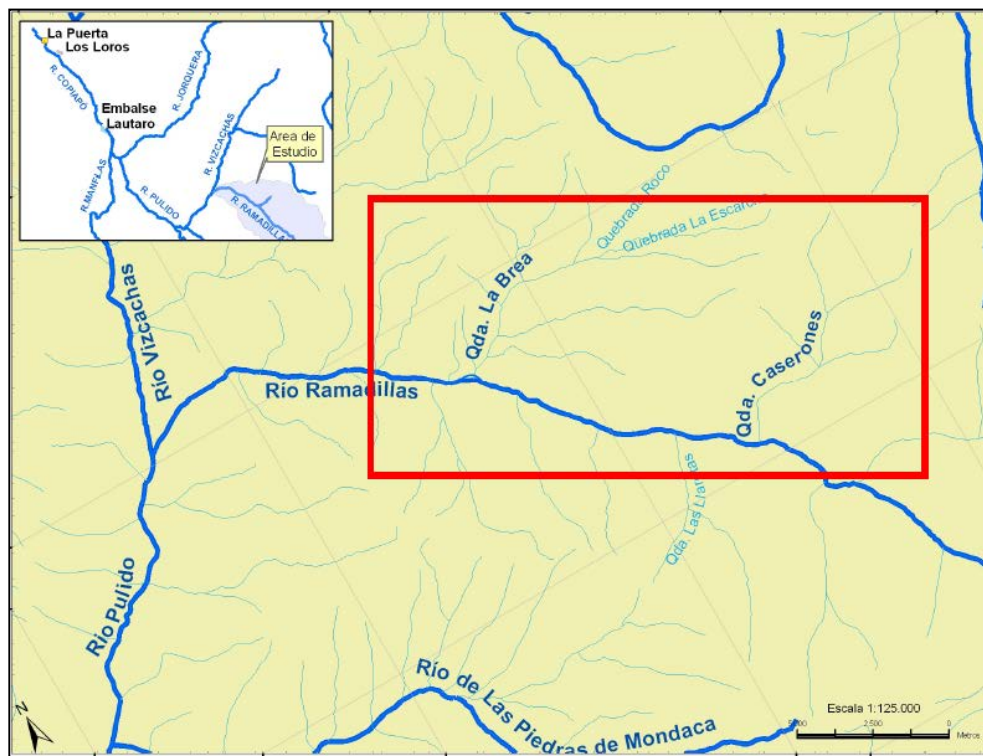
**Capítulo 8 Referencias:** Se listan las referencias de cada estudio utilizado.

## 2 Visión del Proyecto

El depósito de Lamas se ubicará en la quebrada La Brea, la cual en su parte alta albergará el depósito de Lastre del proyecto así como también el portal de salida del túnel de transporte de lamas (ver **Figura 2-1**).

El depósito de Arenas se encuentra en la quebrada Caserones que en su parte alta albergará también las pilas de lixiviación, el rajo, la planta e instalaciones asociadas (chancador, molienda, etc.).

Ambas quebradas (La Brea y Caserones) se elongan aproximadamente en dirección norte-sur y confluyen a la quebrada Ramadillas que escurre en sentido este-oeste hasta evacuar sus aguas en el río Vizcachas de Pulido, afluente al río Copiapó. Desde el punto de vista hidrográfico e hidrogeológico los escurrimientos podrían ser controlados fácilmente en los sectores antes de la junta de dichas quebradas con la quebrada Ramadillas, facilitando sustantivamente su captura y manejo.



**Figura 2-1 Ubicación de Quebradas La Brea y Caserones (Ref.15)**

Ambos depósitos han sido diseñados con los más altos estándares de la industria para el control de infiltraciones en los materiales aluviales, por lo tanto, se consideran seguros. Sin embargo, las infiltraciones hacia el sustrato rocoso a través de fracturamiento o fallas geológicas pueden actuar en zonas preferenciales para los flujos subterráneos y por lo tanto deben ser investigadas en detalle.

A pesar de contar con los sistemas de control para las infiltraciones, es fundamental tener un plan de contingencia que permita el manejo de los efluentes potencialmente contaminados de modo de evitar que una pluma contaminada impacte las aguas naturales en la quebrada Ramadillas y el sistema subterráneo asociado. Con esta visión MLCC ha propuesto construir una barrera hidráulica al pie de cada depósito que permita interceptar esta potencial pluma y devolver esta agua hacia el área de proceso.

Durante el periodo de evaluación del EIA, la barrera hidráulica propuesta (en cada caso) fue ubicada en la ladera sur de la quebrada Ramadillas (ladera opuesta a la confluencia de ambas quebradas), lo que imprimía desafíos mayores respecto a la forma de operar la batería de pozos de modo de asegurar una captura efectiva de la potencial contaminación. La ubicación de esta barrera estaba supeditada a restricciones de orden administrativo que MLCC tuvo al momento de presentar el EIA.

En Enero de 2010 la autoridad emitió el documento de la RCA donde se aprobó el proyecto presentado. Se establece en dicho documento que la realización del proyecto queda condicionada al cumplimiento de una serie de requisitos, exigencias y obligaciones allí establecidas y se detalla las medidas de mitigación, reparación y compensación apropiadas. Con respecto al Recurso Hídrico, MLCC se comprometió a desarrollar estudios complementarios que validaran la eficiencia del Sistema de Control de Infiltraciones (Barreras Hidráulicas) diseñado, incluyendo la construcción de pozos de monitoreo y de bombeo junto al perfeccionamiento del modelo hidrogeológico.

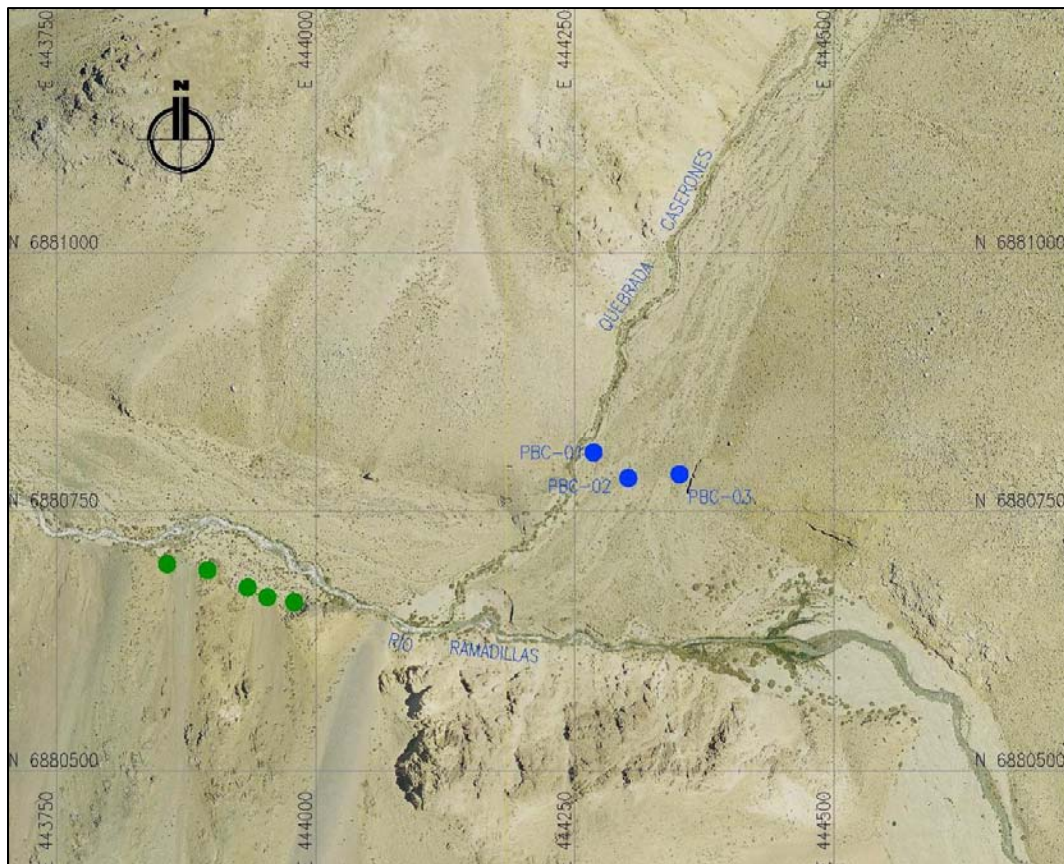
Durante el desarrollo del estudio complementario fueron superadas las limitaciones administrativas por parte de MLCC y, basados en el compromiso de cero contaminación y aseguramiento del éxito de las medidas de contingencia con las obras proyectadas, la minera procedió a negociar y adquirir los derechos de propiedad faltantes para la completitud de la propiedad del sector norte del Río Ramadillas. De esta manera, se abrió la posibilidad para plantear una nueva ubicación, más ventajosa, para las dos baterías de pozos de contingencia y las restricciones de diseño fueron oportunamente franqueadas.

El sitio de estudio fue entonces ubicado inmediatamente aguas abajo de la zanja cortafuga de cada obra de relaves, lo que es comparativamente ventajoso desde el punto de vista de la eficiencia de las captaciones para la captura del flujo pasante hacia la quebrada Ramadillas. En la Figura 2-2 se ilustra la posición de la barrera hidráulica en la situación original presentada en el EIA y la posición que se ha evaluado en esta campaña. Es importante destacar que la construcción de la Barrera definitiva se realizará de acuerdo a lo concluido con este estudio.

El hecho de poseer la totalidad de los derechos de propiedad, permite a MLCC además de la materialización de los pozos de contingencia en el lugar óptimo y más eficiente para la intercepción de eventuales contaminantes, la posterior solicitud de derechos de agua para su eventual operación (por la vía del procedimiento denominado traslado de punto de captación de derechos de agua subterránea).

El estudio que se presenta a continuación aborda las temáticas exigidas por la autoridad en la RCA, presenta un nuevo escenario para el Sistema de Control de Infiltraciones en cuanto a las Barreras Hidráulicas, demostrando que los pozos de contingencia cumplen con su objetivo esencial de controlar eventuales infiltraciones en la zona y, además, actuando en la zona más cercana a la fuente de emisión del contaminante dada la nueva configuración.

La **Tabla 2.1** resume lo establecido en la RCA y lo realizado durante este estudio. Las 3 primeras columnas detallan las obras comprometidas y el objetivo de realización de estas. Posteriormente se muestra los trabajos ejecutados durante este estudio, y grado de cumplimiento de los objetivos, que como se indica, han sido cubiertos en su totalidad. La ejecución de un número diferente de obras (específicamente el número de pozos exploratorios y duración de pruebas de bombeo) a lo comprometido inicialmente, se explica en detalle en los capítulos siguientes y está basado en que el nuevo escenario de barrera modifica el diseño original y lo hace más eficiente en la captura de una potencial pluma contaminada., por lo que se concentraron los esfuerzos en este nuevo sector de menor sección.



**Figura 2-2 Barrera Hidráulica en sector Caserones.**

(En puntos verdes la ubicación original y en puntos azules los pozos perforados en esta oportunidad).

**Tabla 2-1 Resumen cumplimiento RCA**

Obra	Compromiso con Autoridad en la RCA	Objetivos	Trabajos ejecutado en 2010	Cumplimiento Objetivos
Piezómetros	5 piezómetros (40-60m) aguas arriba de la presa de cada depósito	Evaluar el espesor del relleno. Evaluar la condición hidrogeológica de la roca infrayacente al relleno. Controlar los niveles de agua previo y durante la operación de cada depósito. Complementar, a nivel distrital, las curvas equipotenciales.	2 piezómetros (120 m), mas habilitación de 10 sondajes geotécnicos.	OK
Pozos de Bombeo Exploratorios	3 pozos de bombeo y 6 pozos de observación aguas abajo de la presa de los depósitos	Reconocer Estratigrafía. Identificar la base del sistema acuífero. Identificar Niveles Piezométricos. Determinar Parámetros Hidráulicos del entorno. Calcular caudal pasante por secciones específicas. Control de niveles durante la prueba de bombeo.	7 pozos de bombeo/observación.	OK
Pozos de Observación				
Pozo Exploratorios Barrera	Perforación de barrera hidráulica (5 pozos c/u de 100m y 8") ladera sur río Ramadillas	Extraer de la potencial pluma de contaminación. Reconocer Estratigrafía. Identificar Niveles Piezométricos. Determinar Parámetros Hidráulicos del entorno.	3 (aguas abajo de la zanj as corta fuga, ubicación óptima).	OK
Prueba de Bombeo	Pruebas de bombeo individuales en los pozos de la barrera hidráulica	Definir la eficiencia en la captura del flujo contaminado.	Pruebas individuales en 5 pozos (3 de la barrera).	OK
	Pruebas de bombeo simultanea en los pozos de la barrera hidráulica		Prueba simultanea en 3 pozos de la barrera.	OK
Geofísica	Perfiles TEM de alta resolución en el sitio de la barrera hidráulica (400m)	Delimitar con mayor certidumbre el acuífero.	Perfil NanoTEM de 250 m con 5 sondeos	OK
	Perfiles TEM de alta resolución en secciones aguas arriba y aguas debajo de la confluencia de quebrada con río Ramadillas (1000m)		4 perfiles NanoTEM de 1310m con 43 sondeos	OK
Actualización Modelo Hidrogeológico	Análisis de las Pruebas de Bombeo, determinación de K y S	Validar las premisas de modelaciones realizadas y resultados conseguidos, aumentando nivel de confiabilidad de esta herramienta y por lo tanto la proyección de la efectividad de las acciones establecidas.	Realizado	OK
	Análisis estructural de ambas zonas			
	Actualización Modelo Numérico	Completar información para el desarrollo de la Ingeniería de Detalles de los diseños y Sistemas de Monitoreo y Control de infiltraciones, de acuerdo a RCA.		
	Actualización estrategia de contingencia			



### 3 Marco Físico

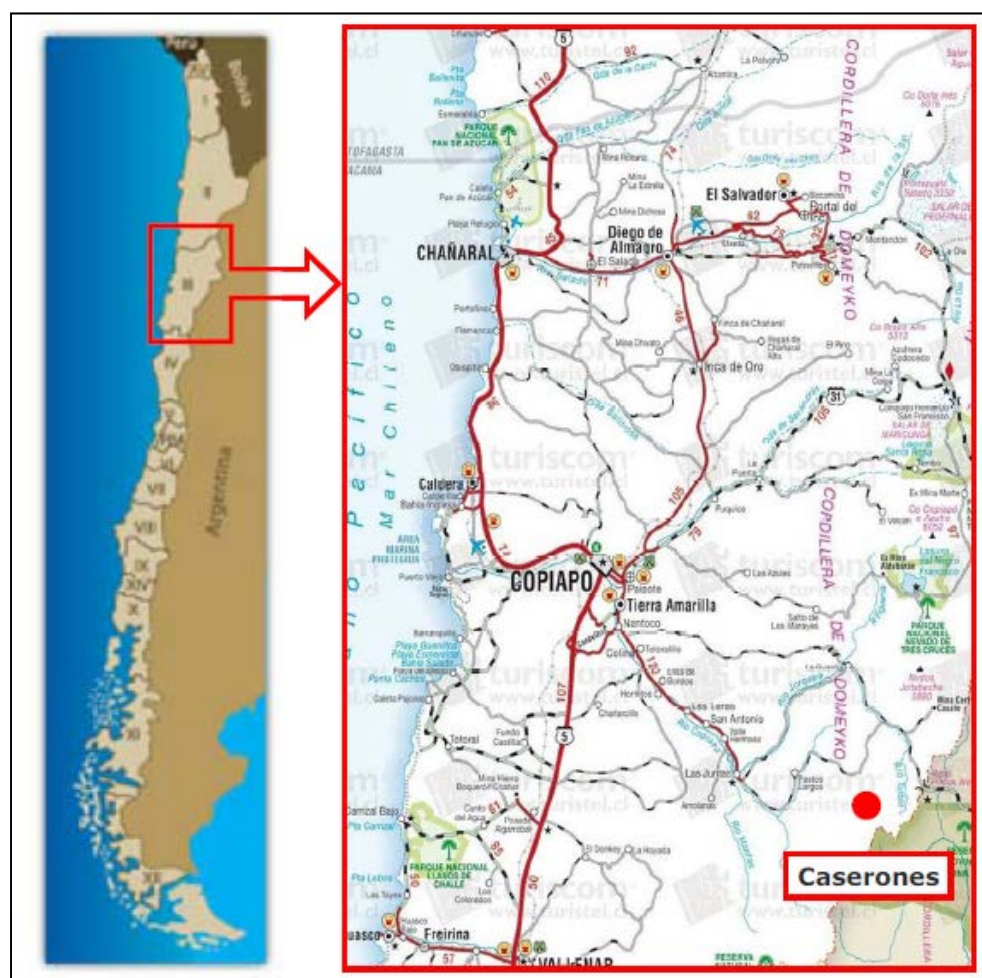
En este capítulo se presenta un extracto de algunos temas presentados en el EIA, con el objetivo de entregar un contexto físico del lugar del proyecto, sus cualidades climatológicas, meteorológicas, hidrológicas, geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas.

#### 3.1 Ubicación del Proyecto

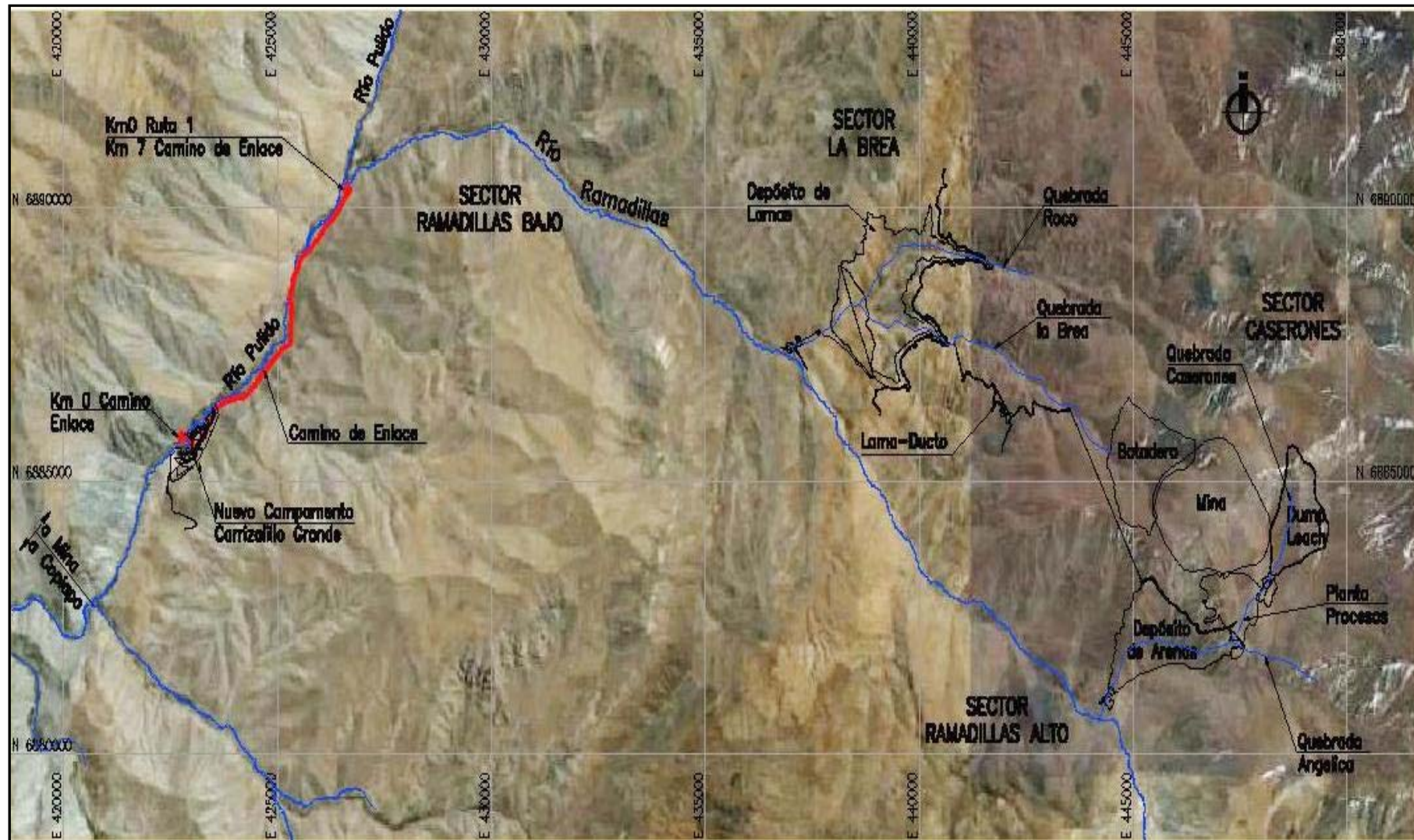
El proyecto se emplazará en la III Región de Atacama, Provincia de Copiapó, Comuna de Tierra Amarilla a 160 km al sureste de la Ciudad de Copiapó a una altura media de 4.300 msnm Se extiende en una superficie aproximada de 9.177 ha (Ver **Figura 3-1**). Las coordenadas UTM referenciales de ubicación del rajo minero se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 3-1 Coordenadas Rajo Minero (Polígono) (PSAD 56)**

Coordenada Este (UTM)	Coordenada Norte (UTM)
444.909	6.884.786
446.206	6.883.242
447.973	6.883.330
448.272	6.884.282
447.162	6.885.972



**Figura 3-1 Ubicación General del Proyecto**



**Figura 3-2 Ubicación de las Instalaciones Principales y Áreas del Proyecto**

El área de emplazamiento del Proyecto Caserones se ha dividido en cinco sectores:

1. **Sector Caserones:** Este sector incluye la quebrada Caserones, se encuentra aproximadamente entre los 3.250 msnm y los 5.000 msnm abarcando alrededor de 3.903 ha, en donde se encuentra la mina propiamente tal, el depósito de lixiviación, la planta y el depósito de arenas. Ver **Figura 3-2**.
2. **Sector Ramadillas Alto:** Se encuentra aproximadamente entre los 2.750 msnm y los 4.250 msnm abarcando alrededor 3.363 ha.
3. **Sector La Brea:** Incluye la quebrada La Brea. Se encuentra aproximadamente entre los 2.600 msnm y los 3.250 msnm abarcando alrededor de 1.686 ha, donde se ubicará el depósito de lamas y en las cabeceras el depósito de lastre. Ver **Figura 3-2**.
4. **Sector Ramadillas Bajo:** Se encuentra aproximadamente entre los 2.150 msnm y los 2.600 msnm abarcando alrededor de 225 ha.
5. **Sector Valle:** Es el sector donde se ubicarán los pozos que abastecerán de agua al Proyecto y que no es incluido para efectos de este estudio.

## 3.2 Clima y Meteorología

### 3.2.1 Clima

Según la clasificación de Köppen el área del proyecto presenta un Clima Desértico Marginal Bajo (BWh) y Clima Desértico Marginal de Altura (BWH). Por otro lado, según el Mapa Agroclimático de Chile, el área del proyecto se inserta en un agroclima desértico de altura, particularmente en los agroclimas denominados Potrerillos y Putre. A continuación se describe las unidades climáticas mencionadas.

**Clima Desértico Marginal Bajo (BWh):** Este clima corresponde a la mayor parte de la Región, cubriendo la zona que va desde donde comienzan las tierras altas de la cordillera hasta donde alcanza la influencia marítima intensa por el oeste. De Copiapó al norte es de una rigurosa sequedad, en cambio de Copiapó al sur, la inexistencia de la cordillera de la Costa permite alguna forma de efecto marítimo en la humedad sin nubosidad, que atenúa las características desérticas.

Las precipitaciones aumentan con la latitud y con la altura, concentrándose en los meses de invierno. La Dirección Meteorológica de Chile registra valores totales anuales que llegan a 12 mm en Copiapó (291 metros de elevación), 19 mm en El Salvador (2.400 m), 32 mm en Vallenar (470 m) y 34 mm en Los Loros (948 m).

**Clima Desértico Marginal de Altura (BWH):** Se manifiesta sobre los 2.000 m de altura. El régimen térmico es más frío pero las oscilaciones térmicas son menores que en el desierto marginal bajo, debido a la altura. La humedad es relativamente baja.

Las precipitaciones son más abundantes en este clima y se producen casi exclusivamente en los meses de invierno, de mayo a agosto. Estas son de origen frontal y muchas veces son de carácter nival.



**Clima Desértico de Altura, Agroclima Potrerillos:** El Agroclima Potrerillos se extiende entre el límite con Perú y la latitud 30° (al norte de la ciudad de Vicuña). El régimen térmico se caracteriza por una temperatura media anual de 11,99°, con una máxima media de los meses más cálidos (enero y febrero) de 18,4° y una mínima media del mes más frío (Junio) de 4,9°C. La lluvia anual alcanza a 44,1 mm, distribuida principalmente entre los meses de mayo a agosto.

**Clima Desértico de Altura, Agroclima Putre:** El Agroclima Putre se encuentra al oriente del clima Potrerillos, desde la frontera con Perú hasta un poco al norte del paralelo 29°. En invierno, el promedio más bajo del mes más frío es superior a -2,9°C, en tanto que la máxima media diaria del mes más frío varía de 1° a 5° C. En verano, la máxima media de los 4 meses más cálidos es superior a 10°C. La duración de la estación sin heladas promedio (temperaturas mínimas promedio superiores a 0° C) es inferior a 1 mes. La lluvia alcanza a 256,6 mm, que caen mayormente durante los meses de enero y febrero.

### 3.2.2 Meteorología

A continuación se presenta la información meteorológica de las estaciones ubicadas en el área del Proyecto: Estación Curva Negra y Estación Campamento.

**Estación Curva Negra** La estación curva Negra se encuentra ubicada cerca del kilómetro 12 de la Ruta 2 en el sector mina, unos 500 m al oeste de la envolvente del rajo Caserones. La temperatura media anual es de -0,3° C. El mes más cálido es enero, el cual posee una temperatura media de 5,3° C. Sin embargo, la temperatura máxima media fue registrada en el mes de febrero, alcanzando un valor de 17,1° C. El mes más frío es agosto, con una temperatura media de -6,6° C y una temperatura mínima media de -18° C. En cuanto a las precipitaciones, se registraron 45,9 mm anuales (ver Tabla 3-2).

**Tabla 3-2 Variables Meteorológicas Estación Curva Negra**

Estación Curva Negra (445.225 E; 6.884.380 N; 4.280 msnm)						
Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa Media (%)	Velocidad del Viento Media (m/s)	Precipitación (mm)
	Media	Máxima Media	Mínima Media			
Enero	5,3	15,1	-3,8	37,3	4,3	6,6
Febrero	4,2	17,1	-5,8	32,2	5,3	0,5
Marzo	4,1	14,7	-4,2	30,3	6,4	3,8
Abril	1,3	12,8	-8,1	29,0	8,1	0,0
Mayo	-4,4	6,6	-13,6	45,2	10,8	12,9
Junio	-5,6	7,9	-15,0	47,2	12,4	12,9
Julio	-5,3	8,5	-15,5	31,3	9,4	0,1
Agosto	-6,6	-2,7	-18,0	24,7	12,5	0,7
Septiembre	-2,7	8,7	-14,6	23,0	11,6	1,3
Octubre	0,7	11,7	-13,6	22,6	8,9	0,0
Noviembre	2,0	13,9	-11,6	20,1	5,6	0,0
Diciembre	3,2	13,5	-5,0	26,6	4,7	0,0
<b>Anual</b>	<b>-0,3</b>	<b>11,1</b>	<b>-10,7</b>	<b>30,8</b>	<b>8,3</b>	<b>45,9</b>

Fuente: Mediciones realizadas en la Estación Curva Negra (Enero 2007 – Diciembre 2007)

**Estación Campamento** Se ubica en las inmediaciones del campamento La Brea de MLCC. La temperatura media anual es de 10,9° C. El mes más cálido es enero, el cual posee una temperatura media de 16,4° C. Sin embargo, la temperatura máxima media fue registrada en el mes de febrero, alcanzando un valor de 28,3° C. El mes más frío es agosto, con una temperatura media de 5,0° C. La temperatura mínima media fue registrada en el mes de agosto, alcanzando un valor de -7,7° C. En cuanto a las precipitaciones, se registraron 54,94 mm anuales (ver Tabla 3-3).

**Tabla 3-3 Variables Meteorológicas Estación Campamento**

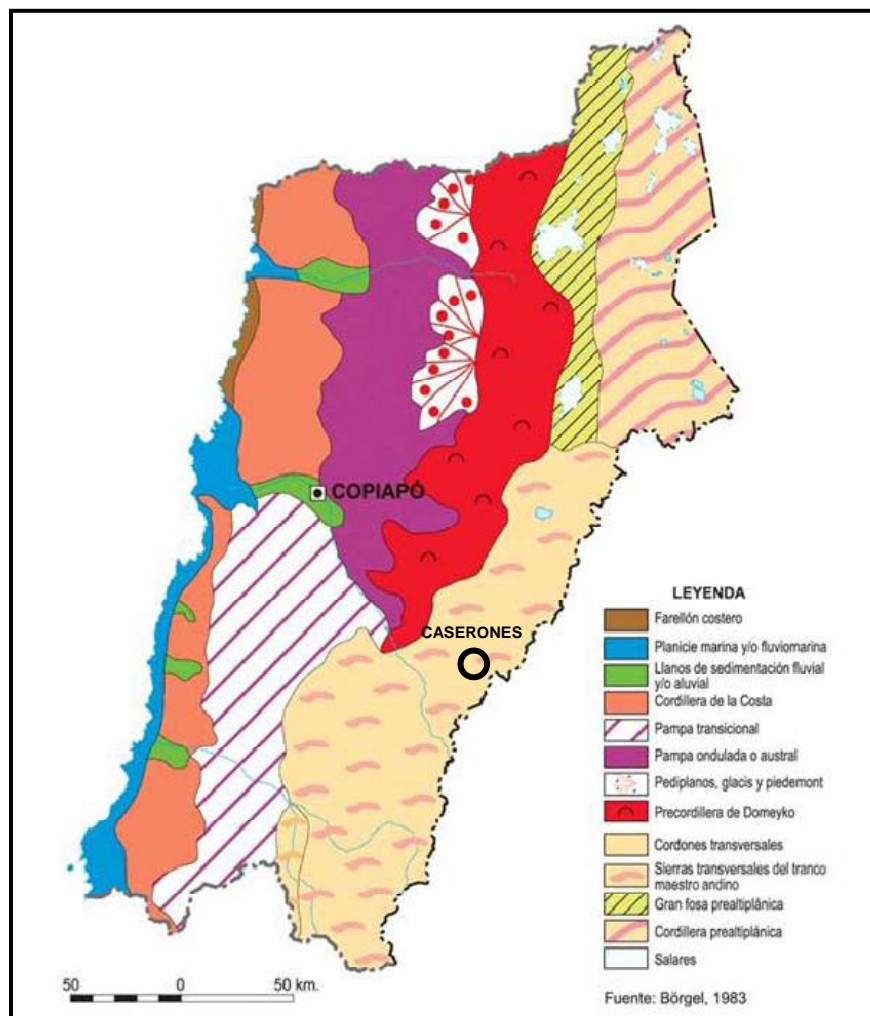
Estación Campamento (438.626 E; 6.888.155 N; 2.750 msnm)						
Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa Media ( %)	Velocidad del Viento Media (m/s)	Precipitación (mm)
	Media	Máxima Media	Mínima Media			
Enero	16,4	26,1	6,2	26,8	2,3	0,3
Febrero	15,4	28,3	4,7	24,7	2,2	1,0
Marzo	14,9	25,7	6,1	21,9	2,2	0,0
Abril	12,5	24,9	2,7	18,1	2,1	0,0
Mayo	7,5	20,1	-3,1	28,0	2,0	44,9
Junio	5,6	18,4	-3,7	31,7	1,8	0,04
Julio	5,7	20,1	-5,6	19,2	2,0	0,1
Agosto	5,0	16,9	-7,7	15,0	2,4	0,0
Septiembre	8,7	21,5	-3,5	15,5	2,5	8,6
Octubre	12,1	24,1	-1,9	15,3	2,5	0,0
Noviembre	13,2	25,8	-2,2	15,9	2,4	0,0
Diciembre	14,3	24,7	4,4	20,4	2,4	0,0
<b>Anual</b>	<b>10,9</b>	<b>23,0</b>	<b>-0,3</b>	<b>21,0</b>	<b>2,2</b>	<b>54,94</b>

Fuente: Mediciones realizadas en la Estación Campamento (Enero 2007 – Diciembre 2007)

### 3.3 Geomorfología

#### 3.3.1 Geomorfología Regional

Según la clasificación de Börgel, la región de Atacama, corresponde a la Región Septentrional de las Pampas Desérticas y Cordilleras Prealtiplánicas y a la Región de las Planicies Litorales y Cuencas del Sistema Montañoso Andino Costero. Estas zonas están divididas en cuatro subzonas geomorfológicas representadas por la Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Costa. Dentro de estas zonas es posible encontrar subunidades geomorfológicas, que se muestran en la **Figura 3-3**, de las cuales se tomaron las que se verán involucradas en el desarrollo del proyecto y en la extracción del mineral.



**Figura 3-3 Subunidades Geomorfológicas para la Región de Atacama**

Fuente: Börgel 1983.

De acuerdo a la figura, el área del proyecto se inserta en la subunidad geomorfológico de las Sierras Transversales del Tronco Maestro Andino, la cual se extiende desde el nevado Ojos del Salado hasta el Cerro Juncal por el sur, con un ancho medio de 90 km y una extensión longitudinal de 630 km. Las cordilleras y sierras transversales que se inscriben en esta zona presentan un acelerado drenaje exorreico, en la medida que ganan altitud. A consecuencia de esto el desplazamiento de la cordillera por erosión de las aguas corrientes permite una profunda penetración de los valles en su tronco principal.

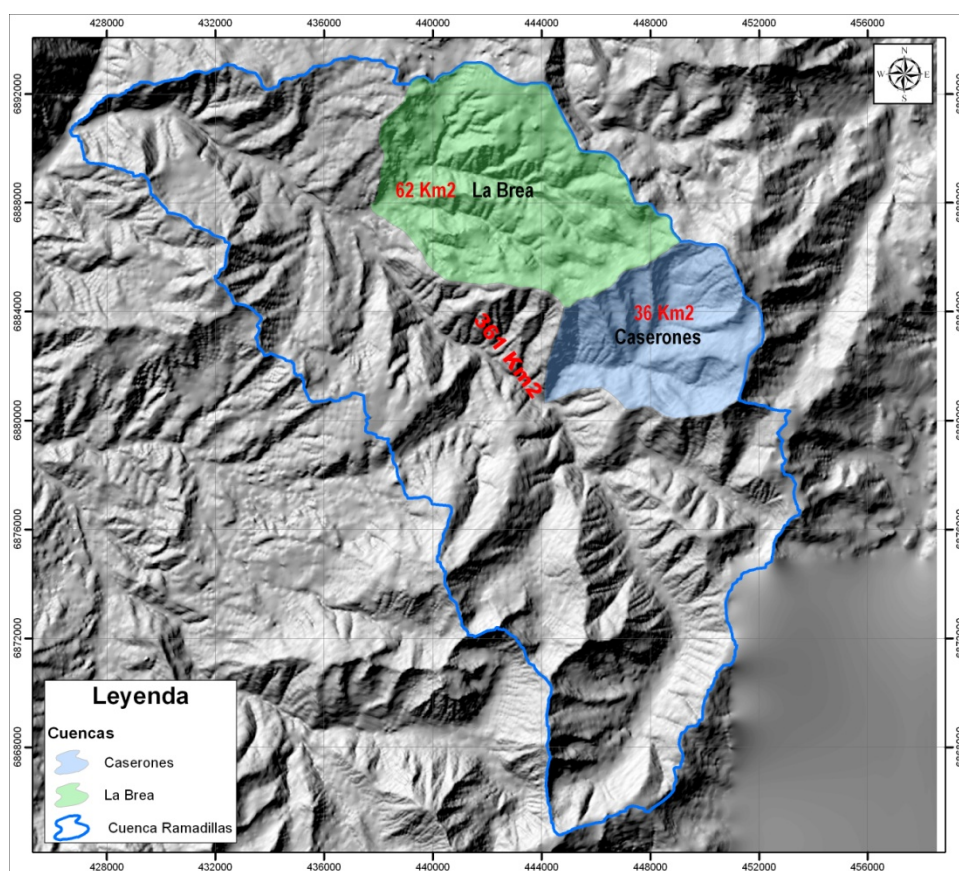
### 3.3.2 Geomorfología Local

El sector del proyecto corresponde a la geomorfología típica de la parte norte de las “sierras transversales del tronco maestro andino”, en la cual el paisaje se ve dominado por valles longitudinales creados por afluentes superiores de algunos ríos (río Vizcachas de Pulido y río Jorquera, ambos afluentes del río Copiapó), y por cumbres de más de 5.000 msnm sobre el límite fronterizo.

En la **Tabla 3.4** se presenta un resumen de los parámetros morfológicos característicos de las cuencas del área del proyecto: Ramadillas y sus sub cuencas de La Brea y Caserones, en tanto que en la **Figura 3-4** se presenta la delimitación de las cuencas.

**Tabla 3-4 Parámetros Morfológicos en cuencas del área del Proyecto**

Parámetro	Cuenca		
	Ramadillas	La Brea	Caserones
Área (km <sup>2</sup> )	360	62	36
Cota Mínima (msnm)	2144	2669	3154
Cota Máxima (msnm)	5535	4857	5535
Cota Media (msnm)	3822	3685	4403
Desnivel (m)	3391	2188	2381
Pendiente Media (%)	43.95	41.69	49.30



**Figura 3-4 Cuencas Hidrográficas y Morfología Distrital**

## 3.4 Hidrología

A continuación se presenta una síntesis de la información hidrológica, proveniente tanto del EIA (Ref. 15), como de estudios posteriores (Ref. 11). Este último se encuentra anexado en el **Apéndice II**.

### 3.4.1 Red Hidrográfica

A escala local, los cauces principales son las quebradas Caserones y La Brea que confluyen al río Ramadillas el que desagua en el río Vizcachas de Pulido, uno de los afluentes principales del río Copiapó en su cabecera.

En los ríos Copiapó, Jorquera, Pulido y Manflas existe estaciones con medición periódica de caudal por parte de la DGA. En la zona alta de la cuenca donde se ubicará el proyecto no existe estaciones de medición de caudal por lo que se utilizó la información de aforos periódicos realizados por la empresa SITAC desde Octubre del año 2004.

### 3.4.2 Pluviometría

En la zona de estudio se ha identificado 7 estaciones DGA con medición periódica de precipitación, cuya ubicación se muestra en la **Figura 3-5**.



**Figura 3-5 Ubicación de Estaciones Pluviométricas**

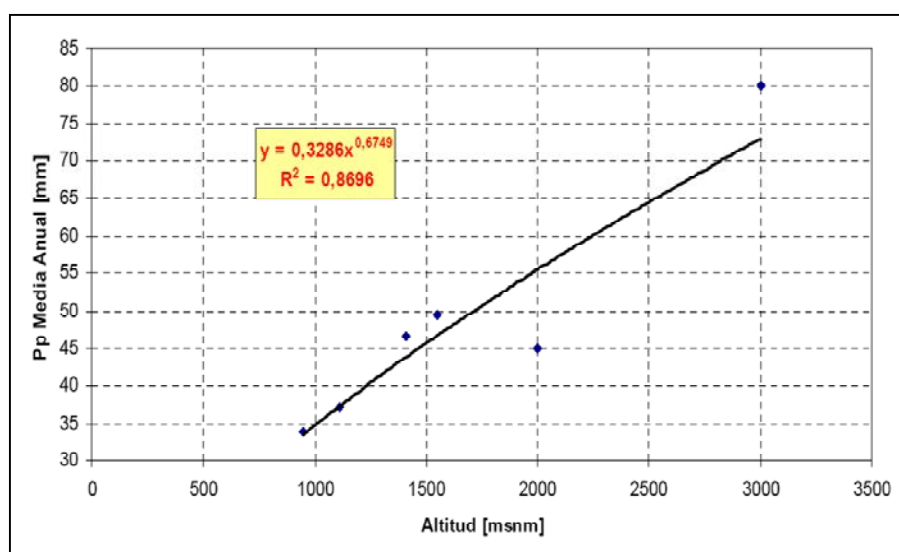
Se realizó un análisis para más de 30 años de información, lo que permitió establecer los valores de precipitación media que se muestran en la **Tabla 3.5**.

**Tabla 3-5 Precipitación Media Anual y altitud asociada (Ref.11)**

Nombre Estación	Latitud S	Longitud W	Altitud [msnm]	Pp Media Anual [mm]
Jorquera en La Guardia	27° 50'	69° 45'	2.000	45,0
Iglesia Colorada	28° 09'	69° 52'	1.550	80,0(*)
Hacienda Manflas	28° 08'	69° 58'	2.000	49,4
Torín en El Potro	28° 16'	69° 45'	3.000	46,5
Embalse Lautaro	27° 58'	70° 00'	1.110	37,2
Los Loros	27° 50'	70° 06'	950	33,8

(\*) Este valor fue obtenido del "Balance Hídrico de Chile" 1987. Dirección General de Aguas, MOP.

A nivel de precipitación media anual no se observa variaciones importantes en las estaciones medidas. Con estos valores se estableció una correlación entre los valores de precipitación media anual y la altitud (Ref. 11); y se ajustó una línea de regresión, que se presenta en la **Figura 3.6**.

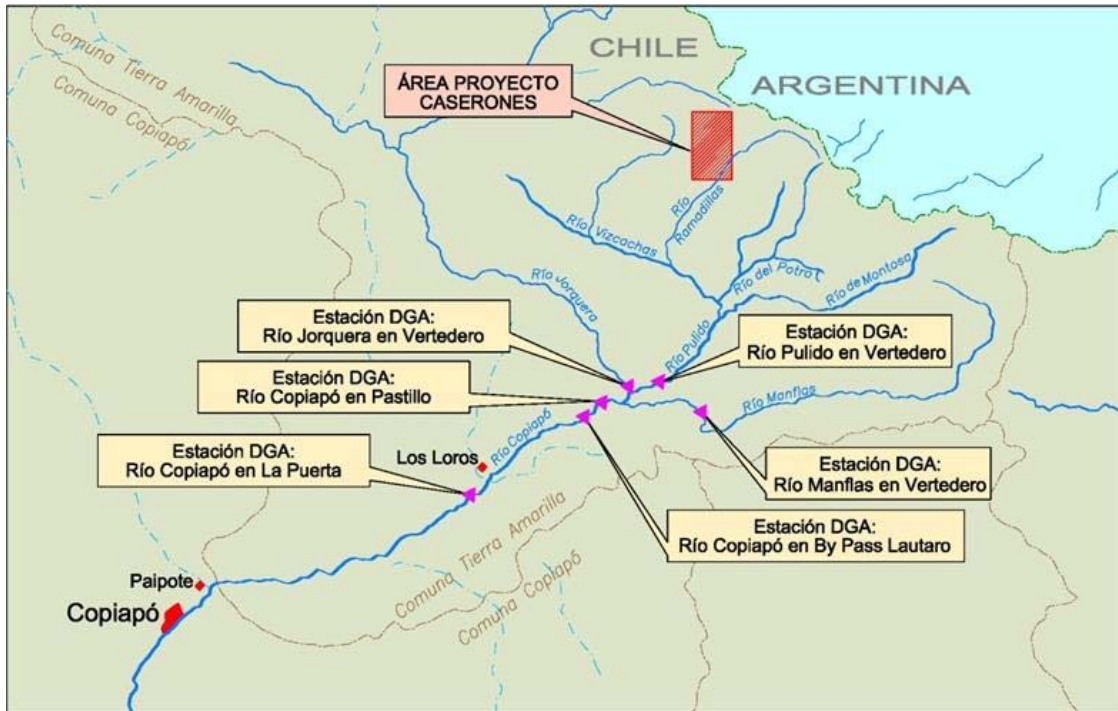


**Figura 3-6 Relación entre altitud y precipitación media anual (Ref. 11)**

### 3.4.3 Fluviometría

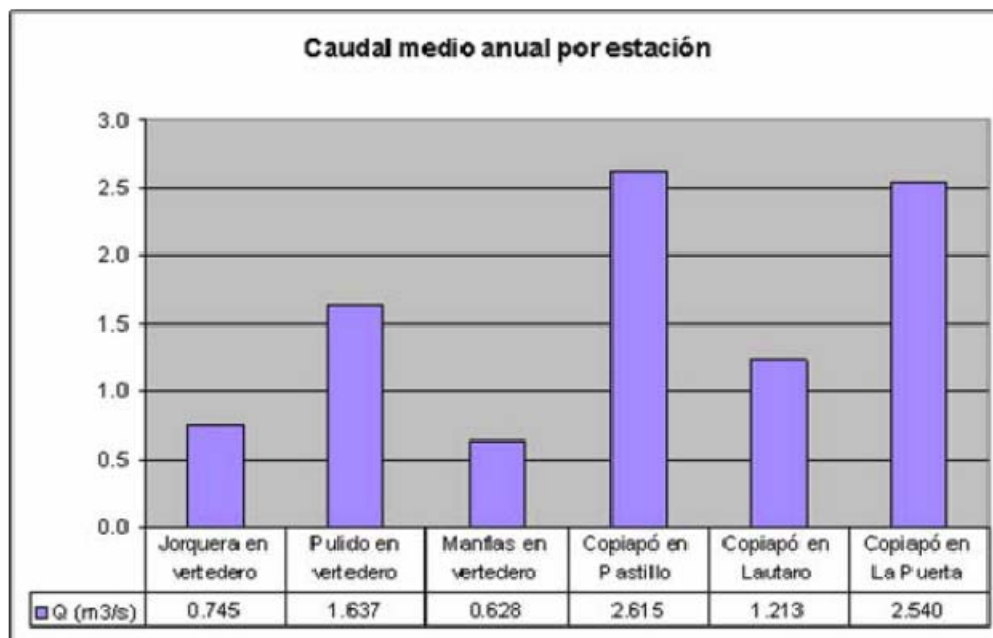
En la zona de estudio se cuenta con mediciones fluviométricas en 6 estaciones (**Figura 3-7**). Los registros son realizados periódicamente por la DGA. Los caudales que se miden en estas estaciones no corresponden a régimen natural, ya que están influenciadas por extracción de canales de regadío, regulación del embalse Lautaro, etc.





