

**Estudios Hidrogeológicos
Complementarios Control
Infiltraciones Depósitos de Lamas
Quebrada La Brea
Proyecto Caserones
Rev. A**

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

Preparado por
 **SRK Consulting**
Engineers and Scientists

Enero, 2011

Estudios Hidrogeológicos Complementarios Control Infiltraciones Depósitos de Lamas Quebrada La Brea Proyecto Caserones

Rev. A

Minera Lumina Copper Chile S.A

Av. Andrés Bello 2687 Piso 4, Las Condes

Número de Proyecto 02-2161-03

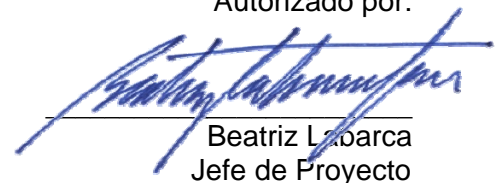
SRK Consulting (Chile)

Av. Apoquindo 4001, Piso 7°
Las Condes, Santiago
Chile
Tel: +(56 2) 4890 800
Fax: +(56-2) 4890 801

santiago@srk.cl
www.srk.cl

Enero, 2011

Autorizado por:



Beatriz Lobarca
Jefe de Proyecto

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, MLCC 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 de relaves 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 para la 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 pudieran generar impacto hacia los cuerpos de agua en dirección aguas abajo de ambos depósitos.

Trabajos de Terreno en sector de Quebrada La Brea

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 2 pozos de bombeo y 5 de observación aguas abajo del muro del depósito de lamas;
- Perforación de 3 pozos de bombeo exploratorio en sector de barrera hidráulica;
- Perforación de 6 piezómetros en las partes altas de la Quebrada La Brea para controlar los niveles de agua subterránea;
- Perforación de un sondaje diamantino para calibrar la estratigrafía (recuperación continua);
- 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 de agua en los pozos del área en forma periódica;
- Colección de muestras de agua para análisis químico; y
- Verificación de rasgos geológicos estructurales en el área.

Unidades Hidrogeológicas

Considerando esta información se ha complementado el modelo hidrogeológico conceptual en donde se reconoce 5 unidades hidrogeológicas en el sector de La Brea:

Qf - Depósitos fluviales: Depósitos compuestos por gravas y arenas pobremente consolidados que se ubican principalmente en el curso del río Ramadillas. Las potencias observadas varían entre 36 y 46m. El nivel de agua subterránea se encuentra cercano al nivel del río mostrando conexión entre el acuífero y curso superficial. La conductividad hidráulica es del orden de 1 a 6 m/d y las transmisividades entre 75 y 480 m²/d.

Qa - Depósitos aluviales: Se ubican en los cursos de la quebrada La Brea y sus afluentes. Corresponden principalmente a depósitos aluviales y, en menor medida, a depósitos fluviales, de variada composición granulométrica, que en sectores se encuentran aterrizados y cortados por cauces

fluviales actuales, especialmente hacia la confluencia con río Ramadillas. Las potencias observadas varían desde unos pocos metros en las nacientes de la quebrada hasta 45m en las cercanías de la confluencia con el río Ramadillas. La conductividad hidráulica varía entre 10^{-2} a 10^{+2} m/d con un promedio de 24 m/d. La transmisividad calculada es de $5,7 \cdot 10^{+2}$ m²/d en promedio y el coeficiente de almacenamiento de 0,01. Los niveles de agua subterránea se encuentran en la mitad inferior de esta unidad.

RSVa - Rocas Sedimentarias y Volcánicas Meteorizadas: Corresponden a rocas sedimentarias (principalmente areniscas y conglomerados) y volcánicas (lavas andesíticas) muy alteradas tanto por meteorización como fracturamiento pertenecientes a las formaciones La Ternera, Lagunillas y Quebrada Seca, con paquetes de decenas de metros y manto de 25° a 30° oeste. El grado de alteración disminuye en profundidad. La conductividad hidráulica se encuentra en un amplio rango de valores, entre 10^{-3} y 10^{+1} m/d, con un promedio de 2,98 m/d. Los valores de transmisividad obtenidos promedian 10^{+2} m²/d y un coeficiente de almacenamiento de 0,001. Esta unidad se encuentra en su mayoría saturada, con niveles estáticos sobre el límite superior de esta unidad.

RSVf - Rocas Sedimentarias y Volcánicas Frescas: Corresponden a las mismas rocas de la unidad anterior sin alteración o meteorización, por lo que sus características hidráulicas corresponden a acuitados. La conductividad hidráulica se encuentra entre 10^{-1} y 10^{-3} m/d.

RI - Rocas Intrusivas: Unidad de rocas intrusivas antiguas. Esta unidad aflora en la parte oriental del área estudiada y se encuentra muy cerca de la superficie en el sector norte. La permeabilidad promedio es de $6 \cdot 10^{-2}$ m/d. Estas permeabilidades están calculadas en la parte superior de esta unidad, que es la que se encuentra más afectada por meteorización.

Dinámica Hidrogeológica

El sistema subterráneo albergado en la quebrada La Brea está constituido por un acuífero freático contenido en varias unidades hidrogeológicas. Los límites norte y este del acuífero se consideran impermeable (rocas intrusivas antiguas, RI) y el límite oeste corresponde a las rocas poco permeables de la secuencia estratificada.

El agua subterránea se mueve dentro del acuífero desde aguas arriba de la quebrada La Brea hacia la confluencia con el río Ramadillas, con un gradiente hidráulico que varía entre 0,10 a 0,05 en la sección superior y 0,03 aguas abajo. Se observa claramente un cambio de pendiente asociado al límite entre el dominio intrusivo (unidad RI) y la aparición de la unidad RSV. Hacia el sector de confluencia con el río Ramadillas, sitio donde se ubicará la barrera hidráulica, los niveles de agua subterránea conforman una superficie de muy baja pendiente hasta alcanzar la cota de las aguas del cauce.

La dirección de flujo subterráneo sigue el gradiente topográfico y el lineamiento de la Quebrada La Brea hasta confluir al sistema albergado en el río Ramadillas. Con la información de los monitoreos de niveles de agua en los pozos se elaboró una piezometría del sector, que si se compara con la presentada en el EIA (Ref 15) y que se adjunta en el **Apéndice II**, se observa que son similares, con pequeñas diferencias, y que el trabajo de construcción de nuevos piezómetros ha permitido refinar la ubicación de la tabla de agua logrando una mejor cobertura.

El nivel de agua se ubica principalmente en la mitad inferior de la unidad de depósitos aluviales y en algunos casos en la parte superior de las rocas alteradas (Figura 5-2).

Las precipitaciones en el área ocurren principalmente en forma de nieve de modo que la mayor recarga del acuífero ocurre cuando ésta se funde en las partes altas de la cuenca y percola hacia los sedimentos permeables superficiales y en profundidad.

En cuanto a la química, las aguas subterráneas corresponden a aguas del tipo sulfatadas cálcicas y neutras.

Modelo Numérico

En agosto 2010 se presentó un modelo numérico construido utilizando el código Modflow con la interface gráfica Visual Modflow 4.4. Dicho modelo representó la dinámica de las aguas subterráneas en el área del depósito de Lamas, considerando la información estratigráfica, de recarga, permeabilidades, direcciones de flujo, gradiente hidráulico, coeficientes de almacenamiento, etc. Para la calibración del estado transiente se utilizó 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, para efectos de este estudio se simula 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). Así, la razón entre las concentraciones que determine el modelo en diferentes puntos y esta concentración unitaria, determinará un factor que a su vez se aplica sobre la concentración química por elemento que se definió como condición más desfavorable de entre los ensayos realizados con materiales del yacimiento.

En el presente informe se entrega una actualización de dicho modelo. Este modelo presenta un mejor ajuste de las tendencias de los niveles en los pozos en flujo transiente, lo que permite una mayor confiabilidad en las simulaciones.

Se desarrollaron 5 escenarios con diferentes configuraciones, que difieren en el caudal infiltrado, el tiempo de infiltración, y el número de pozos de la barrera. La infiltración que potencialmente produciría el depósito de lamas ha sido simulada mediante la inyección de un caudal de 1 y 10 l/s distribuida en 3 pozos, por donde se ingresa una carga unitaria de contaminante, ya sea por un año o tres años continuos.

Para capturar este flujo excedente, se ha modelado un campo de 2 a 3 pozos conformando la barrera hidráulica, distribuidos en forma transversal al flujo, y se ha simulado escenarios con un bombeo total de 12 l/s en la barrera.

En todos los escenarios la barrera hidráulica presenta una eficiencia tal que permite la mantención de la calidad natural del agua, incluso antes de la confluencia de la quebrada La Brea en el río Ramadillas.

Conclusiones

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, que corresponde al entregado en agosto 2010.

Posteriormente, se realizó una actualización de este modelo, que es la que se presenta en este informe. Este modelo representa el sistema acuífero en cuanto a sus características hidráulicas, condiciones de borde, recargas y niveles, tanto en situación estacionaria como al reproducir el bombeo simultáneo de nueve días, de manera más precisa que modelo entregado en agosto 2010. Consecuentemente, las simulaciones predictivas son de mayor precisión con resultados más confiables.

Además con esta actualización del modelo se pudo realizar simulaciones con un caudal de extracción de la barrera hidráulica más óptimo, y que al ser más similar al caudal natural pasante es más factible de obtener.

Finalmente, la conjunción y actualización del Modelo Conceptual, el Modelo Numérico, el diseño del Depósito de Lamas 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 a 3 años, el bombeo en la barrera permite cumplir el objetivo de mantener las condiciones naturales del sistema. Es más, el modelo indica que una barrera conformada por dos pozos de extracción permite cumplir con el objetivo de cero contaminación.

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 Lamas, y por otro, garantizar que ante eventuales episodios de infiltración desde el depósito de Lamas, no se generará impacto ambiental sobre la componente calidad de las aguas.

Tabla de Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	II
TABLA DE CONTENIDO	VI
TABLAS	VIII
FIGURAS.....	VIII
APÉNDICES	X
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 ANTECEDENTES.....	3
1.3 ESTRUCTURA DEL INFORME	3
2 VISIÓN DEL PROYECTO.....	5
3 MARCO FÍSICO.....	9
3.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	9
3.2 CLIMA Y METEOROLOGÍA.....	12
3.2.1 <i>Clima</i>	12
3.2.2 <i>Meteorología</i>	12
3.3 GEOMORFOLOGÍA	14
3.3.1 <i>Geomorfología Regional</i>	14
3.3.2 <i>Geomorfología Local</i>	15
3.4 HIDROLOGÍA	16
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</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
3.6 ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS	31
3.6.1 <i>Sondajes</i>	31
3.6.2 <i>Unidades Hidrogeológicas y Flujo Subterráneo</i>	32
3.7 CALIDAD QUÍMICA DE LOS RELAVES	33
3.7.1 <i>Metodología de Análisis</i>	33
3.7.2 <i>Resultados</i>	33
4 TRABAJOS DE TERRENO	36
4.1 SONDAJES.....	37
4.1.1 <i>Generalidades</i>	37
4.1.2 <i>Estratigrafía</i>	41
4.2 PRUEBAS DE BOMBEO.....	42
4.2.1 <i>Diseño de las Pruebas</i>	42
4.2.2 <i>Ejecución Pruebas Individuales</i>	43
4.2.3 <i>Ejecución Prueba Simultánea</i>	51
4.2.4 <i>Interpretación de las Pruebas de Bombeo</i>	53
4.3 GEOFÍSICA	58
4.3.1 <i>Metodología</i>	58
4.3.2 <i>Resultados e Interpretación</i>	58
4.4 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL	61
4.4.1 <i>Metodología</i>	61
4.4.2 <i>Resultados</i>	61
4.5 CONTROL DE NIVELES	64

4.6	HIDROQUÍMICA	67
4.6.1	<i>Clasificación según el Diagrama de Piper</i>	71
4.6.2	<i>Diagramas de Stiff</i>	71
4.6.3	<i>Conclusiones Hidroquímica</i>	71
5	HIDROGEOLOGÍA	73
5.1	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	73
5.1.1	<i>Qf Depósitos fluviales</i>	73
5.1.2	<i>Qa Depósitos aluviales</i>	78
5.1.3	<i>RSVa Rocas Sedimentarias y Volcánicas Meteorizadas</i>	78
5.1.4	<i>RSVf Rocas Sedimentarias y Volcánicas Frescas</i>	79
5.1.5	<i>RI Rocas Intrusivas</i>	79
5.1.6	<i>Distribución de las unidades hidrogeológicas</i>	79
5.2	PIEZOMETRÍA	81
5.3	SÍNTESIS MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	83
6	MODELO NUMÉRICO	84
6.1	DOMINIO Y GRILLA	85
6.2	SIMULACIÓN DE CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	87
6.2.1	<i>Simulación de Unidades Hidrogeológicas</i>	87
6.2.2	<i>Simulación de Entradas y Salidas por Flujos Subterráneos</i>	91
6.2.3	<i>Simulación de Recarga por Precipitación</i>	91
6.2.4	<i>Simulación de Pozos de Bombeo</i>	92
6.3	CALIBRACIÓN DEL MODELO	93
6.3.1	<i>Calibración Estacionaria</i>	93
6.3.2	<i>Calibración Transiente</i>	97
6.4	SIMULACIONES PREDICTIVAS Y MODELO DE TRANSPORTE	99
6.4.1	<i>Simulación del caudal infiltrado</i>	99
6.4.2	<i>Simulación de las concentraciones químicas en el flujo</i>	99
6.4.3	<i>Escenarios de Simulación</i>	101
6.4.4	<i>Resultados Modelo Transporte</i>	104
6.5	CONCLUSIONES DEL MODELO NUMÉRICO	111
7	CONCLUSIONES	112
8	REFERENCIAS	114

Tablas

Tabla 2-1	Resumen cumplimiento RCA.....	7
Tabla 3-1	Coordenadas Rajo Minero (Polígono) (PSAD 56).....	9
Tabla 3-2	Variables Meteorológicas Estación Curva Negra.....	13
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	Precipitación Media Anual Cuencas de Interés (Ref.11).....	19
Tabla 3-7	Caudales de Crecidas de Deshielo Quebrada La Brea (Ref.11).....	20
Tabla 3-8	Calidad de Aguas del Relave.....	34
Tabla 3-9	Balance Iónico de las muestras.....	35
Tabla 4-1	Pozos perforados en sector Quebrada La Brea.....	38
Tabla 4-2	Resumen perforación y habilitación Pozos sector Quebrada La Brea.....	38
Tabla 4-3	Resumen Pruebas de Bombeo Realizadas.....	44
Tabla 4-4	Descensos durante bombeo variable en PBB-1.....	45
Tabla 4-5	Descensos durante bombeo variable en PBB-7 del 12 de Junio.....	47
Tabla 4-6	Descensos durante bombeo variable en PBB-7 del 14 de Junio.....	48
Tabla 4-7	Descensos durante bombeo variable en POB-8B.....	50
Tabla 4-8	Descensos durante bombeo variable en PBB-6.....	50
Tabla 4-9	Bombeo simultaneo del 22 de junio.....	52
Tabla 4-10	Bombeo simultaneo del 30 de junio.....	53
Tabla 4-11	Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-01.....	54
Tabla 4-12	Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-03.....	54
Tabla 4-13	Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-06.....	54
Tabla 4-14	Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-07.....	55
Tabla 4-15	Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo POB-08B.....	56
Tabla 4-16	Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo POB-08B.....	56
Tabla 4-17	Valores de T (m ² /día) y K (m/día) obtenidos por pozo.....	57
Tabla 4-18	Pozos con niveles en sector La Brea.....	64
Tabla 4-19	Parámetros de Calidad de Agua In Situ.....	68
Tabla 4-20	Resultados de Laboratorio para Calidad de Agua en La Brea.....	69
Tabla 4-21	Resultados Balance Iónico Muestras en La Brea.....	70
Tabla 5-1	Resumen parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica.....	80
Tabla 5-2	Niveles estáticos considerados para Isopiezas.....	82
Tabla 6-1	Conductividad Hidráulica Calibrada.....	87
Tabla 6-2	Balance de Masa Global.....	97
Tabla 6.3	Calidad de las Aguas usadas en el Modelo.....	100
Tabla 6-4	Calidad de las Aguas usadas en el Modelo.....	110

Figuras

Figura 2.1	Ubicación de Quebradas La Brea y Caserones (Ref.15).....	5
Figura 2.2	Ubicación Barrera Hidráulica La Brea.....	8
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.....	15
Figura 3.5	Ubicación de Estaciones Pluviométricas (Ref.11).....	16
Figura 3.6	Relación entre altitud y precipitación media anual (Ref. 11).....	17
Figura 3.7	Ubicación de Estaciones Fluviométricas (Ref.11).....	18

Figura 3.8	Caudal Medio Anual por Estación.....	18
Figura 3.9	Mapa Geológico Regional.....	28
Figura 3.10	Perfiles Geológicos sector La Brea	29
Figura 3.11	Diagramas de Schmidt y de Roseta.....	30
Figura 4.1	Esquema ubicación pozos de bombeo y observación.	39
Figura 4.2	Esquema ubicación piezómetros	40
Figura 4.3	Equipos instalados en bombeo de pozo PBB-01	44
Figura 4.4	Curva de descarga de pozo PBB-01	45
Figura 4.5	Descensos en PBB-01 durante bombeo constante de pozo PBB-01	46
Figura 4.6	Descensos en PBB-03 durante bombeo constante de pozo PBB-03	47
Figura 4.7	Curva de descarga de pozo PBB-07	48
Figura 4.8	Descensos en PBB-07 durante bombeo constante de pozo PBB-07.....	48
Figura 4.9	Descensos en POB-08B durante bombeo constante de pozo POB-08B.	49
Figura 4.10	Curva de descarga de pozo POB-08B	50
Figura 4.11	Curva de descarga de pozo PBB-06	51
Figura 4.12	Esquema ubicación pozos de bombeo involucrados en los bombeos simultáneos.	52
Figura 4.13	Planta de perfiles geofísicos sector La Brea.....	59
Figura 4.14	Secciones de resistividad en sector La Brea, de las líneas obtenidas con los modelos de capas múltiples de la inversión ‘smooth model’.	60
Figura 4.15	Ubicación de Puntos de Control en Quebrada la Brea.	62
Figura 4.16	Estereograma de polos y roseta de orientación para los puntos de control	63
Figura 4.17	Niveles Estáticos en Cuenca La Brea.....	65
Figura 4.18	Niveles Piezométricos en Cuenca La Brea.....	65
Figura 4.19	Niveles de agua en los pozos perforados en la presente campaña	66
Figura 4.20	Niveles de agua en los pozos perforados en la presente campaña (detalle).	67
Figura 4.21	Diagrama de Piper.....	71
Figura 4.22	Diagramas de Stiff.....	72
Figura 5.1	Mapa Hidrogeológico Quebrada La Brea	74
Figura 5.2	Perfil Hidrogeológico 1	76
Figura 5.3	Perfiles Hidrogeológicos 2 y 3	77
Figura 5.4	Delimitación de unidades Hidrogeológicas.....	80
Figura 6.1	Grilla y Dominio del Modelo (en verde se observa la zona inactiva del modelo)	86
Figura 6.2	Distribución de de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 1	88
Figura 6.3	Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 2	89
Figura 6.4	Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 3	90
Figura 6.5	Ubicación de condiciones de borde para las tres capas.....	91
Figura 6.6	Ubicación de pozos de observación de niveles	94
Figura 6.7	Gráfico Calibración Niveles Estado Estacionario	95
Figura 6.8	Curvas Equipotenciales Estado Estacionario	96
Figura 6.9	Calibración del Caudal de Bombeo Simultánea de Larga Duración.....	97
Figura 6.10	Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación cercanos a batería de bombeo	98
Figura 6.11	Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación distantes a batería de bombeo	98
Figura 6.12	Ubicación pozos inyección, remediación y de observación de calidad Modelo de Transporte	103
Figura 6.13	Concentración vs Tiempo Escenario 1 – Línea 3 y Línea 5	105
Figura 6.14	Concentración vs Tiempo Escenario 2 – Línea 3 y Línea 5	106
Figura 6.15	Concentración vs Tiempo Escenario 3 – Línea 3 y Línea 5	107
Figura 6.16	Concentración vs Tiempo Escenario 4 – Línea 3 y Línea 5	108
Figura 6.17	Concentración vs Tiempo Escenario 5 – Línea 3 y Línea 5	109

Apéndices

Apéndice I:	Aspectos Relevantes comprometidos en la RCA
Apéndice II:	Antecedentes Hidrológicos e Hidrogeológicos
Apéndice III:	Estratigrafía y Habilidad Sondas Nuevos
Apéndice IV:	Pruebas de Bombeo
Apéndice V:	Estudio Geofísico
Apéndice VI:	Control de Niveles
Apéndice VII:	Certificados Laboratorio de la Calidad de las Aguas

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 donde se proyecta la producción de cobre mediante procesos de lixiviación y de flotación. La producción estimada es de 1.047 millones de toneladas, con leyes de Cobre de 0.34 % y 126 ppm de Molibdeno.

El proyecto considera al menos las siguientes obras de infraestructura minera:

- Rajo
- Chancador 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

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

Los relaves provenientes del proceso de flotación, serán ingresados a ciclones 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 pudiesen percolar hacia el sistema acuífero infrayacente. 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 cantidad de agua posible.
- Diseño de un sistema de desvío de agua 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 un zanja cortafuga excavada en todo el material no consolidado (aluvios) y que atraviesa toda la sección de la quebrada, de modo 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 de relaves, el 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 La Brea.