**Figura 3-7 Ubicación de Estaciones Fluviométricas**

Un análisis a más de 30 años de información permitió establecer los caudales medios que se muestran en la **Figura 3-8**.



**Figura 3-8 Caudal Medio Anual por Estación**

En la **Figura 3-8** se observa que los mayores caudales se miden en las estaciones Pastillo, aguas arriba del embalse Lautaro, y en La Puerta, aguas abajo del embalse, en donde debido a un angostamiento del valle se genera importantes aportes de la napa al río (zona de afloramientos). Se observa también que el caudal en estación Pastillo es bastante mayor al de Lautaro, esto se debe al

efecto regulador del embalse y a las filtraciones de su muro e infiltraciones hacia el sistema subterráneo.

El principal aporte al río Copiapó proviene del río Vizcachas de Pulido con más del 50% del caudal. El río Jorquera tiene un régimen pluvial, lo que se observa en el aumento de los caudales en los meses de julio a octubre.

El río Pulido presenta un régimen marcadamente nival con un aumento de caudal en los meses de verano (enero y febrero principalmente). El río Manflas al igual que el Pulido presenta un régimen nival.

En el río Copiapó en Lautaro se observa un aumento de los caudales durante el período primavera-verano. En el río Copiapó en La Puerta no se observan variaciones importantes durante el año.

Por otra parte, se cuenta con datos de caudales obtenidos de una serie de campañas de aforos, encargadas por Minera Lumina Copper Chile S.A., y realizadas por la empresa SITAC, en distintos puntos ubicados aguas abajo y aguas arriba de la quebrada Caserones, entre los años 2004 y 2010. La ubicación de estos puntos de aforos puede observarse en el informe que se anexa en el apéndice II.

#### 3.4.4 Análisis Hidrológico sector Caserones

Como se ha mostrado, en la zona de estudio, es decir la Quebrada Caserones, no existe información sistemática medida de caudales o precipitaciones. Ante esto, el estudio de la Ref.11 se realizó una correlación entre los caudales aforados en el punto río Ramadillas aguas abajo de Quebrada Las Lletas y los caudales medios diarios registrados en la estación fluviométrica río Pulido en Vertedero, en el período de deshielo (Octubre a Marzo) entre los años 2004 y 2010. Posteriormente, y considerando los datos de las campañas de aforos realizadas en los puntos río Ramadillas aguas abajo de Quebrada Las Lletas y Quebrada Caserones aguas arriba confluencia río Ramadillas, se pudo generar un factor de transposición de los caudales desde el primer punto de aforo mencionado hacia Quebrada Caserones. Así, es posible obtener los caudales medios diarios máximos para Quebrada Caserones aguas arriba de la confluencia con el río Ramadillas, para el período de deshielo.

Con estos valores, y haciendo un análisis estadístico, se calculó los valores de caudales medios diarios máximos para 10, 20, 50, 100 y 200 años de período de retorno, los que se presentan en la **Tabla 3-6**.

**Tabla 3-6 Caudales Medios Diarios Máximos T = 10, 20, 50, 100 y 200 años [m<sup>3</sup>/s]. Quebrada Caserones aguas arriba confluencia río Ramadillas (Ref.11)**

T [años]	Qmax [m <sup>3</sup> /s]
200	2,16
100	1,68
50	1,28
20	0,85
10	0,59

Para generar el factor de conversión de caudales medios diarios máximos a caudales instantáneos diarios máximos en Quebrada Caserones, el estudio (Ref. 11) consideró datos obtenidos de una



cuenca similar de la III Región de Atacama (río Valle Ancho). Así, se pudo establecer una relación que permitió obtener los caudales de crecida correspondiente a máximos instantáneos en la Quebrada Caserones (ver **Tabla 4.1 y 4.2 del Apéndice II**).

Otro punto analizado fue la posible ocurrencia de precipitaciones líquidas durante el período de deshielo. Para esto se tomó las precipitaciones diarias más significativas en la estación pluviométrica Iglesia Colorada, ubicada en la cota 1.550 msnm, durante los meses de Octubre a Marzo para los años donde se dispone de información, esto es entre 1991 a 2004. Por otro lado, se consideró las temperaturas mínimas diarias registradas en Iglesia Colorada, en los días donde se registró las precipitaciones más significativas. Adoptando un valor típico del gradiente adiabático húmedo de temperatura en función de la altura de  $-0,53\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , es posible hacer una inferencia sobre la altitud de la isoterma  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  para cada una de esas tormentas. Esto muestra que en general, la ubicación de la isoterma  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  en los días donde ocurrieron eventos de precipitaciones significativos, registrados en la estación Iglesia Colorada, se encuentra por debajo de los 4.050 msnm o a una altitud muy cercana. De esto es posible afirmar, que a la altura de la Quebrada Caserones (sobre los 4.000 msnm), la precipitación que se produce es del tipo sólida, siendo consistente con el carácter nival de la cuenca, y no se hace necesario considerar algún tipo de aporte de lluvias del tipo líquido a los caudales de crecida que se calcularon.

Mas detalles de la hidrología se pueden encontrar en el informe anexado en el Apéndice II.

## 3.5 Geología Regional

A continuación se presenta una síntesis de la información geológica presentada en el EIA del proyecto (Ref.15).

En el área de ubicación del Proyecto Caserones se reconoce dos sectores bien diferenciados (ver **Figura 3-9**): un sector occidental, en donde predominan las rocas sedimentarias jurásicas con intercalaciones volcánicas y volcanitas triásicas en la base, las que presentan un manteo general hacia el oeste entre 25° a 30°; y un sector oriental, donde afloran mayoritariamente rocas volcánicas triásicas e intrusivos paleozoicos. Sin embargo, en este sector, hacia el sur de la quebrada La Brea, las plutonitas paleozoicas son cubiertas directamente por rocas sedimentarias jurásicas con contenido fosilífero en la base de la secuencia sedimentaria, la que se dispone en discordancia de erosión obliterando a las volcanitas triásicas. El límite entre estos dos sectores lo constituye la quebrada La Brea, situada a lo largo del contacto entre las rocas estratificadas y las intrusivas, debido, muy probablemente, a erosión diferencial. (Ref.15).

En toda el área se observa una serie de fracturas que afectan a las rocas allí presentes. Sin embargo, las diferentes orientaciones del fracturamiento regional se manifiestan con mayor intensidad en la superficie cubierta por los granitoides paleozoicos, los que muestran un fuerte e intenso fracturamiento polidireccional resultante de la superposición de sistemas de fracturas regionales, probablemente asociadas a fallas, sobre un estilo de fracturamiento propio de los granitoides paleozoicos debido al enfriamiento del intrusivo, exagerado posteriormente por fenómenos de erosión diferencial (crioclastismo, glaciares, erosión por agua, etc.) que acentuaron e incluso abrieron las diaclasas en superficie. En el sector considerado de la subcuenca La Brea no se observan fallas importantes.

La cubierta de depósitos cuaternarios está representada por escombros de falda, conos de deyección, aluvios de fondo de valle y cubierta coluvial discontinua.

A continuación se describe las unidades estratigráficas, rocas intrusivas, depósitos no consolidados y estructuras reconocidas en el área del proyecto.

### 3.5.1 Rocas Estratificadas

Las unidades estratificadas involucradas en el área se ubican al oeste de la quebrada Caserones y consisten en:

- Una secuencia volcanoclástica, principalmente andesítica, de color verde a negro en afloramiento, y que en este trabajo se correlaciona con la Formación La Ternera del Triásico Superior-Liásico sobre la base de similitud de facies, ubicación litoestratigráfica, de relaciones de contacto y continuidad areal con afloramientos asignados a esta unidad en la Hoja La Guardia que se ubica al norte inmediato del área de estudio. El lugar tipo de la unidad se ubica aproximadamente a unos 150 Km hacia el N del área de estudio. Esta unidad sobreyace directamente en contacto depositacional sobre granitoides paleozoicos.

El rumbo de los estratos es generalmente NS a N5-10°W/25°W. En general, ni las lavas ni los niveles conglomerádicos presentan alteración importante visible; en cambio los niveles de tobas presentan colores abigarrados entre rojo y verde lo que indica al menos una alteración clorítica de la matriz piroclástica.

La Formación La Ternera se acuña rápidamente hacia el sur del actual campamento, de modo que al sur de éste y del camino de acceso a la mina, esta unidad ya no aflora en el sector de la quebrada La Brea. Sin embargo, afloramientos dispersos de esta unidad pueden

ser seguidos a lo largo del camino hacia la mina, en las partes más altas y siempre sobreyaciendo a los granitoides paleozoicos.

- Sobre la unidad anterior sobreyace, en aparente concordancia, una secuencia sedimentaria roja compuesta principalmente por areniscas rojas y conglomerados rojos a rosados, con intercalaciones volcánicas, y que se ubica hacia el oeste de la zona de interés. Esta secuencia ha sido asignada, por similitud litoestratigráfica, al menos en su parte inferior en la quebrada La Brea y Cocambico, a la Formación Lagunillas del Jurásico. Hacia el oeste, esta secuencia se continúa en sus niveles superiores en facies continentales rojo-moradas y niveles volcánicos intercalados. El lugar tipo de la formación Lagunillas se ubica en Las Quebradas Cocambico y Peñasco Largo afluentes del río Ramadillas.

La orientación de las capas es regular con rumbos entre N5° a 15°W/25°-30°W y con buena estratificación (estratificación fina a media). En la parte alta y media de la quebrada La Brea, esta unidad se dispone en aparente concordancia sobre las lavas superiores del Miembro Medio de la Formación La Ternera y, a partir de la parte baja de la quebrada La Brea, al sur del campamento actual y hasta la quebrada Ramadillas y más al sur, la base de la unidad reposa directamente sobre el granito paleozoico.

- Una secuencia potente, compuesta por niveles volcánicos, ignimbritas y niveles volcanoclásticos, sobreyace en aparente concordancia sobre la Formación Lagunillas y se continua hacia el oeste hasta la ladera oriental del valle del río Vizcachas de Pulido. Esta unidad de acuerdo con la asignación hecha en la Hoja la Guardia, corresponde a la Formación Quebrada Seca del Cretácico Superior. Una serie de afloramientos dispersos de rocas volcánicas y volcanoclásticas, distribuidos sobre el macizo granítico paleozoico, en la parte más oriental del área de estudio, cerca de la mina, y a los que se asocian cuerpos subvolcánicos dioríticos a microdioríticos, se asimilan a esta unidad.

De acuerdo a las observaciones de terreno, estas unidades mesozoicas, se disponen sobre una paleosuperficie irregular labrada sobre los granitoides paleozoicos y son recortadas a su vez por filones de andesita a microdiorita de edad indeterminada.

### 3.5.2 Rocas Intrusivas

Regionalmente, el área de estudio se presenta mayoritariamente constituida por al menos tres grupos de rocas intrusivas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas. Estas se disponen espacialmente en el sector donde se ubicará la mina, el Depósito de Arenas y otras instalaciones. Sus características se describen a continuación (Ref.15):

- Un primer grupo constituido por granitos a sienogranitos de grano grueso, en el que se distinguen los denominados Granito Caserones (Pzmg), del Carbonífero Superior y el Granito El Colorado (Pzsg). El primero incluye granitos de biotita y anfíbolos de colores rojos a rosado-naranja, equigranulares, hipidiomórficos y de grano grueso, a los que se asocian facies subordinadas de microgranito. El Granito El Colorado, ha sido descrito como un leucogranito rosado de biotita y muscovita de grano medio a grueso, cuyas edades radiométricas obtenidas más al norte dan valores entre 260 y 270 Ma, las que lo ubican en el Pérmico (Paleozoico Superior).
- Un segundo grupo de rocas intrusivas está representado por afloramientos de monzogranitos leucocráticos, de color claro gris a gris rosado muy claro, con cuerpos porfídicos epizonales asociados, que varían desde dioríticos a cuarzo-dioríticos a veces con textura brechizada.

Este macizo intrusivo, que aflora en la parte más oriental del área de estudio, tendría una edad asociada al Paleozoico Superior a Triásico en su mayor parte, sin embargo también se asocia a la extensión norte de un amplio batolito terciario que se extiende más hacia el sur y al cual se asocian varios prospectos de edad Mioceno Superior.

Se reconoce además, en este grupo, pequeños cuerpos de pórfidos dacíticos emplazados en dirección NE, intruyendo a los granitoides y generando halos de alteración hidrotermal en sus bordes.

Los intrusivos paleozoicos del primer grupo y paleozoico-mesozoicos del segundo grupo, se presentan intruídos por una red de filones lamprofíricos de colores oscuros, generalmente de composición andesítica a gábrica. Estos filones, de ancho variable entre algunos centímetros a más de 2 m, son de bordes parejos y nítidos, sin aureolas de contacto y están asociados al patrón de fracturas de la zona. Se trata de filones y/o diques emplazados en un régimen extensional sincrónico o inmediatamente posterior al desarrollo del fracturamiento que afectó a los intrusivos paleozoicos y mesozoicos.

- Un tercer grupo lo constituyen una serie de cuerpos subvolcánicos o “necks” y diques andesítico-dioríticos (microdioríticos) asociados, de hasta 15m de espesor y de textura homogénea y algunos filones más ácidos. Son reconocibles especialmente en la parte superior (nacientes de las quebradas La Brea y La Escarcha) aún cuando también afloran más hacia el oeste en donde intruyen las secuencias triásico-jurásicas. Asociadas a estos cuerpos hipabisales afloran lavas andesíticas. La edad de estos cuerpos intrusivos y lavas asociadas es estimada como Oligoceno a Mioceno y se han asignado transitoriamente a una unidad denominada aquí Complejo Volcánico Oligoceno-Mioceno.

La alteración hidrotermal reconocida en el sector se desarrolla en amplias y coloridas aureolas, afectando principalmente a los granitoides. Las zonas de alteración presentan preferentemente, fuerte silicificación y sericitización pervasiva que destruye completamente la textura original de las rocas intrusivas, incorporando un agregado de sericita-cuarzo, muchas veces acompañadas por limonitas que le imprimen a la roca una gama de tonalidades entre blanco y marrón claro. La alteración fílica (cuarzo sericita  $\pm$  pirita), es en general suave a moderada y se encuentra restringida a zonas intensamente fracturadas, con desarrollo de planos de alteración.

### 3.5.3 Depósitos No Consolidados

En el área se reconoce varios tipos de depósitos no consolidados que conforman la cubierta cenozoico-cuaternaria actual. Ellos son:

#### Depósitos aluviales y fluviales (Qaf)

Constituyen el piso de las quebradas Caserones, La Brea y La Escarcha en sus cursos inferiores, además del río Ramadillas en el sector de Caserones. Corresponden a depósitos aluviales y, en menor medida, a fluviales, antiguos y actuales, de variada composición granulométrica, que en sectores se encuentran aterrazados y cortados por cauces fluviales actuales, especialmente en confluencia con río Ramadillas.

Los materiales aluviales se asocian a crecidas torrenciales del cauce que los transporta. Son materiales con amplio predominio de tamaños grava y arena, porosos, permeables y poco resistentes a la erosión. El espesor máximo de estos depósitos, en la parte baja de la quebrada alcanza casi 50m.

Depósitos fluviales y aluviales asociados al cauce actual de estas quebradas se ubican a nivel superficial de los depósitos aluvionales, aproximadamente a unos 3 a 5 m en promedio. Son el resultado del transporte de material tamaño arena y gravas durante las épocas de deshielo y aumento de la capacidad de transporte de los cursos de agua.

#### **Depósitos fluviales actuales y depósitos aterrazados asociados (Qf)**

- **Depósitos fluvio torrenciales del cauce actual del río Ramadillas.** Constituyen el piso o fondo de las quebradas y corresponden a depósitos fluviales y aluviales asociados al cauce actual del río desde la confluencia con la quebrada La Brea hacia aguas abajo. Corresponde a material detrítico aterrazado, pobremente consolidados, compuestos por bloques y bolones heteromícticos con diámetros desde centimétricos a métricos. Esta variada composición granulométrica, está asociada al carácter episódico torrencial de estos depósitos, los cuales ocurren principalmente durante crecidas de los cauces.

#### **Depósitos de suelos coluviales (Qc)**

- **Escombros de falda.** Ellos conforman una cubierta de suelos de ladera en la parte occidental de la subcuenca, específicamente en la ladera norponiente de la quebrada la Brea y quebrada La Escarcha. Se trata de depósitos coluviales proximales depositados y acumulado al pie de las laderas con bastante pendiente. Están constituidos por material de granulometría gruesa con bajos porcentajes de limo. Estos depósitos se encuentran en equilibrio metaestable y en algunas ocasiones sobrepasan los 30° de inclinación. En los cortes de caminos puede observarse la alternancia de materiales finos y gruesos lo que es típico de coluvios afectados por fenómenos de solifluxión.
- **Depósitos de cobertura coluvial,** conformada por un manto irregular de depósitos. Se trata de depósitos originados por meteorización y erosión del macizo de granito paleozoico en las partes más orientales de la subcuenca La Brea y depositados en niveles topográficamente más bajos en la parte occidental de la subcuenca. El material detrítico está compuesto por arenas y clastos de composición granítica, son porosos y permeables. Los datos de sondajes disponibles actualmente indican espesores variables entre 0.50 a 7m (sondaje SDL-6).
- **Depósitos Periglaciales Coluviales.** Corresponden a conos de escombros de talud y derrames de ladera compuestos por material detrítico, polimíctico, de baja compacidad, constituidos por bloques angulosos y bolones con escasa matriz de finos, originados principalmente por meteorización física y posterior desplazamiento gradual por acción del agua durante la época de deshielo. Estos depósitos se encuentran localmente estabilizados por la presencia de vegetación y en equilibrio metaestable, cuando sobrepasan los 30° de inclinación.

En algunos cortes de caminos, es posible observar, la alternancia de materiales de granulometría fina y gruesa derivados de procesos de solifluxión. En ocasiones, estos depósitos conforman en superficie verdaderos corredores de avalanchas y en otras aparecen cortados por canaletas de erosión producto del hielo, sobre todo en las partes más altas.

Se distribuyen en las laderas de los cordones montañosos de todo el sector, con potencias de entre algunos centímetros a más de 10 m.

#### **Depósitos de cono de deyección (Qcd)**

- Consisten en acumulaciones de material grueso (arena y gravas) poroso y permeable acumulados al pie de quebradas secundarias estrechas y de poco desarrollo que forman conos de talud, pequeños y con alta pendiente con espesores considerables en la parte distal de ellos. La mayoría de ellos han sido cortados por avenidas en el cauce principal al que salen, volumétricamente son

poco importantes. En el sector de la subcuenca La Brea, se ubican de preferencia al pié de la ladera NW.

#### **Depósitos de Remoción en Masa antiguos (Qrm)**

- **Remociones en masa.** En la quebrada del campamento actual se ha observado depósitos no consolidados carentes de estratificación, de mala selección, con clastos sub-angulosos a angulosos que cubren el abanico granulométrico que va desde arenas finas a bloques de rocas, los cuales han sido interpretados como resultado de un deslizamiento antiguo. Depósitos similares que constituyen un notorio lóbulo, se han identificado rellenando una quebrada menor labrada en andesitas de la Formación La Ternera, ubicada entre las quebradas La Brea y La Escarcha. Tales, visibles en el sector occidental de la subcuenca, corresponderían a un evento de ocurrencia muy antiguo generado en un período con mayor abundancia de agua que en la actualidad.
- **Depósitos de Flujos de Barro.** Depósitos de material detrítico, matriz soportado, moderadamente compactos, compuestos por bloques heteromícticos de entre 5 y 50 centímetros de diámetro, inmersos en una matriz de finos arcillosos. Fueron identificados, en la confluencia de la quebrada Caserones y el río Ramadillas, alcanzando potencias de hasta 3 m, intensamente erosionados.

### **3.5.4 Geología Estructural**

El área del proyecto, desde el punto de vista estructural, se ubica en una de las franjas tectónicas más orientales de la cordillera de Copiapó – Vallenar (Ref.15). En efecto, la geología regional del sector cordillerano de Vallenar-Copiapó corresponde a una zona de franjas tectónicas de orientación NS, que comprometen hasta el basamento pre-mesozoico (unidades e intrusivos paleozoicos) limitadas por fallas inversas de alto ángulo con vergencia hacia el oeste, y generalmente con el bloque occidental (colgante) constituido por intrusivos paleozoicos, montándose sobre la cobertura mesocenoica del bloque oriental (yacente). Este estilo de deformación en compresión genera dentro de cada franja arqueamientos estructurales y comúnmente pliegues en la cobertura mesozoica.

En este esquema, el área del proyecto Caserones se ubica en la franja tectónica más oriental, cuyo límite oeste lo constituye el valle del río Vizcachas de Pulido por donde pasa el contacto tectónico entre el granito paleozoico por el oeste y la Formación Quebrada Seca por el este. El límite este de esta franja se ubica al oriente de la mina Caserones en la frontera con Argentina, allí aparece una serie escalonada de falla inversas de alto ángulo con vergencia este, ellas definen el límite oriental de la franja tectónica de Caserones – Río Ramadillas. El sector en donde se emplazará el Acopio de Arenas se ubica en la parte más oriental de la franja tectónica Caserones – Río Ramadillas y está caracterizado por la presencia de intrusivos paleozoicos cortados por filones microdioríticos – andesíticos de edad incierta y por filones y cuerpos hipabisales de pórfidos riolíticos.

Esta disposición permite sugerir una deformación a nivel cortical que habría desarrollado un estilo de “horst y graben” en donde los “horsts” estarían representados por la franjas de intrusivos paleozoicos, mientras que los graben corresponderían a las zonas de afloramiento de las secuencias volcano-sedimentarias. Este dispositivo estructural a nivel geotectónico explica bien las sucesivas franjas aflorantes de intrusivos paleozoicos y la intensa deformación que presentan las secuencias estratificadas mesocenoicas “pinchadas” entre las franjas de granitoides paleozoicos.

En el área de la quebrada Caserones se observa una serie de fracturas y/o diaclasas que afecta a las rocas allí presentes. Las diferentes orientaciones del fracturamiento regional se manifiestan con mayor intensidad en la superficie cubierta por los granitoides paleozoicos, los que muestran un fuerte

e intenso fracturamiento polidireccional, el cual es resultante de la superposición de sistemas de fracturas regionales, probablemente asociadas a fallas, sobre un estilo de fracturamiento propio de los granitoides paleozoicos debido al diaclasamiento por enfriamiento del intrusivo, exagerado posteriormente por fenómenos de erosión diferencial (crioclastismo, glaciares, erosión por agua, etc.), que acentuaron e incluso acrecentaron la cantidad de diaclasas en superficie.

### 3.5.5 Fallas

En el sector de Caserones, la falla de las nacientes de quebrada Cocambico se muestra como una estructura importante, ya que el desplazamiento en sentido dextral, es de aproximadamente unos 200 a 300 m, el que además iría acompañado de un alzamiento relativo del bloque sur. (**Ref. 9**). Esta falla cruza de este a oeste en la parte inferior de la **Figura 3-9**.

En las nacientes de la quebrada Cocambico los efectos de esta estructura son que altera, en las cercanías de su traza, la inclinación de los niveles sedimentarios de la Formación Lagunillas, los que de una inclinación monótona y repetitiva de 25° al W pasan en corto trecho a adoptar una inclinación vertical, para después retomar la misma actitud de 25° al oeste, al sur inmediato de la traza de la falla. Por otra parte, se observa un claro desplazamiento en el que el nivel de lavas de la base del Miembro superior Pastos Largos, se enfrenta hacia el sur con el nivel de conglomerados del Miembro inferior Cocambico lo que indica un desplazamiento relativo hacia el oeste del bloque sur el cual habría producido el cambio de inclinación por arrastre de las capas del bloque norte en la parte más cercana a la zona de falla.

El examen de terreno del área, así como el análisis de las ortofotos de alta resolución disponibles para la zona, muestran que esta estructura no afecta a las rocas de la Formación Quebrada Seca, por lo tanto es posible sugerir que la edad de este fallamiento EW sería al menos post-Jurásico y pre-Cretácico Superior.

Es importante destacar que no existe evidencias visibles de la continuación de esta estructura en el área de estudio del proyecto del Acopio de Arenas, a excepción del alineamiento que muestra la quebrada Caserones en su tramo EW y el contacto entre dos unidades de granitos paleozoicos (Pzsg y Pzmg). Por este hecho, no aparece en el plano geológico del proyecto de acopio de arenas.

La traza probable de esta falla, atraviesa y pone en contacto dos cuerpos intrusivos, sin generar en ellos patrones estructurales tales como zonas de cizalle o zonas de falla.

Por otra parte, esta falla, al oeste del sector de estudio, no afecta a las unidades geológicas más modernas (Formación Quebrada Seca, por ejemplo), por lo tanto se trata de una falla no-activa actualmente.

En conclusión esta falla antigua no representa ningún riesgo desde el punto de vista de fundación, como de potenciales filtraciones fuera del depósito.

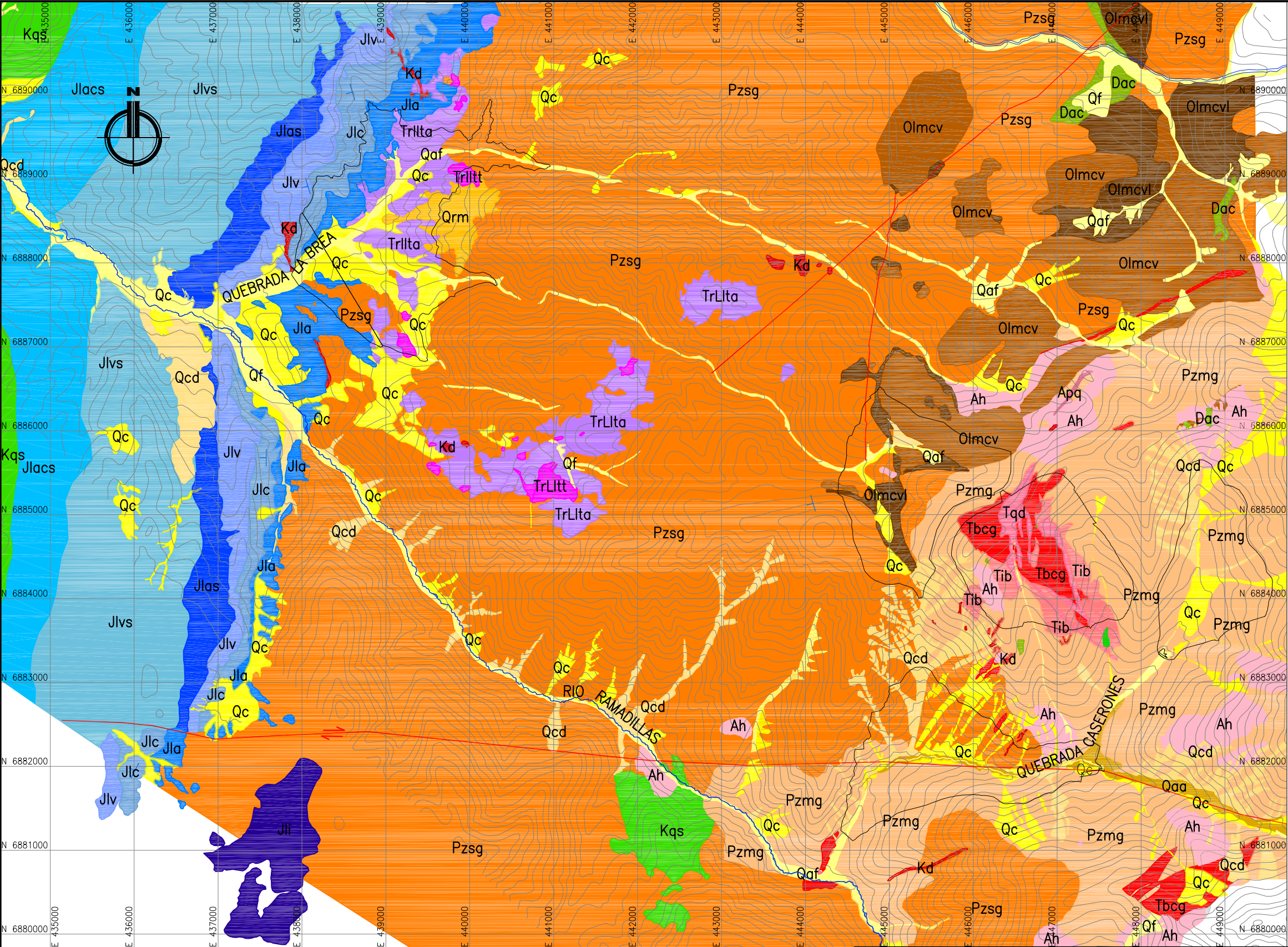
### 3.5.6 Fracturas y Diaclasas

En los Intrusivos del sector Caserones se distingue numerosos sistemas de fracturamiento polidireccionales, siendo los principales los siguientes (Ver **figura 3-10**):

- **N77°E/ 72°S** con variaciones de hasta 25° en el rumbo hacia el este u oeste, y de  $\pm 15^\circ$  en el manto, este set de diaclasas, alcanza frecuencias de hasta 2.5 diaclasas por metro, en general planas, rugosas y pocos milímetros de espesor sin rellenos, en general de largas corridas (más de 10m, pero discontinuas).
- **N13°W/77°W** con variaciones hasta  $\pm 10^\circ$  tanto en el rumbo como en el manto. Se trata de fracturas con largos de hasta 5m, en general planas y de superficie rugosa, sin rellenos y discontinuas con una frecuencia, de 2.5 diaclasas por metro, en general, sin rellenos.
- **N51°W/83°S** con variaciones de aproximadamente 18° en su rumbo y 20° en el manto. Las estructuras que componen este set, son en general de largos menores a 5m, sin rellenos, espaciamiento medio de 2.5 estructuras por metro, planas y de superficie rugosa.
- **N66°E/27°**. Este sistema está compuesto por estructuras más bien discontinuas, de trazas menores a 2m, con superficies planas pero rugosas, con frecuencia de fractura promedio de 4 ff/m, y máximos de hasta 10 estructuras por metro. Las estructuras se encuentran típicamente sin relleno.

Es importante destacar que los sistemas de fracturas descritos corresponden a sistemas de fracturamiento antiguos que en la actualidad no son activos, y que en los distintos sectores no necesariamente se encontrarán los cuatro sistemas, sino, que estos corresponden a los más representativos de la zona en estudio.





**SIMBOLOGIA**

- Rio Ramadillas
- Perfil geológico
- Falla
- Infraestructura
- Fósil
- Rumbo y Manteo

**LEYENDA**

**DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS**

- Qc** Depósitos de suelos coluviales (escombros de falda, conos de deyección coalescentes, etc.)
- Qf** Cauces fluviales actuales y depósitos aterrazados asociados.
- Qaf** Depósitos aluviales y coluviales aterrazados antiguos cortado por los depósitos del cauce actual.
- Qrm** Depósitos de probables deslizamientos
- Qcd** Depósitos de conos de deyección identificados

**COMPLEJO VOLCANICO OLIGO-MIOCENO**

- Olmcv** Depósitos de probables deslizamientos.
- Olmcvl** Lavas andesíticas y aglomerados asociados.

**FORMACION QUEBRADA SECA**

- Kqs** Lavas, tabas, brechas, y conglomerados continentales. CRETÁCICO SUPERIOR?
- Dac** Tobas dacíticas (WARREN PRATT, 2005).

**FORMACION LAGUNILLAS**

**MIEMBRO SUPERIOR**

- Jlacs** Areniscas y conglomerados superiores.
- Jlvs** Lavas andesíticas superiores.

**MIEMBRO INFERIOR**


- Jli** Miembros inferior indiferenciado.
- Jlas** Areniscas rojas medias a finas.
- Jlv** Rocas volcánicas andesíticas amigdaloidales.
- Jlc** Conglomerados rojos.
- Jla** Areniscas rojas basales.

**FORMACION LA TERNERA**

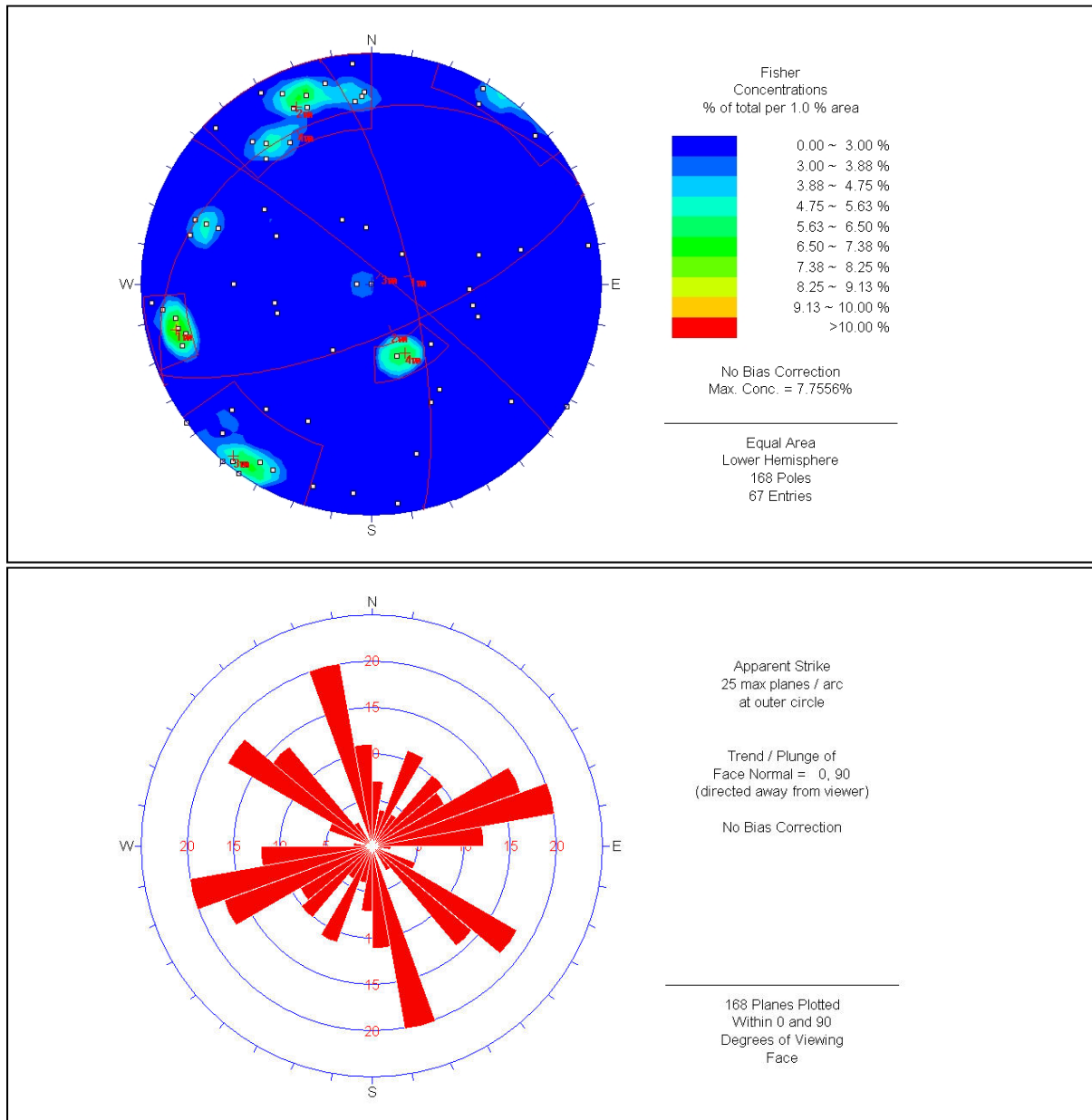
- TrLIta** Lavas andesíticas gradando lateralmente a ortoconglomerados monomixíticos.
- TrLItt** Niveles de tobas riolíticas.

**ROCAS INTRUSIVAS**

- Tpd** Pórfidos dacíticos.
- Apq** Aplita (WARREN PRATT, 2005 ).
- Tbcg** Brechas hidrotermales con clastos de granito (en el área de la mina). (WARREN PRATT, 2005)
- Tib** Tobas dacíticas (WARREN PRATT, 2005)
- Kd** Intrusivos hipaisales de microdiorita a andesita y filones asociados.
- Pzmg** Monzogranito y granodiorita leucocrático con anfíbola y biotita de colores gris claro.
- Pzsg** Granitos rojos y sienogranitos paleozoico (plutón Pircas Coloradas (?)).
- Ah** Alteración hidrotermal.

PREPARADO POR:  <b>SRK Consulting</b> Engineers and Scientists										CLIENTE:  <b>CASERONES</b> PROYECTO DE MINERIA LUMINA COPPER CHILE S.A.				PROYECTO: <b>ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS</b>			
DIBUJO: N. MORALES										CLIENTE:				TITULO: <b>MAPA GEOLOGICO</b> (MODIFICADO DE: ARCADIS, Febrero 2009.			
PROYECTO: I. SANTIBANEZ										ING.PROYECTO:				Plano N° 3445-0000-GE-PLA-001. EIA Proyecto Caserones, Adenda 1.)			
ING.PROYECTO: I. SANTIBANEZ										JEFE DISCIPLINA:							
JEFE DISCIPLINA: B. LABARCA										JEFE PROYECTO:							
JEFE PROYECTO: B. LABARCA										CONTRATO N°:							
SRK										N° PLANO:				N° PROYECTO: 02-2161-02			
														ESCALA: 1:50.000			
														N° FIGURA: 3.9			
														REV. 0			





**Figura 3-10 Diagramas de Schmidt y de Roseta del patrón estructural del sector Caserones (Ref.9).**

## 3.6 Antecedentes Hidrogeológicos

En este capítulo se presenta una síntesis de los antecedentes hidrogeológicos colectados y presentados en el EIA, información contundente que ha respaldado los diseños planteados en la ingeniería.

Dentro de estos estudios se destaca aquellos emitidos por SITAC en las quebradas asociadas a los depósitos de relaves, los estudios de Schlumberger en la hidrogeología del rajo, los estudios geotécnicos de ARCADIS y los diseños de AKER Solutions, entre otros. Las referencias se encuentran en el **Capítulo 8**.

A continuación se describe los trabajos realizados anteriormente y una síntesis del modelo hidrogeológico conceptual planteado en la quebrada Caserones.

Para el EIA se contó con la información de sondeos geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos con información relevante para este estudio y con trabajos de prospección geofísica (TEM) en 5 perfiles ubicados en la parte de confluencia hacia la quebrada Ramadillas.

### 3.6.1 Pozos de Exploración SITAC

SITAC S.A. realizó en mayo de 2009 la construcción de tres pozos de exploración denominados **DA-01, DA-02 y DA-03**, en el sector confluencia de Quebrada Caserones con Río Ramadillas, a fin de ampliar el conocimiento hidrogeológico en el sector de emplazamiento del Depósito de Arenas.

A fin de determinar las constantes elásticas del acuífero, se realizó una prueba de bombeo de larga duración en el pozo de mayor profundidad (DA-02), utilizando los otros dos pozos como observación ubicados a 249,5 m (DA-01), y a 25,1 m (DA-03) del pozo DA-02, para determinar el coeficiente de almacenamiento (S), y el radio de influencia.

### 3.6.2 Sondeos Geotécnicos Arcadis

ARCADIS desarrolló un programa de exploraciones geotécnicas a lo largo de toda la quebrada Caserones en donde se ubican la mina y las instalaciones principales.

Los sondeos SDU (01, 02, 03 y 04), ubicados en la parte alta de la cuenca (Mina y Depósitos de Lixiviación), indican que el sector está compuesto por dos estratos; el superior correspondiente a material coluvial, y la roca basamental de monzogranito fracturado. La ubicación de la roca basamental no es profunda en este sector, ya que se encuentra entre los 7 y 16 metros desde la superficie.

Los sondeos SPC (01, 02, 04, 05, 06, 07, 08, 09 y 10) y SCHM-01, ubicados en la zona intermedia de la quebrada Caserones, donde se dispondrá del Chancador, Planta, Molienda, etc., muestran la presencia de cobertura principalmente coluvial de unos 10 m, roca meteorizada de entre 15 a 20m de espesor y posteriormente rocas intrusivas, principalmente monzogranitos, diques microdioríticos y pórfidos dacíticos. Las rocas presentes en el área de estudio clasifican de Regular a Buena Calidad Geotécnica, según los valores de RQD reconocidos, los cuales en general son mayores a 50%, excepto cerca de SPC-08, zonas de intensa alteración hidrotermal donde los valores de RQD son menores a 20%. En el informe de construcción de estos sondeos no se indica la presencia de agua subterránea al momento de su perforación, sin embargo 2 de estos sondeos se usaron en la piezometría hecha por SITAC.

Los sondeos **SDA (02, 03 y 04)**, ubicados en la parte baja de la quebrada Caserones, en el sector del depósito de arenas, se caracterizan por tener un estrato superior compuesto por gravas con bolones de monzogranito, y una roca basamental de monzogranito fracturado. A diferencia de la zona alta de la quebrada, la ubicación de la roca basamental es más profunda encontrándose entre 11 y 26 metros desde la superficie. Estos sondeos se encuentran en el sector del pie del depósito de arenas, donde se construiría la barrera hidráulica para el control de infiltraciones.

La roca meteorizada definida a partir de los resultados de los perfiles de refracción sísmica posee calidad geotécnica regular, mientras que los valores de conductividad hidráulica obtenidos para esta roca varían entre  $3 \times 10^{-05}$  y  $8 \times 10^{-03}$  m/día, este amplio rango de variación se debe a los intensos fracturamientos que muestra la roca en estos tramos. Los espesores de roca meteorizada reconocidos en los perfiles de refracción sísmica varían entre 6,0 y 35,0 m.