1.1 Objetivos

El objetivo general es dar cumplimiento a lo comprometido en la RCA en cuanto a los temas hidrogeológicos de los depósitos de lamas y arenas del proyecto (resumen que 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 sector del depósito de Lamas y del 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 (ver referencias). 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 (ver referencias). 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 aportan información relevante a esta investigación (ver referencias). También existe 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, pruebas de bombeo, geofísica, levantamiento estructural, control de niveles de agua y monitoreo de calidad 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, que en su parte alta albergará el depósito de Lastre del proyecto así como también el portal de salida del túnel de transporte de lamas.

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

Ambas quebradas (La Brea y Caserones) se elongan aproximadamente en dirección norte-sur y confluyen al río Ramadillas que escurre en sentido este-oeste hasta evacuar sus aguas en el río Vizcachas de Pulido, afluente del río Copiapó (**Figura 2.1**). 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 el río Ramadillas, facilitando sustantivamente su captura y manejo.

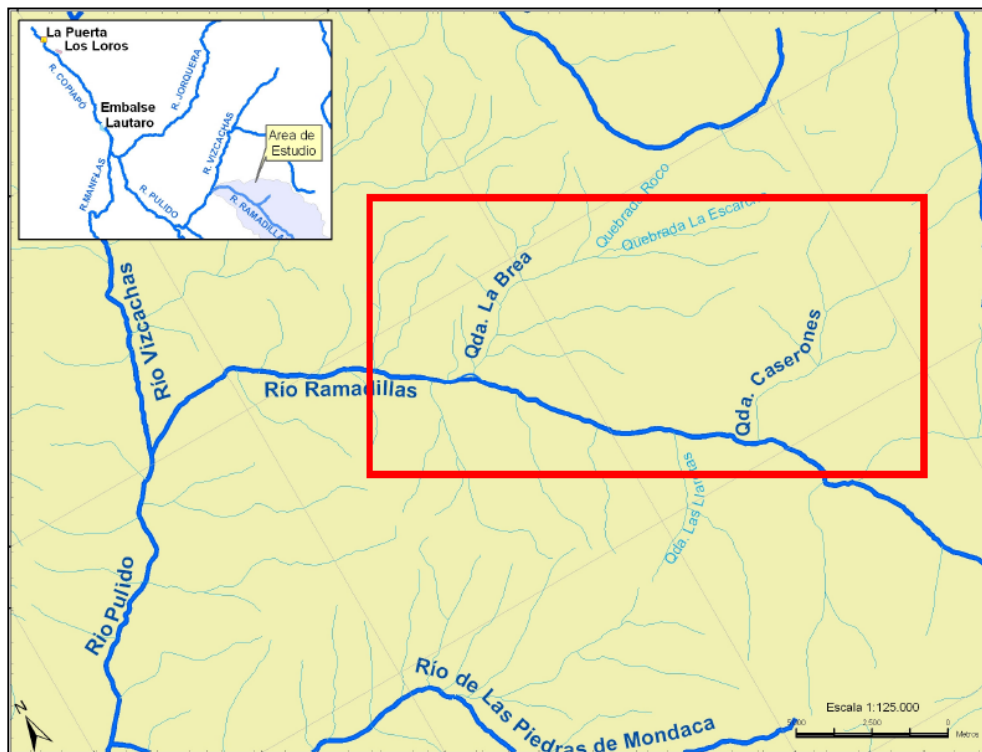


Figura 2.1 Ubicación de Quebradas La Brea y Caserones (Ref.15).

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 podrían ocurrir a través de fracturamiento o fallas geológicas, que pueden actuar como zonas preferenciales para los flujos subterráneos, y por lo tanto dichas estructuras 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 potenciales efluentes contaminados de modo de evitar que una potencial pluma de contaminación impacte la calidad de las aguas naturales en el río Ramadillas. Con esta visión MLCC ha propuesto construir una barrera hidráulica al pie de cada depósito que permita interceptar y bombear la potencial agua contaminada hacia el área de proceso.

Durante el desarrollo del EIA, se propuso construir la barrera hidráulica (para cada depósito) en la ladera sur del río 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. Sin embargo, se establece 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. 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 a la actualización del modelo hidrogeológico.

Durante el desarrollo del estudio complementario fueron superadas, por parte de MLCC, las limitaciones administrativas que obligaban a ubicar la barrera de contingencia en la ladera sur. Basados en el compromiso de cero contaminación y aseguramiento del éxito de las medidas de contingencia con las obras proyectadas, MLCC 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 el río Ramadillas.

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 flujos 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 flujos contaminados 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 primeras 3 columnas detallan las obras comprometidas y el objetivo de realización de estas. Posteriormente se muestran los trabajos ejecutados durante la realización de este estudio cumpliendo los objetivos 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, por lo que se concentraron los esfuerzos en un sector distinto al original.

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.	6 piezómetros (263 m).	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 zanjas 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 e 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 500 m con 10 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 1660 m con 56 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			

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. Con el modelo numérico se evalúa la eficacia de una barrera hidráulica en esta ubicación y se define el escenario final de diseño que contempla la cantidad y ubicación de los Pozos de Contingencia definitivos. Es importante destacar que la construcción de la Barrera definitiva se realizará de acuerdo a lo concluido con este estudio.

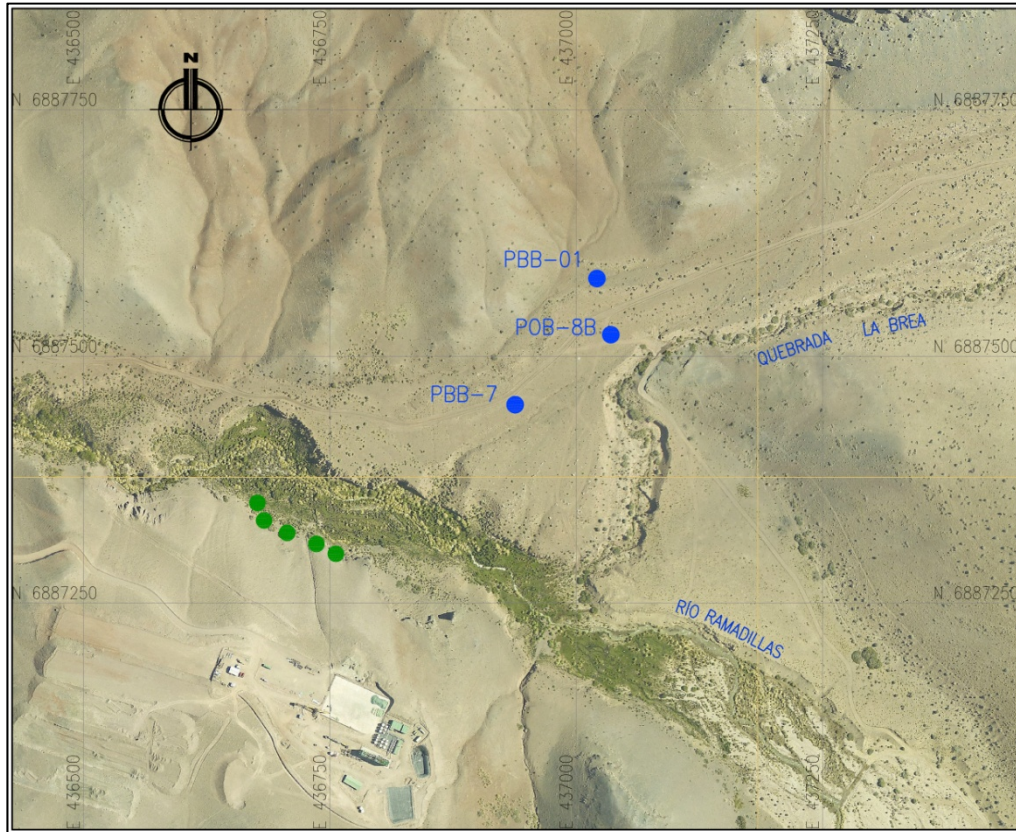


Figura 2.2 Ubicación Barrera Hidráulica La Brea.

En puntos verdes la ubicación original y en puntos azules los pozos bombeados en esta oportunidad.

La **Tabla 2-1** muestra que se cumplió con todos los objetivos del sistema planteados, ejecutándose la mayoría de las obras. Si bien no se construyó todos los pozos considerados inicialmente, y las pruebas de bombeo fueron reducidas en duración, esto no influye en absoluto en la obtención de los datos necesarios para realizar los análisis y modelaciones comprometidas, lo que se explica en detalle más adelante.

3 Marco Físico

En el siguiente 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 emplaza 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

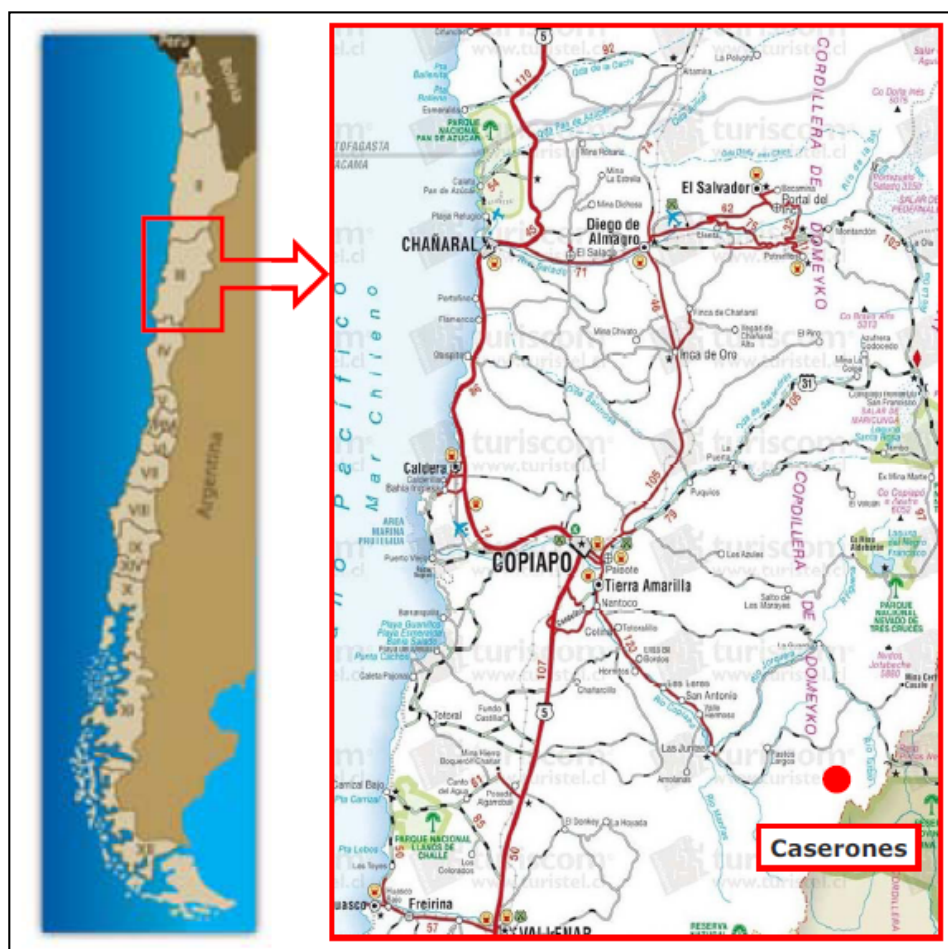


Figura 3.1 Ubicación General del Proyecto



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 ubicará 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 aproximadamente 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 ubicaran los pozos que abastecerán de agua al Proyecto y que para efectos del presente estudio no se incluye.

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, por el este, hasta donde alcanza la influencia marítima intensa por el oeste. Desde Copiapó al norte es de una rigurosa sequedad, en cambio desde 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 msnm), 19 mm en El Salvador (2.400 msnm), 32 mm en Vallenar (470 msnm) y 34 mm en Los Loros (948 msnm).

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, desde 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°C, con una máxima media de los meses más cálidos (enero y febrero) de 18,4°C 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 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 registró 45,9 mm anuales.

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
Anual	-0,3	11,1	-10,7	30,8	8,3	45,9

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

Estación Campamento

Los registros de la estación de monitoreo Campamento, distan aproximadamente 20 metros de las instalaciones actuales 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 registró 54,94 mm anuales.

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
Anual	10,9	23,0	-0,3	21,0	2,2	54,94

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 sub zonas 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 consideró aquellas que se verán involucradas en el desarrollo del proyecto y en la extracción del mineral.

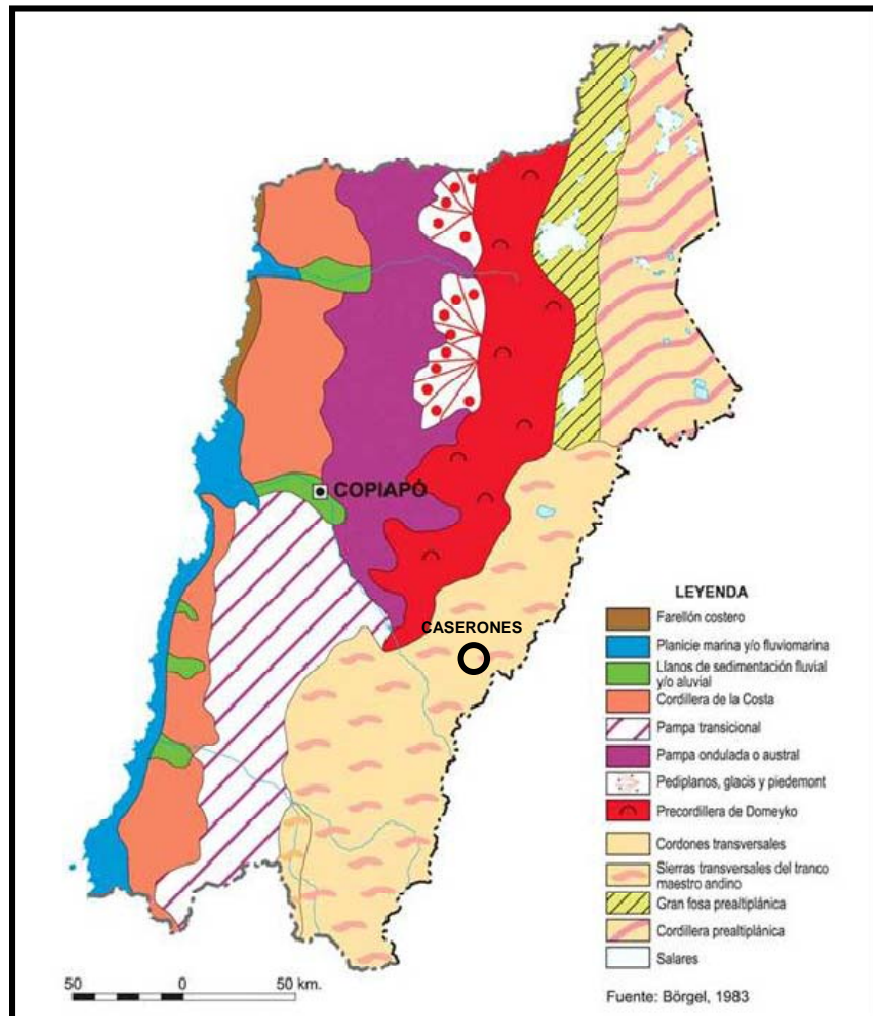


Figura 3.3 Subunidades Geomorfológicas para la Región de Atacama

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 con 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 ²)	360	62	36
Cota Mínima (msnm)	2.144	2.669	3.154
Cota Máxima (msnm)	5.535	4.857	5.535
Cota Media (msnm)	3.822	3.685	4.403
Desnivel (m)	3.391	2.188	2.381
Pendiente Media (%)	43,95	41,69	49,30

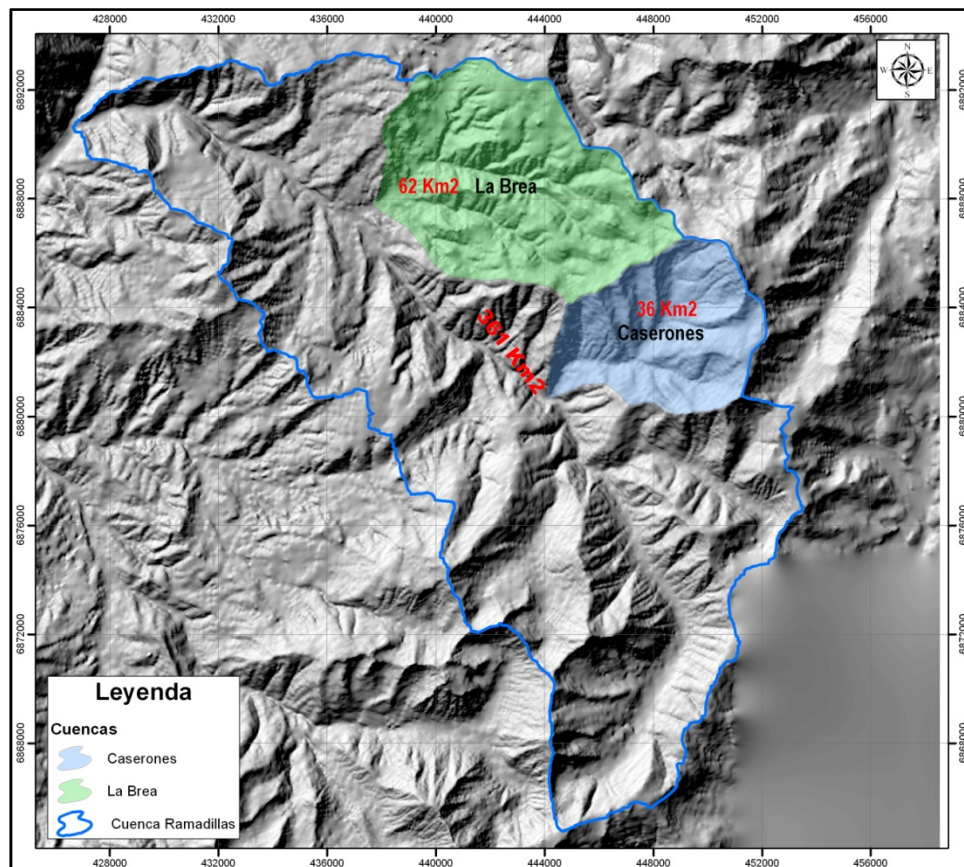


Figura 3.4 Cuencas Hidrográficas

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 la Quebrada Caserones y la Quebrada 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 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**.

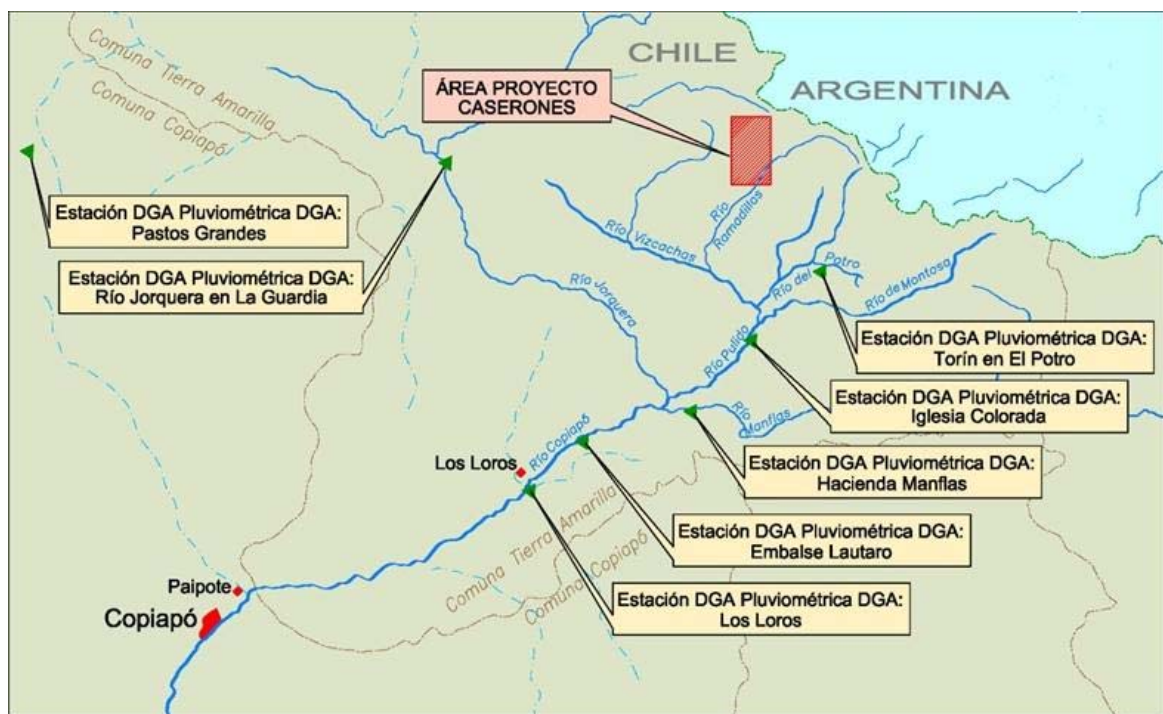


Figura 3.5 Ubicación de Estaciones Pluviométricas (Ref.11)

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**.