Desde el punto de vista hidrogeológico estos sondeos aportaron información relevante de la permeabilidad de las unidades en el área de estudio (Lefranc en suelo y Lugeon en roca) y niveles de agua subterránea.

### 3.6.3 Sondeos Schlumberger

En la parte alta de la quebrada, en el sector donde estará ubicada la mina, se instaló varios piezómetros y se ejecutó pruebas de permeabilidad. (RG07-122-RT; RG07-154-R; RG07-164-R; RG07-166-R; RG07-167-R; RG07-169-D; RG07-171-R; RG07-177-D; RG07-183-DT, entre otros)

Los resultados entregados por los ensayos de infiltración permiten caracterizar las unidades geológicas, con valores de conductividad hidráulica del orden de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  m/s. Existe un contraste leve en la conductividad para la unidad de monzogranito entre el tramo con mineralización secundaria, de aquella con mineralización primaria, siendo ésta última la mitad de la primera. En general independiente del tipo de brecha, los valores de conductividad observados son similares.

### 3.6.4 Unidades Hidrogeológicas y Flujo Subterráneo

En base a los antecedentes obtenidos a partir de las pruebas de bombeo realizadas por Sitac, y los sondeos de Arcadis – Lumina, se identificó 2 unidades acuíferas principales y una unidad impermeable:

- Unidad Sedimentaria Fluvio Aluvial reciente. Permeabilidad media a alta.
- Unidad Sedimentaria suelos, terrazas y conos de deyección. Permeabilidad baja.
- Roca basamental impermeable.

Con los niveles estáticos obtenidos, se elaboró una superficie equipotencial del área del depósito de arenas, la que evidencia una zona de recarga en las partes altas de la cuenca con un gradiente en dirección aguas abajo, muy similar al topográfico, donde ocasionalmente se visualiza vegas como consecuencia de afloramientos de agua subterránea a superficie.

Todo esto ha sido resumido en el Mapa Hidrogeológico del Apéndice II.

### 3.7 Calidad Química de los Relaves

En el modelo de transporte de contaminantes presentado a la autoridad en el EIA, se utilizó como información de la calidad de las aguas provenientes de los relaves, antecedentes provenientes de otros depósitos de relaves ubicados en la región y con similares características.

En esa oportunidad se analizó los datos de calidad de las aguas del relave monitoreados en forma mensual durante 7 años obteniendo valores promedio, máximos y mínimos. Para efectos de la inclusión de estos datos en el modelo numérico se optó por simular el escenario más pesimista tomando los valores máximos registrados para las concentraciones de cada uno de los elementos (Ref.15).

Con ocasión al presente estudio, se ha llevado a cabo pruebas metalúrgicas de flotación de modo de obtener una estimación de la calidad de las aguas resultantes del proceso que serán dispuestas en los depósitos de relaves. También se analizó la calidad del agua de uno de los pozos ubicados en el río Copiapó (de propiedad de MLCC) como representativa de la fuente de abastecimiento hacia la planta metalúrgica. Los certificados del laboratorio de las muestras de agua realizadas recientemente se encuentran en el **Apéndice VII-1**.

#### 3.7.1 Metodología de Análisis

Lumina Copper Chile S.A. solicitó a SGS Minerals realizar 3 pruebas de flotación, con el objeto de caracterizar el relave final y las aguas de flotación.

Las muestras que se utilizó corresponden a muestras preparadas con anterioridad y que estaban embolsadas en cargas de 1 kilo y 100% bajo 10 mallas.

Las muestras elegidas para realizar estas pruebas fueron:

- Agua de Proceso: Muestra de agua de un pozo en el valle de Copiapó
- Test 12/M-1: Prueba de flotación con mineral Sulfuro Secundario Brecha (SS BX)
- Test 13/M-12: Prueba de flotación con mineral Sulfuro Primario Brecha (SP BX)
- Test 14/M-19: Prueba de flotación con mineral Sulfuro Secundario Pórfido Dacítico (SS PDA)

Se realizó pruebas de cleaner con un circuito modificado.

Las condiciones utilizadas para estas flotaciones son: 10 g/ton de AP-405, 5 g/ton de AX-343, 20 g/ton de Diesel y 20 g/ton de MIBC. El pH de flotación rougher fue de 10 y 11,8 para la flotación cleaner. El tiempo para la flotación rougher fue de 10 minutos, 8 minutos para la flotación Scavenger y 4, 2, 2 para las flotaciones cleaner.

#### 3.7.2 Resultados

Se realizó una prueba por cada mineral y se analizó el agua recibida y el agua recuperada, cuyos resultados se muestran en la **Tabla 3.7**:

**Tabla 3-7 Calidad de Aguas del Relave**

Parámetro	Unidad	Antecedentes Calidad Aguas en Tranque Similar			Resultados Ensayos SGS - Mayo 2010				Promedio	Mínimo	Máximo
		Promedio	Mínimo	Máximo	Copiapó	12/M1	13/M12	14/M19			
Aluminio	mg/L	0.15	0.01	0.52	<0,5	2.92	1.77	2.61	2.43	1.77	2.92
Amoníaco	mg/L	0.04	0.01	0.05							
Arsénico	mg/L	0.02	0.01	0.03	0.01	0.002	0.003	0.002	0.00	0.002	0.003
Bario	mg/L	0.02	0.01	0.03	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Berilio	mg/L	0.01	0.01	0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01			
Boro	mg/L	2.60	0.60	5.12	2.79	2.16	2.45	2.13	2.25	2.13	2.45
Cadmio	mg/L	0.01	0.01	0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01			
Cianuro	mg/L	0.05	0.05	0.05	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02			
Cloruro	mg/L	1085.25	854.00	1648.00	89.00	150	98	190	146.00	98	190
Cobalto	mg/L	0.01	0.01	0.01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			
Cobre	mg/L	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.06	0.04	0.02	0.06
Cromo Hexavalente	mg/L	0.01	0.01	0.01	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			
Detergente	(mg SAAM/L)	0.06	0.05	0.07	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Compuestos Fenólicos	(mg fen/L)	0.00	0.00	0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01			
Flúor	mg/L	0.87	0.20	1.27	0.60	<0,5	<0,5	<0,5			
Hierro	mg/L	0.14	0.03	0.77	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
Litio	mg/L	0.03	0.02	0.05	0.46	0.24	0.29	0.24	0.26	0.24	0.29
Magnesio	mg/L	29.85	26.60	33.00	50.60	4.35	4.29	4.81	4.48	4.29	4.81
Manganeso	mg/L	0.03	0.01	0.35	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mercurio	mg/L	0.00	0.00	0.00	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001			
Molibdeno	mg/L	0.05	0.03	0.07	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Níquel	mg/L	0.05	0.01	0.09	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			
Nitratos	mg N-NO <sub>3</sub> /L	8.91	0.10	31.52	2.22	5.86	5.2	2.89	4.65	2.89	5.86
Nitritos	mg N-NO <sub>2</sub> /L	0.05	0.05	0.05	<0,02	0.03	<0,02	<0,02	0.03	0.03	0.03
Plata	mg/L	0.01	0.01	0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01			
Plomo	mg/L	0.00	0.00	0.00	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			
Selenio	mg/L	0.00	0.00	0.00	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001			
Sodio Porcentual	%	372.70	47.40	698.00	28.00	39.5	39	34.1	37.53	34.1	39.5
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	4082.82	4.17	5052.00							
Sulfatos	mg/L	2153.20	2.31	3037.60	652.00	693	667	795	718.33	667	795
Vanadio	mg/L	0.01	0.01	0.01	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1			
Zinc	mg/L	0.03	0.01	0.04	<0,01	0.03	<0,01	<0,01	0.03	0.03	0.03
Conductividad Específica	µmho/cm	6275.60	5630.00	6570.00	1818.00	1860	1688	2080	1876.00	1688	2080
pH		7.60	7.20	8.36	7.77	9.05	9.12	9.97	9.38	9.05	9.97
Oxígeno Disuelto	mg/L	4.72	2.60	6.70	8.04	8.23	8.15	8.16	8.18	8.15	8.23
Temperatura	°C	22.94	20.30	25.50	27.00	27.1	27.2	27.1	27.13	27.1	27.2
Color	Escala Pt-Co	5.00	5.00	5.00	<5	<5	<5	<5			
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1.75	1.00	2.00	-	<1,8	--	<1,8			
Coliformes totales	NMP/100 ml	1.75	1.00	2.00	-	<1,8	--	<1,8			
Razón de Adsorción de Sodio	(RAS)	7.99	7.99	7.99	2.20	3.3	3.1	3	3.13	3	3.3
Calcio	(mg/L)	522.33	394.00	611.00	235.00	225	200	311	245.33	200	311
Sodio	(mg/L)	891.50	875.00	908.00	143.03	183.2	160.25	195.45	179.63	160.25	195.45
Potasio	(mg/L)	50.17	46.00	56.30	5.14	24	20.5	17.7	20.73	17.7	24

El balance iónico realizado indica que las muestras (ver Tabla 3-8) fueron correctamente analizadas puesto que los errores en el balance son menores que un 10% que se considera admisible, excepto la del río Copiapó.

**Tabla 3-8 Balance Iónico de las muestras**

	<b>Copiapó</b>	<b>12M1</b>	<b>13/M12</b>	<b>14/M19</b>
<b>Suma de Aniones (meq/L)</b>	16,41	18,97	16,98	22,18
<b>Suma de Cationes (meq/L)</b>	22,38	20,54	18,08	25,21
<b>Balance (%)</b>	<b>-15,39</b>	<b>-3,97</b>	<b>-3,14</b>	<b>-6,38</b>

Utilizando los valores entre las tres muestras analizadas y contrastándolos con los valores utilizados en el estudio anterior se puede observar que las tres muestras analizadas y que se usan en este informe, son mayores para: Aluminio, Cobre, Litio, pH, oxígeno disuelto y turbiedad.

## 4 Trabajos de Terreno

Durante los meses de enero y febrero de 2010 se trabajó en la planificación y coordinación para llevar a cabo los trabajos de prospección hidrogeológica en la quebrada de Caserones.

A partir de los primeros días de marzo se inicia la campaña de terreno, la que se prolongó durante los meses de abril, mayo, junio y parte de julio. Las condiciones climáticas excepcionales respecto a lo esperado en un régimen medio, imposibilitaron tener una continuidad en los trabajos de terreno.

Durante el mes de junio fue necesario detener los trabajos en el sector de quebrada Caserones debido a las condiciones de invierno, que cubrieron de nieve el sector imposibilitando el acceso. Esta situación fue explicada en carta MLCC 160/2010 de fecha 09 de julio de 2010, dirigida a la Sra. Ximena Matas Quilodrán, Intendenta Tercera Región y Presidenta de la Comisión Regional del Medio Ambiente, Región de Atacama.

Se retomó los trabajos de bombeo durante el mes de Octubre de 2010, una vez que el acceso al área de estudio fue despejado. Con ocasión de esta segunda etapa se ha desarrollado las pruebas de bombeo individuales en los 3 pozos de bombeo perforados como barrera hidráulica de contingencia, así como también en otros 2 pozos de bombeos perforados aguas debajo de dicha barrera, con fines de exploración.

En total, los trabajos realizados en el sector de Caserones son los siguientes:

- Campaña geofísica con el Método N-TEM (1400 m en 5 perfiles) con sondeos espaciados cada 20 y 50 m.
- Perforación de pozos para realizar pruebas de bombeo aguas abajo del depósito de arenas.
- Perforación de pozos de observación aguas abajo del depósito de arenas.
- Perforación de piezómetros en las partes altas de la quebrada Caserones para controlar los niveles.
- Monitoreo de Niveles de Agua
- Monitoreo de Calidad de Agua
- Pruebas de bombeo individuales
- Pruebas de bombeo simultáneas
- Verificación de rasgos estructurales en el área

En la quebrada Caserones se terminó de perforar 3 pozos de 8" y 7 pozos de 6", además de 2 piezómetros diamantinos para controlar los niveles en la parte alta de la quebrada (ver **Tabla 4-2**).

Durante la segunda semana de Marzo de 2010 se realizó también, las prospecciones geofísicas N-TEM en 5 perfiles, con separación entre estaciones de 20 m y 50 m, según la localización de cada uno de ellos.

En forma sistemática se controló los niveles de la mayor cantidad de puntos de monitoreo, con el objetivo de trazar una piezometría actualizada del área del proyecto. En las partes altas de la quebrada Caserones no ha sido posible monitorear niveles debido a que no existe acceso por estar cubierto de nieve.

A continuación se describe los resultados de los trabajos de terreno desarrollados.



## 4.1 Sondajes

### 4.1.1 Generalidades

Se perforaron 10 pozos de observación y bombeo como parte del estudio de barrera hidráulica. Esto lo realizó la empresa Perforagua, mediante el sistema “Rotex” que corresponde a roto-percusión con martillo y entubación simultánea con casing de acero con zapata. No se utilizó aditivos, sólo se agregó agua hasta llegar a zona húmeda del sustrato. Los pozos se perforaron en 8 o 6 pulgadas de diámetro, hasta llegar a roca dura, donde el sistema no permite seguir perforando. Algunos pozos fueron profundizados perforando con bit de fondo en 5 ½”.

Las habilitaciones de estos pozos, que corresponden al casing de acero de perforación, ciego o ranurado (con galleta), son diseñadas en base a estimaciones de la estratigrafía a encontrar. Se estableció dejar 2 o 3 tubos ranurados de 6m en la parte inferior de los pozos. Finalizada la perforación se desarrolló los pozos mediante soplado hasta que el agua sale limpia sin sedimentos.

Por otra parte, se perforaron 2 piezómetros en las partes más altas de la quebrada Caserones, para complementar la información piezométrica. Estos fueron perforados por la empresa Connors con método diamantina en diámetro HQ. Se restringió el uso de aditivos durante la perforación a sólo en casos de extrema inestabilidad y previo a la habilitación se lavó el pozo. La habilitación de estos pozos se hizo con tubería PVC de 2” de diámetro, privilegiando el uso de tubería ranurada en la mitad inferior del sondaje.

En el sector alto de quebrada Caserones se realizaron perforaciones con fines geotécnicos, cuyo detalle no se entrega en el presente informe. La información de niveles de agua de estos sondajes se indica en el **Apéndice VI**.

Las muestras de perforación tipo Rotex corresponden a cuttings, los que se recuperaron cada 2 m de perforación, en la mayoría de los casos, y fueron guardados en bolsas y cajas de cutting. Por otro lado, en los piezómetros se tiene testigos de diamantinas que se conservan en bandejas.

La **Tabla 4.1** presenta los datos de ubicación de los nuevos pozos y sus características principales, mientras que la **Tabla 4.2** resume los datos de perforación y habilitación de estos. La **Figura 4-1** muestra la ubicación de los pozos de bombeo y de observación, y en la **Figura 4-2** se ve los piezómetros construidos para complementar la información piezométrica.

Estratigrafía, fotos y habilitación de cada uno de los sondajes se encuentran en el Apéndice III.

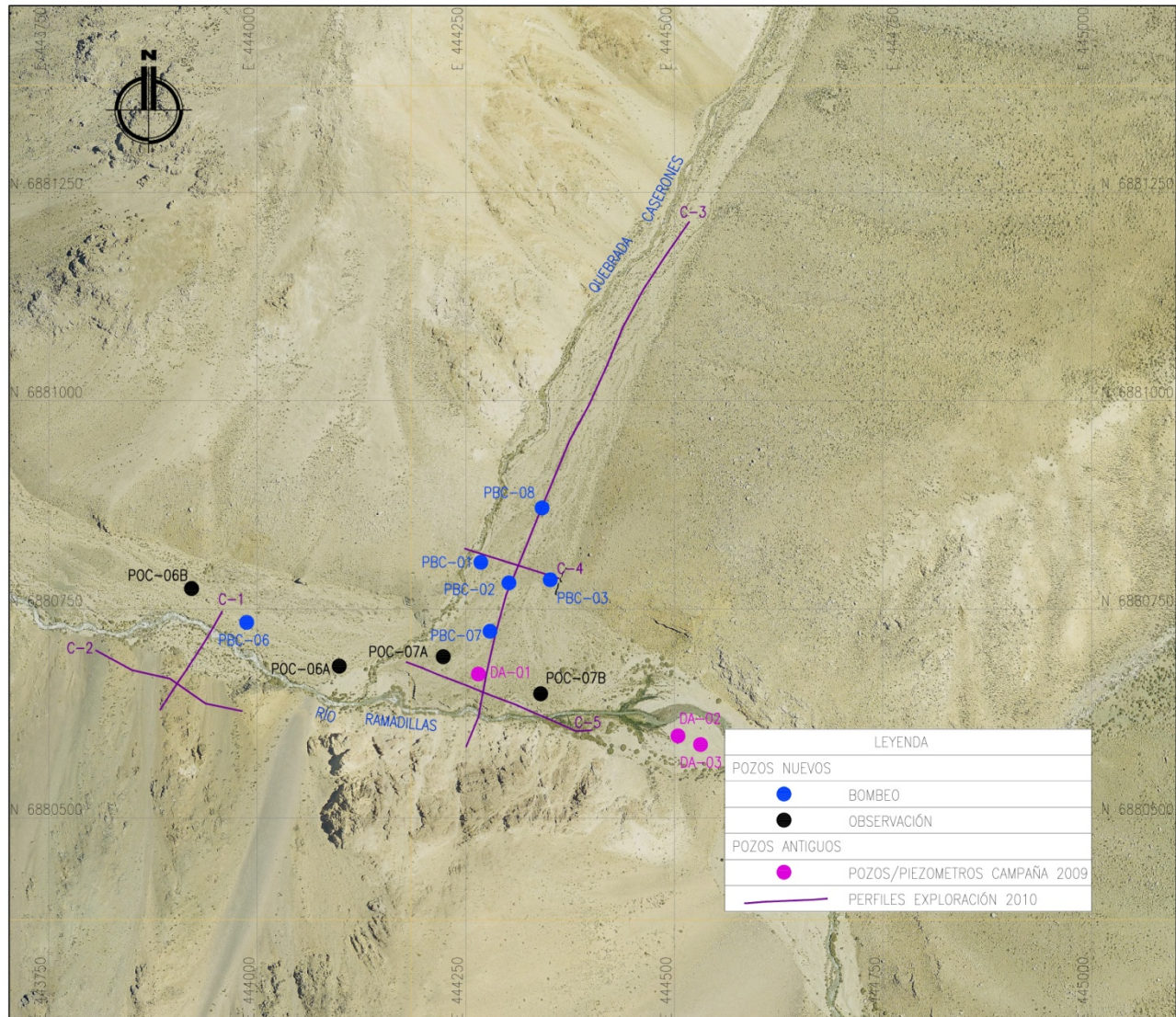
**Tabla 4-1 Pozos Perforados en Sector Quebrada Caserones**

POZO	Tipo	UBICACIÓN		
		Coordenadas Definitivas [UTM 56]		
		Norte (m)	Este (m)	Cota a superficie (msnm)
PBC-01	Bombeo	6.880.806,45	444.267,85	3.201,09
PBC-02	Bombeo	6.880.781,76	444.301,50	3.201,82
PBC-03	Bombeo	6.880.785,44	444.351,00	3.205,23
PBC-06	Bombeo	6.880.734,37	443.987,11	3.168,96
POC-06A	Observación	6.880.682,06	444.098,11	3.178,97
POC-06B	Observación	6.880.774,76	443.920,93	3.160,70
PBC-07	Bombeo	6.880.723,71	444.278,76	3.197,00
POC-07A	Observación	6.880.693,28	444.222,78	3.190,45
POC-07B	Observación	6.880.648,83	444.339,54	3.193,23
PBC-08	Bombeo	6.880.871,62	444.341,27	3.211,00
POC-10	Piezómetro	6.883.120,06	445.206,89	3.781,25
POC-11	Piezómetro	6.881.853,43	444.928,92	3.375,51

**Tabla 4-2 Resumen Perforación y Habilitación Pozos Sector Quebrada Caserones**

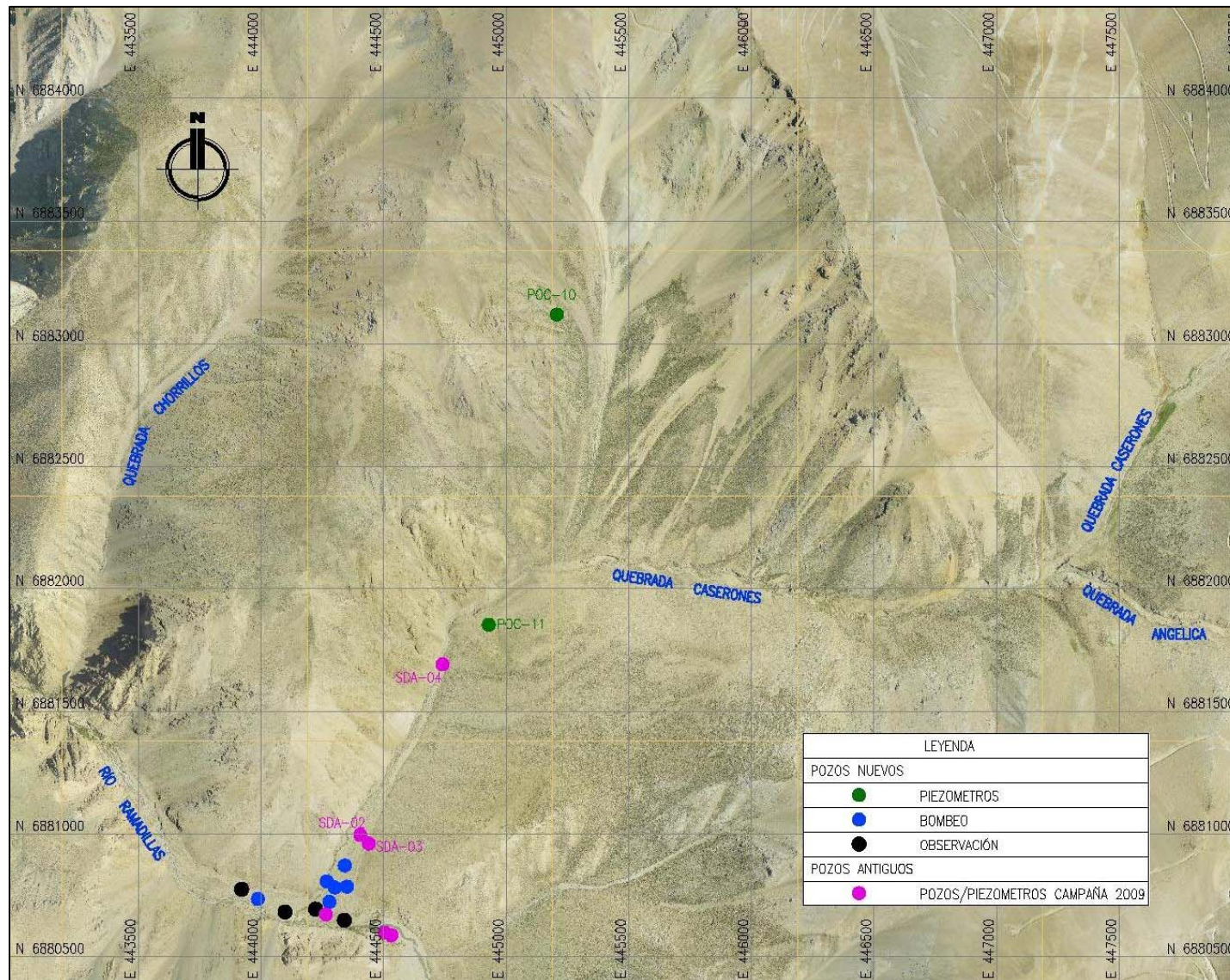
POZO	PERFORACIÓN							HABILITACIÓN			
	Empresa	Tipo perforación	Fecha			Φ (")	Profundidad (m)	Fecha	Tipo	Φ (")	Profundidad (m)
			Desde	Hasta	Desarrollo						
PBC-01	Perforagua	RP-ES	28-Abr	29-Abr	29-Abr	8	42,0	29-Abr	Acero	8	42,0
		RP-BF				5 1/2	54,0		nada		
PBC-02	Perforagua	RP-ES	20-Abr	22-Abr	22-Abr	8	54,0	22-Abr	Acero	8	54,0
		RP-BF				5 1/2	80,0		nada		
PBC-03	Perforagua	RP-ES	23-Abr	27-Abr	27-Abr	8	54,0	27-Abr	Acero	8	54,0
		RP-BF				5 1/2	66,0		nada		
PBC-06	Perforagua	RP-ES	01-Abr	06-Abr	07-Abr	6	49,0	06-Abr	Acero	6	49,0
POC-06A	Perforagua	RP-ES	26-Mar	31-Mar	01-Abr	6	48,0	31-Mar	Acero	6	48,0
POC-06B	Perforagua	RP-ES	24-Mar	25-Mar	26-Mar	6	49,0	25-Mar	Acero	6	49,0
PBC-07	Perforagua	RP-ES	04-May	06-May	06-May	6	50,0	06-May	Acero	6	50,0
POC-07A	Perforagua	RP-ES	07-Abr	14-Abr	14-Abr	6	63,5	14-Abr	Acero	6	63,5
POC-07B	Perforagua	RP-ES	15-Abr	17-Abr	19-Abr	6	47,0	17-Abr	Acero	6	47,0
PBC-08	Perforagua	RP-ES	10-May	14-May	14-May	6	60,0	14-May	Acero	6	60,0
POC-10	Connors	DD	18-Abr	19-Abr	19-Abr	HQ	50,0	19-Abr	PVC	2	49,6
POC-11	Connors	DD	12-Abr	14-Abr	15-Abr	HQ	70,0	14-Abr	PVC	2	69,4

NOTAS: RP-ES: Rotopercusión con entubamiento simultaneo, RP-BF: Rotopercusión con bit de fondo, DD: Diamantina.



**Figura 4-1 Esquema ubicación pozos de bombeo y observación en Sector Quebrada Caserones**





**Figura 4-2 Esquema ubicación piezómetros (color verde) en Sector Quebrada Caserones.**

#### 4.1.2 Estratigrafía

A partir de las muestras recuperadas en los sondeos mencionados, se realizó un mapeo hidrogeológico y una descripción general que agrupa las grandes unidades hidrogeológicas identificadas. Dada la viabilidad que ofrecen los testigos de diamantina, de ellos se realizó una descripción litológica y geotécnica de mayor detalle. En el **Apéndice III** se entrega la información litológica obtenida a partir de los pozos perforados para este estudio. La información está agrupada por pozo y contiene para cada uno:

- Una columna litológica, en que se agrupan las unidades litológicas perforadas en cada caso. En la figura se ha agregado la información de la habilitación realizada, como la de un nivel freático representativo del pozo.
- El mapeo geológico de detalle. En el caso de las perforaciones de cuttings se trata del mapeo geológico, y en las perforaciones diamantinas, del mapeo geotécnico de suelo y de roca del testigo obtenido.
- Finalmente para cada pozo se muestra las fotografías, ya sea del cutting o del testigo diamantino.

Las columnas litológicas se han agrupado con un criterio amplio que permitan una generalización litológica de los tipos de materiales perforados, que ayude a una mejor conceptualización del sistema hidrogeológico. Al respecto, se puede señalar que las principales litologías encontradas corresponden a:

##### **Gravas y arenas**

Esta secuencia se encuentra en la parte superior de los sondeos, alcanzando espesores de unos 44 m (en POC-06A). En algunos casos hay intercalaciones de horizontes con mayor presencia de arenas finas alcanzando espesores de hasta 24 m. (ej.: POC-07B).

##### **Monzogranito**

Este tipo de roca se observa en todos los sondeos realizados en la Quebrada Caserones. En la zona central del área de estudio el monzogranito se presenta fracturado y con paredes meteorizadas con abundante limonitas y hematitas (PBC-01, PBC-02, PBC-07 y PBC-08).

El posterior cruce de esta información, con los datos de niveles de agua y parámetros hidráulicos provenientes de los ensayos y pruebas realizados en los sondeos, permite definir las unidades hidrogeológicas que se indican en el capítulo de Hidrogeología del informe.

## 4.2 Pruebas de Bombeo

Uno de los objetivos esenciales de esta campaña de terreno es la determinación de los parámetros hidráulicos o constantes elásticas (transmisividad (**T**), conductividad (**k**) y almacenamiento (**S**)) del sistema acuífero de Quebrada Caserones. Estos valores, permitirán la construcción de un modelo numérico a través del cual se diseñará la barrera hidráulica definitiva para el control de las infiltraciones en caso de contingencia.

Debido a que los accesos al área de estudio fueron bloqueados por la nieve durante el invierno, se tuvo que detener la campaña una vez terminada las perforaciones, y retomar las pruebas de bombeo en Octubre del presente año. Esta situación fue explicada en CARTA MLCC 160/2010 de fecha 09 de julio de 2010, dirigida a la Sra. Ximena Matas Quilodrán, Intendente Tercera Región y Presidenta de la Comisión Regional del Medio Ambiente, Región de Atacama.

De acuerdo a lo comprometido en la RCA (Apéndice I) se realizaron pruebas de bombeo en los pozos ubicados en la zona de la barrera hidráulica (PBC-1, PBC-2 y PBC-3) y en los pozos ubicados en los perfiles de control que permiten estimar el caudal pasante (PBC-6, PBC-7 y PBC-8).

Un resumen de las pruebas de bombeo realizadas en la quebrada Caserones se muestra en la **Tabla 4-3**, mientras que los datos de las pruebas se compilan en el **Apéndice IV**, donde se adjunta la siguiente información por cada prueba:

- Datos de nivel medidos manualmente en el pozo bombeado y en los pozos de observación.
- Gráficos con los análisis numéricos para obtención de los parámetros hidráulicos.

### 4.2.1 Diseño de las Pruebas

Para la correcta realización de los bombeos se deben llevar a cabo las siguientes etapas:

- Prueba de Gasto Variable:** En este caso se comienza con una prueba de calibración o tanteo cuyo objetivo es estimar los caudales que se bombearán en la prueba de gasto variable. En esta última, se realizan bombeos escalonados crecientes, manteniendo el caudal constante dentro de cada escalón o periodo de tiempo. Idealmente se procede a bombear al menor caudal definido en la calibración hasta que se estabilice el nivel de agua, por un mínimo de 2 hrs. Enseguida se pasa al caudal siguiente hasta que se estabilice el nivel de agua, por un mínimo de 2 hrs, y así hasta terminar las etapas de la prueba. En el caso que el bombeo de calibración muestre que el caudal que entrega el pozo es muy bajo, lo que implica que es técnicamente muy difícil establecer etapas a distintos caudales, es posible que se opte con llevar a cabo solo la prueba de caudal constante.
- Prueba de Gasto Constante:** A partir de la información recopilada en el bombeo variable, se define un caudal para realizar el gasto constante. La extensión de cada prueba es hasta conseguir la estabilización de los niveles, con un mínimo de 24 horas continuas de bombeo a caudal constante, debiendo registrar el nivel estático inicial y los niveles dinámicos durante todo este lapso en el pozo de bombeo y en varios pozos de observación aledaños. Siguiendo las prácticas habituales recomendadas por DGA (DGA, 2008), se considera estabilización cuando se observa un descenso de 2 cm/hora, durante las últimas 3 horas de bombeo. Posteriormente se mide la recuperación de niveles hasta alcanzar un 95% de recuperación respecto del nivel estático inicial.
- Prueba Simultánea de Larga Duración:** El objetivo de esta prueba de bombeo es determinar los parámetros hidráulicos en el largo plazo. También permite verificar las condiciones de borde del acuífero evaluado, puesto que se bombea durante un largo período.



Para ello, y a partir de la información de las pruebas individuales, se determinan los caudales de bombeo en cada pozo, de modo de garantizar la continuidad en el tiempo del alumbramiento constante de agua en cada punto.

En cada una de las pruebas se define previamente que pozos se utilizarán para medir el descenso producido debido al bombeo, es decir los que serán los pozos de observación en cada caso. El registro de los niveles en cada uno de los pozos se realiza tanto en forma manual mediante medidores de nivel de agua, como con transductores de presión, lo que permite validar los datos. Los medidores de nivel de agua utilizados son marca Heron Instruments, mientras que los transductores utilizados son marca In situ, modelo LevelTroll 500, y se utiliza el software Win-Situ 5 tanto para la programación de los sensores, como para la recuperación de los datos.

Antes de cada prueba se realiza una medición de los niveles en los pozos del sector, para definir el nivel estático y después del bombeo determinar el área de influencia que alcanzó el bombeo.

En el capítulo siguiente se detalla lo realizado en cada una de las pruebas de bombeo, agrupadas por pozo.

#### 4.2.2 Ejecución Pruebas Individuales

La Tabla 4-3 muestra los detalles de las pruebas realizadas. El **Apéndice IV** recopila los datos tomados manualmente en los pozos de bombeo.

Para la medición de los caudales de bombeo se utilizó flujómetros digitales, medidas que fueron comparadas con aforos volumétricos para su validación. Para la evacuación de las aguas bombeadas y con objeto de evitar recirculación de las aguas se utilizó contenedores para recibir el caudal bombeado, a partir de los cuales se extendieron mangas plásticas que descargaron el flujo por lo menos 100 m aguas abajo del contenedor. Un ejemplo de instalación utilizada se observa en la **Figura 4-3**, correspondiente al pozo PBC-01.



**Figura 4-3** Equipo de bombeo instalado durante bombeo constante de pozo PBC-01.

**Tabla 4-3 Resumen Pruebas de Bombeo Realizadas**

POZO	Fecha inicio prueba	Tipo de Prueba	Caudal	Nivel Estático	Nivel Dinámico Máximo	Tiempo de Bombeo	Tiempo de Recuperación
			[l/s]	[mbnt]	[mbnt]	HRS	HRS
PBC-01	24-10-2010	VARIABLE	0,32	21,24	30,5	3,0	1
	31-10-2010	VARIABLE	0,23	22,01	26,69	2,5	0
	01-11-2010	CONSTANTE	0,15	21,95	26,66	25,0	13
	14-11-2010	CONSTANTE	0,47	21,63	34,32	24,5	24
PBC-02	29-10-2010	VARIABLE	1,82	23,15	47,54	2,2	2,6
	29-10-2010	CONSTANTE	1,53	23,61	48,96	24,0	5
PBC-03	27-10-2010	VARIABLE	1	24,75	50,7	2,0	0,5
	03-11-2010	CONSTANTE	0,64	25,2	50,6	28,5	24
PBC-06	12-11-2010	VARIABLE	4,09	13,05	25,66	2,0	1,3
	17-11-2010	VARIABLE	3,8	14,05	30,125	2,0	0
	17-11-2010	VARIABLE	4,6	30,125	42,41	4,0	13
	18-11-2010	CONSTANTE	4,4	14,05	40,81	24,0	12
PBC-07	06-11-2010	VARIABLE	0,17	25,965	42,265	1,7	1
PBC-08	07-11-2010	VARIABLE	0,89	25,24	37,01	2,5	2
	08-11-2010	VARIABLE	1,06	25,54	41,3	2,0	2
	09-11-2010	VARIABLE	1,34	27,69	51,78	2,0	2
	09-11-2010	CONSTANTE	1,14	25,64	53,73	24,0	18
PBC-01	21-11-2010	SIMULTANEO	0,36	21,81	36,58	240	127
PBC-02	21-11-2010		1,20	23,19	43,13	240	127
PBC-03	21-11-2010		0,44	25,30	47,39	240	127

[mbnt]: Metros bajo nivel de terreno

El detalle de las pruebas realizadas para cada pozo se entrega a continuación.

#### 4.2.2.1 PBC-01

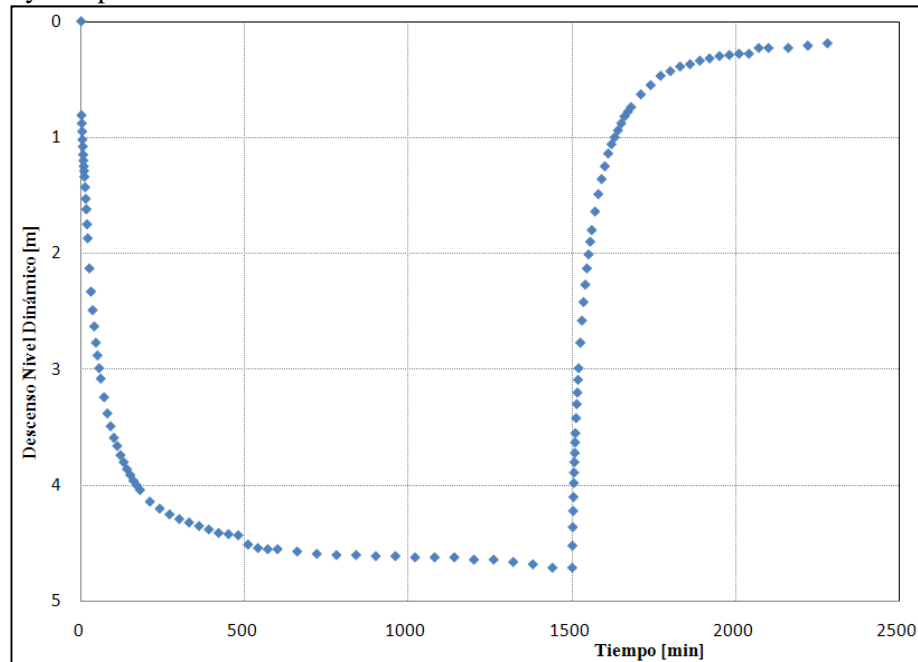
En este pozo se realizó un primer tanteo el 22 de octubre, con un equipo (bomba y motor) diseñado para bombear unos 20 l/s a 40 metros, que causó la inmediata depresión del nivel, razón por la cual se tuvo que detener el bombeo. Ante eso, se cambió por un equipo para extraer menor caudal, y el 24 de octubre se bombeó un caudal promedio de 0,32 l/s (con rango entre 0,2 y 0,34) por 3 horas, basado en medidas puntuales de flujómetro digital. El Nivel Estático (NE) fue de 21,24 [mbnt] y se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 30,50 [mbnt], es decir un descenso de 9,26 m, pero sin poder alcanzar la estabilización.

Ante esto, se optó por realizar un nuevo tanteo con un equipo aun menor, el 31 de octubre, con el que se obtuvo un caudal promedio más bajo (0,23 l/s), por 2,5 hrs. Esta vez el caudal se obtuvo a partir de aforos puntuales de un volumen conocido. El Nivel Estático (NE) fue de 22,005 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 26,685 [mbnt], es decir un descenso de 4,68 m, alcanzando una relativa estabilización solo al final de la prueba.

Como los caudales que era posible extraer del pozo eran muy bajos, se definió no realizar una prueba variable con etapas, pero si programar una prueba de caudal constante para el primero de noviembre a un caudal objetivo de 0,15 l/s, que se pudo promediar durante 25 horas del bombeo y que estuvo en un rango de 0,13 l/s a 0,16 l/s, nuevamente resultado de aforos puntuales de un volumen conocido. El Nivel Estático (NE) fue de 21,945 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 26,655 [mbnt], es decir un descenso de 4,71 m, alcanzando la estabilización (ie descensos de 2 cm/hora, durante 3 horas de bombeo) cerca de las 12 hrs de bombeo.

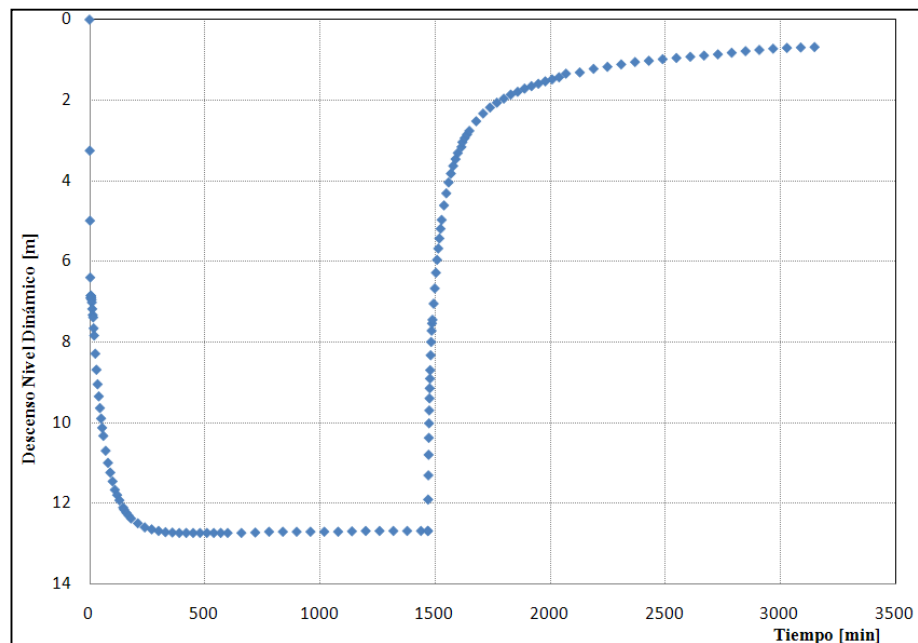


Posteriormente se procedió a medir la recuperación de niveles por 13 hrs, alcanzando un nivel de 21,93 [mbnt], totalmente recuperado. En la **Figura 4.4** se puede ver el descenso en el pozo durante este bombeo y recuperación.



**Figura 4-4 Descenso en pozo PBC-01 durante su bombeo constante del 1 de noviembre.**

Con el fin de obtener un mayor descenso en el pozo, se realizó una nueva prueba a un caudal constante mayor, de unos 0,49 l/s el 14 de noviembre. El Nivel Estático (NE) fue de 21,63 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 34,32 [mbnt], es decir un descenso de 12,69 m, alcanzando una relativa estabilización cerca de las cinco horas de bombeo. En la **Figura 4-5** se puede ver el descenso en el pozo durante este bombeo y recuperación.



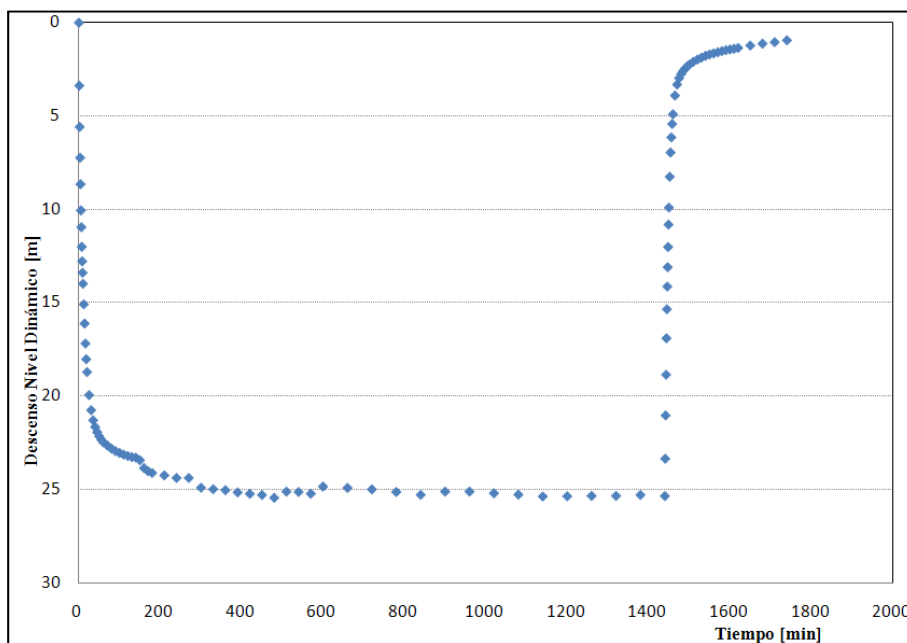
**Figura 4-5 Descenso en pozo PBC-01 durante su bombeo constante del 14 de noviembre.**

Las variaciones de nivel estático entre las pruebas se deben a las variaciones naturales de nivel freático en el sector, lo que se verá en más detalles en el capítulo de niveles.