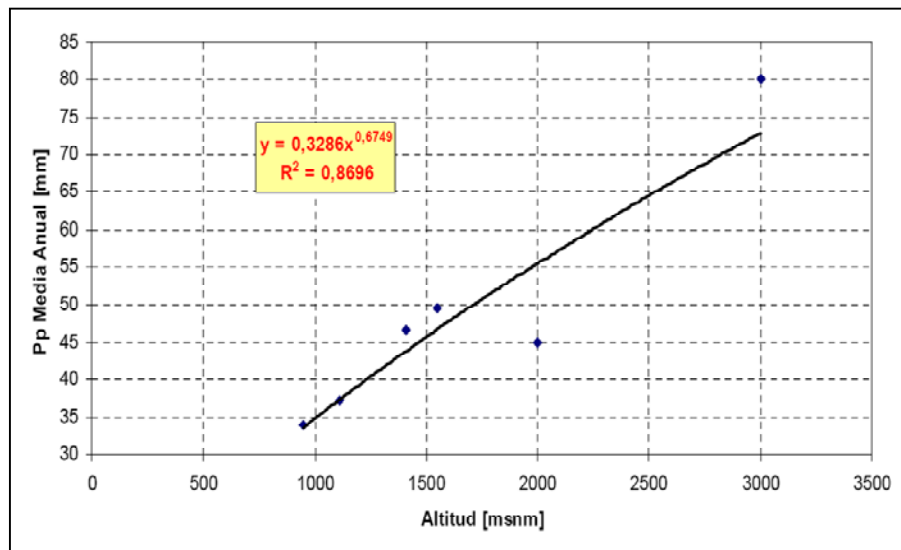


Figura 3.6 Relación entre altitud y precipitación media anual (Ref. 11)

3.4.3 Fluviometría

En la zona de estudio se cuenta con mediciones 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.

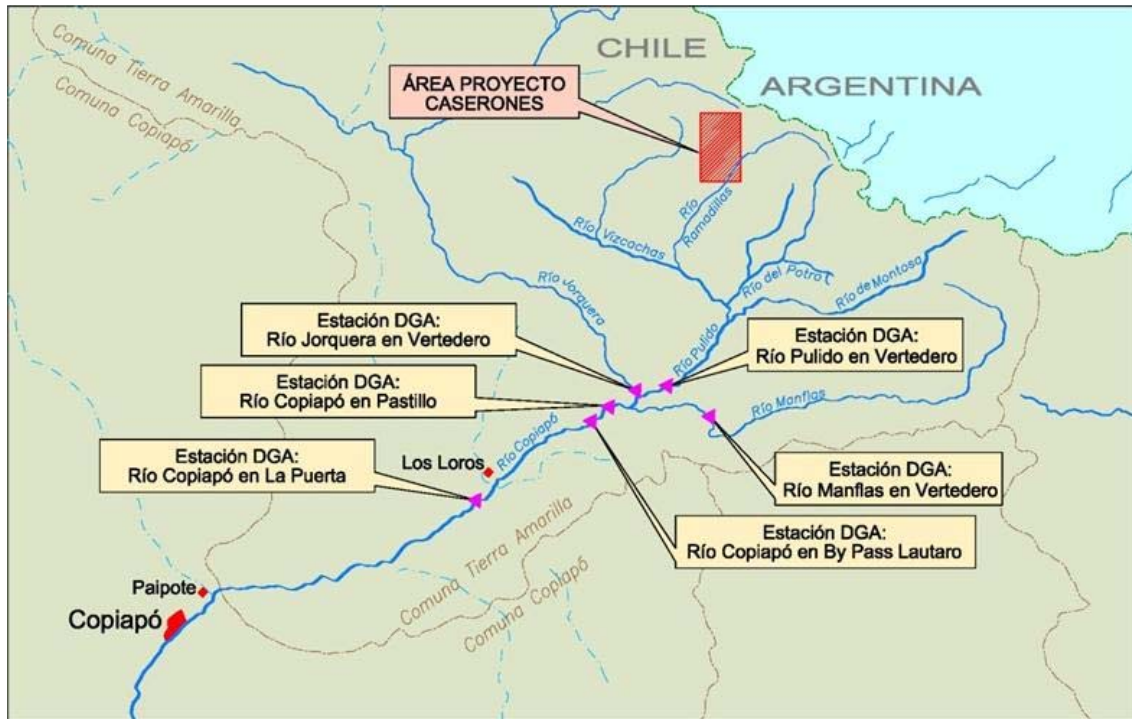


Figura 3.7 Ubicación de Estaciones Fluviométricas (Ref.11)

Un análisis para más de 30 años de información permitió establecer los caudales medios que se muestran en la **Figura 3.8** (Ref.15).

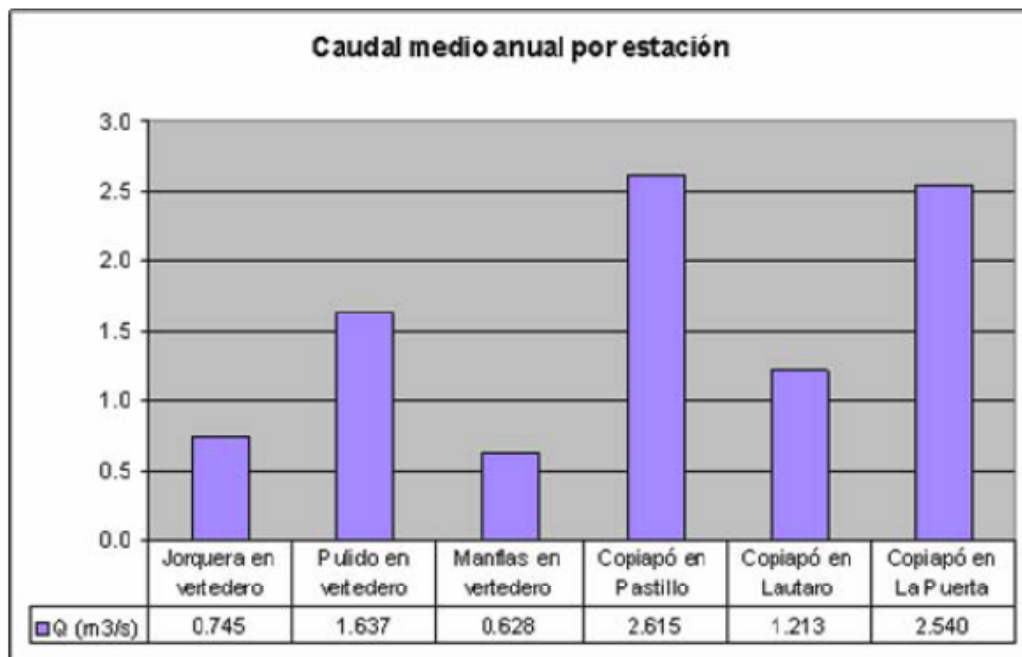


Figura 3.8 Caudal Medio Anual por Estación

En la **Figura 3.8** se observa que los mayores caudales se miden en las estaciones Pastillo y La Puerta, esto es aguas arriba del embalse Lautaro y aguas abajo del mismo, en donde se existe un estrechamiento del valle, produciéndose una zona de importantes aportes de la napa al río (zona de

afloramientos) respectivamente. 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

A continuación se presenta un resumen de las conclusiones del “Estudio Hidrológico de Crecidas Quebrada La Brea” (Ref.11), cuya versión completa se anexa en **Apéndice II**. El estudio citado se centra en siete subcuencas de la Quebrada La Brea y una cuenca de una pequeña quebrada adyacente a La Brea. Estas subcuencas quedan definidas por la ubicación de las obras interceptoras puntuales IP-D1 e IP-D2, correspondientes a la obra del desvío Norponiente, y las obras IP-B, IP-C, IP-A1 e IP-A2, correspondientes a la obra del desvío Suroriente; y, por las obras de descarga Norponiente y Suroriente, respectivamente. Estas obras interceptoras se proyectan para la captación de las aguas superficiales, que luego son conducidas por las respectivas obras de desvíos hacia los puntos de descarga proyectados. Las características y distribución estas subcuencas se pueden ver en informe anexado en **Apéndice II**.

Con la relación establecida en la **Figura 3.6**, se obtiene la precipitación media anual en estas subcuencas, la que se entrega en la **Tabla 3-6**.

Tabla 3-6 Precipitación Media Anual Cuencas de Interés (Ref.11)

Nombre	Área [Km ²]	Altitud Media [msnm]	Pp Media Anual [mm]
QUEBRADA CASERONES	27,00	4.541	96,6
CONDUCCIÓN NORPONIENTE			
IP-D1	0,95	3.295	77,8
IP-D2	0,61	3.368	78,9
DESCARGA NP	0,39	3.220	76,6
CONDUCCIÓN SURORIENTE			
IP-B	5,3	3.438	80,0
IP-C	11,0	4.259	92,5
IP-A1	4,0	4.207	91,7
IP-A2	4,2	3.500	81,0
DESCARGA SO	0,41	3.244	77,0

Para obtener los valores de caudales instantáneos máximos para estas subcuencas, y como los caudales aforados en La Brea son bajos, se utilizó los caudales máximos instantáneos obtenidos para la Quebrada Caserones, con transposiciones por unidad de área y por unidad de precipitación media, hacia las subcuencas de la Quebrada La Brea. Con esto, se obtienen los caudales de crecida correspondientes a los máximos instantáneos en las distintas subcuencas de la Quebrada La Brea, para cada período de retorno (**T**), que se presentan en la **Tabla 3-7**. En esta tabla también se entrega los caudales máximos probables de deshielo (**CMP**), para cuyo cálculo se utilizó la metodología propuesta en punto 4.2 del “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica” de la Dirección General de Aguas.

Tabla 3-7 Caudales de Crecidas de Deshielo Quebrada La Brea (Ref.11)

PUNTOS DE INTERÉS		Área TOTAL [Km ²]	Área NIVAL [Km ²]	Caudales Máximos Instantáneos [m ³ /s]				
				T = 10	T = 20	T = 50	T = 100	T = 200
CONDUCCIÓN NORPONIENTE	IP-D1	0,95	0,00	0,022	0,031	0,047	0,062	0,080
	IP-D2	0,61	0,00	0,014	0,020	0,031	0,040	0,052
	DESCARGA	0,39	0,00	0,009	0,013	0,019	0,025	0,032
CONDUCCIÓN SURORIENTE	IP-B	5,30	0,00	0,124	0,179	0,270	0,355	0,456
	IP-C	24,70	11,00	0,297	0,429	0,647	0,852	1,095
	IP-A1	11,10	4,00	0,107	0,154	0,233	0,307	0,395
	IP-A2	4,20	0,00	0,099	0,143	0,216	0,285	0,366
	DESCARGA	0,41	0,00	0,009	0,013	0,020	0,026	0,034

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, en donde afloran mayoritariamente rocas volcánicas triásicas e intrusivos paleozoicos. Sin embargo, en este último sector, hacia el sur de la quebrada La Brea, las plutonitas paleozoicas están 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 observa fallas importantes.

Mientras que en las rocas intrusivas se puede distinguir numerosos sistemas de fracturamiento, en las rocas estratificadas adyacentes sólo se ha podido determinar algunos sistemas de fracturas, los que probablemente se podrían asociar a posibles fallas, estructuras que sin embargo no han sido identificadas en el sector occidental de la subcuenca de la quebrada La Brea.

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

A continuación se describen las unidades estratigráficas, rocas intrusivas, depósitos no consolidados y estructuras reconocidas en el área del proyecto. Dos perfiles esquemáticos que cruzan la quebrada La Brea se muestran en la **Figura 3.10**.

3.5.1 Rocas Estratificadas

Las unidades estratificadas involucradas en el área consisten en (Ref.15):

- Una secuencia volcanoclástica, principalmente andesítica, de color verde a negro en afloramiento, que en este trabajo se correlaciona con la Formación La Ternerera 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 deposicional 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, 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 S 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 continúa 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 (Ref.15):

- Un primer grupo está constituido por granitos a sienogranitos de grano grueso, en el que se distingue los denominados Granito Caserones (Pzmg), del Carbonífero Superior y el Granito El Colorado (Pzsg). El primero incluye granitos de biotita y anfíboles 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 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 intruidos 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 constituye una serie de cuerpos subvolcánicos o “necks” y diques andesítico-dioríticos (microdioríticos) asociados, de hasta 15 m 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 Caserones-La Brea.

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 filica (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

Los espesores de los depósitos no consolidados son variables, correspondiendo las mayores potencias a los depósitos aluvionales aterrazados de fondo de valle para los cuales se ha registrado espesores máximos cercanos a los 46 metros (SDL-03) en el sector frente al campamento actual, mientras que en la salida de la quebrada La Brea al río Ramadillas los espesores máximos observados son del orden de 26 metros (SDL-09). Para la cubierta coluvial, los sondeos realizados indican espesores del orden de los 3 a 8 metros.

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 La Brea y La Escarcha en sus cursos inferiores, de orientación NE-SW. Corresponden a depósitos aluviales y, en menor medida, fluviales (antiguos y actuales), de variada composición granulométrica. En algunos sectores se encuentran aterrizados 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 La Brea, varía entre 26 m (sondaje SDL-10, sector muro cortafugas) hasta 46 m (sondaje SDL-3, sector muro del Depósito de Lamas).

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 aterrizados asociados (Qf)

- **Depósitos fluvio torrenciales del cauce actual del río Ramadillas.** Constituyen el piso o fondo de los cauces y corresponden a depósitos fluviales y aluviales asociados al cauce actual de estos cursos de agua, material detrítico aterrizado, 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 se puede observar 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 pié de quebradas secundarias estrechas y de poco desarrollo formando 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 Caserones, 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 fallas inversas de alto ángulo con vergencia este, las que definen el límite oriental de la franja tectónica de Caserones – Río Ramadillas. Así, la quebrada La Brea ocupa un sector central al interior de la franja.

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 las 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.

Dentro de la franja tectónica así definida, se ubica en superficie un basamento paleozoico de posición oriental, mientras que hacia el oeste se ubican las secuencias mesocenoicas (Formaciones La Ternera, Lagunillas y Quebrada Seca); sin embargo, en el sector de la quebrada La Brea si bien se observa un basculamiento de unos 15° a 20° de toda la columna litoestratigráfica hacia el oeste, el contacto entre el basamento granítico y la secuencia mesozoica en el sector de la quebrada La Brea, es depositacional, sin que se haya encontrado hasta ahora alguna evidencia que permita suponer un contacto tectónico entre ambos niveles estructurales.

3.5.4.1 Estructuras Sedimentarias

En el sector La Brea, la estructura sedimentaria dominante en el área es la estratificación de la Formación Lagunillas que tiene una actitud monoclinial hacia el WSW (Ref. 8). Es una estructura depositacional pervasiva que aparece en todos los niveles de la secuencia de la Formación Lagunillas, separa capas desde centimétricas a milimétricas en algunos casos y que probablemente se formó debido al arqueamiento estructural de la franja tectónica durante la fase deformativa.

Otras estructuras sedimentarias en el sector La Brea, serían: La acordancia o disconformidad de la depositación mesozoica de la Formación La Ternera sobre el basamento granítico paleozoico; y la discordancia de erosión entre la Formación La Ternera y la Formación Lagunillas sobreyacente.

3.5.4.2 Fracturas y Diaclasas

Las rocas presentes en el sector La Brea han sido afectadas por una serie de fracturas, siendo los granitoides paleozoicos los que presentan un mayor número de sistemas de fracturas, comparado con las rocas estratificadas suprayacentes.

Por esto, los granitoides paleozoicos son los que manifiestan con mayor intensidad las diferentes orientaciones del fracturamiento (Ref. 8). Estos muestran un 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. Sin embargo, en el sector considerado de la subcuenca La Brea no se observan fallas importantes.

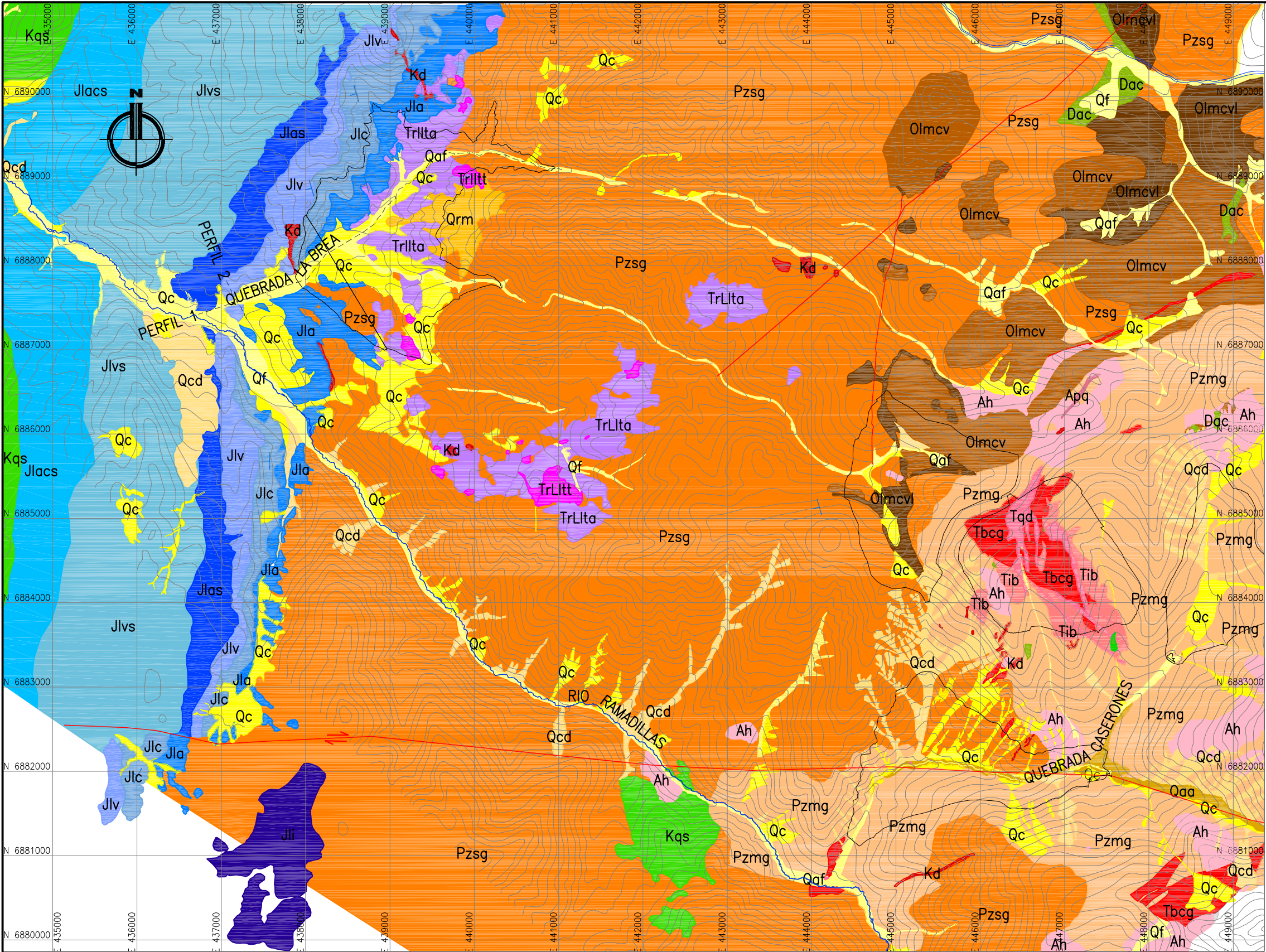
Los sistemas de fracturas principales son los siguientes (Ver **Figura 3.11**):

- **NS/90°** con variaciones de hasta 15° hacia el este u oeste; mientras que en el granito alcanza frecuencias de hasta 10 f/m, en las secuencias estratificadas su frecuencia disminuye a menos de 1/m. Este sistema está muy bien representado en los afloramientos de granito paleozoico que conforman la ladera oriental de la quebrada La Brea, en donde este sistema es predominante. El origen de estas discontinuidades podría estar relacionada a la deformación anticlinal de rumbo NS a N15°E (con un núcleo de granito paleozoico) que se aprecia en el sector oriental de la quebrada La Brea. Este sistema sería menos evidente en las rocas estratificadas debido a la menor competencia de éstas respecto del granito. En el granito se observan como diaclasas de más de 15 m, en general subverticales y de paredes planas.
- **N10°-30°E** con variaciones hasta N35°E, este sistema es visible principalmente en los afloramientos de andesitas y areniscas, mientras que en el granito es un sistema muy subordinado debido al predominio del sistema NS/90°. Se trata de fracturas cortas a

largas, desde 3 hasta más de 15 m, generalmente paralelas y subverticales, en general planas y de superficie rugosa.

- **N65°-70°W/90°** con inclinaciones de hasta 85° hacia el Norte o sur; las densidades de fracturas son del orden de 1 a 2 /m. En las rocas estratificadas este sistema se presenta controlando la dirección de varias quebradas principales, entre ellas las quebradas La Brea y la Escarcha que son paralelas entre sí. Asociadas a este sistema, fuera del ámbito del sector de interés, el informe del EIA (Ref.15) comenta de otros trabajos que han observado fallas con estrías en el rumbo (subhorizontales) y además la presencia de vetillas alineadas de cuarzo, baritina y limonita con espesores de hasta 20 cm.
- **N40-60°E/55°W a 90°**, representado por diaclasas se reconoce tanto en los intrusivos como en las rocas estratificadas. En general la densidad de las discontinuidades es de 1 a 2/m para las rocas estratificadas y de 4 a 7/m para las rocas intrusivas.
- Finalmente un sistema **EW/90°-80°S** que se manifiesta claramente en los sectores más bajos de afloramientos de los intrusivos paleozoicos, en la parte oriental de la subcuenca de la quebrada La Brea.