#### 4.2.2.2 PBC-02

En este pozo se realizó un bombeo de calibración el 29 de octubre obteniéndose un caudal promedio de 1,82 l/s (con rango entre 0,96 y 2,61) por 130 minutos, basado en medidas puntuales de flujómetro digital. El Nivel Estático (NE) fue de 23,15 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 47,54 [mbnt], es decir un descenso de 24,39 m, alcanzándose la estabilización. Posteriormente se mide la recuperación de esta prueba, por 160 minutos, llegando a un nivel de 23,61 [mbnt], es decir a un 98,1 % de recuperación de niveles.

Como el caudal extraíble del pozo es bajo, se definió realizar directamente la prueba de caudal constante. Se programó así comenzar con la prueba de caudal constante el mismo día, inmediatamente después de terminar la medición de la recuperación del ensayo anterior, a un caudal proyectado de 1,5 l/s. Se bombeó por 24 hrs, con un caudal promedio de 1,53 l/s, calculado a partir de totalizador de flujómetro digital instalado en la salida. Además, se corroboró el caudal con aforos puntuales de un volumen conocido, obteniendo un rango entre 1,42 y 2,33 l/s. El Nivel Estático (NE) fue de 23,61 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 48,96 [mbnt], es decir un descenso de 25,35m. Si bien no se obtuvo una estabilización completa (según criterio de descensos de 2 cm/hora durante 3 horas de bombeo), se puede ver en la **Figura 4-6** que el nivel estaba relativamente constante al final del bombeo. Posteriormente se procedió a medir la recuperación de niveles por 5 hrs, alcanzando un nivel de 24,55 [mbnt], es decir con un 96,3 % de recuperación de los niveles. En este caso, la diferencia en el NE entre las dos pruebas se debe a que el sistema no estaba totalmente recuperado al momento de comenzar la prueba constante, aunque como ya se señaló, se tenía más de un 98 % de recuperación.



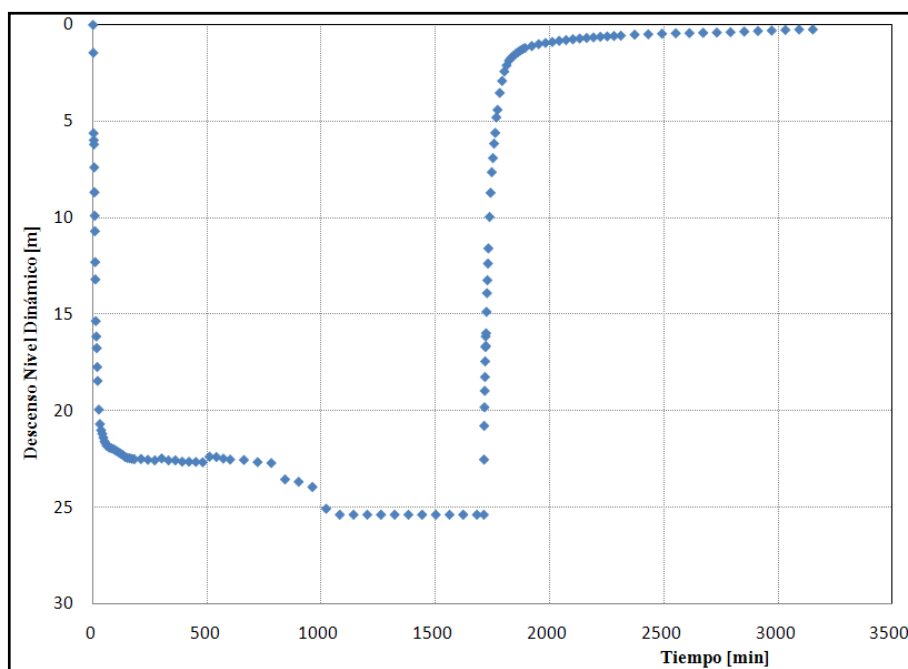
**Figura 4-6 Descenso en pozo PBC-02 durante su bombeo constante.**

#### 4.2.2.3 PBC-03

El 27 de octubre se realizó un bombeo por 2 horas, con caudales entre 0,65 y 1,5 l/s, según aforos puntuales de volumen conocido. El Nivel Estático (NE) fue de 24,75 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 50,70 [mbnt], es decir un descenso de 25,95 m, alcanzándose la estabilización.

Nuevamente, el bajo caudal extraíble del pozo llevó a omitir la prueba de caudal variable, y programar directamente la prueba de caudal constante. Esta se realizó el 3 de noviembre, bombeando por 28,5 hrs un caudal promedio de 0,64 l/s, con un rango entre 0,59 y 1 l/s. El Nivel Estático (NE) fue de 25,205 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 50,60 [mbnt], es decir un descenso de 25,395 m, alcanzándose la estabilización a las 20 hrs de bombeo.

Posteriormente se procedió a medir la recuperación por 24 hrs, alcanzando un nivel de 25,44 [mbnt], es decir con un 99,1 % de recuperación de niveles. La **Figura 4-7** grafica el descenso en el pozo durante este bombeo y recuperación.



**Figura 4-7 Descenso en pozo PBC-03 durante su bombeo constante.**

#### 4.2.2.4 PBC-07

El 6 de noviembre se realizó un bombeo por 100 minutos, con caudales de entre 0,09 y 0,30 l/s, y un promedio de 0,17 l/s. El Nivel Estático (NE) fue de 25,965 [mbnt], se llegó a un Nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 42,265 [mbnt], es decir un descenso de 16,3 m, alcanzándose la estabilización.

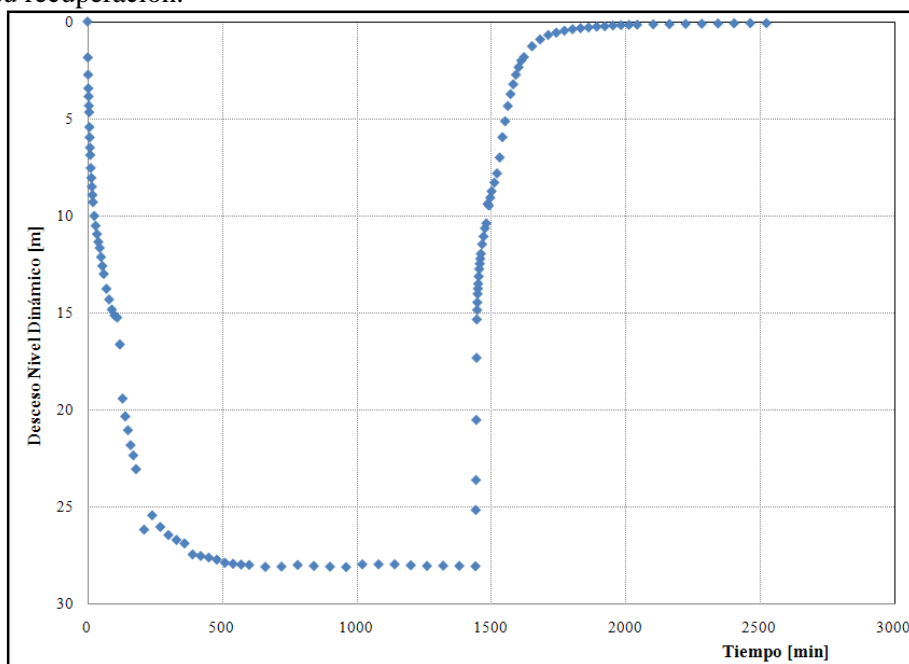
Dado que este fue el caudal más bajo que se extrajo de un pozo y que estaba muy cerca del límite operacional de los equipos existentes en ese momento en terreno, lo que implicaba que no era viable mantener estos caudales por más tiempo, se optó por no realizar más ensayos en este pozo por esta etapa.

#### 4.2.2.5 PBC-08

El 7 de noviembre se realizó un bombeo por 2,5 hrs en este pozo. El caudal fue de 0,47 l/s por las primeras 2 horas, subiendo a 1,15 l/s en la última media hora. El nivel Estático (NE) fue de 25,24 [mbnt], se llegó a un nivel dinámico (ND) al final de la prueba de 37,01 [mbnt], es decir un descenso de 11,77 m, sin alcanzar la estabilización. Posteriormente se mide la recuperación por 2 hrs, hasta llegar a un nivel de 25,91 [mbnt], es decir a un 94,3 % de recuperación.

La noche del 8 de noviembre y la madrugada del 9 de noviembre se realizaron dos pruebas cortas de calibración. Con esto se programo una prueba de caudal constante que comenzó el 9 de noviembre a las 19:00 y se extendió por 24 horas, aun caudal de alrededor de 1 l/s.

La recuperación de niveles se midió por 18 hrs, alcanzando un nivel de 25,72 [mbnt], es decir más de un 99 % de recuperación de niveles. La **Figura 4-8** grafica el descenso en el pozo durante este bombeo y su recuperación.



**Figura 4-8 Descenso en pozo PBC-08 durante su bombeo constante.**

#### 4.2.3 Ejecución Prueba Simultánea

Tal como señala la RCA, el objetivo de la prueba de bombeo simultáneo es definir los volúmenes máximos a producir con los pozos de remediación y determinar los parámetros hidráulicos del acuífero en el largo plazo. Por otro lado es posible evidenciar los límites del acuífero evaluado.

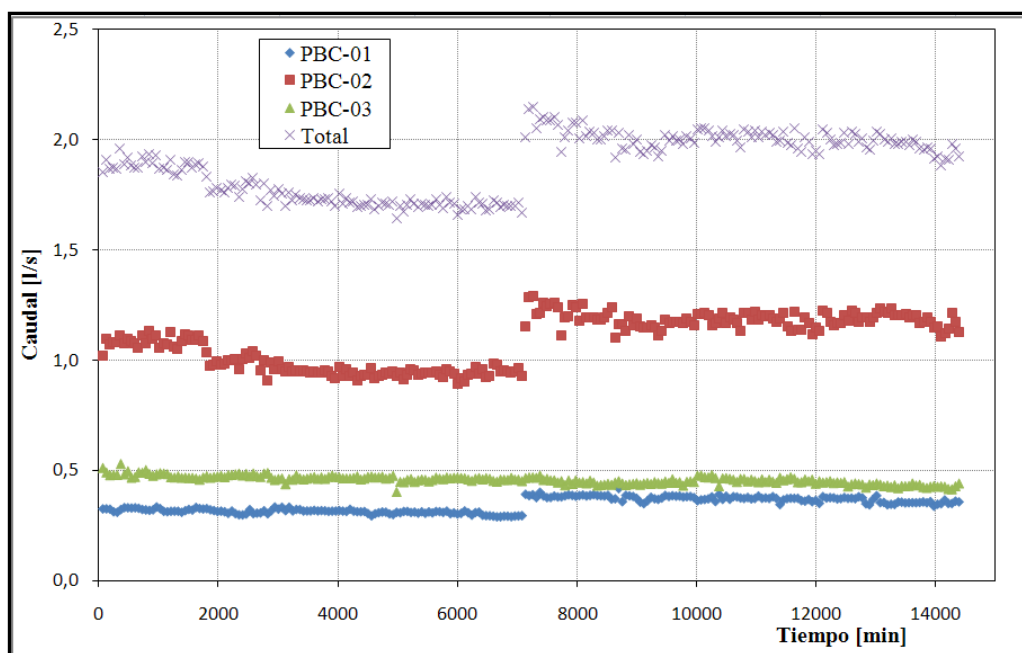
La ubicación definitiva de los pozos de remediación será resultado del modelo numérico, el que estará fundado en los parámetros hidráulicos obtenidos durante esta prueba de bombeo simultánea. Los pozos definitivos no estarán necesariamente en la misma ubicación de los pozos de la presente prueba simultánea.

Los caudales usados en el bombeo simultáneo fueron calculados a partir de la información de los bombeos individuales, de forma que por un lado se lograra producir descensos importantes pero que permitiesen mantener el bombeo, tomando en cuenta su mutua interferencia. Para este cálculo se utilizó la ley de superposición, que permite conocer en forma aproximada el descenso en un punto de un campo de pozos, como el resultante de la suma de los efectos de cada pozo de bombeo.

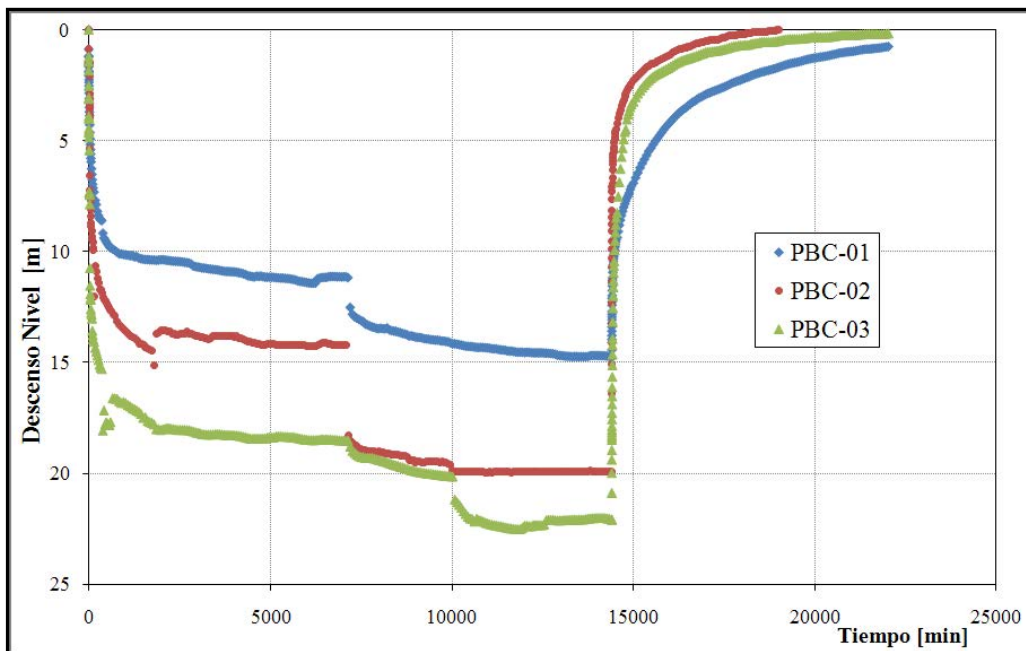
Así, el 21 de noviembre se dio comienzo a la prueba bombeando los pozos PBC-01, PBC-02 y PBC-03. Los caudales se controlaron con flujómetros y aforos volumétricos, y su evolución en el tiempo puede verse en la **Figura 4-9**. Se comenzó con caudales del orden de 0,3 l/s en PBC-01, 1 l/s en PBC-02 y 0,5 l/s en PBC-03. Posteriormente, y casi al cumplir el quinto día de bombeo (aprox. a las 7080 hrs de bombeo) se aumentó levemente el caudal del pozo PBC-01 y PBC-02. En definitiva, los caudales promedios, así como los descensos máximos en cada pozo, son los indicados en la **Tabla 4-4**, mientras que la evolución de los descensos se puede ver en la **Figura 4-10**.

**Tabla 4-4 Bombeo simultaneo del 22 de noviembre de 2010.**

Pozo	Caudal Bombeado promedio [l/s]	Nivel Freático [mbnt]	Nivel Dinámico Máximo [mbnt]	Máximo Descenso [m]
PBC-01	0,36	21,81	36,58	14,77
PBC-02	1,20	23,19	43,13	19,94
PBC-03	0,44	25,30	47,39	22,09



**Figura 4-9 Caudales bombeados durante la prueba simultánea.**



**Figura 4-10 Descenso en pozos de bombeo, durante el bombeo simultáneo.**

En función de las tendencias observadas en el tiempo, se decidió detener el bombeo al decimo día, ya que el plan original de 20 días de bombeo se fundaba en la ubicación original de la barrera al otro lado de la quebrada Ramadillas, sitio bastante más distal y con potencial recarga desde el cauce de dicha quebrada. En ese caso, para asegurar la captación de la potencial pluma de contaminación era necesario generar un cono de depresión bastante extendidos en el área. En el caso actual, en el que la barrera se ubicará inmediatamente aguas debajo de la zanja cortafuga, es innecesario prolongar la prueba por más de 10 días.

Una vez finalizada la prueba se procedió a medir la recuperación, lo que se extendió por más de cinco días hasta llegar a más de un 95 % de recuperación de niveles en los 3 pozos que estuvieron en bombeo.

#### 4.2.4 Interpretación de las Pruebas de Bombeo

Para la interpretación de las pruebas de bombeo, los datos fueron cargados al software **AquiferTest Pro**, versión 2010.1, que permite realizar estimaciones de los parámetros hidráulicos mediante la aplicación de diversos métodos numéricos estándares para la interpretación de pruebas de bombeo.

Los métodos de análisis de las pruebas utilizados fueron Theis con corrección de Jacob y Neuman (a partir de los datos de bombeo), y de recuperación de Theis (a partir de los datos de recuperación) que son apropiados para acuíferos libres. Asimismo se analizó en algunos casos con el método de Theis, que si bien están diseñados para acuíferos confinados, permite realizar comparaciones y establecer ciertos rangos.

Para la aplicación del método de Neuman, y dado que el ajuste depende de cinco parámetros, se definió, dadas las características del acuífero, fijar dos de estos parámetros. Por un lado, se estableció que la conductividad horizontal es diez veces mayor que la conductividad vertical. Por otra parte, la razón entre  $S_y/S$  se fijó en 100.

En el caso específico del pozo PBC-01, cuyo nivel estático está en roca fracturada, se utilizó además la interpretación mediante el método de doble porosidad (según teoría de Warren-Root) y el método de Moench para medios fracturados.

En las tablas que se presentan más adelante con los resultados, se utilizan los siguientes símbolos:

- Sy: Rendimiento específico.
- Kv: Conductividad vertical.
- Kh: Conductividad horizontal.
- Lambda ( $\lambda$ ) en Warren-Root: Coeficiente de flujo de interporosidad, es la razón entre la permeabilidad de la matriz, respecto a la de las fracturas (parámetro dimensional).
- Sigma ( $\sigma$ ) en Warren-Root y Moench: Es la razón entre los coeficientes de almacenamiento específicos de la matriz, respecto a las fracturas.
- Gamma ( $\gamma$ ) en Moench: Coeficiente de flujo de interporosidad, es la razón entre la permeabilidad de la matriz, respecto a la de las fracturas (parámetro dimensional).
- SF en Moench: Parámetro que caracteriza el tipo de fracturas.
- NA: No se obtuvo ese valor con el método en cuestión.

Más detalles sobre los métodos y parámetros se encuentran en la literatura (Kruseman, et al, 1990; Schlumberger, 2010).

A continuación se detallan los resultados obtenidos en la interpretación de las pruebas, para cada uno de los pozos, y también se indica un resumen de los resultados en la **Tabla 4-11**. Los gráficos de ajuste de las curvas de cada una de las interpretaciones se encuentran en el **apéndice IV**.

#### 4.2.4.1 Análisis de Prueba constante del PBC-01

En este pozo se realizaron dos pruebas de bombeo constantes, pero como ya se vio, fue la segunda de ellas, del 14 de noviembre, la que produjo un mayor descenso del nivel, razón por la cual fueron los datos de esta prueba los utilizados para estimar los parámetros hidráulicos. Para este análisis se tomaron en cuenta los datos de nivel del mismo pozo, así como de los pozos PBC-02 y PBC-03. En la **Tabla 4-5** se muestran los valores obtenidos con los diversos métodos empleados.

**Tabla 4-5 Parámetros hidráulicos obtenidos en bombeo constante del PBC-01.**

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-01									
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman		Doble Porosidad (Warren-Root)		Moench	
T [m <sup>2</sup> /día]	2,67E+00	5,98E+00	2,45E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	2,88E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	2,00E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	2,22E+00
k [m/d]	1,33E-01	2,99E-01	1,23E-01	k [m/d]	1,44E-01	k [m/d]	9,99E-02	k [m/d]	1,11E-01
Coeficiente de almacenamiento	9,46E-03	1,13E-04	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01	Almacenamiento específico	5,00E-03	Almacenamiento específico	4,50E-02
				Razón Kv/Kh	1,00E-01	Sigma	7,94E+00	Sigma	2,00E+04
				Razón Sy/S	1,00E+02	Lambda	4,44E+00	Gamma	1,20E-01
								SF	6,31E+01

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-02									
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman		Doble Porosidad (Warren-Root)		Moench	
T [m <sup>2</sup> /día]	2,35E+01	2,38E+01	3,72E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	5,67E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	1,81E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	2,00E+01
k [m/d]	1,18E+00	1,19E+00	1,86E+00	k [m/d]	2,83E-01	k [m/d]	9,03E-01	k [m/d]	1,00E+00
Coeficiente de almacenamiento	1,62E-03	1,62E-03	NA	Sy (Rendimiento específico)	1,10E-01	Almacenamiento específico	1,60E-03	Almacenamiento específico	1,85E-03
				Razón Kv/Kh	1,00E-01	Sigma	3,16E+00	Sigma	1,18E+01
				Razón Sy/S	1,00E+02	Lambda	1,20E-01	Gamma	2,80E-03
								SF	5,60E+01

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-03									
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman		Doble Porosidad (Warren-Root)		Moench	
T [m <sup>2</sup> /día]	2,66E+01	2,69E+01	3,70E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	2,31E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	2,75E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	1,46E+01
k [m/d]	1,33E+00	1,34E+00	1,85E+00	k [m/d]	1,16E+00	k [m/d]	1,38E+00	k [m/d]	7,30E-01
Coeficiente de almacenamiento	6,87E-04	6,87E-04	NA	Sy (Rendimiento específico)	8,08E-04	Almacenamiento específico	7,00E-04	Almacenamiento específico	3,96E-04
				Razón Kv/Kh	1,00E-01	Sigma	2,51E+02	Sigma	3,13E+01
				Razón Sy/S	1,00E+02	Lambda	2,51E-05	Gamma	2,50E-04
								SF	7,04E-03



#### 4.2.4.2 Análisis de Prueba constante del PBC-02

Para el análisis del bombeo constante de este pozo, se consideraron los datos de los pozos de observación PBC-01, PBC-03 y PBC-08, además de los provenientes del mismo PBC-02. En la **Tabla 4-6** se muestra los resultados de los análisis realizados.

**Tabla 4-6 Parámetros hidráulicos obtenidos en bombeo constante del PBC-02.**

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-01					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	1,54E+01	1,62E+01	1,67E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	2,03E+01
k [m/d]	4,40E-01	4,61E-01	4,78E-01	k [m/d]	5,81E-01
Coeficiente de almacenamiento	NA	7,79E-04	NA	Sy (Rendimiento específico)	4,60E-04
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en PBC-08					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	6,76E+01	6,82E+01	7,34E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	1,15E+01
k [m/d]	1,93E+00	1,95E+00	2,10E+00	k [m/d]	3,28E-01
Coeficiente de almacenamiento	1,50E-03	1,50E-03	NA	Sy (Rendimiento específico)	8,42E-02
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en PBC-03					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	1,10E+01	1,24E+01	9,70E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	1,17E+01
k [m/d]	3,15E-01	3,55E-01	2,77E-01	k [m/d]	3,34E-01
Coeficiente de almacenamiento	4,38E-05	3,85E-05	NA	Sy (Rendimiento específico)	3,43E-05
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en PBC-02					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	3,87E+00	NA	7,90E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	4,76E+00
k [m/d]	1,11E-01	NA	2,26E-01	k [m/d]	1,36E-01
Coeficiente de almacenamiento	2,62E-02	NA	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

#### 4.2.4.3 Análisis de Prueba constante del PBC-03

Para el análisis del bombeo constante de este pozo, se consideraron los datos de los pozos de observación PBC-01, PBC-02 y PBC-08, además de los provenientes del mismo PBC-03. En la **Tabla 4-7** se muestra los resultados de los análisis realizados.

**Tabla 4-7 Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba constante del PBC-03.**

<b>DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-01</b>					
<b>ANALISIS UTILIZADO</b>	<b>Theis</b>	<b>Theis con corrección de Jacob</b>	<b>Recuperación Theis</b>	<b>Neuman</b>	
T [m <sup>2</sup> /día]	2,12E+01	2,14E+01	1,54E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	4,52E+00
k [m/d]	6,05E-01	6,11E-01	4,39E-01	k [m/d]	1,29E-01
Coeficiente de almacenamiento	7,65E-04	7,66E-04	NA	Sy (Rendimiento específico)	4,69E-02
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

<b>DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en PBC-08</b>					
<b>ANALISIS UTILIZADO</b>	<b>Theis</b>	<b>Theis con corrección de Jacob</b>	<b>Recuperación Theis</b>	<b>Neuman</b>	
T [m <sup>2</sup> /día]	6,43E+01	6,46E+01	47,9	T [m <sup>2</sup> /día]	6,69E+01
k [m/d]	1,84E+00	1,84E+00	1,37	k [m/d]	1,91E+00
Coeficiente de almacenamiento	NA	7,71E-04	NA	Sy (Rendimiento específico)	7,06E-04
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

<b>DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en PBC-03</b>					
<b>ANALISIS UTILIZADO</b>	<b>Theis</b>	<b>Theis con corrección de Jacob</b>	<b>Recuperación Theis</b>	<b>Neuman</b>	
T [m <sup>2</sup> /día]	6,43E+01	NA	1,60E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	1,93E+00
k [m/d]	1,84E+00	NA	4,58E-02	k [m/d]	5,50E-02
Coeficiente de almacenamiento	NA	NA	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

<b>DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en PBC-02</b>					
<b>ANALISIS UTILIZADO</b>	<b>Theis</b>	<b>Theis con corrección de Jacob</b>	<b>Recuperación Theis</b>	<b>Neuman</b>	
T [m <sup>2</sup> /día]	1,12E+01	1,16E+01	1,45E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	3,00E+00
k [m/d]	3,19E-01	3,30E-01	4,14E-01	k [m/d]	8,57E-02
Coeficiente de almacenamiento	1,07E-04	1,05E-04	NA	Sy (Rendimiento específico)	6,00E-03
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

#### 4.2.4.4 Análisis de Prueba constante del PBC-06

Para el análisis del bombeo constante de este pozo, se consideraron los datos de los pozos de observación POC-06A y POC-06B, además de los provenientes del mismo PBC-06. En la **Tabla 4-8** se muestra los resultados de los análisis realizados.

**Tabla 4-8 Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba constante del PBC-06.**

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-06					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	1,14E+01	2,57E+01	1,51E+02	T [m <sup>2</sup> /día]	1,50E+01
k [m/d]	3,25E-01	7,33E-01	4,31E+00	k [m/d]	4,29E-01
Coeficiente de almacenamiento	6,51E-02	7,90E-03	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en POC-06A					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	2,51E+02	2,60E+02	1,31E+03	T [m <sup>2</sup> /día]	2,88E+01
k [m/d]	7,16E+00	7,43E+00	3,74E+01	k [m/d]	8,22E-01
Coeficiente de almacenamiento	3,25E-03	3,21E-03	NA	Sy (Rendimiento específico)	1,46E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en POC-06B					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	3,05E+02	3,08E+02	2,71E+02	T [m <sup>2</sup> /día]	6,55E+01
k [m/d]	8,70E+00	8,79E+00	7,73E+00	k [m/d]	1,87E+00
Coeficiente de almacenamiento	3,68E-04	3,66E-04	NA	Sy (Rendimiento específico)	9,56E-03
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

#### 4.2.4.5 Análisis de Prueba constante del PBC-08

Para el análisis del bombeo constante de este pozo, se consideraron los datos de los pozos de observación PBC-02 y PBC-03 además de los provenientes del mismo PBC-08. En la **Tabla 4-9** se muestra los resultados de los análisis realizados.

**Tabla 4-9 Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba constante del PBC-08.**

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-02					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	3,40E+01	3,43E+01	5,11E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	4,55E+00
k [m/d]	1,36E+00	1,37E+00	2,05E+00	k [m/d]	1,82E-01
Coeficiente de almacenamiento	2,20E-03	2,20E-03	N/A	Sy (Rendimiento específico)	6,96E-02
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-08					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	1,67E+00	6,00E+00	1,75E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	3,47E+00
k [m/d]	6,66E-02	2,40E-01	6,98E-02	k [m/d]	1,39E-01
Coeficiente de almacenamiento	5,00E-01	6,58E-02	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos con sensor en PBC-03					
ANALISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	3,87E+01	3,91E+01	3,83E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	5,23E+00
k [m/d]	1,55E+00	1,57E+00	1,53E+00	k [m/d]	2,09E-01
Coeficiente de almacenamiento	1,56E-03	1,56E-03	N/A	Sy (Rendimiento específico)	6,43E-02
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

#### 4.2.4.6 Prueba de Bombeo Simultáneo (PBC-01, PBC-02 y PBC-03).

Para el análisis del bombeo simultáneo, se consideraron los datos de los pozos en bombeo PBC-01, PBC-02 y PBC-03, además de los pozos de observación PBC-08 y POC-07A. En la **Tabla 4-10** se muestra los resultados de los análisis realizados.

**Tabla 4-10 Resumen de los resultados obtenidos a partir de prueba simultánea.**

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-01					
ANÁLISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	1,74E+00	1,08E+01	1,22E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	3,44E+00
k [m/d]	4,98E-02	3,08E-01	3,50E-02	k [m/d]	9,84E-02
Coeficiente de almacenamiento	2,98E-01	8,29E-05	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-02					
ANÁLISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	3,52E+00	4,83E+00	1,84E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	6,02E+00
k [m/d]	1,01E-01	1,38E-01	5,26E-02	k [m/d]	1,72E-01
Coeficiente de almacenamiento	5,00E-01	5,00E-01	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-03					
ANÁLISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	1,40E+00	2,48E+00	1,81E+00	T [m <sup>2</sup> /día]	2,36E+00
k [m/d]	4,00E-02	7,10E-02	5,18E-02	k [m/d]	6,74E-02
Coeficiente de almacenamiento	1,46E-01	5,00E-02	NA	Sy (Rendimiento específico)	5,00E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en PBC-08					
ANÁLISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	5,66E+01	5,77E+01	1,28E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	6,77E+00
k [m/d]	1,62E+00	1,65E+00	3,67E-01	k [m/d]	1,93E-01
Coeficiente de almacenamiento	2,33E-03	2,31E-03	NA	Sy (Rendimiento específico)	2,17E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

DATOS UTILIZADOS: Niveles medidos manualmente en POC-07A					
ANÁLISIS UTILIZADO	Theis	Theis con corrección de Jacob	Recuperación Theis	Neuman	
T [m <sup>2</sup> /día]	5,66E+01	5,72E+01	1,06E+01	T [m <sup>2</sup> /día]	6,37E+00
k [m/d]	1,62E+00	1,64E+00	3,02E-01	k [m/d]	1,82E-01
Coeficiente de almacenamiento	9,02E-03	9,02E-03	NA	Sy (Rendimiento específico)	3,93E-01
				Razón Kv/Kh	1,00E-01
				Razón Sy/S	1,00E+02

#### 4.2.4.7 Resumen de valores obtenidos y análisis preliminar de las pruebas de bombeo.

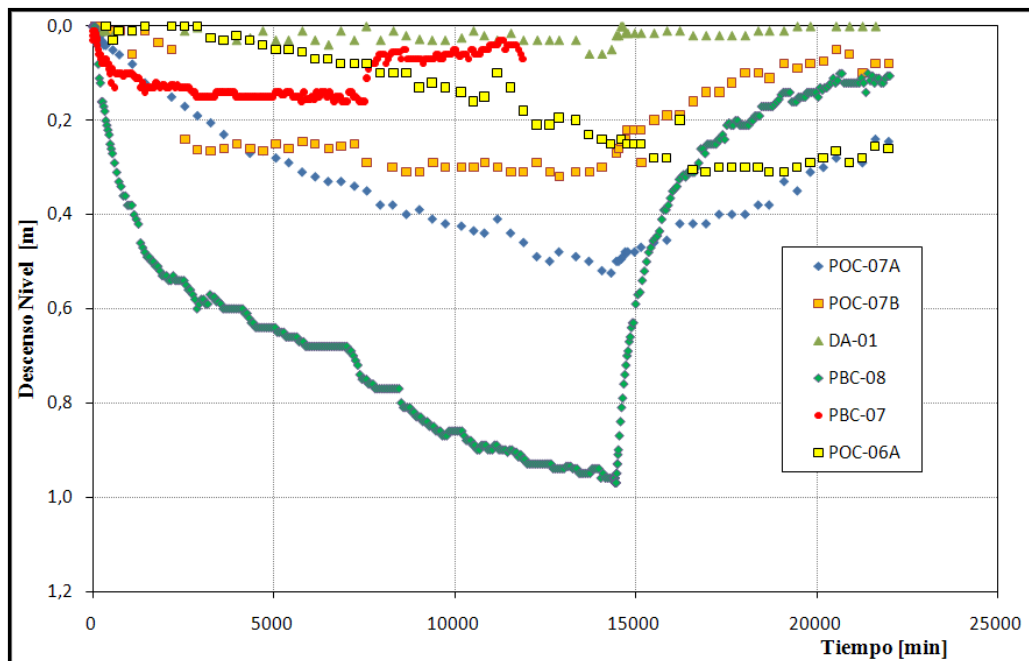
En la **Tabla 4-11** se pueden observar un resumen de los valores obtenidos por pozo.

**Tabla 4-11 Valores de T (m<sup>2</sup>/día) y K (m/día) obtenidos por pozo**

Pozo	T min [m <sup>2</sup> /día]	T max [m <sup>2</sup> /día]	T prom [m <sup>2</sup> /día]	k min [m/d]	k max [m/d]	k prom [m/d]
PBC-01	2,00	37,20	16,79	0,10	1,86	0,84
PBC-02	3,87	73,40	23,38	0,11	2,10	0,67
PBC-03	1,60	66,90	27,62	0,05	1,91	0,79
PBC-06	11,40	1310,00	250,20	0,33	37,40	7,14
PBC-08	1,67	51,10	21,51	0,07	2,05	0,86

Los rangos de valores obtenidos son razonables de acuerdo a los antecedentes existentes (ver Apéndice VIII) y que se analizarán en el punto cinco de este informe. Hay que tener presente que estos valores corresponden a los obtenidos en diferentes pozos, que a su vez están habilitados en distintos horizontes litológicos, por lo cual no pueden asignarse directamente a una de la unidades hidrogeológicas.

Respecto a la prueba de bombeo simultánea es necesario indicar que durante su ejecución se monitorearon niveles en los pozos ubicados en el sector. La **Figura 4-11** muestra los descensos en algunos de los pozos, mientras que la **Tabla 4-12** indica los descensos acumulados al final del bombeo. Hay que señalar que algunos pozos siguieron bajando su nivel con posterioridad al cese del bombeo, como el POC-06A (ver **Figura 4-11**).

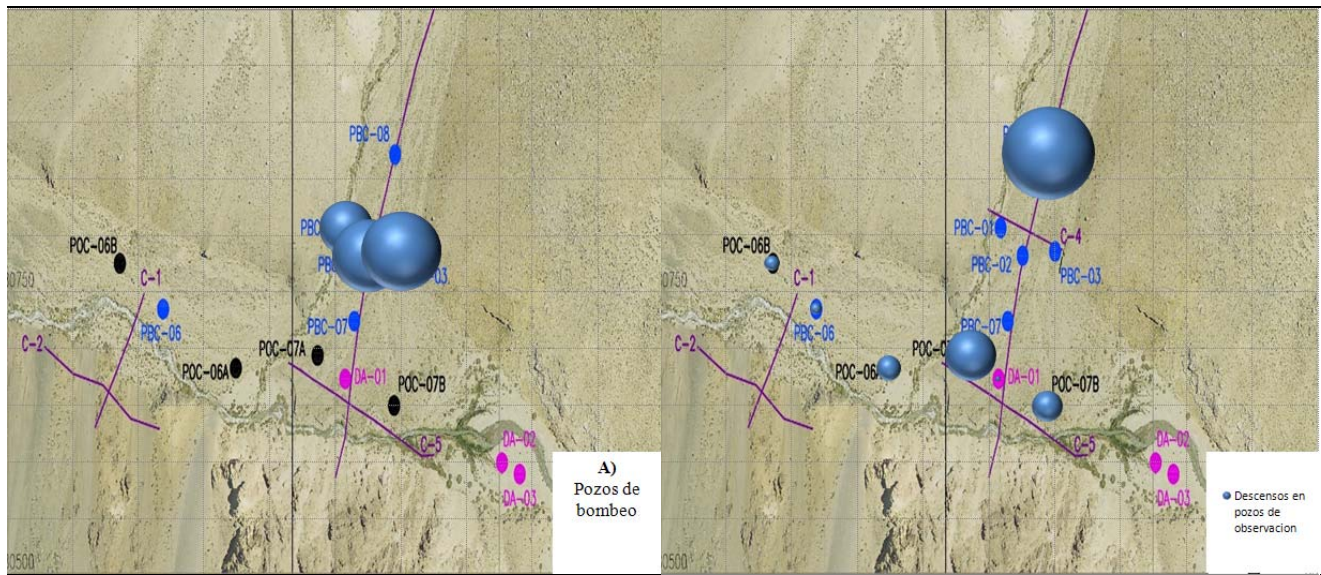


**Figura 4-11 Descenso en pozos de observación, durante el bombeo simultáneo.**

Para analizar cómo se distribuyeron arealmente los descensos de nivel con el bombeo simultáneo, se muestra en la **Figura 4-12** una representación relativa de los descensos señalados en la **Tabla 4-12**. Así, en el lado derecho de la figura se muestra los descensos solo en los tres pozos de bombeo, mientras que en el lado izquierdo se muestra los descensos en los pozos de observación.

**Tabla 4-12 Descensos máximos durante bombeo simultaneo del 22 de noviembre de 2010.**

Pozo	Descenso [m]	Pozo	Descenso [m]	Pozo	Descenso [m]
PBC-08	0,96	POC-06B	0,15	PBC-07	0
POC-07A	0,52	PBC-06	0,11	DA-02	0
POC-07B	0,31	DA-01	0,05	DA-03	0
POC-06A	0,25	POC-11	0,01		



**Figura 4-12 Descensos relativos ocurridos en los pozos durante el bombeo simultáneo.**

## 4.3 Geofísica

Geodatos SAIC realizó un Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica en el área del proyecto que comprende los sectores de La Brea y Caserones. El objetivo fue determinar las características geoelectricas del subsuelo con el propósito de aportar en la definición e interpretación estratigráfica y de las unidades geológicas.

### 4.3.1 Metodología

Se empleó la técnica de Transiente Electromagnético en la modalidad de NanoTEM que permite una mayor resolución de las estructuras geoelectricas que el TEM normal. En el **Apéndice V** se encuentra el reporte íntegro de la empresa Geodatos quién realizó la prospección.

Durante la segunda semana de Marzo de 2010 se llevó a cabo 5 perfiles en el sector Caserones, con separación entre estaciones de 20 m y 50 m. La distribución en planta de los perfiles puede verse en la **Figura 4-13**.

Para los sondeos NanoTEM se utilizó la configuración “Central Loop”, que consiste en una espira transmisora de forma cuadrada y una espira receptora concéntrica de menor tamaño, usándose en el presente caso lados de 50 m y 10 m respectivamente, con las frecuencias de repetición de 32 y 64 Hz. Las coordenadas y cotas de los puntos TEM fueron replanteadas en terreno con instrumental GPS GARMIN eTrex Vista.

Se analizó los datos geoelectricos con el software TEMIXXL de inversión unidimensional (1D), utilizando los algoritmos de estratos reducidos (‘layered model’) y de estratos múltiples (‘smooth model’). Los resultados se muestran en secciones de resistividad (aproximaciones 2D) para ambos tipos de modelos.

### 4.3.2 Resultados e Interpretación

La inversión numérica de los datos TEM permite determinar la estratigrafía geoelectrica del subsuelo (resistividades y espesores de los estratos geoelectricos), constituido en la zona de interés por estratos sedimentarios y eventualmente roca basal. La estratigrafía geoelectrica depende de la mineralogía (litología) y microestructura (porosidad, granulometría, fracturamiento) de las rocas, que varían significativamente según la profundidad.

Las características de los fluidos que contienen las rocas, como la salinidad y el grado de saturación, afectan notablemente la resistividad de los estratos geoelectricos. Las estructuras y los fenómenos de alteración generan también cambios de la resistividad que pueden ser detectados con un estudio geoelectrico.

A partir de los modelos 1D de los sondeos de cada línea, se generó secciones de resistividad en una representación de grilla a color y modelos abatidos.

En la **Figura 4-14** se muestra las secciones de resistividad de las líneas obtenidas con los modelos de capas múltiples de la inversión ‘smooth model’, del sector Caserones.

La zonificación de colores de la resistividad está en escala logarítmica para dar cuenta de la gran variación de resistividad, con valores aproximados entre 10 y 10000 ohm-m.

En las secciones de resistividad, los tonos rojos indican una baja de la resistividad (o aumento de la conductividad), que se puede correlacionar en este caso, en una primera aproximación, con roca intensamente alterada o eventualmente con roca fracturada, y los tonos azules indican un aumento de

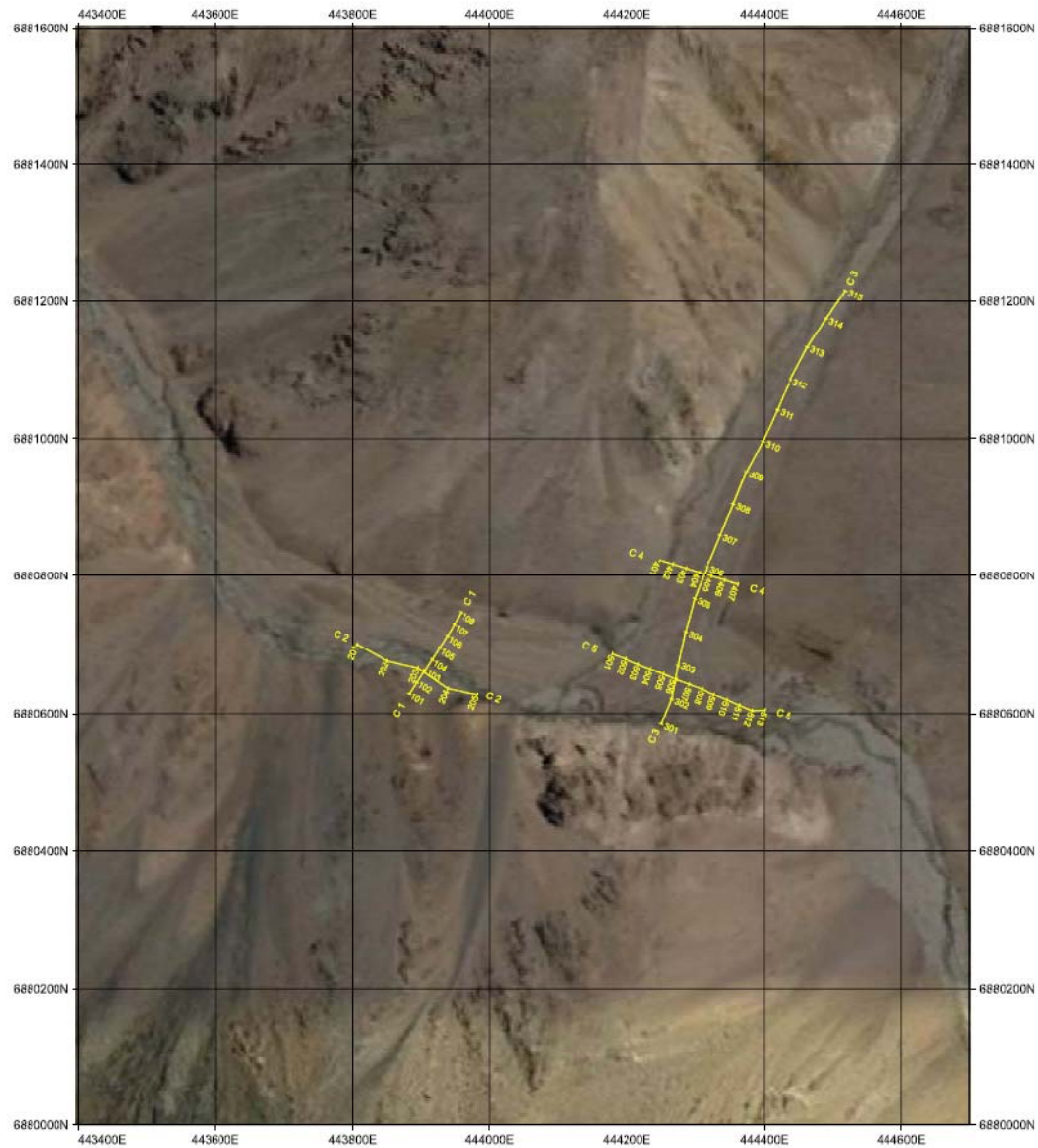


la resistividad, que se correlacionaría con sedimentos superficiales secos o roca basal, mientras que los tonos naranjas, amarillos y verdes darían cuenta de diversos grados de alteración de la roca volcánica del sector.

A partir de los perfiles geoelectricos se puede distinguir 3 unidades geoelectricas principales, con variaciones menores entre los sectores de La Brea y Caserones, las que se describen a continuación:

- Una cubierta resistiva (300-4000  $\Omega$ m) asociada posiblemente a sedimentos secos y/o roca superficial.
- Bajo la sobrecarga anterior se observa una unidad relativamente conductora (50-300  $\Omega$ m), asociada posiblemente con roca alterada.
- Una unidad de alta resistividad (300-4000  $\Omega$ m) asociada posiblemente a roca basal sana impermeable.

Entre los factores que pueden incidir en las variaciones de resistividad de las distintas unidades geoelectricas en los dos sectores del presente caso, se puede mencionar la salinidad de los fluidos, el grado de saturación electrolítica y el nivel de fracturamiento de la roca.



**Figura 4-13 Planta de perfiles geofísicos sector Caserones**

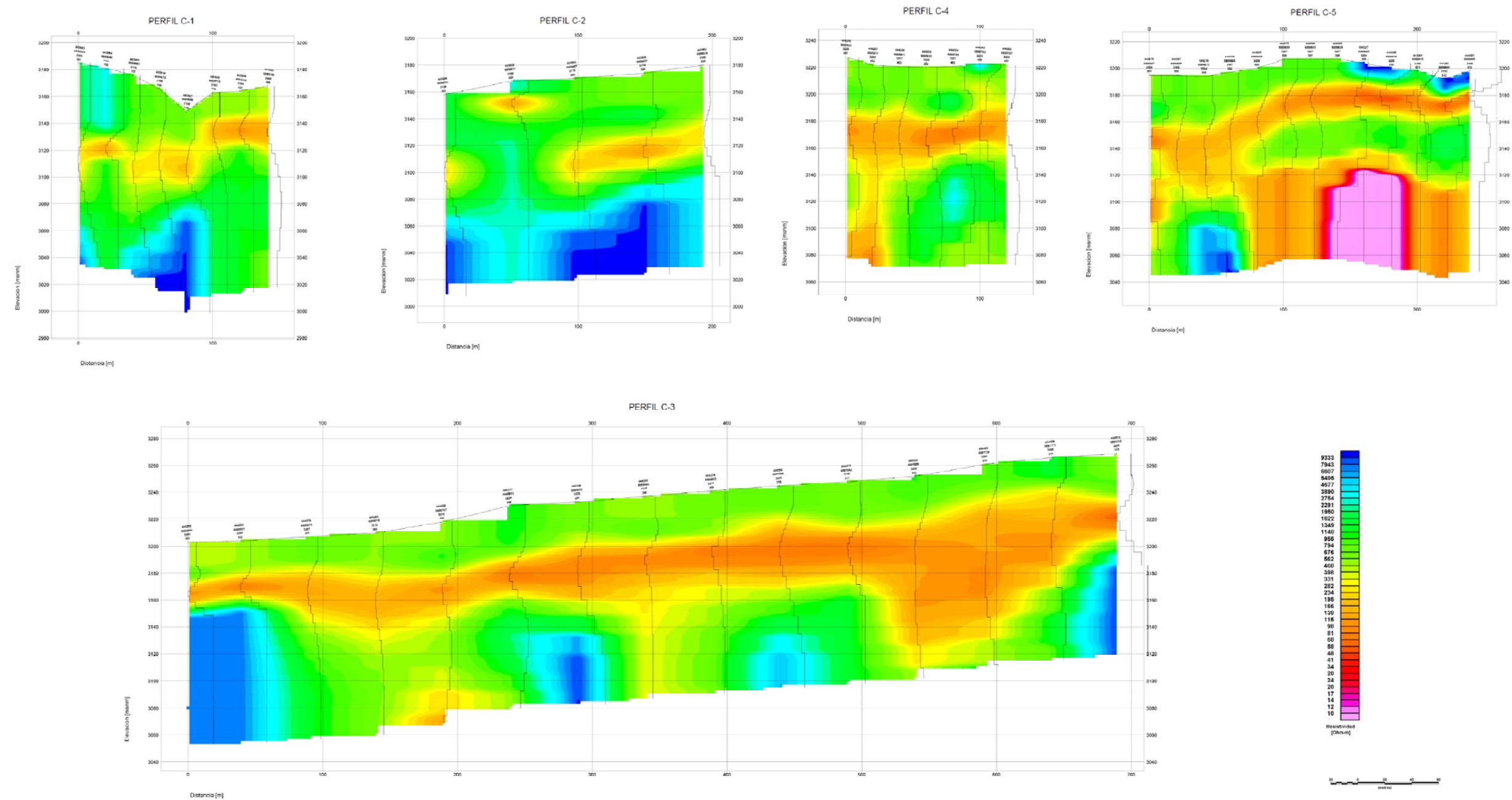


Figura 4-14 Secciones de resistividad en sector Caserones, de las líneas obtenidas con los modelos de capas múltiples de la inversión ‘smooth model’

## 4.4 Levantamiento Estructural

Entre el 26 y 29 de Junio de 2010, profesionales de SRK hicieron un reconocimiento de rasgos estructurales en los sectores de La Brea y Caserones.

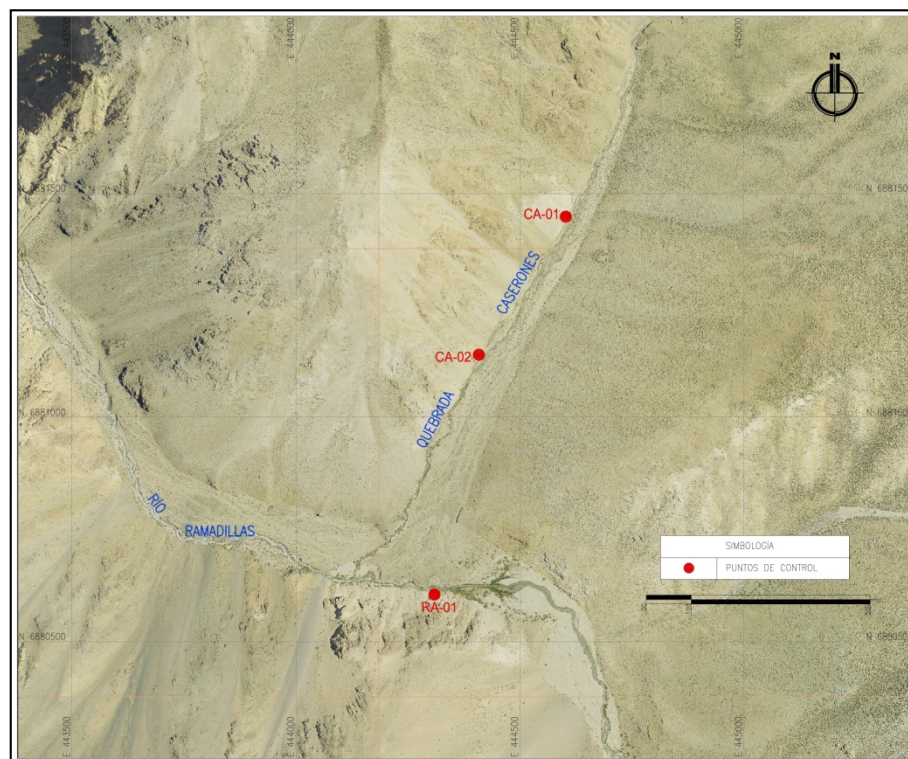
### 4.4.1 Metodología

Este levantamiento consistió en puntos de control estructural y geotécnico, donde se registró los sistemas estructurales presentes y se midió o estimó las diferentes variables físicas que caracterizan el comportamiento geotécnico del macizo rocoso. En total se levantó 3 puntos, al oeste del sector Caserones (**Figura 4-15**), identificados como CA (Caserones) y RA (Ramadillas).

Con las mediciones de discontinuidades se elaboró estereogramas de polos y rosetas de orientación para cada punto de observación, estudiándose la distribución de las estructuras y determinándose los diferentes sets preferenciales existentes (**Figura 4-16**).

### 4.4.2 Resultados

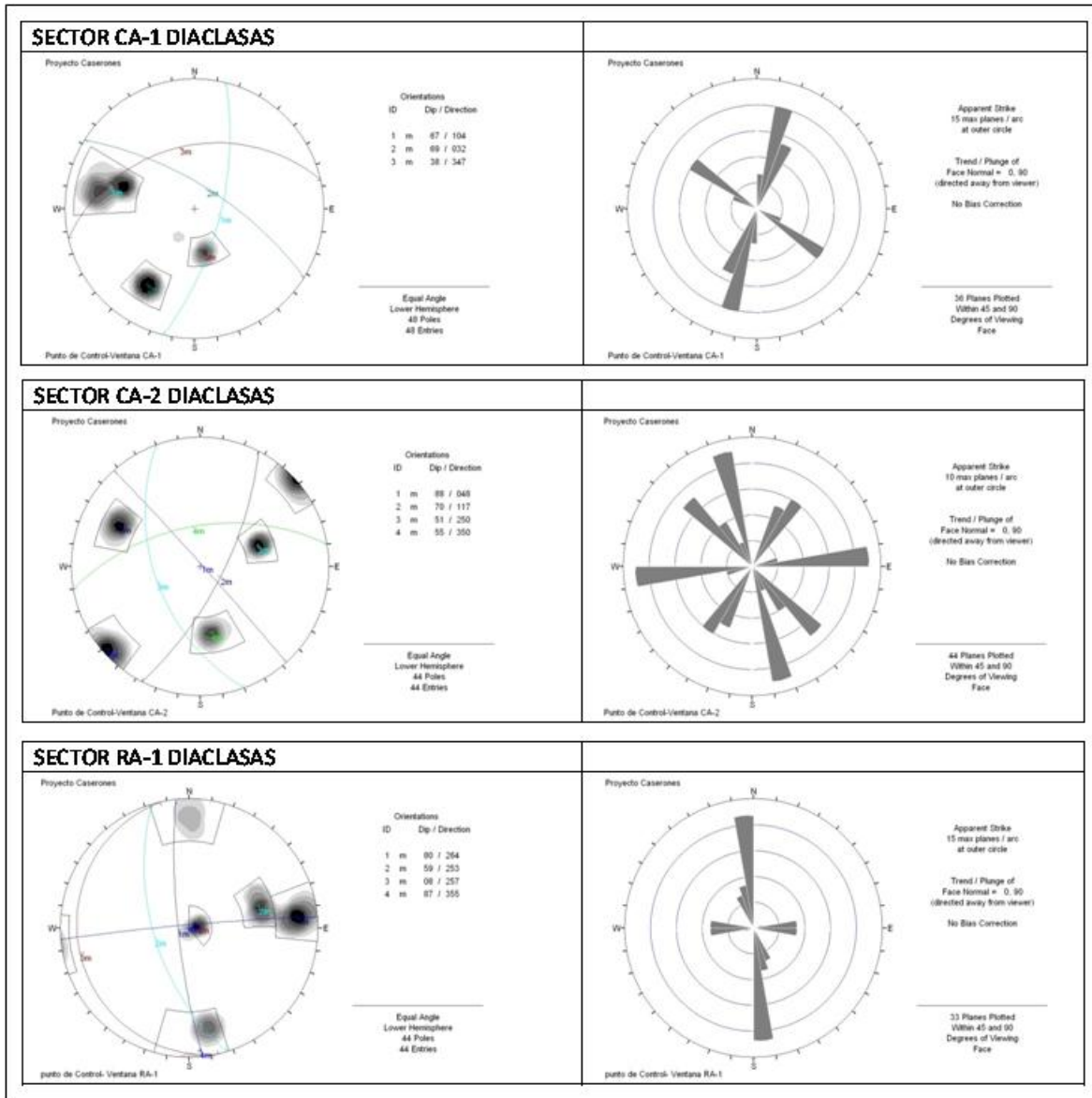
De acuerdo a los puntos de control levantados en el área de las Quebradas Ramadillas y Caserones, los sistemas estructurales principales presentan orientaciones subparalelas a dichas quebradas. Para el sector de la Quebrada Caserones, se reconoce sistemas de diaclasas de orientación preferencial NNE a NE con inclinaciones subverticales hacia el este. Por su parte, para el sector de Quebrada Ramadillas se observan sistemas de diaclasas verticales con orientaciones ENE. Los sistemas de diaclasas de los sectores QR y QC, se caracterizan por mostrar rellenos de jarosita, arcilla y cuarzo con aperturas milimétricas y persistencias entre 2 y 10 m.



**Figura 4-15 Ubicación de Puntos de Control en Quebrada Caserones.**



En un marco más regional, se corrobora la idea de la ausencia de fallas mayores que pudiesen afectar el funcionamiento hidráulico del sistema hidrogeológico.



**Figura 4-16 Estereograma de polos y roseta de orientación para los puntos de control en el sector Caserones y Ramadillas**

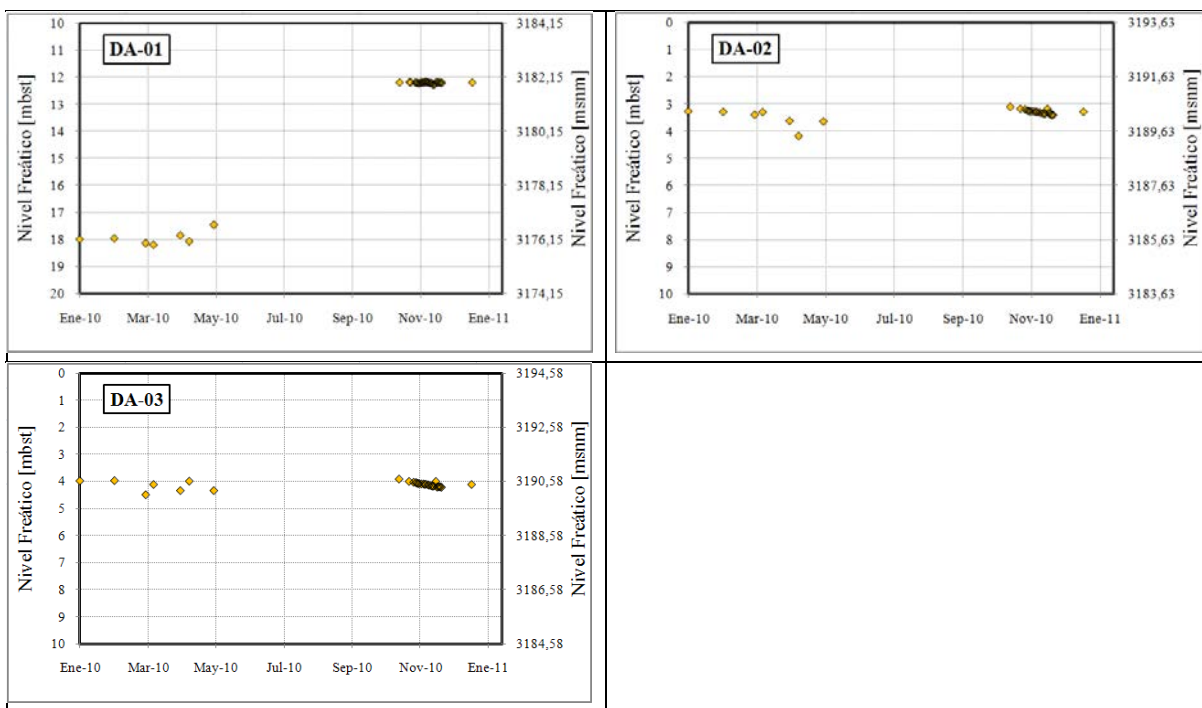
## 4.5 Control de Niveles

Se analizó la variación de los niveles de aguas subterráneas usando la información de los pozos existentes en la quebrada Caserones. Para ello se contó con la información de 3 pozos de bombeo construidos en 2009 cuya información principal se encuentra en la **Tabla 4-13**. En esta, la cota del punto de medición corresponde a la altura (en m) de la parte sobresaliente del pozo desde la cual se mide el nivel de agua.

**Tabla 4-13 Pozos con registro histórico de niveles en Caserones**

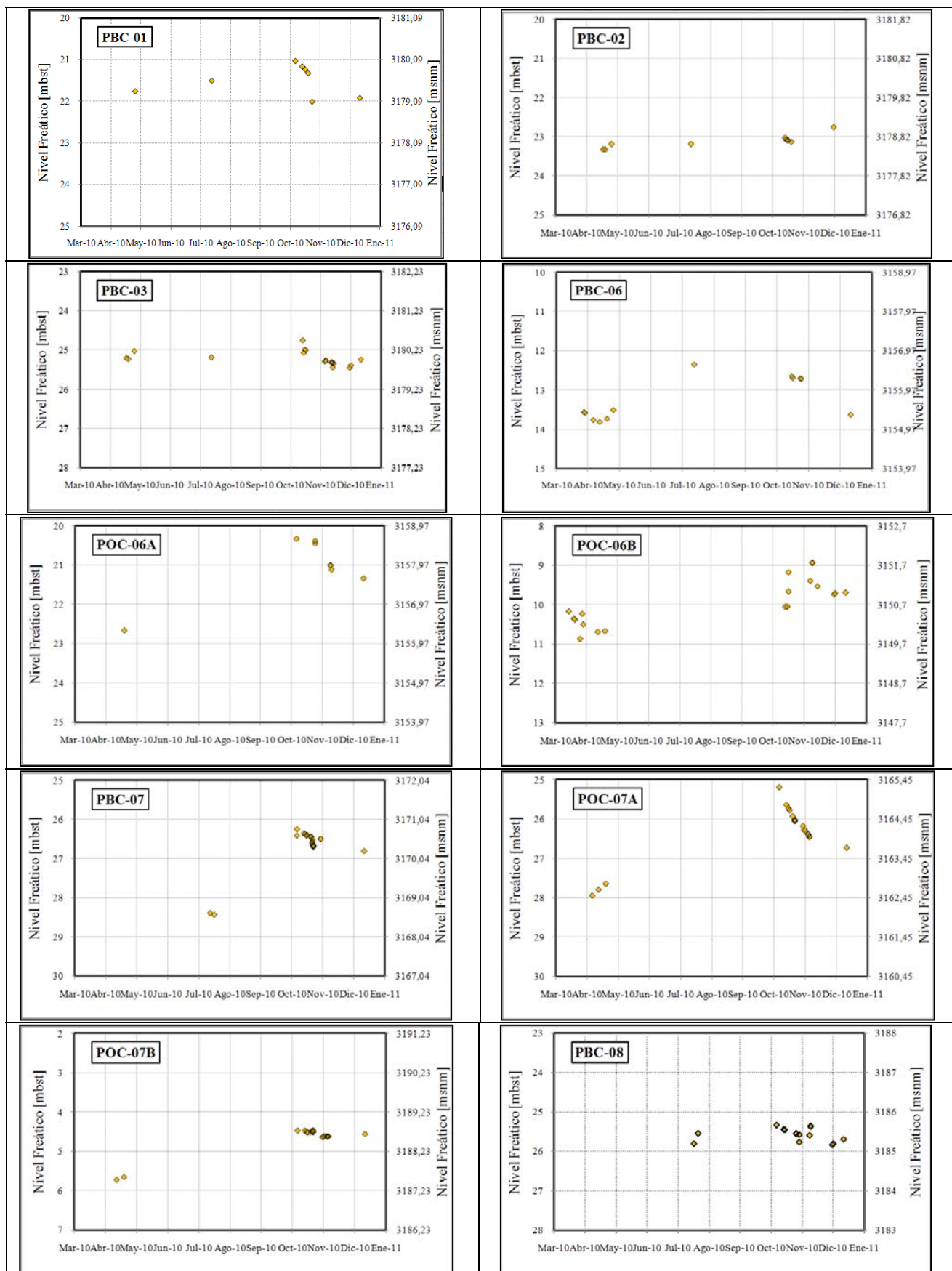
Pozo	Coordenada UTM (m)		Cota Terreno (msnm)	Cota Punto de Medición (msnm)	Profundidad Perforación (mbnt)	Altura punto medición [m]
	Norte	Este				
DA-01	6.880.672,44	444.264,94	3.194,15	3.195,33	36	1,18
DA-02	6.880.598,30	444.504,20	3.193,63	3.195,04	66	1,41
DA-03	6.880.587,96	444.531,23	3.194,58	3.195,93	36	1,35

Estos pozos cuentan con mediciones de nivel hasta diciembre del 2010, la gran mayoría realizadas durante el desarrollo de esta campaña, cabe mencionar que estos pozos solo contaban con 4 a 6 mediciones desde su construcción en 2009. La menor profundidad la registra el pozo DA-02, mientras que la mayor profundidad la registra el pozo DA-01 (**Figura 4-17**).



**Figura 4-17 Niveles Piezométricos en Sector Caserones**

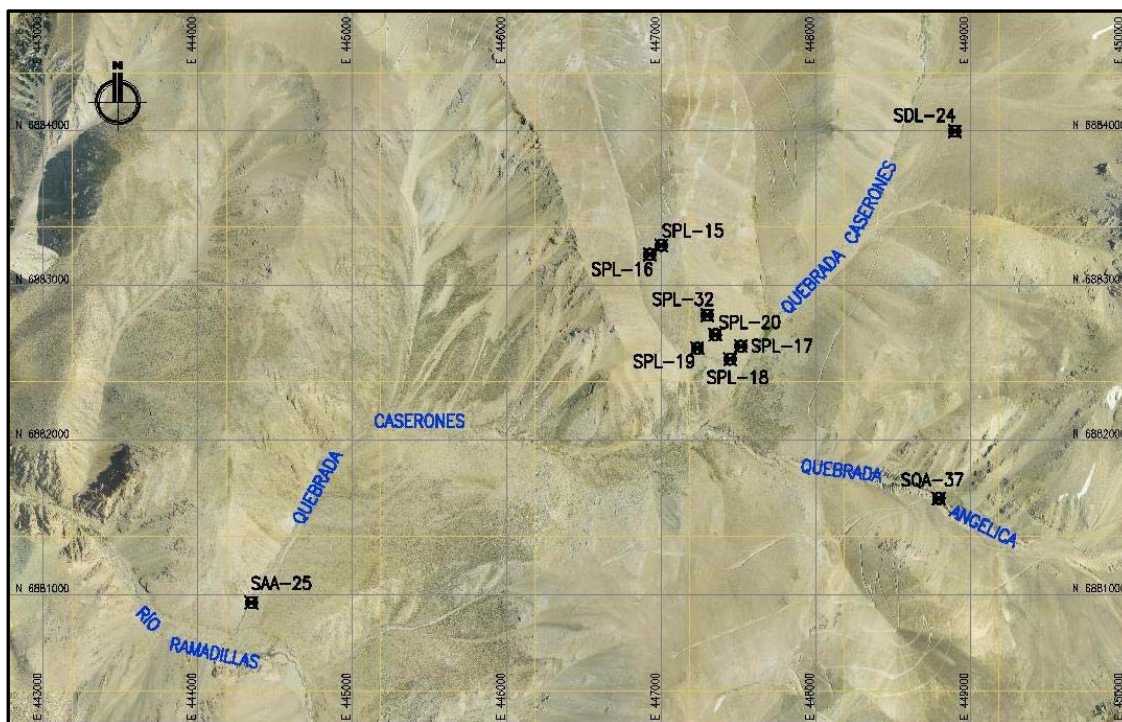
Por otra parte se llevo a cabo un monitoreo de niveles en los pozos construidos en esta campaña. El detalle de las mediciones se adjunta en el **Apéndice VI**, en tanto que en la **Figura 4-18** se grafican los niveles de estos pozos. Se evitó graficar niveles que se hubiesen registrado durante alguno de los bombeos realizados, pero es muy probable que las mediciones de fines de noviembre y diciembre estén influenciados por el bombeo simultáneo. No se grafican, pero si se detallan en **Apéndice VI** los niveles de sondajes POC-10 y POC-11.



**Figura 4-18 Niveles freáticos en pozo construidos en sector Caserones.**



Por otra parte, se logró monitorear niveles en los nuevos pozos construidos con fines geotécnicos, desarrollados en el sector de la Planta de Procesos del proyecto (**Figura 4-19**). En este sector se habilitaron diez sondeos con PVC, en los que se logró medir nivel de agua mientras las condiciones climáticas y de acceso lo permitieron. El detalle de la habilitación se encuentra en el **apéndice III** mientras que en la **tabla 4-14** entrega la información referente a ubicación, cota y profundidad de los sondeos geotécnicos.



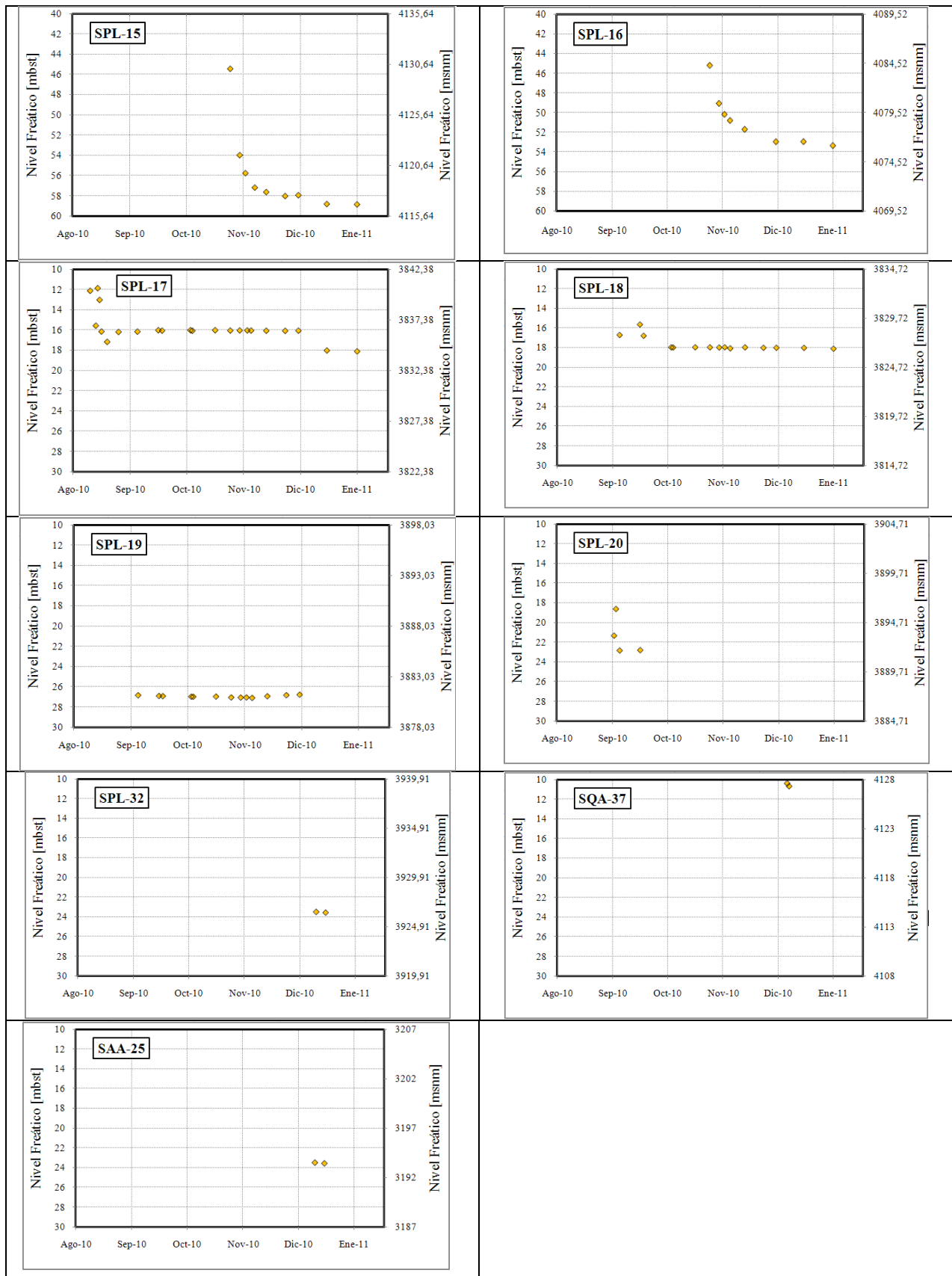
**Figura 4-19 Ubicación pozos geotécnicos en Sector Caserones.**

**Tabla 4-14 Pozos geotécnicos campaña 2010 en Caserones**

Pozo	Tipo Sondaje	Coordenadas UTM (m)		Cota Terreno (msnm)	Profundidad Perforación (mnbt)
		Norte	Este		
SPL-15	GT	6883260.77	446999.66	4175.64	64.60
SPL-16	GT	6883203.16	446924.6	4129.52	85
SPL-17	GT	6882608.73	447514.61	3852.38	35.10
SPL-18	GT	6882524.85	447444.81	3844.72	30
SPL-19	GT	6882595.05	447233.12	3908.03	40
SPL-20	GT	6882683.36	447348.84	3914.71	40
SDL-24 (*)	GT	6884000	448900	4175	45.90
SAA-25 (*)	GT	6880950	444346	3217	60
SPL-32	GT	6882720.11	447180.34	3949.91	80.15
SQA-37(*)	GT	6881623	448796	4138	20

(\*): Coordenadas no replanteadas por Intosim

De acuerdo a las mediciones realizadas en los pozos geotécnicos, se tiene que el pozo con mayor información recopilada es el SPL-17, con un registro desde agosto del 2010 a enero del 2011. Los datos de los pozos geotécnicos se grafican en la **Figura 4-20**. De los 10 pozos geotécnicos medidos, el que presenta menor profundidad en el nivel de agua es el pozo SQA-37, mientras que la mayor profundidad es registrada en el pozo SPL-15. Por otra parte el sondeo SDL-24 no ha presentado nivel de agua en las mediciones realizadas.



**Figura 4-20 Ubicación Niveles Piezométricos en Pozos Geotécnicos Sector Caserones**

**Finalmente, se pudo tener acceso a medir niveles en algunos sondajes realizados con fines geológicos en la parte más alta de quebrada Caserones, cuyos detalles y nivel freático se puede ver en la Tabla 4-15.**

**Tabla 4-15 Mediciones de nivel en sondajes geológicos.**

Pozo	N	E	Cota terreno	Fecha medición NF	NF [mbst]	NF [msnm]
RG07-177D	6883834,00	447591,66	4078,70	27-11-2010 19:01	3,88	4074,82
RG07-169D	6883346,00	446834,88	4139,44	28-11-2010 16:00	54,38	4085,06
RG07-164R	6885297,50	446078,47	4321,28	11-12-2010 16:00	52,69	4268,59

## 4.6 Hidroquímica

### 4.6.1 Tomas de muestra y validación de los análisis

La caracterización hidroquímica tiene 2 objetivos:

1. Definir el tipo de agua que es alumbrada por los pozos muestreados, información relevante para definir su línea base y su consecuente uso durante la operación de la mina.
2. Distinguir si existen más de un tipo de agua, que podrían evidenciar sistemas hidrogeológicos separados.

Para ello, durante el desarrollo de las pruebas de bombeo constante se monitorearon los parámetros de T°, pH, TDS y Conductividad del agua subterránea in situ, los que se pueden ver en **Tabla 4-16**.

**Tabla 4-16 Parámetros de Calidad de Agua In Situ en pozos durante sus pruebas constantes.**

Pozo	Fecha	Hora	Temp [°C]	pH	TDS [ppt]	Conductividad [mS]
PBC-01	02/11/10	9:10	16,9	7,24	0,82	1,39
	02/11/10 (*)	9:40	14,5	7,20	0,89	1,50
PBC-02	30/10/10	10:00	11,3	5,59	1,37	2,24
	30/10/10	11:00	11,0	6,41	1,66	2,27
	30/10/10	13:00	14,4	6,76	1,64	2,82
	30/10/10	14:00	12,1	6,87	1,54	2,68
	30/10/10 (*)	14:50	12,5	6,9	1,62	2,71
PBC-06	18/11/10	16:25	10,2	7,15	0,48	0,79
	18/11/10	17:20	9,9	5,91	0,43	0,73
	18/11/10 (*)	19:30	9,9	6,08	0,42	0,73

(\*): Parámetros medidos al momento de tomar la muestra para Laboratorio

Asimismo, durante el desarrollo de la prueba simultánea de larga duración también se monitorearon los parámetros, los que se detallan en la **Tabla 4-17**.

**Tabla 4-17 Parámetros de Calidad de Agua In Situ en pozos durante prueba simultánea.**

Fecha	PBC-01				PBC-02				PBC-03			
	T° [°C]	pH	CE [mS]	TSD [ppt]	T° [°C]	pH	CE [mS]	TSD [ppt]	T° [°C]	pH	CE [mS]	TSD [ppt]
21-11-2010 12:00	11,8	6,34	1,23	0,75	13,1	6,44	2,23	1,35	12,9	6,24	2,19	1,31
22-11-2010 12:00	10,9	6,72	1,53	0,91	10,9	6,82	2,22	1,33	11,7	6,26	2,06	1,24
24-11-2010 16:10	12,0	6,61	1,46	0,87	13,5	6,63	2,02	1,21	12,9	6,01	1,82	1,09
25-11-2010 13:20	11,6	6,32	1,25	0,72	11,4	6,37	1,87	1,12	11,8	6,03	1,76	1,05
26-11-2010 13:00	12,6	6,18	1,25	0,71	11,1	6,2	1,82	1,09	12,7	5,60	1,71	1,02
27-11-2010 6:30	10,3	6,65	1,04	0,64	10,1	6,58	1,68	1,01	10,5	6,24	1,63	0,98
27-11-2010 13:10	11,1	6,08	1,06	0,63	11,2	6,25	1,82	1,09	12,0	5,76	1,71	1,02
28-11-2010 15:10	10,9	5,51	1,02	0,61	10,7	5,71	1,77	1,05	12,0	5,14	1,71	1,02
29-11-2010 12:25	10,8	6,61	1,03	0,61	11,1	6,26	1,75	1,05	12,0	5,82	1,70	1,02
01-12-2010 10:30 (*)	11,1	6,25	1,01	0,60	11,1	5,92	1,70	1,03	11,8	5,56	1,66	0,99

(\*): Parámetros medidos al momento de tomar la muestra para Laboratorio

Se tomaron 7 muestras de agua para análisis en laboratorio, durante los bombeos constantes y el simultáneo. El muestreo se realizó con uso de preservantes y filtrado de agua en terreno, dependiendo de los análisis correspondientes. En el **Apéndice VII** se entrega el resultado de los

análisis del laboratorio, con detalles de los métodos analíticos y límites de detección. La tabla 4-18 detalla los resultados de los análisis.

**Tabla 4-18 Resultados Hidroquímicos de Laboratorio**

Pozo		PBC-01	PBC-01	PBC-02	PBC-02	PBC-03	PBC-06	PBC-08
Identificación		B. Constante	B. Simultáneo	B. Constante	B. Simultáneo	B. Simultáneo	B. Constante	B. Constante
Fecha de Muestreo		02-Nov-10	30-Nov-10	30-Oct-10	30-Nov-10	30-Nov-10	18-Nov-10	10-Nov-10
Hora de Muestreo		09:40	09:20	14:38	09:40	10:10	19:00	17:00
Parámetro	Unidad							
Parámetros Físico Químicos								
CE	µS/cm	1510	1460	2710	2530	2380	1024	1414
Alc HCO <sub>3</sub>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	30	42	37	49	<1	58	<1
Alc CO <sub>3</sub>	mg/L CaCO <sub>3</sub>	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Alc Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	30	42	37	49	<1	58	<1
pH		6.58	6.43	6.66	6.55	5.05	6.75	4.49
Parámetros Inorgánicos								
Cl	mg/L	46	43.9	164	143.9	28.2	18.8	6.8
SO <sub>4</sub>	mg/L	736	690	1381	1318	1451	552	810
CN-T	mg/L	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Metales Disueltos								
Hg	mg/L	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005
Ag	mg/L	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050
Al	mg/L	0.0482	0.0148	0.0433	0.0164	2.48	0.0455	1.85
As	mg/L	0.0451	0.0615	0.140	0.124	0.0227	0.00128	0.00098
B	mg/L	0.444	0.421	1.56	1.30	0.215	0.114	0.065
Ba	mg/L	0.0130	0.00844	0.00573	0.00474	0.00506	0.0118	0.00496
Be	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	0.0053	<0.0025	0.0101
Bi	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025
Ca	mg/L	224	198	411	368	356	146	137
Cd	mg/L	0.00033	0.00025	0.00038	0.00057	0.00139	0.00168	0.0210
Co	mg/L	0.00177	0.00163	0.00275	0.00428	0.0144	<0.00050	0.0728
Cr	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025
Cu	mg/L	0.0454	0.00457	0.00294	0.00247	0.372	0.0167	2.05
Fe	mg/L	3.05	2.71	7.58	6.03	30.7	0.249	26.4
K	mg/L	4.8	4.0	6.6	5.7	8.9	3.3	3.4
Li	mg/L	0.0989	0.109	0.295	0.266	0.0677	0.0303	0.0608
Mg	mg/L	33.5	24.9	30.5	27.7	68.6	31.2	43.0
Mn	mg/L	0.711	0.711	1.56	1.55	2.96	0.0897	2.85
Mo	mg/L	0.00248	0.00322	0.00528	0.00482	0.00083	0.00203	<0.00025
Na	mg/L	57.9	53.3	193	152	55.0	20.9	25.5
Ni	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	0.0105	0.0056	0.0363
P	mg/L	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30
Pb	mg/L	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025
Sb	mg/L	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	0.00073	<0.00050
Se	mg/L	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Si	mg/L	12.6	11.7	16.1	14.3	21.4	11.8	20.4
Sn	mg/L	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050
Sr	mg/L	1.09	1.20	2.78	2.57	1.59	0.400	0.634
Ti	mg/L	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Tl	mg/L	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050
U	mg/L	0.00432	0.00273	0.00194	0.00139	0.00234	0.00439	0.00831
V	mg/L	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Zn	mg/L	0.121	0.0889	0.0749	0.256	1.03	0.209	2.43

**Tabla 4-18 Resultados Hidroquímicos de Laboratorio (continuación).**

Pozo		PBC-01	PBC-01	PBC-02	PBC-02	PBC-03	PBC-06	PBC-08
Identificación		B. Constante	B. Simultáneo	B. Constante	B. Simultáneo	B. Simultáneo	B. Constante	B. Constante
Fecha de Muestreo		02-Nov-10	30-Nov-10	30-Oct-10	30-Nov-10	30-Nov-10	18-Nov-10	10-Nov-10
Hora de Muestreo		09:40	09:20	14:38	09:40	10:10	19:00	17:00
Parametro	Unidad							
Metales Totales								
Hg	mg/L	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005
Ag	mg/L	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050
Al	mg/L	0.195	0.0151	0.0652	0.0186	2.65	0.0853	2.36
As	mg/L	0.0453	0.0645	0.156	0.130	0.0240	0.00169	0.00155
B	mg/L	0.445	0.425	1.67	1.31	0.221	0.119	0.083
Ba	mg/L	0.0141	0.00882	0.00621	0.00493	0.00515	0.0141	0.00644
Be	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	0.0053	<0.0025	0.0124
Bi	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025
Ca	mg/L	230	200	419	406	370	157	169
Cd	mg/L	0.00035	0.00027	0.00056	0.00062	0.00165	0.00193	0.0270
Co	mg/L	0.00183	0.00168	0.00300	0.00430	0.0145	<0.00050	0.0923
Cr	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025
Cu	mg/L	0.0755	0.00544	0.00575	0.00330	0.389	0.0244	2.11
Fe	mg/L	3.53	2.77	7.71	6.76	32.0	0.776	32.6
K	mg/L	4.9	4.1	6.8	7.3	8.9	3.8	4.3
Li	mg/L	0.102	0.114	0.310	0.284	0.0711	0.0322	0.0754
Mg	mg/L	35.2	25.9	31.4	32.1	70.5	33.3	54.0
Mn	mg/L	0.739	0.724	1.67	1.57	3.05	0.113	3.63
Mo	mg/L	0.00256	0.00338	0.00572	0.00506	0.00084	0.00207	<0.00025
Na	mg/L	63.6	55.8	207	177	56.6	22.0	30.4
Ni	mg/L	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	0.0109	0.0062	0.0458
P	mg/L	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30
Pb	mg/L	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025
Sb	mg/L	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	0.00079	<0.00050
Se	mg/L	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Si	mg/L	13.5	12.4	16.6	16.9	22.3	12.6	25.0
Sn	mg/L	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050
Sr	mg/L	1.16	1.22	2.99	2.63	1.70	0.445	0.806
Ti	mg/L	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Tl	mg/L	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050
U	mg/L	0.00450	0.00276	0.00212	0.00140	0.00268	0.00484	0.0104
V	mg/L	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050
Zn	mg/L	0.154	0.122	0.106	0.305	1.11	0.271	3.06

Para verificar que estos resultados están correctamente analizados se ha calculado el balance iónico con los cationes y aniones mayores como se indica en la siguiente fórmula.

$$\text{Error en el Balance Iónico} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} * 100$$

Donde

Cationes: K, Na, Ca, Mg, Fe, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, NH<sub>4</sub>, Mn, Ni, Zn

Aniones: Cl, F, SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>

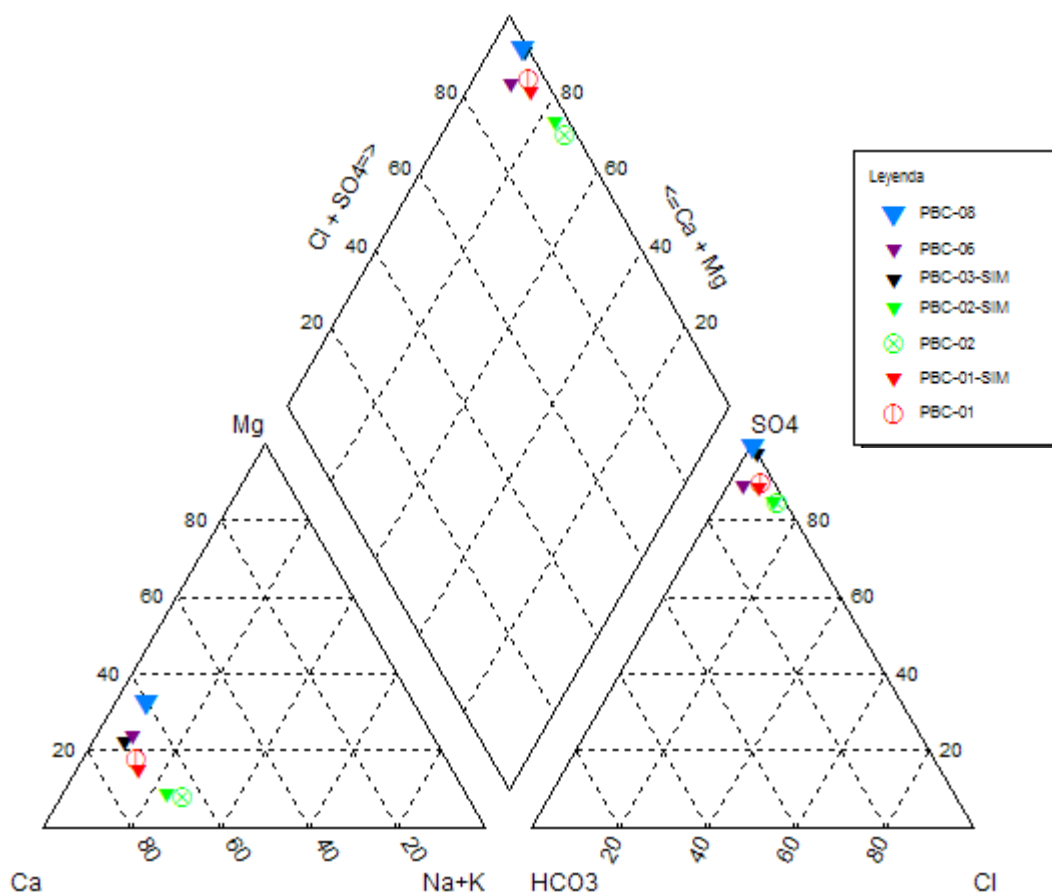
Los balances calculados son menores al 10%, por lo que se consideran válidos (ver **Tabla 4-19**):

**Tabla 4-19 Resultados Balance Iónico de análisis hidroquímicos.**

Pozo	Fecha de muestreo	Identificación	Suma Aniones	Suma Cationes	Balance Iónico	Observaciones
			[meq/l]	[meq/l]	[%]	
PBC-01	02-Nov-10	PBC-01	17,20	17,36	-0,48	Durante bombeo Constante
PBC-01	30-Nov-10	PBC-01-SIM	16,37	14,72	5,32	Durante bombeo simultáneo
PBC-02	30-Oct-10	PBC-02	34,19	32,86	1,98	Durante bombeo Constante
PBC-02	30-Nov-10	PBC-02-SIM	32,47	30,96	2,39	Durante bombeo simultáneo
PBC-03	30-Nov-10	PBC-03-SIM	31,09	27,42	6,27	Durante bombeo simultáneo
PBC-06	18-Nov-10	PBC-06	13,03	11,66	5,53	Durante bombeo Constante
PBC-08	10-Nov-10	PBC-08	17,02	14,80	7,28	Durante bombeo Constante

#### 4.6.2 Análisis de información hidroquímica

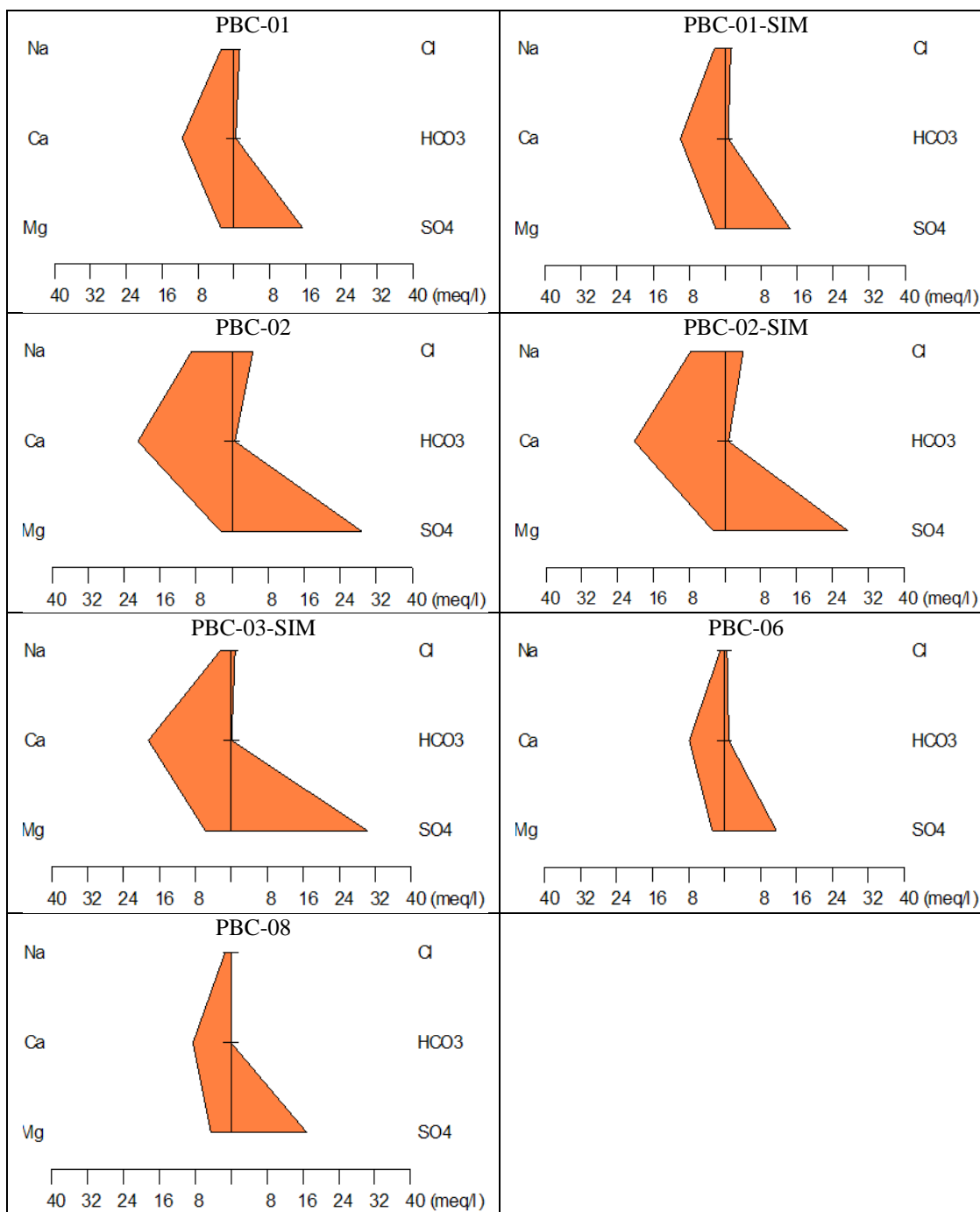
Se han graficado las concentraciones de los elementos mayores en un diagrama de Piper (ver **Figura 4.21**), en donde se puede apreciar que las aguas subterráneas son de similar composición hidroquímica en los cinco pozos bombeados. Además se puede determinar que los elementos mayores con mayor presencia porcentual son sulfato en los aniones y calcio en los cationes, lo que permite clasificar las aguas como del tipo sulfatadas cálcicas.