Es importante destacar que los sistemas de fracturas descritos corresponden a sistemas de fracturamiento antiguos y que hoy día 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

- Jlac** Areniscas y conglomerados superiores.
- Jlv** Lavas andesíticas superiores.

MIEMBRO INFERIOR

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

FORMACION LA TERNERA

- TrLIta** Lavas andesíticas gradando lateralmente a ortoconglomerados monomixíticos.
- TrLIIt** 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 hipabisales 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.

												<div>PREPARADO POR:</div> <div> SRK Consulting Engineers and Scientists</div>				<div>CLIENTE</div> <div> CASERONES PROYECTO DE MINERA LUMINA COPPER CHILE S.A.</div>				<div>PROYECTO</div> <div>ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS</div>																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													

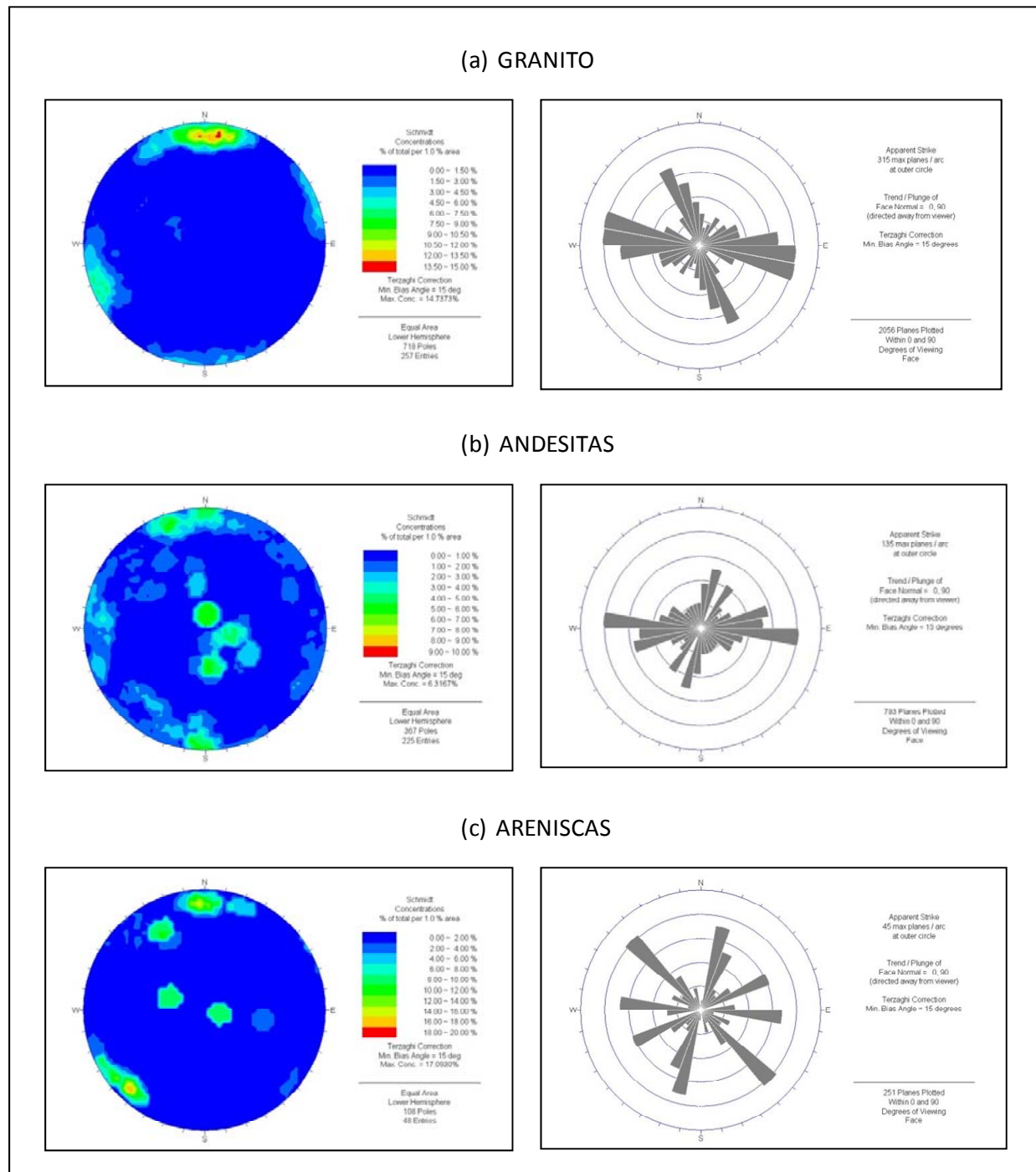


Figura 3.11 Diagramas de Schmidt y de Roseta

Muestra el patrón estructural para los tres tipos de rocas principales existentes en el sector de la quebrada La Brea: (a) Granitos, (b) Andesitas y (c) Areniscas.

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 destacan los emitidos por SITAC en las quebradas asociadas a los depósitos de relaves, los estudios geotécnicos de ARCADIS y los diseños de Arcadis / 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.

3.6.1 Sondajes

Para el EIA se contó con la información de 17 sondajes entre hidrogeológicos y geotécnicos con información relevante para este estudio y 18 perfiles TEM ejecutados en dos campañas (9 cada vez) el año 2006 y 2008 (Ver Mapa Hidrogeológico SITAC en el **Apéndice II**).

Los datos de parámetros hidráulicos encontrados se presentan en el **Apéndice II**.

3.6.1.1 Pozos de Exploración SITAC

SITAC S.A. realizó en el período febrero-marzo de 2007 la construcción de cuatro pozos de exploración de agua denominados WE-01, WE-02, WE-03 y WE-04 a lo largo del río Ramadillas. De éstos, el pozo WE-1 se encuentra en el sector de la junta de dicho río con la quebrada La Brea. A fin de ampliar el conocimiento estratigráfico del área, en el período marzo-abril de 2008, SITAC S.A. realizó la perforación de otros 3 pozos de exploración en el sector del Depósito de lamas P1-TR, P2-TR y P3-TR. Finalmente, en septiembre de 2008, fue necesaria la construcción y profundización de pozos de exploración de agua (P2-TR y P4-TR), y la construcción de dos pozos de producción (WP-01 en el río Ramadillas en el sector de la junta con la quebrada La Brea y WP-02 en el río Ramadillas aguas abajo del área del presente estudio).

En los pozos construidos se realizó pruebas de bombeo con caudales variables, a fin de establecer el caudal de producción del pozo y una prueba de caudal constante de 48 horas. Sólo en el caso del pozo WE-01, la prueba de gasto constante se realizó en 72 horas. Esto permitió estimar la transmisividad y coeficiente de almacenamiento de las unidades hidrogeológicas investigadas.

3.6.1.2 Sondajes Geotécnicos Arcadis

Se cuenta con información geológica y geotécnica en 12 sondajes perforados en la quebrada La Brea (SDL-02, SDL-03, SDL-03A, SDL-04, SDL-05, SDL-06, SDL-07, SDL-08, SDL-9, SDL-10, SDL-11, SDL-12) todos ubicados en el sector de la cubeta del depósito de lamas, cerca de la presa y en el sector de la zanja cortafuga. En estos sondajes se realizó pruebas de permeabilidad tipo Le Franc y Lugeon, además de la identificación de la profundidad de los niveles de agua subterránea, datos de gran interés desde el punto de vista hidrogeológico.

3.6.2 Unidades Hidrogeológicas y Flujo Subterráneo

Con la información anterior se definió 2 unidades hidrogeológicas principales:

Unidad Superior: Constituida por los depósitos sedimentarios de los cauces actuales de quebradas, esteros y ríos. En general se trata de gravas y arenas de origen fluvial y fluvio aluvional, regular a mal seleccionadas, que rellenan los mencionados cauces. Su espesor no sobrepasa los 60 metros con un ancho siempre menor a los 100 metros.

La transmisividad de esta unidad es media a alta (400 y 500 m²/día), dependiendo de las facies sedimentarias donde se efectúan las mediciones. En el sector central de la quebrada La Brea (sector de la cubeta y muro) esta unidad no presenta saturación sin embargo, hacia la confluencia con el río Ramadillas, el nivel de agua subterránea aparece en esta unidad.

Unidad Inferior: Está constituida por rocas sedimentarias del Mesozoico que corresponden a areniscas de grano medio a muy fino de color rojizo. Se perforó en casi la totalidad de los pozos exploratorios del sector de Ramadillas, en los cuales se ha mostrado cierto nivel de transmisividad y permeabilidad del orden de 0,02 m/d y 3 m/d. La unidad se encuentra desarrollada hacia el occidente del sector de la confluencia de los río Ramadillas y la quebrada La Brea. El coeficiente de almacenamiento estimado para estas unidades es del orden de 3%.

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.

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 3-8**.

Tabla 3-8 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
Amoniaco	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 ₃ /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 ₂ /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/100ml	1.75	1.00	2.00	-	<1,8	--	<1,8			
Coliformes totales	NMP/100ml	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 fueron correctamente analizadas puesto que los resultados son menores que un 10% que se considera admisible, excepto la del río Copiapó.

Tabla 3-9 Balance Iónico de las muestras

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

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

4 Trabajos de Terreno

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

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 continuidad en los trabajos de terreno, incluso dejando sin acceso la quebrada Caserones desde mediados de mayo.

Estos trabajos realizados son los siguientes:

- Construcción de pozos de bombeo con sus pozos de observación
- Construcción de pozos en la barrera hidráulica definida
- Perforación de sondajes diamantinos para obtener mejor recuperación de muestras
- Pruebas de bombeo individuales
- Pruebas de bombeo simultáneas
- Prospección Geofísica con perfiles Nano TEM
- Levantamiento Estructural
- Monitoreo de Niveles de Agua
- Monitoreo de Calidad de Agua

Finalmente en la quebrada la quebrada La Brea se perforó 3 pozos en 8" (bombeo) y 7 pozos en 6" (observación y bombeo), además de 6 piezómetros diamantinos que se distribuyeron en las partes más altas de la quebrada. Se tomaron 4 pruebas de bombeo individuales y una prueba de bombeo simultánea de 9 días continuos que finalizó el 9 de julio de 2010.

Durante la segunda semana de Marzo de 2010 se ejecutó las prospecciones geofísicas N-TEM en donde se midió un total de 114 estaciones distribuidas en 5 perfiles en el sector La Brea, con separación entre estaciones de 20 m y 50 m, según la localización de cada perfil.