**Figura 4-21 Diagrama de Piper**



Los diagramas de Stiff permiten visualizar las proporciones relativas de algunos iones mayores, dando como resultado un polígono de forma irregular que facilita su clasificación. En estos gráficos, que se pueden ver en la **Figura 4-22**, se corrobora que las aguas subterráneas alumbradas en la quebrada Caserones son similares en su composición química, con un mayor contenido de sulfatos en las aguas de los pozos PBC-02 y PBC-03.



**Figura 4-22 Diagramas de Stiff**

#### **4.6.3 Conclusiones hidroquímica**

Con los antecedentes ya señalados, se puede decir que las aguas del sector bajo de quebrada Caserones tienen una composición fisicoquímica similar y corresponden a aguas del tipo sulfatadas cálcicas.

## 5 Hidrogeología

Los trabajos de terreno realizados, perforación de nuevos sondeos y estudios geofísicos, junto a la revisión de los antecedentes existentes, permitieron actualizar el modelo hidrogeológico conceptual establecido anteriormente.

A continuación se describe las características hidrogeológicas presentes en el área de la quebrada Caserones.

### 5.1 Unidades hidrogeológicas

La definición de unidades hidrogeológicas se basa en las características geológicas de los depósitos y rocas, su distribución areal, sus propiedades hidráulicas y la disponibilidad de agua subterránea.

En el **Apéndice III** se muestra, junto a la descripción detallada de cada sondeo perforado durante esta campaña, columnas litológicas agrupadas en unidades similares. Por otro lado, se cuenta con pruebas de permeabilidad realizadas en sondeos geotécnicos y mineros (Slug Test, Le Franc, Lugeon) y en sondeos hidrogeológicos (pruebas de bombeo), todas realizadas en tramos litológicos específicos. La **Tabla 5-1** resume los parámetros hidráulicos calculados por distintos medios para las distintas unidades y en el **Apéndice VIII** se muestra una tabla con las unidades y profundidades correspondientes para cada sondeo con pruebas de permeabilidad.

Por último, las mediciones de nivel en sondeos antiguos y nuevos, indican la disponibilidad de agua en las distintas unidades. La totalidad de niveles medidos desde la construcción de los pozos está compilada en el **Apéndice VI**.

Con toda esta información reunida se definió unidades hidrogeológicas, cuyas características se describen a continuación y cuya disposición espacial se aprecia en el mapa hidrogeológico de las **Figura 5-1**. Además se realizaron 2 perfiles hidrogeológicos, donde se pueden apreciar las unidades en profundidad (**Figura 5-2** y **Figura 5-3**).

#### 5.1.1 Qf Depósitos fluviales

Depósitos no consolidados fluviales y en menor medida aluviales, compuestos por gravas y arenas pobremente consolidados, polimícticos con diámetros desde centimétricos a métricos. Se ubican principalmente en el curso del río Ramadillas.

Presentan espesores de entre 30 y 40m reconocidos en los pozos DA y en los pozos POC-6B y PBC-6. Los niveles de agua subterránea registrados se encuentran entre 3 y 18m de profundidad, en sectores muy cercanos al nivel del río.

Las permeabilidades registradas son del orden de 10 a 30 m/d y las transmisividades varían entre 330 y 760 m<sup>2</sup>/d. Dichos valores corresponden a un acuífero considerado bueno, aunque su poco espesor y distribución areal hacen que esta unidad tenga una importancia hidrogeológica media a alta.

#### 5.1.2 Qa Depósitos aluviales

Se encuentran en los cursos de las quebradas Caserones y sus afluentes. Corresponden principalmente a depósitos aluviales. Pequeños cauces fluvio-aluviales antiguos y actuales de los escasos flujos superficiales se incluyen además en esta unidad.

En las partes más bajas de la cuenca y donde las quebradas son menos estrechas, es donde mejor se desarrollan los depósitos de tipo aluvial. En la confluencia con el río Ramadillas se interdigitan los depósitos del río y los del abanico aluvial de la quebrada Caserones, siendo este último erosionado por el río, formando una terraza de al menos 5m. Los pozos POC-7A y POC-7B se encuentran en el sector terminal del abanico aluvial, donde se mezclan estos depósitos con los fluviales. Probablemente el pozo POC-6A se encuentra en un sector similar.

Los espesores en la unidad puramente aluvial varían entre 10m (SDA-03) y 48m (PBC-03). Se encuentra agua subterránea en estos depósitos entre 10 y 20m de profundidad; en las cabeceras de las quebradas en la parte inferior de esta unidad, hacia abajo esta unidad se encuentra más saturada. Las pruebas de permeabilidad realizadas indican valores entre 1,73 y  $3,46 \times 10^{-02}$  m/d.

La heterogeneidad, la constricción areal y la permeabilidad mediana que posee esta unidad la califican como una unidad de alta a media relevancia hidrogeológica.

### 5.1.3 Qc Depósitos coluviales

En las partes más altas de esta cuenca, los depósitos corresponden principalmente a sedimentos coluviales, de remociones en masa y otros depósitos no consolidados de baja permeabilidad. Los espesores de esta unidad son en general de pocos metros pero pueden alcanzar hasta 20 m en sectores donde las quebradas son más anchas, como ocurre en el sector de los pozos SDU.

Niveles de agua subterránea se encuentran en la mitad inferior de esta unidad o más profundos que esta. La conductividad hidráulica calculada, aunque en promedio similar a la de la unidad aluvial, presenta valores un poco menores; entre 1,21 y  $4,15 \times 10^{-03}$  m/d. Por estas razones se considera una unidad de importancia media a baja.

### 5.1.4 RSV Rocas Sedimentarias y Volcánicas

Aparecen sólo en la parte más al norte de la quebrada Caserones, correspondiendo a una serie de afloramientos dispersos de rocas volcánicas, sub-volcánicas y volcanoclásticas, distribuidas sobre el macizo granítico paleozoico.

Sus características litológicas le confieren permeabilidades bajas, lo que sumado a la poca recarga que reciben les confieren una importancia hidrogeológica baja a muy baja. No se tienen datos de permeabilidades de esta unidad.

### 5.1.5 RI/Rla Rocas Intrusivas

En esta unidad se agrupan todas las rocas intrusivas con edades desde paleozoicas a cenozoicas. Esta unidad se encuentra en toda el área estudiada y muy cerca de la superficie, excepto en las quebradas más grandes donde la cubren sedimentos no consolidados.

Estas rocas se encuentran meteorizadas, alteradas y/o fracturadas en distintos grados, sobre todo en superficie. Además, las intrusiones de cuerpos más jóvenes generaron también fracturamiento y, en algunos lugares, fuerte alteración hidrotermal, lo que puede aumentar considerablemente la permeabilidad de la roca.

Es por esto que se diferencian las rocas alteradas de las que poseen una mejor calidad, denominándolas como **Rla** (Rocas Intrusivas alteradas). En superficie se encuentran sectores de rocas alteradas que se muestran como regolito y afloramientos de rocas más frescas.

Los estudios geotécnicos indican que en general se encuentra una cobertura meteorizada de 20 a 40m sobre rocas más compactas, de mejor calidad geotécnica, condición que en algunos sondeos se presenta hasta mayor profundidad.

Las pruebas realizadas indican una permeabilidades entre  $8,64 \cdot 10^{-01}$  a  $6,39 \cdot 10^{-04}$ , con un promedio de  $1,52 \cdot 10^{-01}$  m/d. Estas permeabilidades están calculadas en la parte superior de las rocas intrusivas, reconocida como rocas alteradas (RIa), y se consideran como permeabilidades máximas.

**Tabla 5-1 Resumen parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica**

		Qf	Qaf	Qc	RIa
k [m/d]	Max	$2,93 \cdot 10^{+1}$	$1,73 \cdot 10^{+0}$	$1,21 \cdot 10^{+0}$	$8,64 \cdot 10^{-1}$
	Min	$1,24 \cdot 10^{+1}$	$3,46 \cdot 10^{-2}$	$4,15 \cdot 10^{-3}$	$6,39 \cdot 10^{-4}$
	Prom.	$2,01 \cdot 10^{+1}$	$6,03 \cdot 10^{-1}$	$4,18 \cdot 10^{-1}$	$1,49 \cdot 10^{-1}$
	N° datos	6	12	17	48
T [m <sup>2</sup> /dia]	Max	$7,63 \cdot 10^{+2}$	-	-	-
	Min	$3,27 \cdot 10^{+2}$	-	-	-
	Prom.	$5,20 \cdot 10^{+2}$	-	-	-
	N° datos	6	-	-	-

## 5.2 Piezometría

Los datos aportados por los pozos construidos durante el curso de este estudio, se encuentran focalizados en las cercanías del río Ramadillas, por lo que la piezometría aquí entregada se restringe a este sector. Los niveles de los pozos que se usaron para el análisis se encuentran en la Tabla 5-2.

En la **Figura 5-1** se muestra piezometría propuesta en base a esta información. Los gradientes hidráulicos en el sector de esta figura están entre 10 y 5%. Cambios de nivel grandes, transversales a la quebrada, por ejemplo entre los pozos SDA-02 y SDA-03, indican flujos muy superficiales y con alta pendiente en las laderas de la quebrada, en la parte meteorizada de los intrusivos, llegando a un acuífero más potente en los depósitos aluviales y coluviales, con pendientes más planas.

En cuanto a la relación con las unidades hidrogeológicas, el nivel de agua se ubica principalmente entre la roca alterada y la mitad inferior de la unidad de depósitos aluviales y coluviales.

Los perfiles de las **Figuras 5-2 y 5-3** reflejan las situaciones antes mencionadas. Además, se observa que el nivel de agua subterráneo al llegar al Ramadillas se encuentra varios metros por debajo del nivel del río.

**Tabla 5-2 Niveles estáticos considerados para Isopiezas**

Sondaje	Coordenadas UTM		Cota de	Nivel	Fecha	Cota Nivel
			Terreno	Estático	medición	(mbnt)
	Norte	Este	(mbnt)	(mbnt)		
<b>Sondajes Hidrogeológicos</b>						
PBC - 01	6.880.806,45	444.267,85	3.201,09	21,51	22Jul10	3.179,58
PBC - 02	6.880.781,76	444.301,50	3.201,82	23,39	22Jul10	3.178,43
PBC - 03	6.880.785,44	444.351,00	3.205,23	25,37	22Jul10	3.179,87
PBC - 06	6.880.734,37	443.987,11	3.168,96	13,51	22Jul10	3.155,46
POC - 06A	6.880.682,06	444.098,11	3.178,97	21,91	22Jul10	3.157,07
POC - 06B	6.880.774,76	443.920,93	3.160,70	9,78	22Jul10	3.150,92
PBC - 07	6.880.723,71	444.278,76	3.197,00	28,39	22Jul10	3.168,61
POC - 07A	6.880.693,28	444.222,78	3.190,45	26,93	22Jul10	3.163,52
PBC - 08	6.880.871,62	444.341,27	3.211,00	25,80	26Jul10	3.185,20
POC - 10	6.883.371,40	444.117,15	3.896,95	13,28	24Abr10	3.883,67
POC - 11	6.881.853,43	444.928,92	3.375,51	26,23	23Abr10	3.349,28
DA - 01	6.880.672,44	444.264,94	3.194,15	17,47	01May10	3.176,68
DA - 02	6.880.598,30	444.504,20	3.193,63	3,65	01May10	3.189,98
DA - 03	6.880.587,96	444.531,23	3.194,58	4,34	01May10	3.190,24
<b>Sondajes Geotécnicos</b>						
SDA - 2	6.880.995,00	444.400,00	3.224,00	24,00	27Ene09	3.200,00
SDA - 3	6.880.967,00	444.441,00	3.225,00	8,00	29Ene09	3.217,00
SDA - 4	6.881.691,00	444.740,00	3.307,00	10,00	02Feb09	3.297,00

### 5.3 Síntesis Modelo Hidrogeológico Conceptual

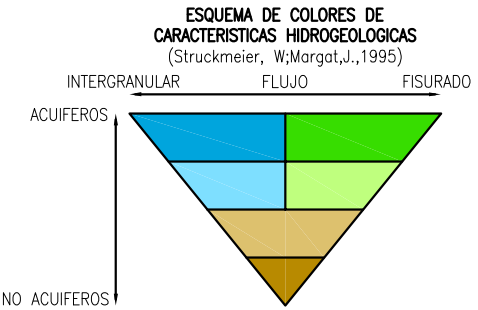
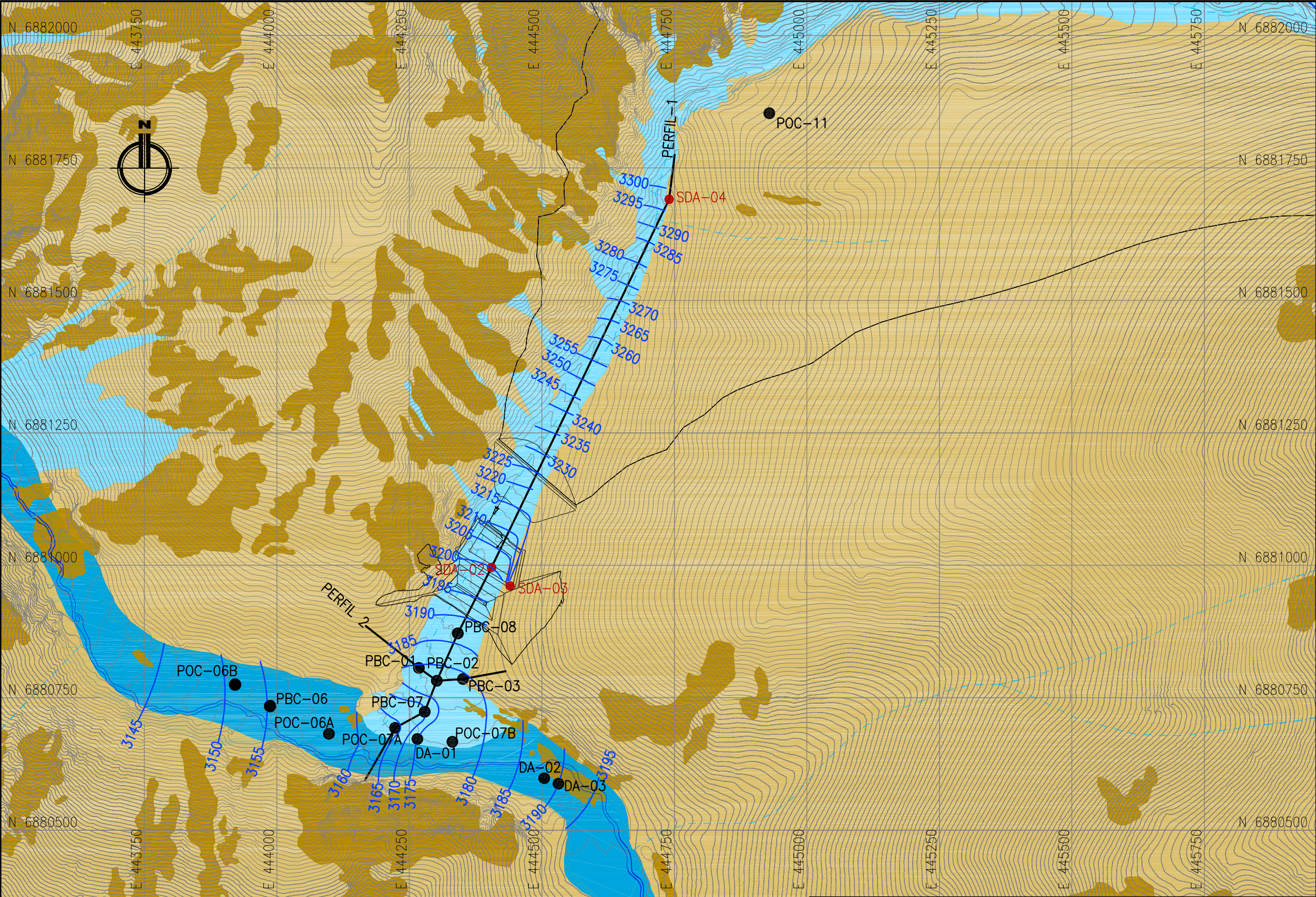
El primer concepto establecido se refiere a que en el área se encuentra un cuerpo acuífero, de características freáticas, constituido por varias unidades hidrogeológicas con sus respectivas características. Parte desde las más altas cumbres en roca intrusivas alteradas y se va mezclando con depósitos coluviales y aluviales quebrada abajo, aumentando su permeabilidad. Por esto, existe una concordancia entre la cuenca hidrológica superficial y la subterránea.

Hacia el sur, el acuífero se junta con los depósitos fluviales del río Ramadillas, en un sector donde la quebrada Caserones se abre en un abanico aluvial, encontrándose el nivel subterráneo varios metros por debajo del nivel del río.

La recarga del acuífero se produce por la infiltración directa de las precipitaciones caídas en el área de su cuenca hidrográfica, la que ocurre principalmente en forma de nieve. Los análisis isotópicos realizados en estudios previos indicaron la existencia de una recarga regional o área de respaldo, fuera del dominio del área de estudio, la que corresponde a las cabeceras de la cuenca.


Los flujos están estrechamente relacionados a la topografía del sector; con pendientes altas en los cerros y más planas en las quebradas con más relleno. Incluso, en sectores donde el espesor de los sedimentos es escaso y el sustrato rocoso es impermeable, se produce afloramiento de agua (vegas en sector mina).



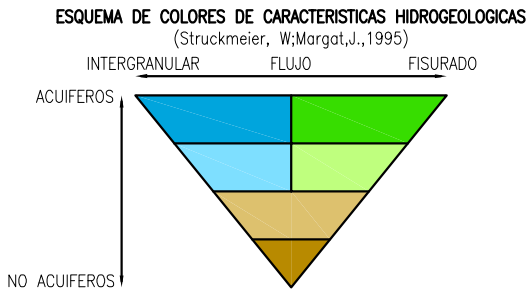
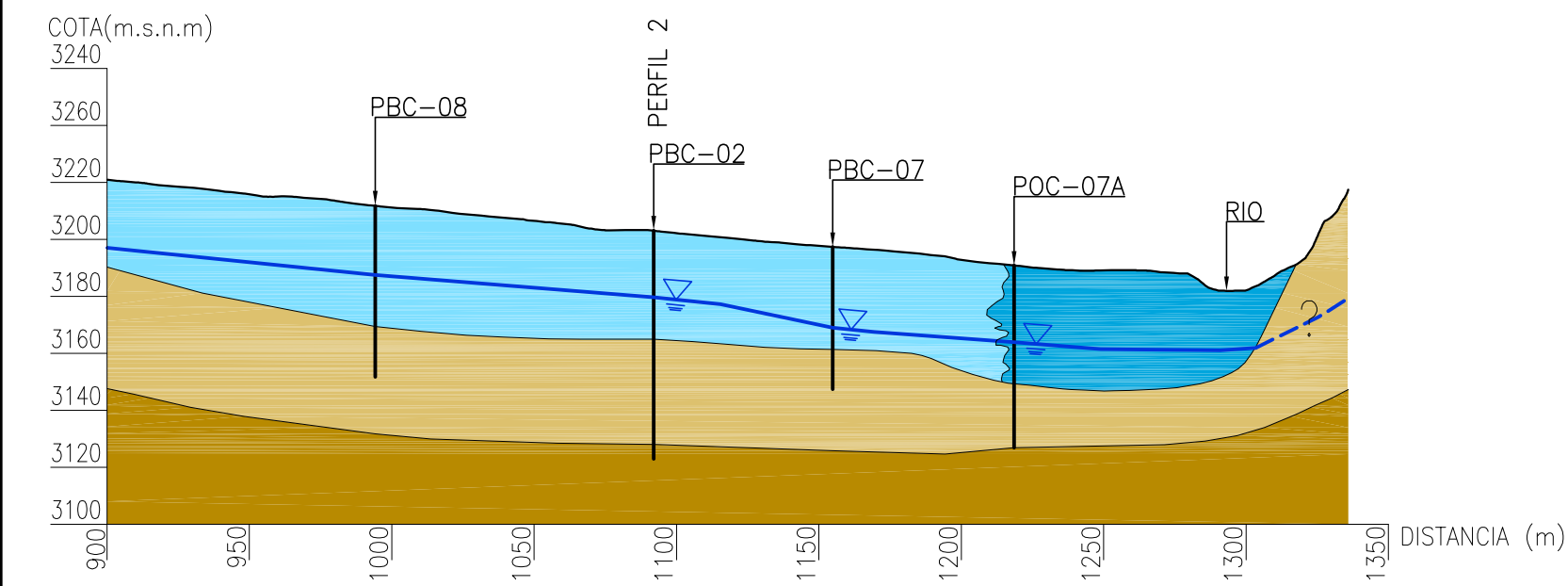
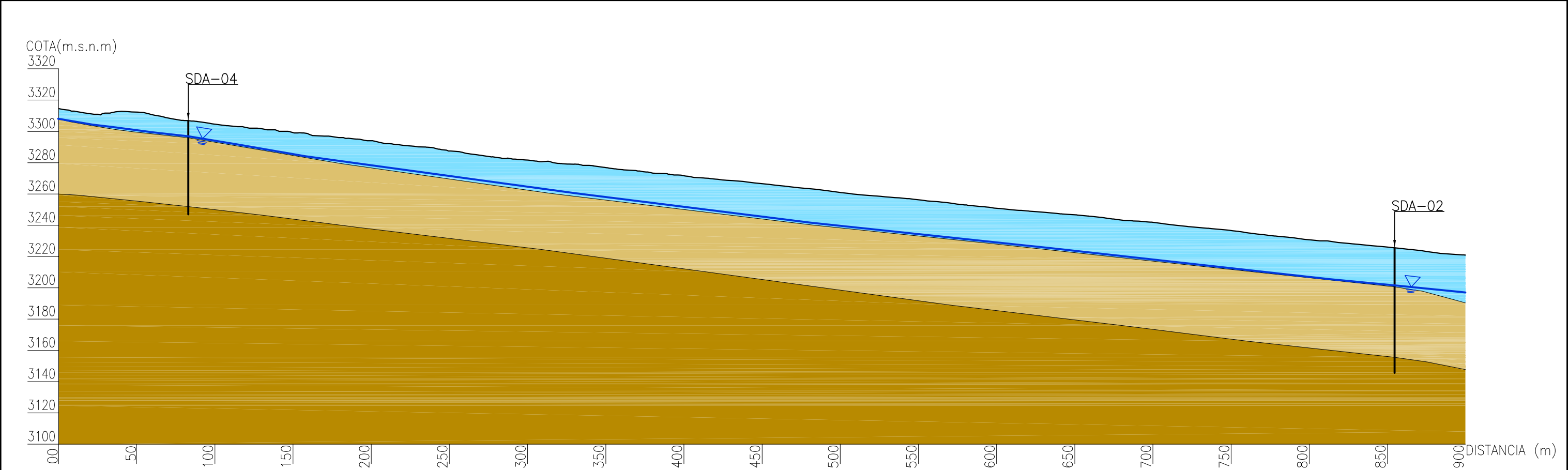


UNIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	FORMACIONES
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR			
A.1		ALTA A MEDIA	Qf
A.2		MEDIA A BAJA	Qa-Qc
C. ROCAS CON LIMITADO A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRANEAS			
C.1		BAJA A MUY BAJA	RSV-Rla
C.2		MUY BAJA A NULA	RI

LEYENDA	
	PERFIL HIDROGEOLOGICO
	SONDAJES HIDROGEOLOGICOS
	SONDAJES GEOTECNICOS
	ISOPIEZA GENERALIZADA (msnm)
	ISOPIEZA GENERALIZADA INFERIDA
	INFRAESTRUCTURA

														PREPARADO POR: <div><b>SRK Consulting</b> Engineers and Scientists</div>				CLIENTE <div><b>CASERONES</b> PROYECTO DE MINERA LUMINA COPPER CHILE S.A.</div>				PROYECTO <div>ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS</div>			
														DIBUJO	N. MORALES		AGOSTO 2010	CLIENTE		FIRMA	FECHA	TITULO: <div>MAPA HIDROGEOLOGICO SECTOR CASERONES</div>			
														PROYECTO	C. FERNANDEZ		AGOSTO 2010	ING.PROYECTO			00/00/00				
														ING.PROYECTO	I. SANTIBANEZ		AGOSTO 2010	JEFE DISCIPLINA			00/00/00				
														JEFE DISCIPLINA	B. LABARCA		AGOSTO 2010	JEFE PROYECTO			00/00/00				
														JEFE PROYECTO	B. LABARCA		AGOSTO 2010	CONTRATO N°	N° PLANO						
REV.	FECHA	REVISION			POR	ING.PROY.	JEFE. PROY.	APROBACION SRK	APROBACION CLIENTE	REV.	FECHA	NUMERO DE PLANO	REV.	DESCRIPCION	SRK	NOMBRE	FIRMA	FECHA				N° PROYECTO 02-2161-02	ESCALA 1:7.500	N° FIGURA 5.1	REV. 0

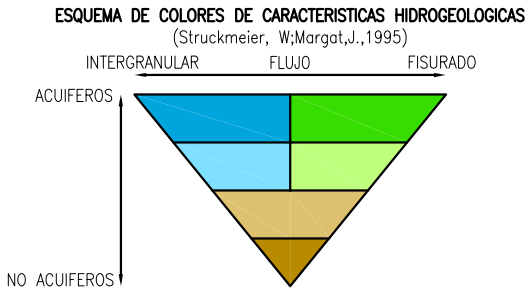
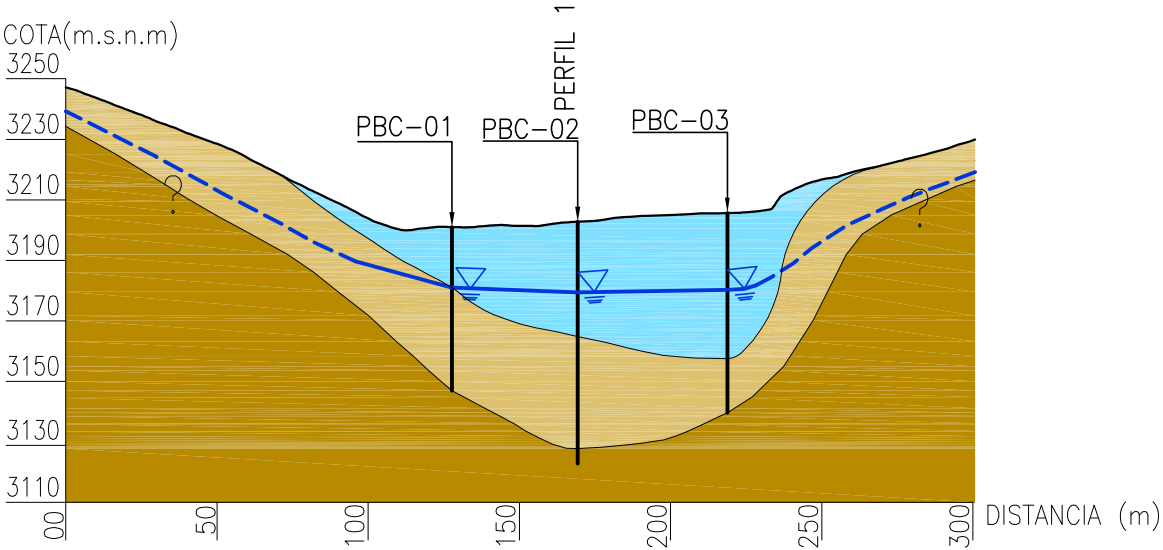




UNIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	FORMACIONES
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESCENCIALMENTE INTERGRANULAR			
A.1		ALTA A MEDIA	Qf
A.2		MEDIA A BAJA	Qa-Qc
C. ROCAS CON LIMITADO A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRANEAS			
C.1		BAJA A MUY BAJA	RSV-Rla
C.2		MUY BAJA A NULA	RI

LEYENDA	
	NIVEL ESTATICO MEDIDO EN ABRIL-MAYO 2010
	SONDAJES
	SUPERFICIE TERRENO

												PREPARADO POR: <div><b>SRK Consulting</b> Engineers and Scientists</div>				CLIENTE <div><b>CASERONES</b> PROYECTO DE MINERA LUMINA COPPER CHILE S.A.</div>				PROYECTO <b>ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS</b>							
														DIBUJO	N. MORALES		AGOSTO 2010	CLIENTE	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TITULO: <b>PERFIL HIDROGEOLOGICO 1 SECTOR CASERONES</b>					
														PROYECTO	C. FERNANDEZ		AGOSTO 2010	ING.PROYECTO			00/00/00						
														ING.PROYECTO	I. SANTIBANEZ		AGOSTO 2010	JEFE DISCIPLINA			00/00/00						
														JEFE DISCIPLINA	B. LABARCA		AGOSTO 2010	JEFE PROYECTO			00/00/00						
														JEFE PROYECTO	B. LABARCA		AGOSTO 2010	CONTRATO N°	N° PLANO			N° PROYECTO	ESCALA	N° FIGURA	REV.		
REV.	FECHA	REVISION			POR	ING.PROY.	JEFE. PROJ.	APROBACION SRK	APROBACION CLIENTE	REV.	FECHA	NUMERO DE PLANO	REV.	DESCRIPCION				SRK	NOMBRE	FIRMA	FECHA	02-2161-02			1:2.500	5.2	0



UNIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	FORMACIONES
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR			
A.1		ALTA A MEDIA	Qf
A.2		MEDIA A BAJA	Qa-Qc
C. ROCAS CON LIMITADO A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRANEAS			
C.1		BAJA A MUY BAJA	RSV-Rla
C.2		MUY BAJA A NULA	RI

LEYENDA	
	NIVEL ESTATICO MEDIDO EN ABRIL-MAYO 2010
	SONDAJES
	SUPERFICIE TERRENO

													PREPARADO POR: <div><b>SRK Consulting</b> Engineers and Scientists</div>				CLIENTE <div><b>CASERONES</b> PROYECTO DE MINERIA LUMINA COPPER CHILE S.A.</div>				PROYECTO ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS				
													DIBUJO	N. MORALES		AGOSTO 2010	CLIENTE	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TITULO: PERFIL HIDROGEOLOGICO 2 SECTOR CASERONES				
													PROYECTO	C. FERNANDEZ		AGOSTO 2010	ING.PROYECTO			00/00/00					
													ING.PROYECTO	I. SANTIBAÑEZ		AGOSTO 2010	JEFE DISCIPLINA			00/00/00					
													JEFE DISCIPLINA	B. LABARCA		AGOSTO 2010	JEFE PROYECTO			00/00/00					
													JEFE PROYECTO	B. LABARCA		AGOSTO 2010	CONTRATO N°	N° PLANO			N° PROYECTO	ESCALA	N° FIGURA	REV.	
REV.	FECHA	REVISION			POR	ING.PROY.	JEFE. PROJ.	APROBACION SRK	APROBACION CLIENTE	REV.	FECHA	NUMERO DE PLANO	REV.	DESCRIPCION				SRK	NOMBRE	FIRMA	FECHA	02-2161-02	1:2.500	5.3	0

## 6 Modelo Numérico

El objetivo del modelo numérico es simular la barrera hidráulica óptima que permita el abatimiento de cualquier contaminación potencial generada por las infiltraciones no interceptadas por las obras de ingeniería del depósito de arenas en la quebrada Caserones. Con base en estos resultados se diseñará dicha barrera y construirá posteriormente, asegurando una nula contaminación hacia las aguas naturales del río Ramadillas.

El modelo de numérico de flujo existente (SITAC, 2009) para el sector del depósito de arenas, que fue presentado en el EIA, consideró la construcción de una batería de pozos de contingencia ubicada en la ladera sur del río Ramadillas, algunos metros aguas abajo de la confluencia a esta última de la quebrada Caserones.

En esta ocasión se decidió investigar en profundidad el sitio ubicado inmediatamente aguas abajo de la zanja corta fuga, dado que conceptualmente es este sitio el que presenta ventajas sustantivas respecto a la barrera anteriormente simulada.

Para la construcción del modelo numérico descrito en este documento se ha empleado todos los antecedentes anteriores, sumado a los resultados obtenidos durante la campaña de prospección hidrogeológica presentada en los capítulos precedentes.

Se ha mantenido (lateralmente) el dominio del modelo numérico existente, pues no se cuenta con información fuera de este dominio que indique unidades permeables o que se haya observado algún descensos durante la prueba de bombeo de larga duración. Sin embargo, en la discretización vertical, se ha incluido un tercer layer para diferencias las rocas meteorizadas y aquellas sin meteorización.

No se ha considerado en este caso recarga directa por precipitación pues se entiende que esta última es de carácter nival. No obstante, se ha calibrado la entrada de agua por concepto de caudal subterráneo desde aguas arriba en la quebrada Caserones, contra el caudal pasante estimado en dicha sección proveniente de la recarga por infiltración del agua de deshielo de la nieve caída.

En esta oportunidad se ha desarrollado una calibración estacionaria y una calibración transiente basada en los niveles estáticos, caudales bombeados y los descensos observados durante de la prueba simultánea de larga duración. Luego se ha simulado el flujo pasante contaminado y los pozos que permitirán su captura y manejo frente a este evento de contingencia.

La incorporación de estos conceptos permite tener una calibración estacionaria y transiente de mayor confianza para los parámetros de las unidades hidrogeológicas lo que consecuentemente permite tener simulaciones predictivas de mayor precisión con resultados de mayor confiabilidad.

A continuación se presenta la información constructiva del modelo (parámetros hidráulicos, espesores de unidades, condiciones de borde, dominio, etc.), los resultados de la calibración estacionaria para la condición natural actual, la calibración transiente y finalmente los resultados de la etapa de simulación del proyecto que permite concluir acerca de la efectividad de los pozos de contingencia.

### 6.1 Dominio y Grilla

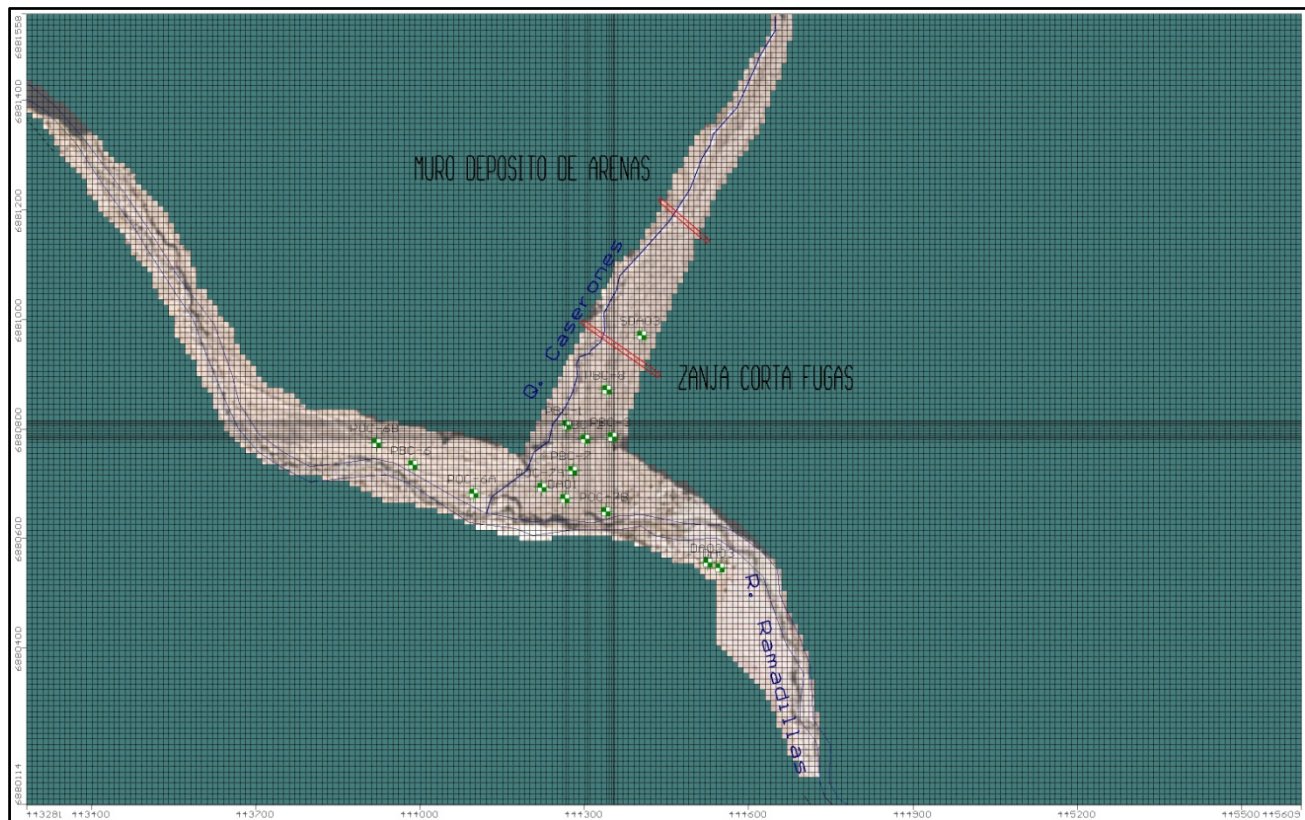
Se ha utilizado el código de diferencias finitas MODFLOW (96), a través de la interfaz Visual MODFLOW (SWS, 2007) para la construcción del modelo numérico de flujo de agua subterránea y

la simulación de los escenarios de bombeo de la batería de pozos de contingencia y sus efectos en el sistema subterráneo.

El dominio total del modelo tiene una extensión aproximada de  $3.3 \text{ km}^2$  y una superficie de celdas activas de  $0.3 \text{ km}^2$ , en la vecindad de la ubicación del muro del Depósito de Arenas. La grilla de diferencias finitas contiene un total de 36.176 celdas (152 filas por 238 columnas) en un total de 3 layers (**Figura 6-1**).

La dimensión horizontal de las celdas esta en un rango de 2 m., en la zona de los pozos, hasta los 10 m en otras áreas del modelo. La dimensión vertical de las celdas varía desde 5 m a 100 m.

La base del modelo ha sido designada como un borde de no-flujo o impermeable basado en que en profundidad aumenta la compactación de las unidades rocosas y por lo tanto disminuye la permeabilidad de las mismas.



**Figura 6-1 Grilla y Dominio del Modelo**

## 6.2 Simulación de Características Hidrogeológicas

### 6.2.1 Simulación de Unidades Hidrogeológicas

En el método de diferencias finitas, las propiedades hidráulicas son asignadas al nodo central de cada celda definida en función de la grilla generada. Cada celda almacena los valores para la conductividad hidráulica horizontal ( $K_h$ ) y vertical ( $K_v$ ), coeficiente de almacenamiento confinado ( $S_s$ ) y coeficiente de almacenamiento específico o capacidad específica ( $S_y$ ), basados en información de ensayos hidráulicos realizados en las distintas campañas de terreno y calibrados durante esta modelación.

Las unidades hidrogeológicas descritas en el **Capítulo 5** han sido incorporadas en el modelo numérico utilizando un total de 6 zonas numéricas. La distribución de las zonas simuladas es descrita en la **Tabla 6.1** donde también se entrega los parámetros hidráulicos calibrados para cada una de ellas. La distribución espacial es mostrada por layer en las **Figuras 6-2, 6-3 y 6-4**.

**Tabla 6.1 Conductividad Hidráulica Calibrada**

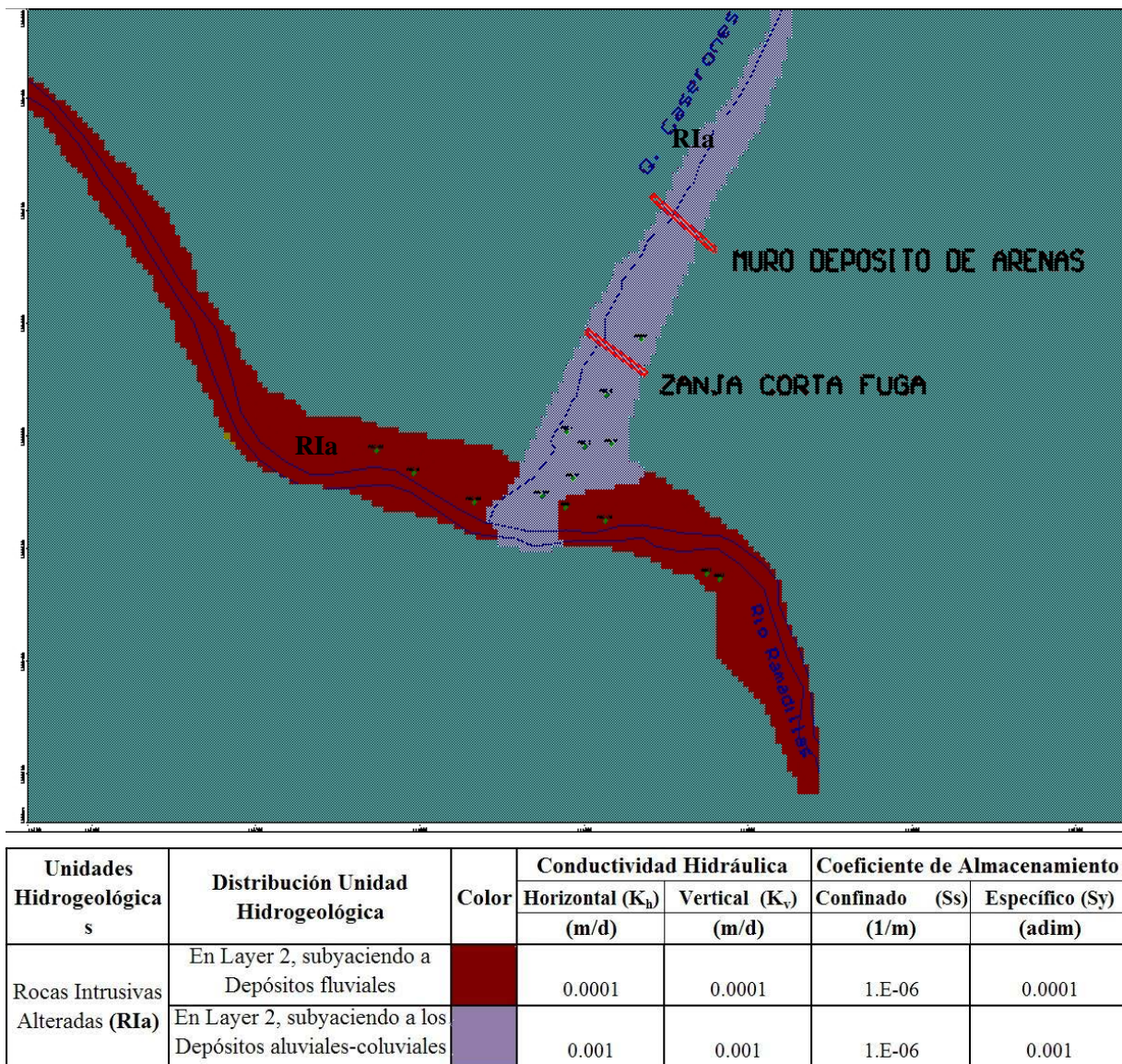
Unidades Hidrogeológicas	Distribución Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica		Coeficiente de Almacenamiento	
		Horizontal (K <sub>h</sub> )	Vertical (K <sub>v</sub> )	Confinado (S <sub>s</sub> )	Específico (S <sub>y</sub> )
		(m/d)	(m/d)	(1/m)	(adim)
Depósitos Fluviales (Qf)		10 a 14	1 a 1.4	0.0001	0.2
Depósitos Aluviales y Coluviales (Qa – Qc)		2	0.2	1.E-04 a 1.E-05	0.005
Rocas Intrusivas Alteradas (RIa)	En Layer 2, subyaciendo a Depósitos fluviales	0.0001	0.0001	1.E-06	0.0001
	En Layer 2, subyaciendo a los Depósitos aluviales – coluviales	0.001	0.001	1.E-06	0.001
	En Layer 3	0.0001	0.0001	1.E-07	0.0001





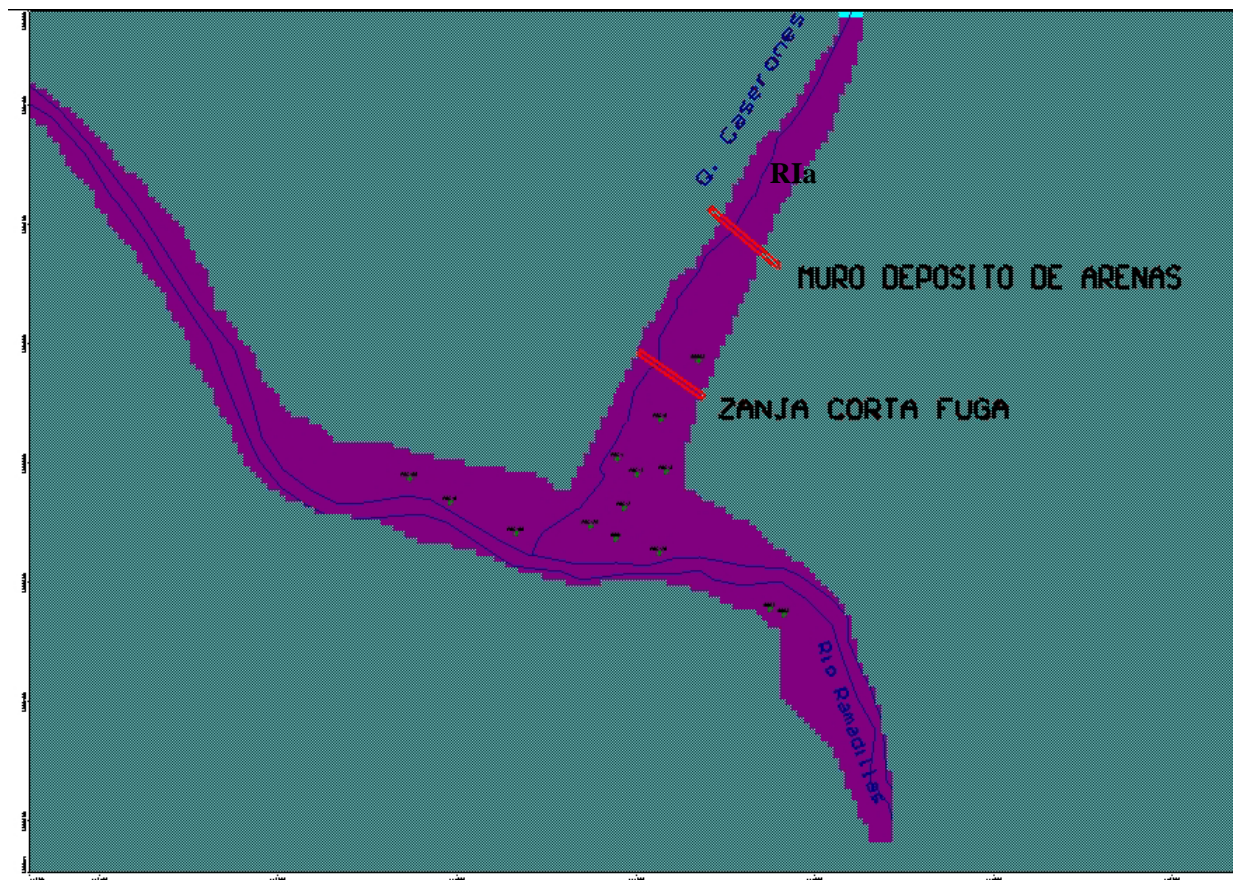
Unidades Hidrogeológicas	Distribución Unidad Hidrogeológica	Color	Conductividad Hidráulica		Coeficiente de Almacenamiento	
			Horizontal ( $K_h$ )	Vertical ( $K_v$ )	Confinado ( $S_s$ )	Específico ( $S_y$ )
			(m/d)	(m/d)	(1/m)	(adim)
Depósitos Fluviales (Qf)			10 a 14	1 a 1.4	0.0001	0.2
Depósitos Aluviales y Coluviales (Qa – Qc)			2	0.2	1.E-04 a 1.E-05	0.005

**Figura 6-2 Distribución de de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 1**



**Figura 6-3 Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 2**





Unidades Hidrogeológicas	Distribución Unidad Hidrogeológica	Color	Conductividad Hidráulica		Coeficiente de Almacenamiento	
			Horizontal ( $K_h$ )	Vertical ( $K_v$ )	Confinado (Ss)	Específico ( $S_y$ )
			(m/d)	(m/d)	(1/m)	(adim)
Rocas Intrusivas Alteradas (RIa)	En Layer 3		0.0001	0.0001	1.E-07	0.0001

**Figura 6-4 Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 3**



## 6.2.2 Simulación de Entradas y Salidas por Flujos Subterráneos

Para simular el escurrimiento subterráneo en el río Ramadillas se ha empleado la condición de borde tipo carga hidráulica fija o Constant Head Bounday (CHB) en el límite del modelo, cuyo caudal aportante se ha calibrado en función del flujo pasante obtenido mediante Darcy.

El flujo subterráneo saliente del dominio del modelo por el río Ramadillas en dirección aguas abajo también se ha simulado como un CHB igualmente calibrado.

La quebrada Caserones propiamente tal se ha conceptualizado como un flujo subterráneo entrante a través de un CHB el cual también ha sido calibrado.

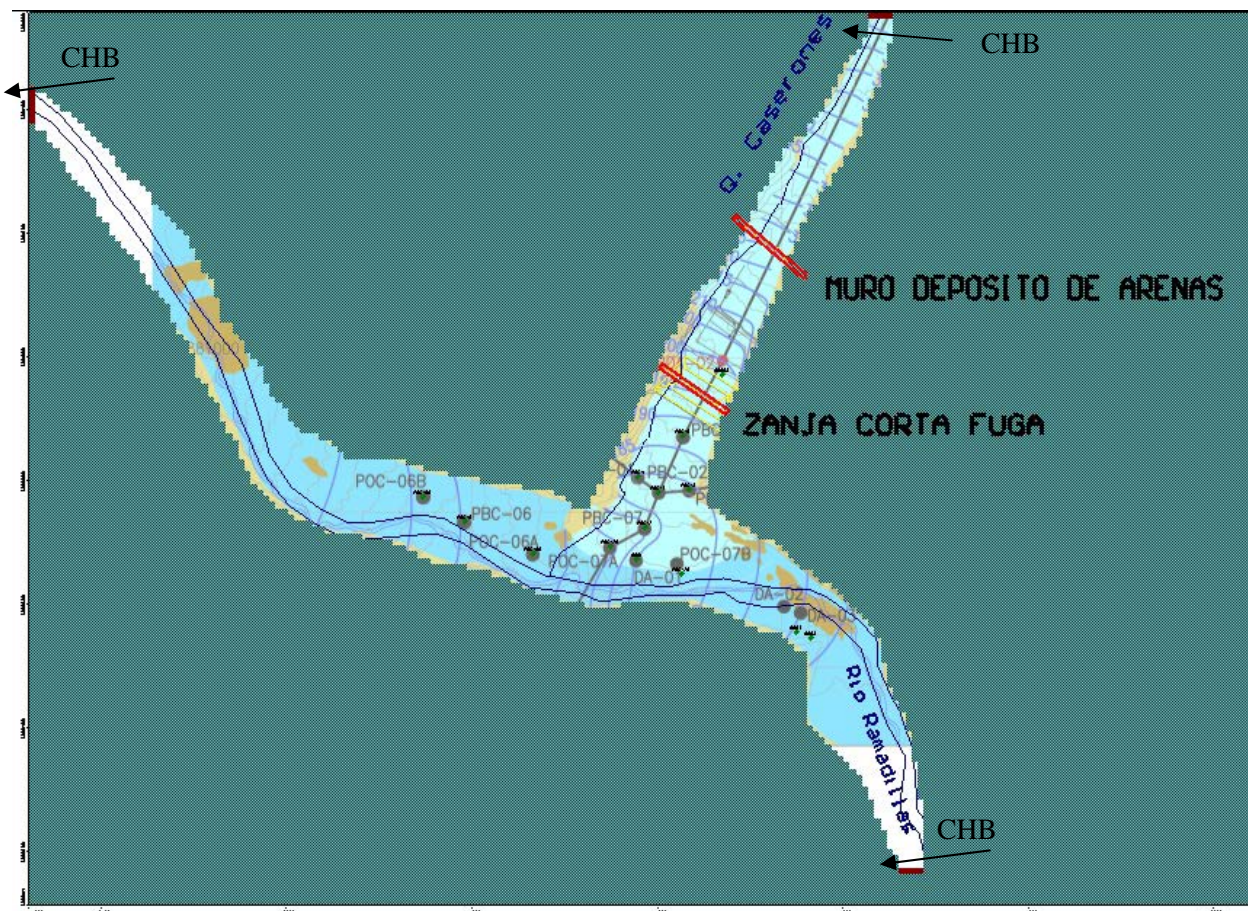


Figura 6-5 Ubicación de condiciones de borde para las tres capas.

## 6.2.3 Simulación de Recarga por Precipitación

Tal como se ha mencionado en el punto 3.4.4 de este informe, las precipitaciones en la quebrada Caserones ocurren mayoritariamente en forma sólida, por lo cual no se ha incorporado este ítem en este modelo.

#### 6.2.4 Simulación de Pozos de Bombeo

Para la representación de la condición transiente se ha incorporado la prueba de bombeo de larga duración. La representación de los pozos de bombeo se realiza utilizando el largo total de las cribas como zona captante, mientras que el caudal es distribuido automáticamente por el software entre los diferentes layers de acuerdo a las transmisividades asignadas.

### 6.3 Calibración del Modelo

La calibración del modelo permite reproducir el medio hidrogeológico por donde se mueven las aguas subterráneas a través del ajuste de parámetros hidráulicos (carga, permeabilidad y almacenamiento) y condiciones de borde (recarga, ríos, barreras, lagos, etc.) que definen el balance hídrico, cuyos valores son conocidos a partir de los trabajos de terreno y del modelo conceptual formulado.

Sobre la base del modelo calibrado se generan escenarios de simulación que permiten reflejar, en este caso, la situación con proyecto y las medidas para controlar las potenciales infiltraciones que no serían captadas por el sistema de control diseñado en el depósito de Arenas.

Antes de ser utilizado para predicciones, el modelo numérico de Caserones fue calibrado para:

1. Condición de Flujo Estacionario para el estado actual antes del proyecto representado por los niveles estáticos medidos durante este año en sondeos y pozos (equipotenciales para el 21 de nov 2010) (mostrados en el **Capítulo 5.2, Tabla 5.2 y Figura 5.5**)
2. Condición de Flujo Transiente para la prueba de bombeo de larga duración. Se bombeó tres pozos durante 10 días y luego se midió la recuperación de niveles por más de 5 días. (ver Sección 4.2). Los datos de niveles y los respectivos descensos observados durante esta prueba fueron utilizados para calibrar los valores de conductividad hidráulica y almacenamiento.

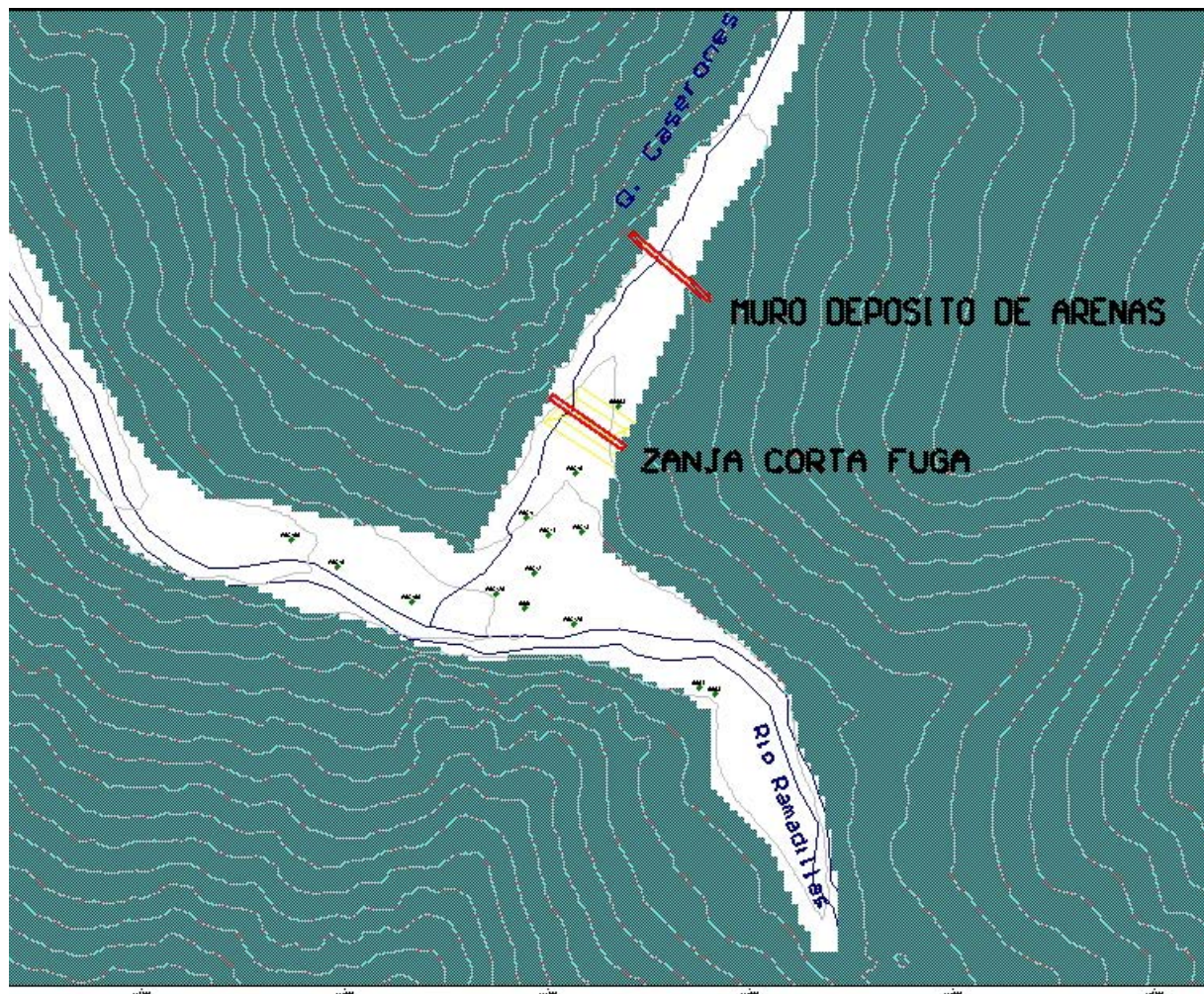
#### 6.3.1 Calibración Estacionaria

Se ha calibrado los flujos de entrada desde aguas arriba en las secciones de quebrada Caserones y del río Ramadillas, la salida del flujo hacia aguas abajo de la confluencia del río Ramadillas y las permeabilidades, para replicar la ubicación de la superficie equipotencial existente en noviembre del 2010. Al mismo tiempo se ha revisado y ajustado la geometría del modelo, específicamente los contactos entre las diferentes unidades, basado en la información obtenida en la última campaña de investigación hidrogeológica.

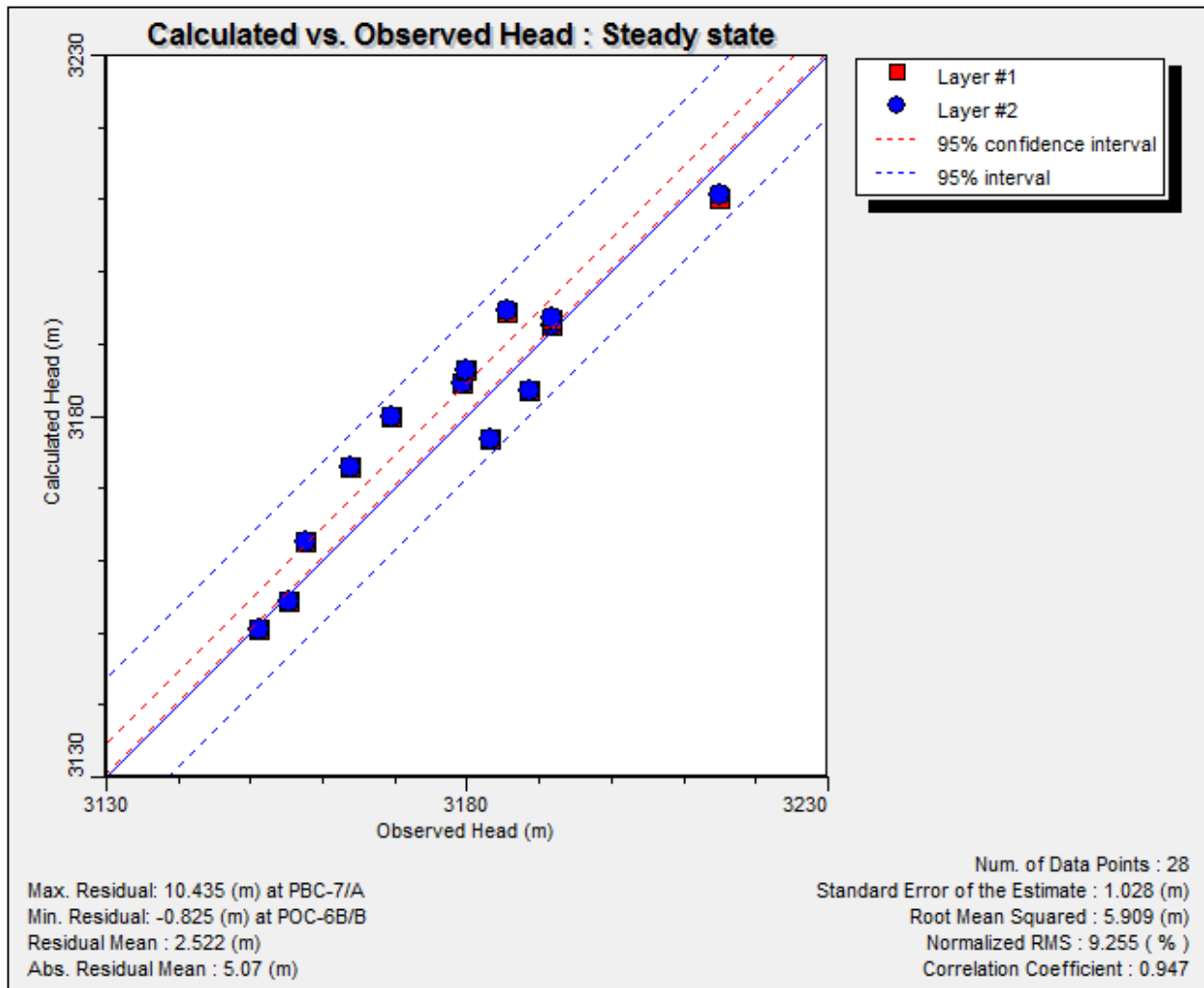
La ubicación de los pozos con información de niveles se observa en la **Figura 6. 8**, mientras que la **Figura 6.9** muestra la distribución de los niveles observados versus aquellos simulados por el modelo para la condición de flujo estacionario. La **Figura 6.10** las curvas equipotenciales resultantes en planta y la dirección de flujo subterráneo.

La **Tabla 6.3** entrega el balance de agua para la condición de flujo estacionaria, donde se entrega los valores simulados para las recargas y descargas del sistema subterráneo.



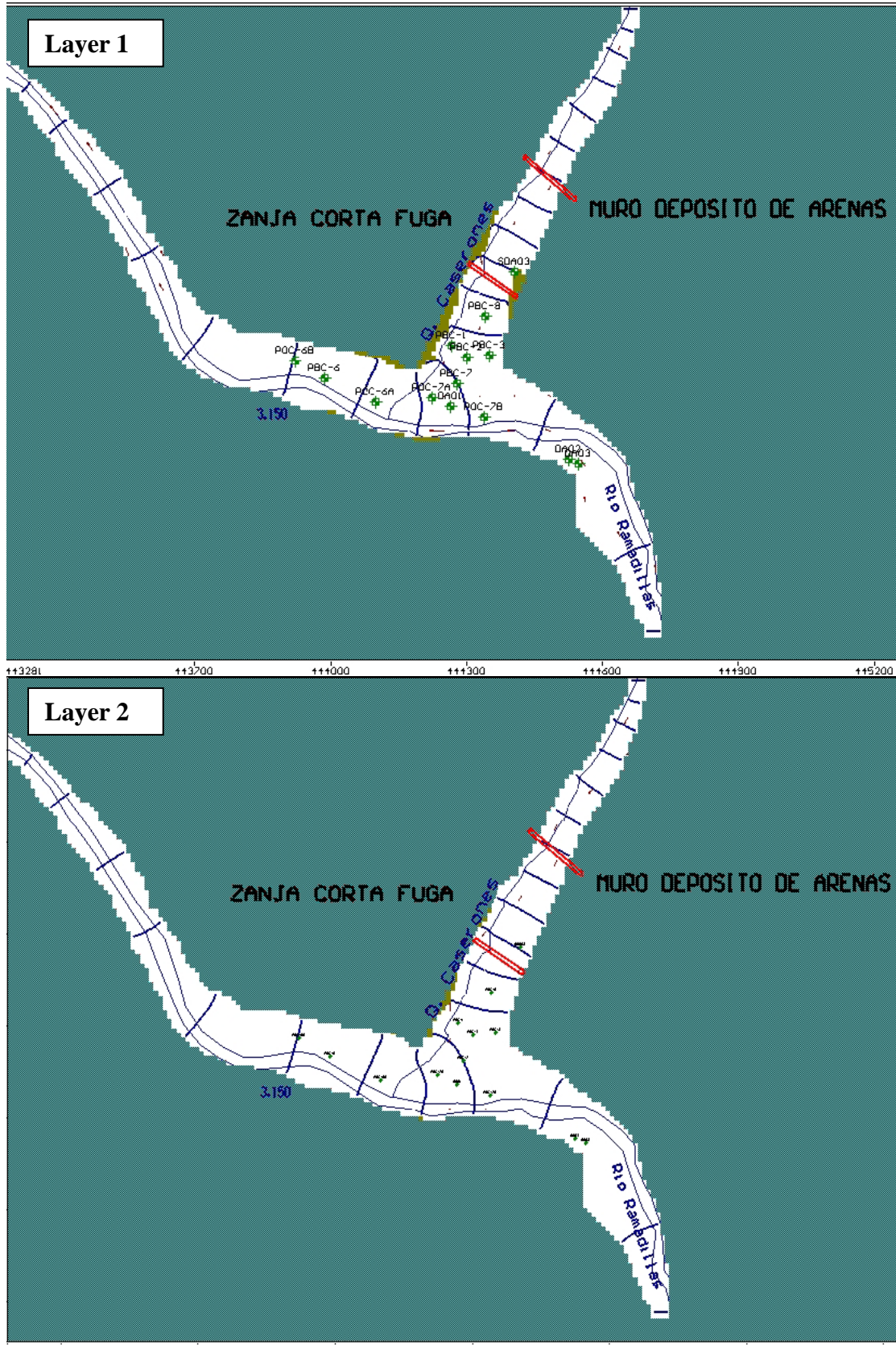


**Figura 6-6** Ubicación de pozos de observación de niveles



**Figura 6-7 Gráfico Calibración Niveles Estado Estacionario**





**Figura 6-8 Curvas Equipotenciales Estado Estacionario**

**Tabla 6-2 Balance de Masa Global**

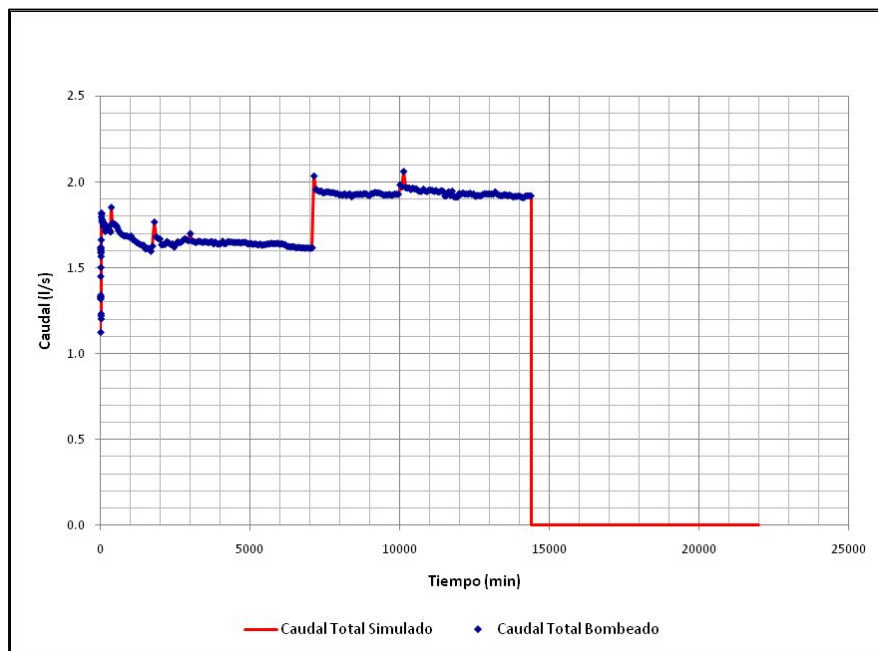
Item	Entradas	Salidas
	(L/s)	(L/s)
Recarga por Precipitación	0	-
Flujo Subterráneo Cabecera Caserones	3.7	-
Flujo Subterráneo R. Ramadilla	16	19.8
Total	19.7	19.8
Discrepancia		0.5%

### 6.3.2 Calibración Transiente

El modelo fue calibrado en su condición de flujo transiente por medio de la representación de los descensos obtenidos durante la prueba de bombeo de larga duración realizada entre el 21 de noviembre y el 12 de diciembre 2010 en los pozos PBC-1, PBC-2 y PBC-3 y los cambios en los niveles de agua subterránea observados en los puntos de control.

Para ello se ingresan los caudales bombeados en cada pozo y se calibran los niveles en los pozos observados moviendo los parámetros hidráulicos siempre dentro de rangos aceptables por la realidad física evidenciada con los datos de terreno.

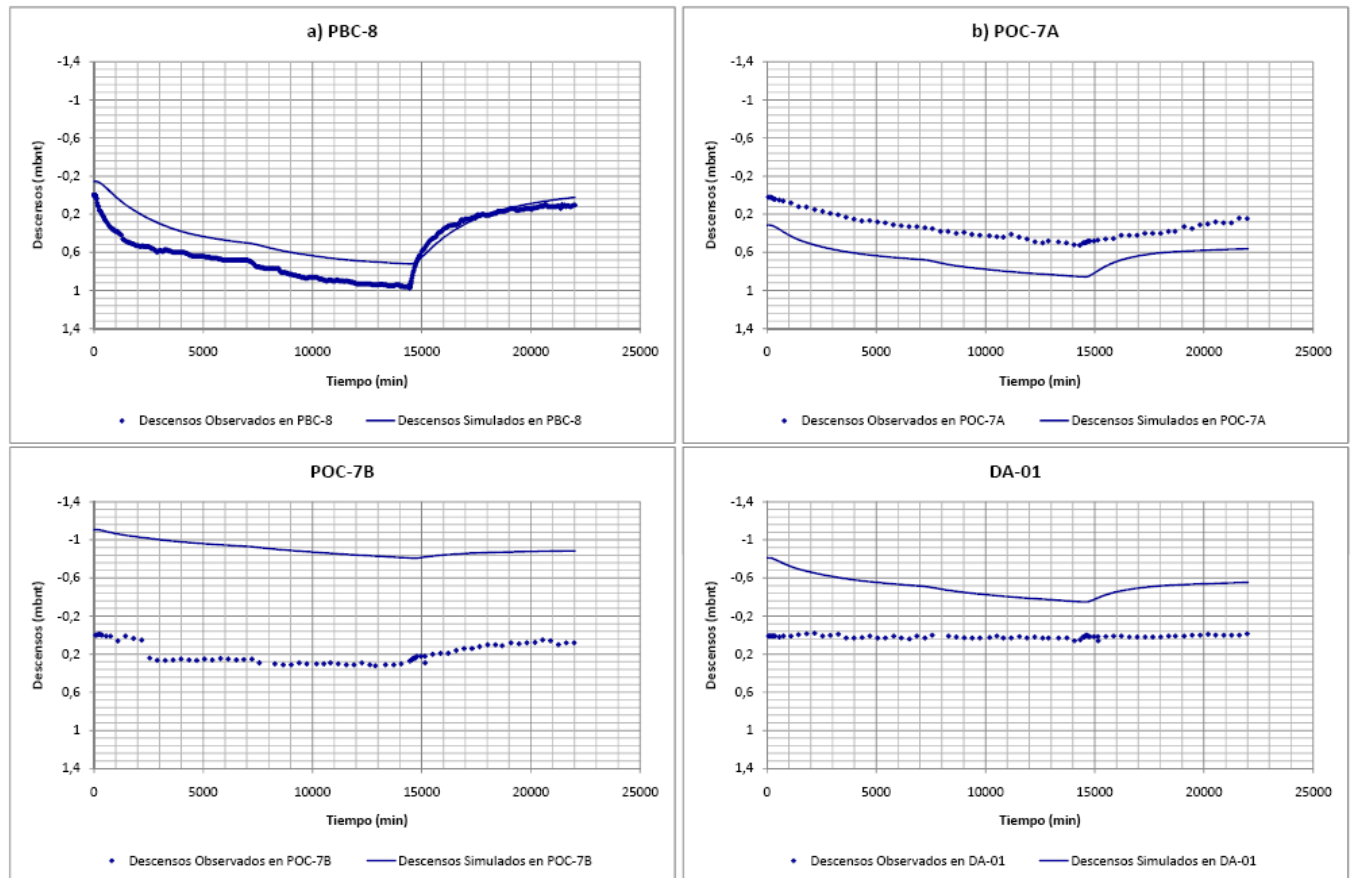
La **Figura 6.11** muestra el ajuste de caudales durante la calibración.



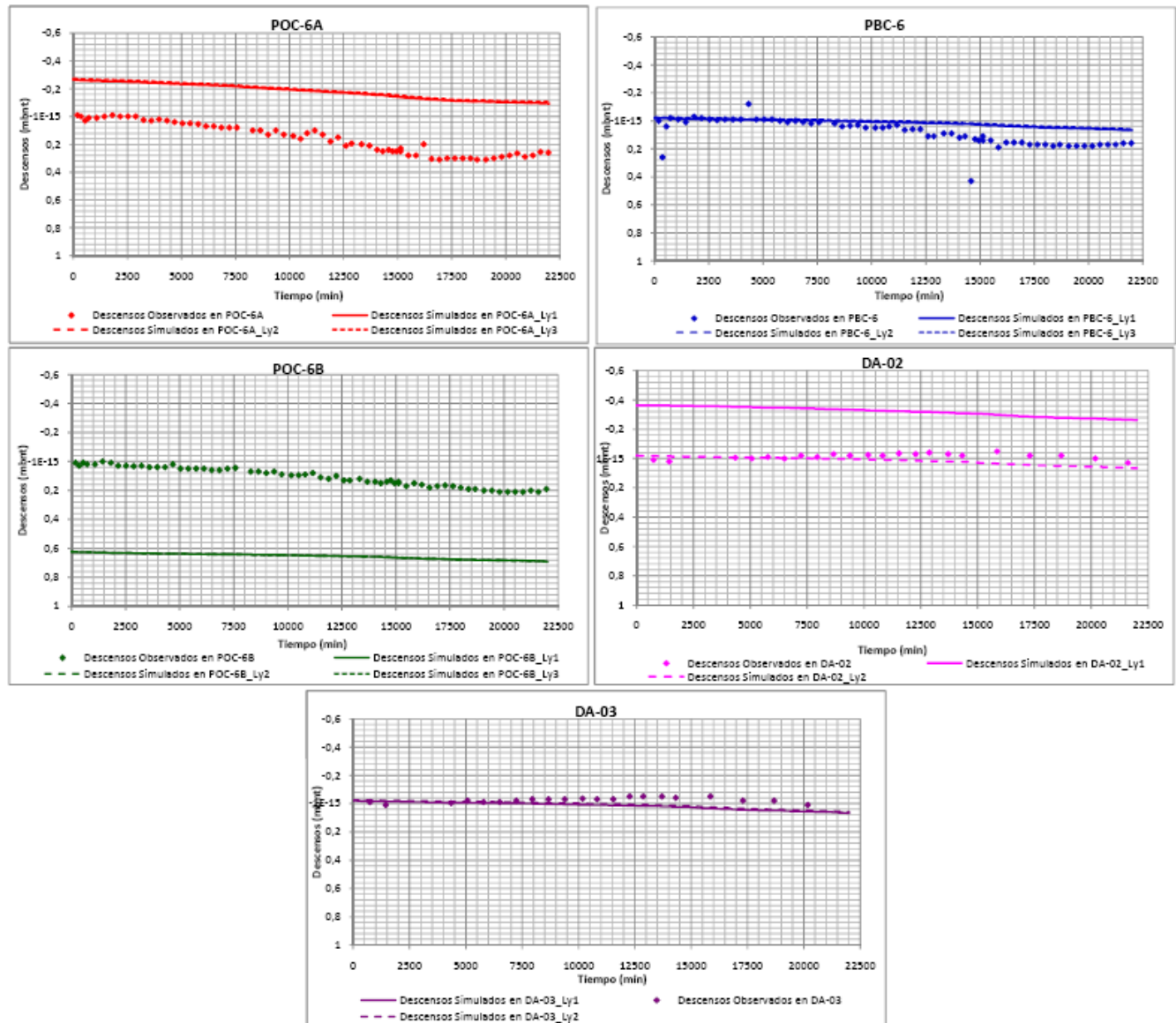
**Figura 6-9 Calibración del Caudal de Bombeo Simultánea de Larga Duración**



Las **Figuras 6-10 a 6-11** muestran el ajuste de descensos logrado en los pozos de observación de niveles dinámicos durante la prueba de bombeo simultánea. Si bien el ajuste no es exacto se puede apreciar que las tendencias de descensos han sido representadas utilizando parámetros promedios para las distintas zonas.



**Figura 6-10 Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación cercanos a batería de bombeo**



**Figura 6-11 Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación distantes a batería de bombeo**

## 6.4 Simulaciones Predictivas y Modelo de Transporte

Ajustados los valores de permeabilidad, almacenamiento y las condiciones de borde tanto en la calibración estacionaria como en la transiente, se realiza la simulación de los escenarios en condiciones de operación del depósito de arenas.

Estudios anteriores de Arcadis (Ref.2) estimaron que en la eventualidad de un episodio de filtración, las aguas que no serían captadas por la zanja cortafuga serían de un caudal menor a 1 l/s.

Por tanto, para efectos de este estudio se simulará la eventualidad de infiltración considerando que debajo de la zanja cortafuga, además del flujo natural, pase 1 l/s con una concentración de contaminantes de 1 gr/l (unitario).

Los resultados obtenidos para esta simulación unitaria, serán distribuidos en función de los valores máximos obtenidos de las aguas resultantes en las pruebas piloto realizadas. El objetivo es cumplir con la norma para Riego (NCH 1333- Riego), exceptuando los valores que en forma natural (línea base) se encuentran excedidos, como es el caso de conductividad específica, sulfatos y sólidos totales disueltos.

### 6.4.1 Simulación del caudal infiltrado

En el área de estudio se ha estimado el flujo pasante a través de la sección, mediante la ley de Darcy, en un valor de entre 3 y 4 l/s, valor que ha sido reproducido en el modelo numérico de flujo.

Como se señaló en el punto anterior, se simulará el eventual episodio de infiltración agregando 1 l/s extra con una concentración de contaminantes unitaria (ie 1 gr/l).

Para simular esto, se añaden en el modelo 3 pozos de inyección ubicados en zona de zanja cortafuga identificados en la **Figura 6.12** como **INY(1), INY (2) e INY (3)**.

Estos pozos inyectarán caudales individuales por un total de 1 l/s, en el layer 2 y con una concentración unitaria igual a 1gr/L.

### 6.4.2 Simulación de las concentraciones químicas en el flujo

En mayo de 2010, MLCC ha realizado ensayos de laboratorio con rocas del yacimiento para determinar, entre otras cosas, la calidad de los efluentes del proceso de flotación que serán vertidos en los depósitos de relaves. La metodología empleada y los resultados obtenidos se encuentran en el **Capítulo 3.7** del presente informe.

Para efectos de la simulación de transporte se considerará el valor máximo obtenido para cada parámetro mostrado en la **Tabla 6.4** como la condición más desfavorable de carga contaminante que ingresará al acuífero y que será capturada por la barrera hidráulica.

La carga se ingresará como carga unitaria y el resultado del modelo se distribuirá de acuerdo a las proporciones reales presentadas por el análisis químico del efluente piloteado.

En la tabla a continuación se presenta la calidad de las aguas del relave simuladas, la calidad de las aguas naturales y la norma de riego.

**Tabla 6.3 Calidad de las Aguas usadas en el Modelo**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Máximo Planta Piloto Aguas Relaves</b>	<b>Conc. Máxima Pozo WE-01*</b>	<b>Límites norma NCh 1.333 riego</b>
Aluminio	mg/L	2,92	1,12	5
Arsénico	mg/L	0,003	0,006	0,1
Bario	mg/L	<0,1		4
Berilio	mg/L	<0,01		0,1
Boro	mg/L	2,45	0,1	0,75
Cadmio	mg/L	<0,01	0	0,01
Cianuro	mg/L	<0,02	0	0,2
Cloruro	mg/L	190	25,7	200
Cobalto	mg/L	<0,05		0,05
Cobre	mg/L	0,06	0,25	0,2
Cromo Hexavalente	mg/L	<0,05	0	0,1
Flúor	mg/L	<0,5	0,7	1
Hierro	mg/L	0,03	62	5
Litio	mg/L	0,29		2,5
Manganeso	mg/L	0,02	0,82	0,2
Mercurio	mg/L	<0,001	0	0,001
Molibdeno	mg/L	<0,1	0,04	0,01
Níquel	mg/L	<0,05		0,2
Plata	mg/L	<0,01		0,2
Plomo	mg/L	<0,05	1,466	5
Selenio	mg/L	<0,001	0	0,02
Sodio Porcentual	%	39,5		35
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	-	460	500
Sulfatos	mg/L	795	212,4	250
Vanadio	mg/L	<0,1		0,1
Zinc	mg/L	0,03	0,66	2
Conductividad Específica	µmho/cm	2080	666	750
pH		9,97		5,5-9,0
Coliformes fecales	NMP/100ml	<1,8		1000

(\*): Máximo de concentración en las campañas de análisis de calidad de agua subterránea (período mayo 2007 – junio 2009), según Anexo 24 de Adenda 3 EIA (Ref.15).

### 6.4.3 Escenarios de Simulación

Se ha formulado un total de 4 escenarios de simulación en los cuales se ha representado diferentes situaciones de infiltración así como diferentes configuraciones de bombeo.

En lo que respecta al caudal de infiltración, ya se mencionó que estudios anteriores estimaron que en la eventualidad de un episodio de infiltración, las aguas que no serían captadas por la zanja cortafuga serían de un caudal menor a 1 l/s (Ref. 2). Sin embargo, en forma conservadora se define como escenario base el inyectar al modelo 1 l/s de solución contaminada. A modo de análisis de sensibilidad, se simulará también escenarios extremos en que la infiltración llegue a representar cerca de la mitad del caudal que pasa naturalmente en el sector. Como en este caso el flujo pasante calculado mediante la ley de Darcy es de entre 3 y 4 l/s, se simulará la inyección de 2 l/s de solución contaminante.

Para cada uno de estos caudales de inyección de solución contaminante se simularán idénticos caudales de extracción por la barrera hidráulica, esto es 1 y 2 l/s de extracción total. Este caudal de extracción también guarda relación con el caudal total del bombeo simultáneo realizado para las condiciones hidrogeológicas en el momento de realización de la prueba (en este caso 2 l/s), lo que avala la posibilidad de esta extracción. Sin embargo esto no implica que estos sean exactamente los caudales a bombear para que el sistema funcione. Es decir, lo que se busca es evaluar si el sistema es viable, más que definir el óptimo operacional (ie caudal mínimo a extraer), dado que se trata de ser conservador en las estimaciones.

Finalmente también se sensibilizó también la duración de la infiltración contaminante, en escenarios de 1 y 3 años.

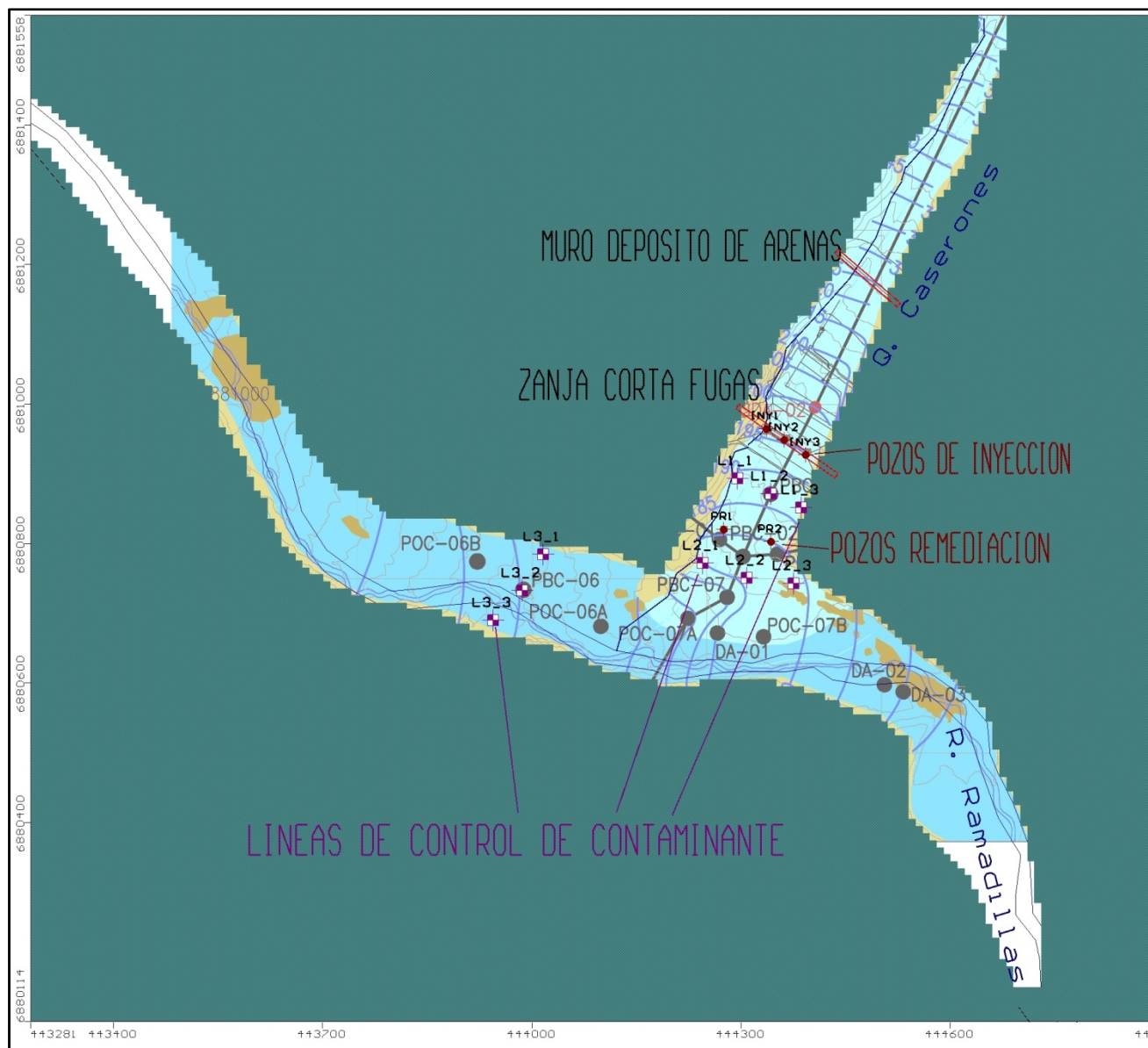
A continuación se describe las condiciones de cada uno de los escenarios:

1. **Escenario 1:** Inyección de 1 l/s con 1 gr/l de contaminación durante 1 año continuo. Puesta en marcha inmediata de la barrera hidráulica con 2 pozos de bombeo ubicados estratégicamente y con un caudal total a extraer de 1 l/s.
2. **Escenario 2:** Inyección de 1 l/s con 1 gr/l de contaminación durante 3 años continuos. Puesta en marcha inmediata de la barrera hidráulica con 2 pozos de bombeo ubicados estratégicamente y con un caudal total a extraer de 1 l/s.
3. **Escenario 3:** Inyección de 2 l/s con 1 gr/l de contaminación durante 1 año continuo. Puesta en marcha inmediata de la barrera hidráulica con 2 pozos de bombeo ubicados estratégicamente y con un caudal de 2 l/s, similar al caudal total extraído durante la prueba de bombeo simultánea.
4. **Escenario 4:** Inyección de 2 l/s con 1 gr/l de contaminación durante 3 años continuo. Puesta en marcha inmediata de la barrera hidráulica con 2 pozos de bombeo ubicado estratégicamente y con un caudal de 2 l/s, similar al caudal total extraído durante la prueba de bombeo simultánea.

Para visualizar la variación de las concentraciones en el tiempo se ubicó 3 líneas de control transversal a la dirección de flujo constituida por 3 o 4 puntos de observación.

- **Línea L1:** Ubicada entre la zanja corta fuga y la barrera hidráulica.
- **Línea L2:** Ubicada en la quebrada Caserones justo antes de la confluencia con el río Ramadillas, es decir antes de la dilución.
- **Línea L3:** Ubicada en el río Ramadillas justo después de la confluencia con la quebrada La Brea.

Los pozos de la Barrera Hidráulica se identifican como **PR1** y **PR2**. En la **figura 6-12** se muestran los puntos antes señalados.



**Figura 6-12 Ubicación pozos inyección, remediación y de observación de calidad Modelo de Transporte**



## 6.4.4 Resultados Modelo Transporte

### 6.4.4.1 Escenario 1

Se presenta dos gráficos con la variación de las concentraciones en las líneas 2 y 3 de pozos de observación.

En la **Figura 6.13** se puede apreciar que, pasada la barrera de contingencia en la línea de control L2, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 2 l/s, la concentración máxima alcanzada es de solo 0.1 mg/l. Este valor corresponde a un factor de  $1 \times 10^{-4}$  respecto de la carga de 1.000 mg/l inyectada en el sector de la zanja.

### 6.4.4.2 Escenario 2

Se presenta dos gráficos con la variación de las concentraciones en las líneas 2 y 3 de pozos de observación.

En la **Figura 6.14** se puede apreciar que, pasada la barrera de contingencia en la línea de control L2, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 2 l/s, la concentración máxima alcanzada es de solo 0.006 mg/l. Este valor corresponde a un factor de  $6 \times 10^{-6}$  respecto de la carga de 1 gr/l inyectada.

### 6.4.4.3 Escenario 3

Se presentan dos gráficos con la variación de las concentraciones en las líneas 2 y 3 de pozos de observación.

En la **Figura 6-15** se puede apreciar que, pasada la barrera de contingencia en la línea de control L2, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 2 l/s, la concentración máxima alcanza un pick de 0.6 mg/l. Este valor corresponde a un factor de  $6 \times 10^{-4}$  respecto de la carga de 1 gr/l inyectada.

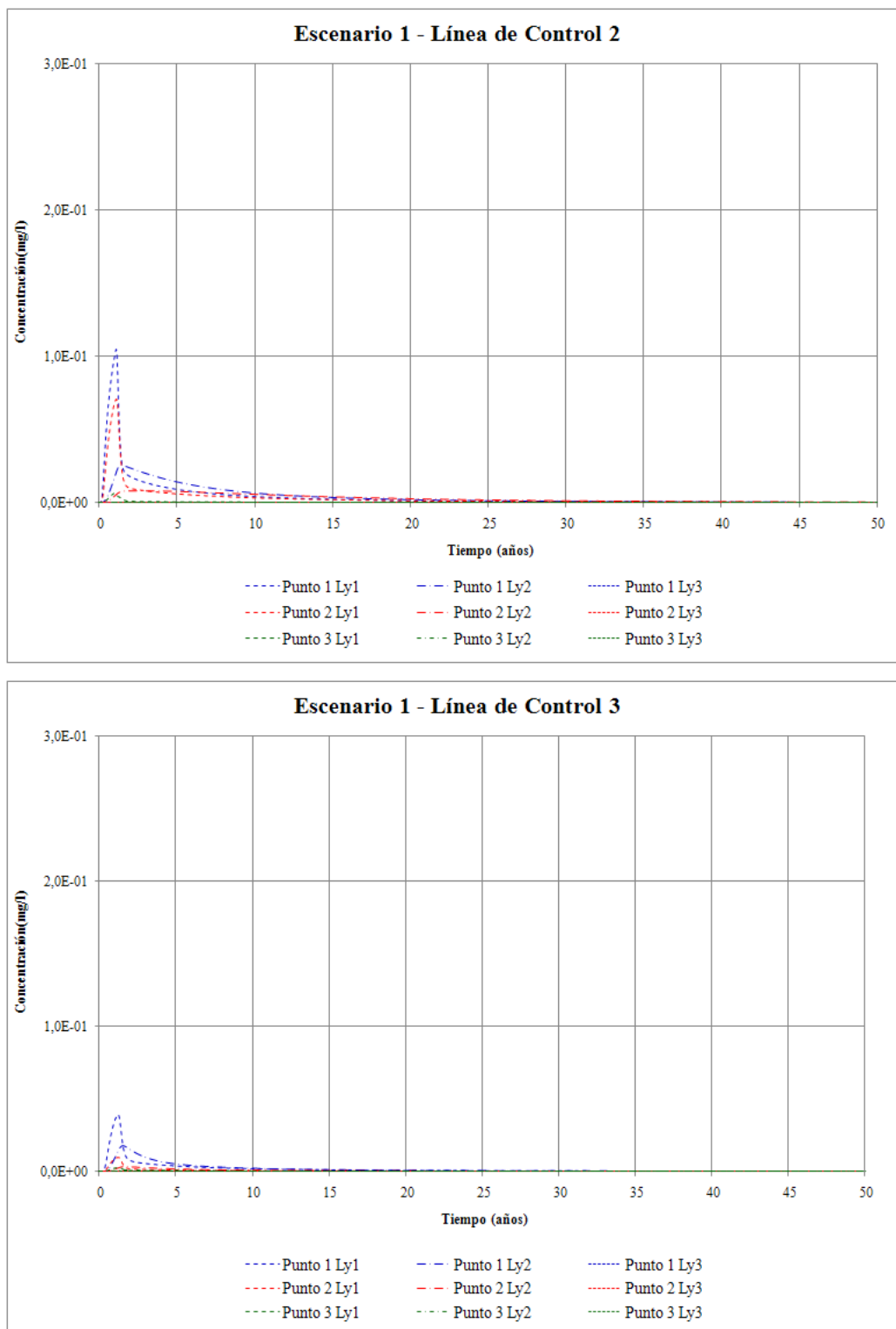
### 6.4.4.4 Escenario 4

Se presentan dos gráficos con la variación de las concentraciones en las líneas 2 y 3 de pozos de observación.

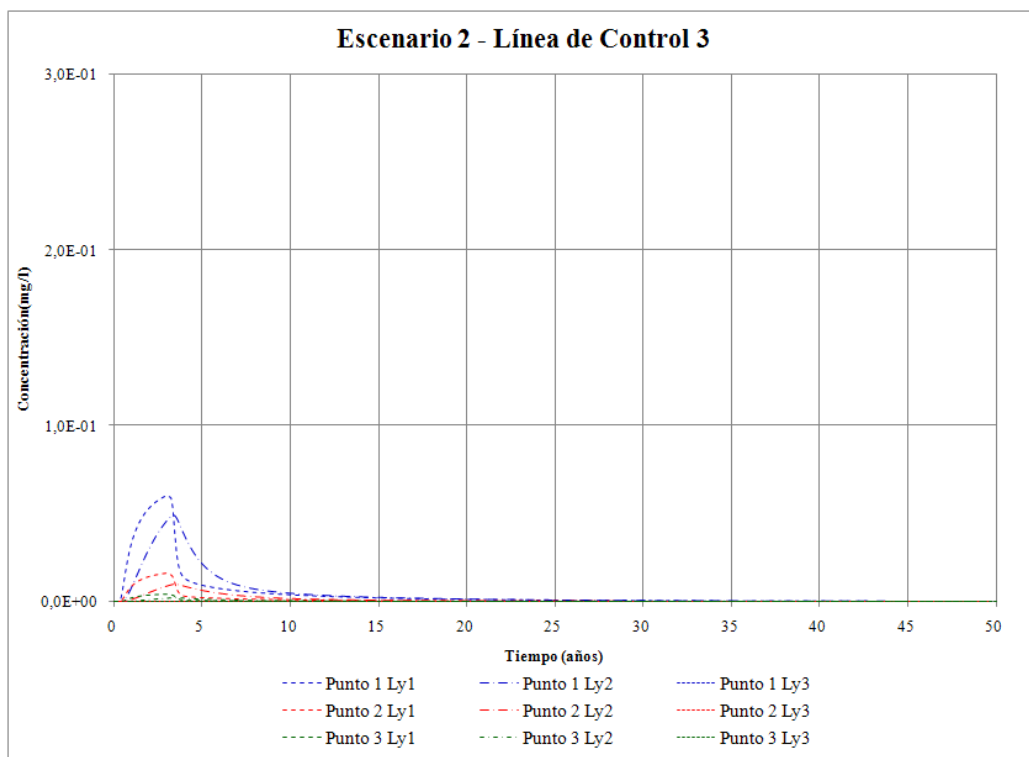
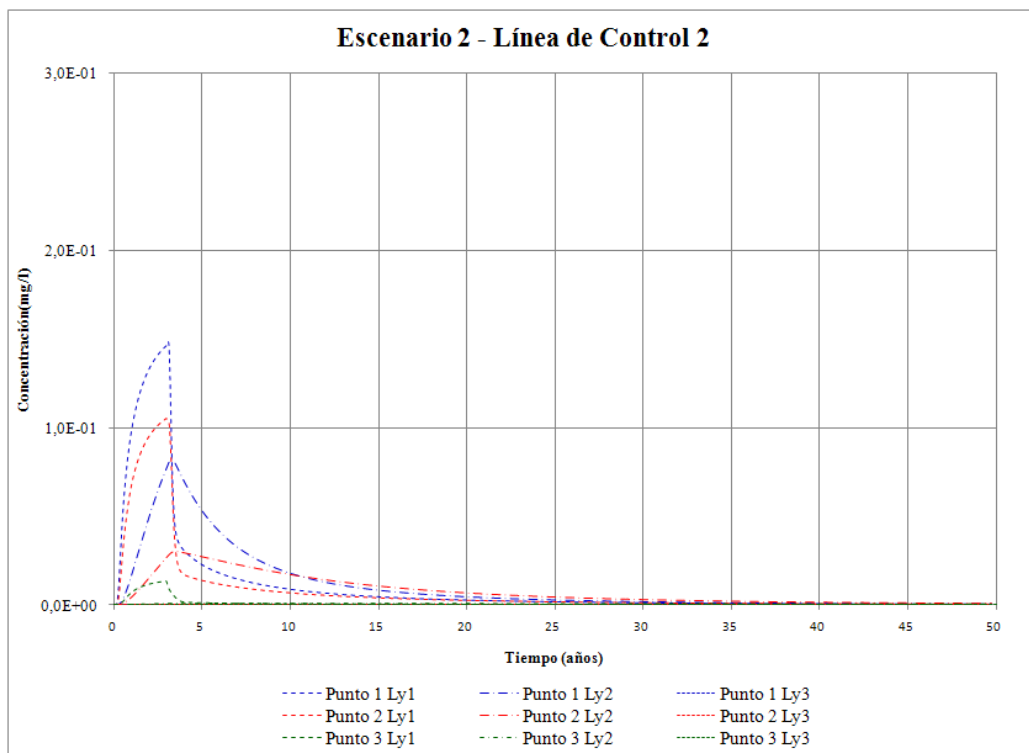
En la **Figura 6-16** se puede apreciar que, pasada la barrera de contingencia en la línea de control L2, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 2 l/s, la concentración máxima alcanza un pick de 0.1 mg/l. Este valor corresponde a un factor de  $1 \times 10^{-4}$  respecto de la carga de 1 gr/l inyectada.

Para calcular la concentración de cada elemento a ser controlada por la NCh de Riego 1.333 o calidad base se considera la calidad de las aguas provenientes del relave (análisis piloto) multiplicada por el factor ponderador obtenido para cada Escenario. Estas aguas son mezcladas con las aguas naturales caracterizadas en el punto WE-01, que representa la calidad del río Ramadillas con un amplio registro de datos monitoreados.

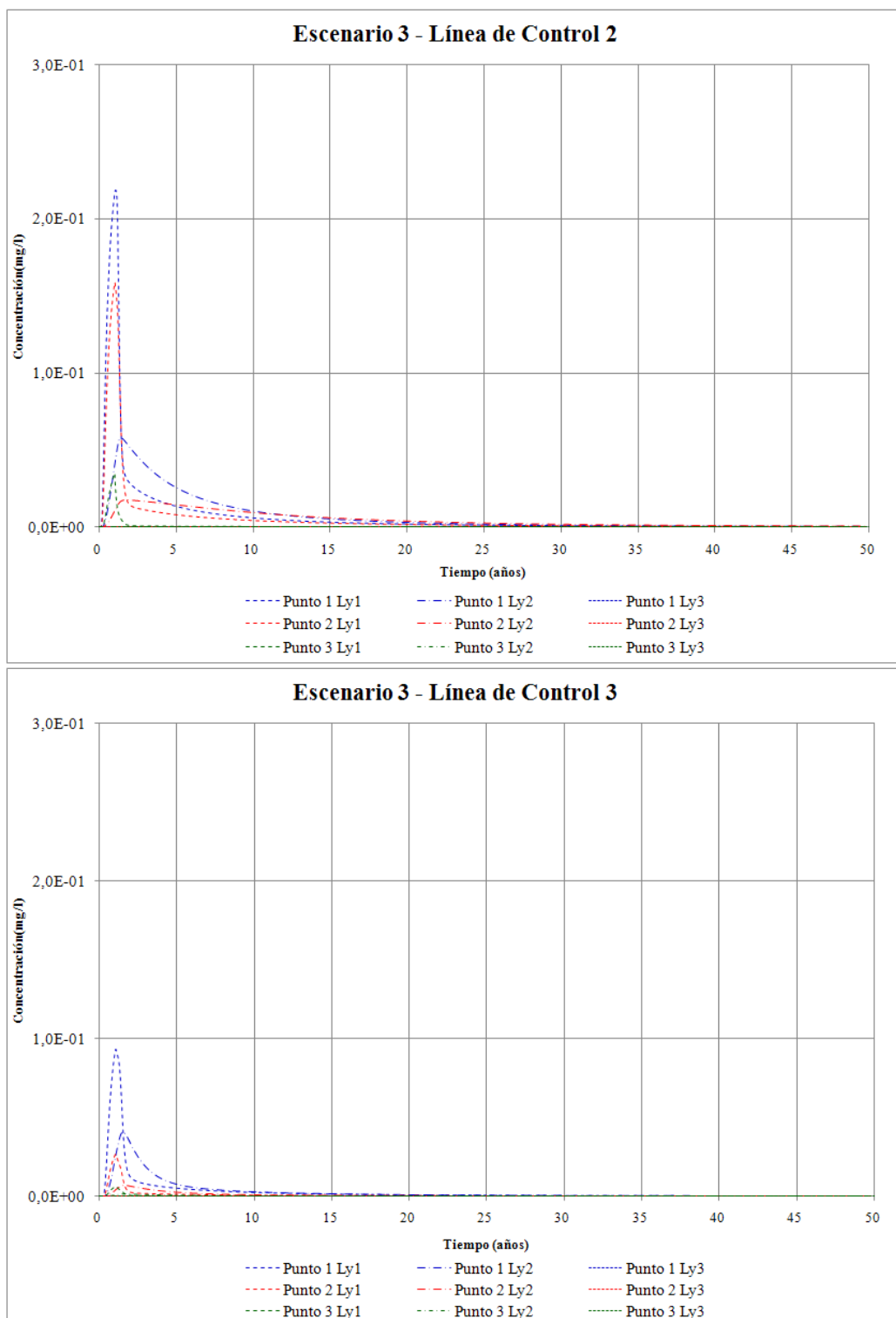
En la Tabla **6.5** se muestra la distribución de las concentraciones de los elementos resultantes del modelo, donde se aprecia que los 3 escenarios simulados permiten cumplir con la Norma de Riego en los casos que la calidad natural la cumple y que en los casos que la calidad natural esta por sobre la norma, esta se mantiene.



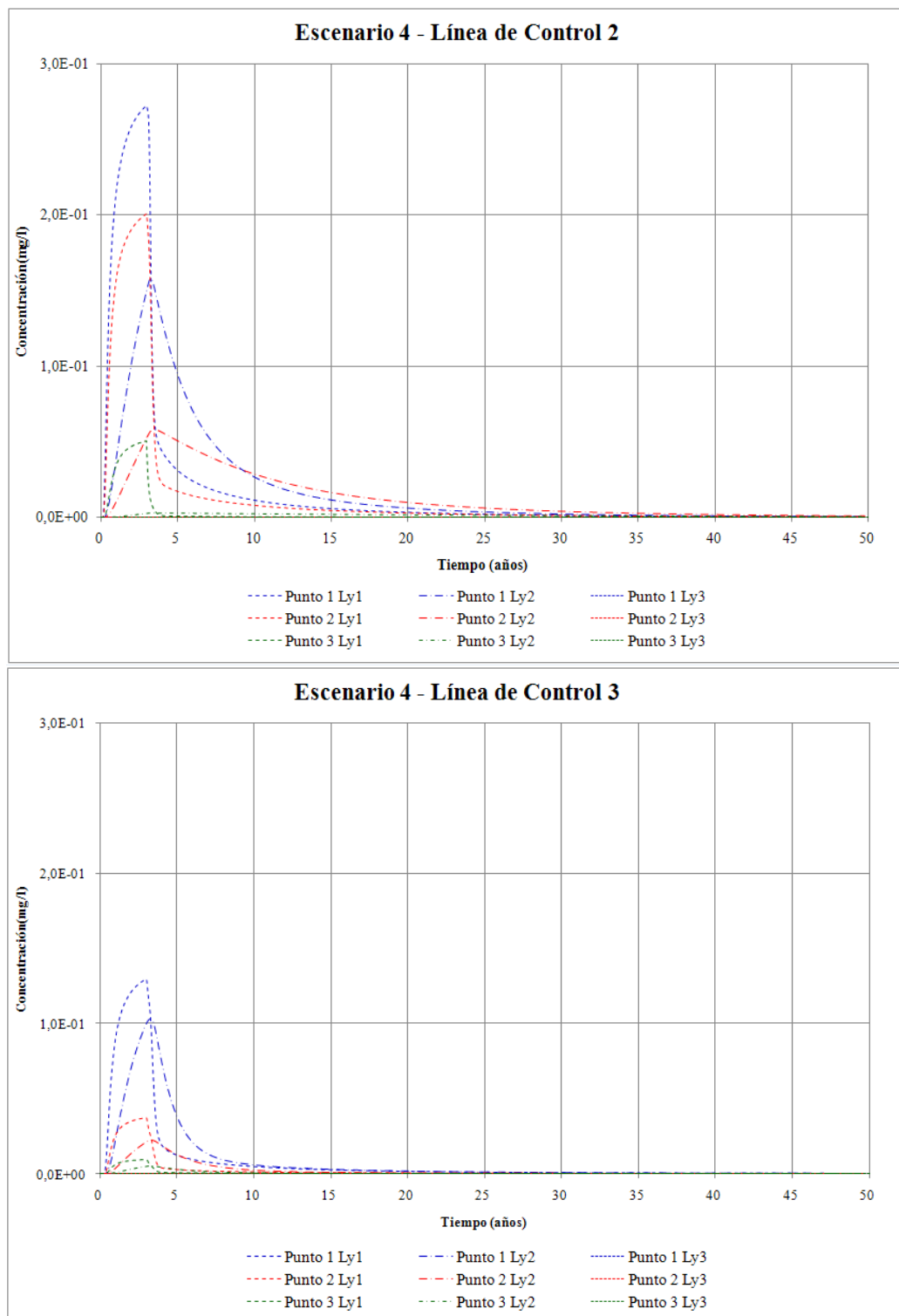
**Figura 6-13 Concentración vs Tiempo Escenario 1 – Línea 2 y Línea 3**



**Figura 6-14 Concentración vs Tiempo Escenario 2 – Línea 2 y Línea 3**



**Figura 6-15 Concentración vs Tiempo Escenario 3 – Línea 2 y Línea 3**



**Figura 6-16 Concentración vs Tiempo Escenario 4 – Línea 2 y Línea 3**



**Tabla 6-4 Calidad de las aguas usadas en el Modelo**

Máxima concentración en línea de control (mg/L)					1,05E-01	3,88E-02	1,48E-01	6,03E-02	2,18E-01	9,34E-02	2,72E-01	1,30E-01
Factor					1,05E-04	3,88E-05	1,48E-04	6,03E-05	2,18E-04	9,34E-05	2,72E-04	1,30E-04
Parámetro	Unidad	Aguas Relaves (Peor caso :Valor Maximo Planta Piloto)	Linea Base Natural (Peor Caso: Max Con. en WE-01)	Límites norma (Nch 1333 riego)	Escenario 1: 1 L/s, 1gr/L, 1 año, bombeo inmediato 1 L/s en 2 pozos de bombeo		Escenario 2: 1 L/s, 1gr/L, 3 años, bombeo inmediato 1 L/s en 2 pozos de bombeo		Escenario 3: 2 L/s, 1gr/L, 1 año, bombeo inmediato 2 L/s en 2 pozos de bombeo		Escenario 4: 2 L/s, 1gr/L, 3 años, bombeo inmediato 2 L/s en 2 pozos de bombeo	
		Aguas Relaves	Pozo WE-01*		L2	L3	L2	L3	L2	L3	L2	L3
Aluminio	mg/L	2,92	1,12	5	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
Amoníaco	mg/L											
Arsénico	mg/L	0,003	0,006	0,1	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Bario	mg/L	0,1		4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Berilio	mg/L	0,01		0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Boro	mg/L	2,45	0,1	0,75	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Cadmio	mg/L	0,01	0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cianuro	mg/L	0,02	0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cloruro	mg/L	190	25,7	200	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,7	25,8	25,7
Cobalto	mg/L	0,05		0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cobre	mg/L	0,06	0,25	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Cromo Hexavalente	mg/L	0,05	0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Fluor	mg/L	0,5	0,7	1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Hierro	mg/L	0,03	62	5	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00
Litio	mg/L	0,29		2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Manganeso	mg/L	0,02	0,82	0,2	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Mercurio	mg/L	0,001	0	0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Molibdeno	mg/L	0,1	0,04	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Níquel	mg/L	0,05		0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plata	mg/L	0,01		0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Plomo	mg/L	0,05	1,466	5	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466
Selenio	mg/L	0,001	0	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sodio Porcentual	%	39,5		35								
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	-	460	500								
Sulfatos	mg/L	795	212,4	250	212,48	212,43	212,52	212,45	212,57	212,47	212,62	212,50
Vanadio	mg/L	0,1		0,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zinc	mg/L	0,03	0,66	2	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Conductividad Específica	µmho/cm	2080	666	750								
pH		9,97		5,5-9,0								
Coliformes fecales	NMP/100ml	<1,8		1000								

\*: máximo de concentración en las campañas de análisis de calidad de agua subterránea (período mayo 2007 – junio 2009), según Anexo 24 de Adenda 3 EIA (Ref.15).

## 6.5 Conclusiones del Modelo Numérico

El modelo ha sido calibrado en estado estacionario en forma satisfactoria ajustando los parámetros dentro de rangos aceptables.

El modelo calibrado en flujo transiente refleja el caudal bombeado durante la prueba de larga duración y las tendencias generales en los pozos observados.

Se han analizado 4 escenarios y en todos ellos el sistema cumple con el objetivo de cero contaminación. Esto implica cumplir con la norma de calidad de aguas para el uso de riego NCH 1333, exceptuando para los parámetros que en la línea base no cumplen con ella. Tal es el caso de los sulfatos, conductividad específica y sólidos disueltos totales, según se presenta en la **Tabla 6.4**.

Es necesario indicar que el cumplimiento de cero contaminación ocurre antes de la confluencia de la quebrada Caserones con el río Ramadillas, es decir antes que ocurra dilución por la adición de las aguas subterráneas del río Ramadillas.

Lo anterior implica que el cumplimiento ocurre dentro de la quebrada Caserones propiamente tal y lejos del límite inferior de la propiedad de MLCC, restringiendo las medidas de control únicamente a la cuenca directamente asociada al Depósito de Arenas.

## 7 Conclusiones

El objetivo del presente estudio era realizar estudios hidrogeológicos complementarios para validar los diseños presentados en el EIA del sistema de control de eventuales infiltraciones a los depósitos de arenas del sector de Caserones.

La información recopilada en la presente campaña es consistente con lo encontrado en los trabajos de terreno anteriores, por lo que la conceptualización hidrogeológica del sistema no sufre grandes variaciones sino que se complementa y refina. Así, se pueden establecer los siguientes puntos con respecto al modelo conceptual:

- En el área se encuentra un cuerpo acuífero, de características freáticas, constituido por varias unidades hidrogeológicas con sus respectivas características.
- Las principales unidades hidrogeológicas se pueden agrupar en:
  - Depósitos Fluviales, ubicados principalmente en el curso del río Ramadillas.
  - Depósitos Aluviales, en los cursos de las quebradas Caserones y sus afluentes.
  - Depósitos Coluviales, en las partes más altas de la cuenca.
  - Rocas Sedimentarias y Volcánicas, ubicadas sólo en la parte más al norte de la quebrada Caserones.
  - Rocas Intrusivas que se encuentran en toda el área, muy cerca de la superficie y en las que se puede diferenciar rocas alteradas de las que poseen una mejor calidad.
- En general, las unidades presentan un amplio rango de permeabilidades. Esto se ha visto en los resultados de las pruebas hidráulicas (apéndice VIII) y es consistente con la variabilidad de su litología y grado de alteración. En los bombeos el rango es menor, ya que los pozos están habilitados en diversas unidades, por lo que los parámetros representan un valor general del sistema.
- La recarga del sistema ocurre como infiltración por deshielo de las precipitaciones solidas que caen sobre la cuenca de la quebrada Caserones.
- El nivel de agua se ubica principalmente en la mitad inferior de las unidades de depósitos coluviales y aluviales, o más profundo en las rocas intrusivas alteradas en las partes altas de la cuenca.
- La dirección de flujo subterráneo sigue predominantemente el gradiente topográfico y el lineamiento de la quebrada Caserones hasta confluir al sistema albergado en la Quebrada Ramadillas.
- No existen antecedentes de fallas estructurales mayores que pudieran generar canales preferenciales de flujo hacia otras quebradas.
- En cuanto a la química las aguas subterráneas corresponden a aguas del tipo sulfatadas cálcicas.

Este modelo conceptual no difiere de los datos ya presentados en el EIA y más bien ha permitido precisar los parámetros característicos de las unidades hidrogeológicas y refinar la geometría de las mismas. Con esta información fue posible reformular un modelo numérico del flujo subterráneo mas actualizado.

El modelo numérico presentado en este informe representa el sistema acuífero en cuanto a sus características hidráulicas, condiciones de borde, recargas y niveles, tanto en situación estacionaria como al reproducir de bombeo. Consecuentemente, las simulaciones predictivas que se presentan son altamente confiables.

El criterio para evaluar el comportamiento del sistema es el compromiso de cero contaminación, que permite mantener las condiciones naturales de las aguas del sector. Esto implica que, en el caso de que la calidad natural del agua cumpla la norma de agua para riego (NCh 1.333), esta se mantenga

bajo la norma. En el caso de que naturalmente se excedan dichos límites, el sistema garantiza que ante eventuales infiltraciones, las concentraciones sean menores o igual al promedio de línea base de estos parámetros.

Con este criterio, se procedió a evaluar cuatro escenarios de contaminación con el modelo numérico. El caudal de infiltración se varió entre un caso base de 1 l/s, lo que es conservador dadas las estimaciones previas (Ref.2) y el caso extremo de 2 l/s que corresponde a cerca de la mitad del caudal que pasa naturalmente en el sector. Para cada uno de estos caudales de inyección de solución contaminante se simularán idénticos caudales de extracción por la barrera hidráulica, esto es 1 y 2 l/s de extracción total. Estos caudales son similares al caudal total del bombeo simultáneo realizado para las condiciones hidrogeológicas en el momento de realización de la prueba, lo que avala la posibilidad de esta extracción. Sin embargo esto no implica que estos sean exactamente los caudales a bombear para que el sistema funcione. Es decir, lo que se busca es evaluar si el sistema es viable, más que definir el óptimo operacional (ie caudal mínimo a extraer), dado que se trata de ser conservador en las estimaciones. Finalmente también se sensibilizó también la duración de la infiltración contaminante, en escenarios de 1 y 3 años.

En los 4 escenarios simulados se cumple con el objetivo de cero contaminación. Esto ocurre antes de la confluencia de la quebrada Caserones con el río Ramadillas, es decir antes que ocurra dilución por la adición de las aguas subterráneas del río Ramadillas.

Hay que recordar que el diseño del depósito de arenas considera una serie de medidas para impedir episodios de contaminación, que incluyen sistemas de desvíos de aguas superficiales, sistemas de drenaje y una zanja cortafuga (Ref. 15).

Además de todo esto, se considera un Sistema de Monitoreo y Control y un Plan de Remediación, basado en la información recopilada en este informe y anteriores. Los componentes del sistema son una barrera hidráulica formada por pozos de bombeo, y el sistema de monitoreo, formado por pozos en 3 sectores:

- i. Después de la zanja cortafuga y antes de la barrera,
- ii. Inmediatamente abajo de la barrera hidráulica, y
- iii. Aguas abajo de la confluencia de la quebrada Caserones con el río Ramadillas.

Así, en la primera de estas ubicaciones los pozos contemplan medición en línea de pH, temperatura, sólidos disueltos y otros parámetros, de forma que al detectar variaciones fuera de rango en ellos, se inicie inmediatamente la extracción desde los pozos del sistema de remediación. La ubicación de los pozos de monitoreo aguas abajo de la barrera hidráulica permite medir la eficiencia del sistema, mientras que los puntos en el río Ramadillas se consideran como punto de fiscalización final.

Más aun, MLCC ha propuesto una nueva ubicación para la barrera hidráulica, que al estar inmediatamente aguas abajo de la zanja cortafuga, hace más eficiente el sistema de captura de las filtraciones.

De esta forma, la conjunción y actualización del modelo conceptual, el modelo numérico, el diseño del Depósito de Arenas con el Sistema de Monitoreo y Plan de Remediación ya mencionado, más la nueva y más eficiente ubicación de la barrera hidráulica permite señalar que ante un episodio de infiltración el bombeo en la barrera permite cumplir el objetivo de mantener las condiciones naturales del sistema.

Todo lo anterior permite por un lado validar las premisas con las que se ha diseñado el Sistema de Monitoreo y Plan de Remediación del Depósito de arenas y sobre todo garantizar que ante eventuales episodios de infiltración desde el depósito, el sistema es capaz de impedir cualquier contaminación aguas abajo.

## 8 Referencias

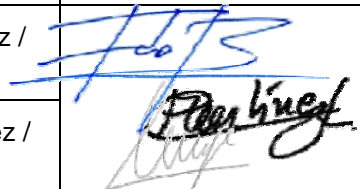
1. ARCADIS- AKER SOLUTION, Nov. 2009, Análisis infiltraciones Arena Acopiada, Informe Técnico N° 3549-674-OC-INF-002
2. ARCADIS- AKER SOLUTION, Nov. 2009 Informe técnico N° IBMR-RET-664-GE-004, Análisis De Consolidación Y Filtraciones De Lamas Depositadas
3. ARCADIS- AKER SOLUTION Nov. 2009, Memoria De Cálculo N° IBMR-CAL-674-CE-001, Memoria De Calculo Sistema De Drenaje Acopio Arenas Caserones Bajo
4. ARCADIS- AKER SOLUTION Dic. 2009, MEMORIA DE CÁLCULO N° 3549-664-IH-MEC-001, Memoria de cálculo sistema de drenaje, depósito lamas la brea
5. ARCADIS- AKER SOLUTION Oct. 2009, Informe técnico N° IBIC-RET-674-GE-001, Estimación de filtraciones al acuífero acopio de arenas
6. ARCADIS- AKER SOLUTION, Oct2009, Informe técnico N° IBIC-RET-664-GE-001; Estimación de filtraciones al acuífero depósito de lamas la brea
7. ARCADIS- AKER SOLUTION, Estudios Geotécnicos para el Acopio de Arenas, Botadero de Lastre, Cantera Enrocado, depósito de Lamas, General y Lamaducto, Varios Informes.
8. ARCADIS. Septiembre 2009, Informe Geológico Geotécnico Depósito de Lamas La Brea.
9. ARCADIS. Septiembre 2009, Informe Geológico Geotécnico Área Acopio de Arenas.
10. Custodio y Llamas, 1996, Hidrología Subterránea, Editorial Omega.
11. CONIC BF, Ernesto Brown, Junio 2010, Estudio Hidrológico de Crecidas Quebrada Caserones.
12. Datos s hidrométricos mensuales en cauces controlados por MLCC, DGA y datos de niveles en pozos desde abril del 2008 a mayo de 2010.
13. GEODATOS, Abril 2008, Estudio Geofísico Mediante Transiente Electromagnético, Sector Río Ramadilla, Estero La Brea, Copiapó III Región.
14. GEODATOS, Marzo 2009, Estudio Geofísico Mediante Transiente Electromagnético, Sectores Carrizalillo Grande, Caserones y La Brea, Los Loros, Copiapó III Región.
15. MLCC, 2009, Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Caserones
16. Johnson, 1986, Groundwater and Wells, Editorial Driscoll.
17. Kruseman, G.P. and N.A. de Ridder, 1990. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data Second Edition (Completely Revised) ILRI publication 47. Intern. Inst. For Land Reclamation and Improvements, Wageningen, Netherlands, 377 p.
18. SCHLUMBERGER WATER SERVICES, Septiembre 2008, Modelo Numérico Hidrogeológico Preliminar Proyecto Caserones.
19. SCHLUMBERGER 2010. Aquifer Test User's Manual, 322 p.






- 20.SGS, Mayo 2010, Informe resultados calidad química de la potencial futura agua de relaves
- 21.SITAC, Septiembre 2009, Caracterización del Sistema Hidrogeológico Quebrada La Brea Proyecto Caserones, MLCC.
- 22.SITAC, Octubre 2009, Modelo Hidrogeológico de Transporte de Masa y Remediación Actualizado Sector Quebrada La Brea, MLCC.
- 23.SITAC, Mayo 2008, Perforación de Tres Pozos Exploratorios Sector Ramadillas y La Brea Proyecto Tranque de Relaves, MLCC.
- 24.SITAC, Septiembre 2009, Caracterización del Sistema Hidrogeológico Quebrada Caserones Proyecto Caserones, MLCC.
- 25.SITAC, Octubre 2009, Modelo Hidrogeológico de Transporte de Masa y Remediación Actualizado Sector Quebrada Caserones, MLCC
- 26.SITAC, Mayo 2009, Antecedentes de Construcción de los Pozos DA – 01, DA – 02 y DA - 03 Sector Confluencia Quebrada Caserones con Río Ramadillas, III Región.
- 27.SITAC, Marzo 2008, Estudio Hidrológico en Crecida Quebrada Caserones y Quebrada La Brea, Cuenca del Río Copiapó.
- 28.SITAC, Mayo 2009, Antecedentes De Construcción De Los Pozos Da – 01, Da – 02 Y Da - 03 Sector Confluencia Quebrada Caserones Con Río Ramadillas, III Región.
- 29.SITAC, Septiembre 2009, Prueba De Bombeo De Larga Duración Del Pozo Wp 01 Sector Rio Ramadillas, III Región
- 30.SITAC, Mayo 2008, Perforación de tres Pozos Exploratorios Sector Ramadillas, La Brea. Proyecto Tranque de Relaves, Minera Lumina Chile
- 31.SITAC, Pruebas De Bombeo Pozos WE-01, WE-02, WE-03, WE-04 y WEO-04.
- 32.SITAC, Antecedentes de la Construcción y Pruebas de Bombeo: Pozos TR Y WP
33. SITAC, Marzo 2010, Informe Nuevo Escenario Modelos Remediación con pozos ubicados en Quebrada La Brea y Quebrada Caserones

## Registro de Distribución

No. de Informe	02-2161-03- Caserones
Revisión	A
Emitido para	Aprobación
No. de Copia	Digital

Nombre/Cargo	Empresa	Copia(s)	Fecha	Preparado por	Firma
René Orellana	MLCC	1, 2 y 3 / Digital	24-01-11	F. Pérez / C. Martínez / C. Moya	
Archivo	SRK	4	24-01-11	F. Pérez / C. Martínez / C. Moya	

Revisión Técnica:	O. Suzuki	
Jefe de Área:	B. Labarca	
Firma de Aprobación para envío a Cliente:	A. Palma	

Este informe está protegido por derecho de autor por parte de SRK Consulting. Prohibida su reproducción o transmisión en cualquier forma o por cualquier medio a cualquier persona sin previa autorización escrita de SRK Consulting.

## CONTROL DE CAMBIOS

No. de Proyecto	02-2161-03
No. de Copia	

Fecha	Rev.	Cambio(s)	Autorizado por	Firma
		-		

Firma de Aprobación para envío a Cliente:		
---	--	--