En forma sistemática se controló los niveles de la mayor cantidad de sondajes disponibles, con el objetivo de trazar una piezometría del área del proyecto actualizada.

Durante las pruebas de bombeo en La Brea se tomaron 3 muestras de agua para la realización de análisis en un laboratorio especializado.

Para verificar la existencia de discontinuidades estructurales mayores en las zonas evaluadas, se realizó un mapeo estructural de algunos puntos de cada quebrada.

A continuación se describe en detalle los trabajos realizados y los resultados obtenidos, información base para la formulación de modelo hidrogeológico conceptual que se presenta en el **Capítulo 5**.

Sobre la base de este modelo se ha construido un modelo numérico (**Capítulo 6**), el que permitirá definir la ubicación de los pozos que formarán parte de la barrera hidráulica definitiva que permitirá controlar las infiltraciones en cada depósito de relave. Por lo tanto, las captaciones que se describen en este capítulo no se consideran definitivas, si no que como pozos de exploración.

4.1 Sondajes

4.1.1 Generalidades

Los Pozos de Bombeo y Observación fueron perforados por 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 la zona húmeda del sustrato. Los pozos fueron perforados 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 superior de los pozos.

Finalizada la perforación se desarrolló los pozos mediante soplado por 4 horas mínimo (algunos hasta 8 horas), parando el desarrollo cuando el agua sale sin sedimentos.

Los piezómetros fueron perforados por la empresa Connors, con método diamantina en diámetro HQ. Se restringió el uso de aditivos durante la perforación únicamente a casos de extrema inestabilidad, en los cuales se realizó un lavado del pozo previo a la habilitación. La habilitación de estos pozos se hizo con tubería PVC de 2” de diámetro, privilegiando el uso de tubería ranurada en la mitad inferior. Además, se perforó un sondaje con la empresa Cusonda, en diámetro HQ3, el que tuvo muy buena recuperación de sedimentos. En este sondaje se realizó pruebas de Le Franc y Lugeon.

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 obtuvo testigos de diamantinas que se conservan en bandejas.

De todos los sondajes 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 estos se realizó una descripción litológica y geotécnica de mayor detalle.

En este sector se ha perforado 5 pozos de bombeo y 5 de observación como parte del estudio de barrera hidráulica. Para el estudio de la piezometría de la cuenca se ha realizado 4 piezómetros. Además se habilitó el sondaje geotécnico antiguo SDL-3A, denominándolo POB-10.

La **Tabla 4-1** presenta los datos de ubicación de los 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 muestran los piezómetros (en conjunto con los piezómetros de Quebrada Caserones). En el **Apéndice III** se adjuntan la estratigrafía, fotos y habilitación de cada uno de los sondajes.

Tabla 4-1 Pozos perforados en sector Quebrada La Brea

POZO	Tipo	UBICACIÓN		
		Coordenadas Definitivas [UTM 56]		
		Norte (m)	Este (m)	Cota a terreno o superficie de cemento (msnm)
PBB-01	Bombeo	6.887.579,36	437.021,35	2.622,47
PBB-03	Bombeo	6.887.530,95	437.085,26	2.626,36
PRB-01	Bombeo	6.887.354,54	436.678,90	2.588,14
PBB-06	Bombeo	6.887.462,13	436.611,41	2.590,55
POB-06B	Observación	6.887.478,51	436.550,32	2.586,51
PBB-07	Bombeo	6.887.450,73	436.938,36	2.617,85
POB-07A	Observación	6.887.428,59	436.863,32	2.613,75
POB-07B	Observación	6.887.418,77	436.967,46	2.617,89
POB-08A	Observación	6.887.602,54	437.278,08	2.638,03
POB-08B	Observación	6.887.521,92	437.035,33	2.624,75
POB-10	Piezómetro	6.888.375,97	438.659,26	2.753,22
POB-11	Piezómetro	6.889.360,44	439.222,93	2.878,10
POB-12	Piezómetro	6.889.349,42	439.665,96	2.878,73
POB-14	Piezómetro	6.887.843,96	439.292,93	2.837,91
POB-15	Piezómetro	6.886.318,99	443.577,93	3.685,14
GFB-01	Geotécnico	6.887.462,13	436.611,41	2.590,55

Tabla 4-2 Resumen perforación y habilitación Pozos sector Quebrada La Brea

POZO	PERFORACIÓN							HABILITACIÓN			
	Empresa	Tipo perforación	Fecha			Φ (")	Profundidad (m)	Fecha	Tipo	Φ (")	Profundidad (m)
			Desde	Hasta	Desarrollo						
PBB-01	Perforagua	RP-ES	20-Abr	23-Abr	23-Abr	8	54,0	23-Abr	Acero	8	54,0
		RP-BF				5 1/2	67,0		nada	5 1/2	67,0
PBB-03	Perforagua	RP-ES	24-Abr	07-May		8	48,0	07-May	Acero	8	48,0
PRB-01	Perforagua	RP-ES	13-May	19-May		8	36,0	19-May	Acero	8	
PBB-06	Perforagua	RP-ES	05-Abr	07-Abr	07-Abr	6	52,0	07-Abr	Acero	6	52,0
POB-06B	Perforagua	RP-ES	01-Abr	02-Abr	03-Abr	6	50,0	02-Abr	Acero	6	50,0
PBB-07	Perforagua	RP-ES	08-Abr	16-Abr	17 y 19-Abr	6	56,0	16-Abr	Acero	6	56,0
POB-07A	Perforagua	RP-ES	10-Mar	17-Mar	17-Mar	6	71,0	17-Mar	Acero	6	71,0
POB-07B	Perforagua	RP-ES	10-Mar	12-Mar		6	43,5	12-Mar	Acero	6	43,5
POB-08A	Perforagua	RP-ES	22-Mar	31-Mar	31-Mar	6	54,0	31-Mar	Acero	6	54,0
		RP-BF				5 1/2	72,0		nada	5 1/2	72,0
POB-08B	Perforagua	RP-ES	17-Mar	19-Mar	19-Mar	6	57,0	19-Mar	Acero	6	57,0
POB-10	-	DD	21-Nov-08			HQ	70,0		PVC	2	70,0
POB-11	Connors	DD	05-May	05-May	05-May	HQ	40,0	05-May	PVC	2	40,0
POB-12	Connors	DD	06-May	06-May	06-May	HQ	43,2	06-May	PVC	2	43,2
POB-14	Connors	DD	07-May	07-May	07-May	HQ	45,0	07-May	PVC	2	45,0
POB-15	Connors	DD	21-Abr	22-Abr	22-Abr	HQ	65,0	22-Abr	PVC	2	65,0
GFB-01	Cusonda	DD	03-May	22-May		HQ3	64,2				

NOTAS: RP-ES: Rotoperación con entubamiento simultáneo, RP-BF: Rotoperación con bit de fondo, DD: Diamantina

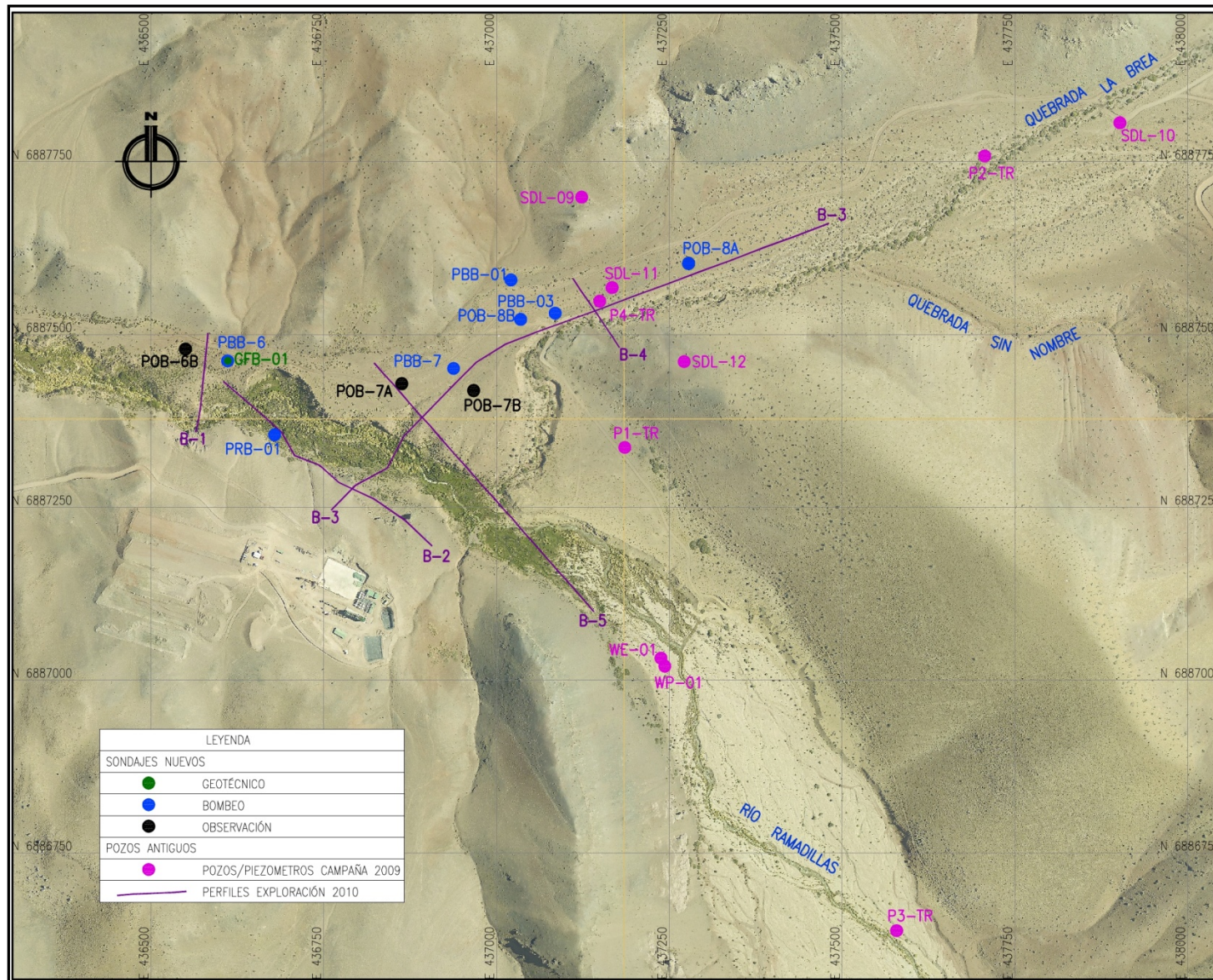


Figura 4.1 Esquema ubicación pozos de bombeo y observación.

Pozos perforados para este estudio se muestran en color azul y negro. En rosado pozos antiguos.

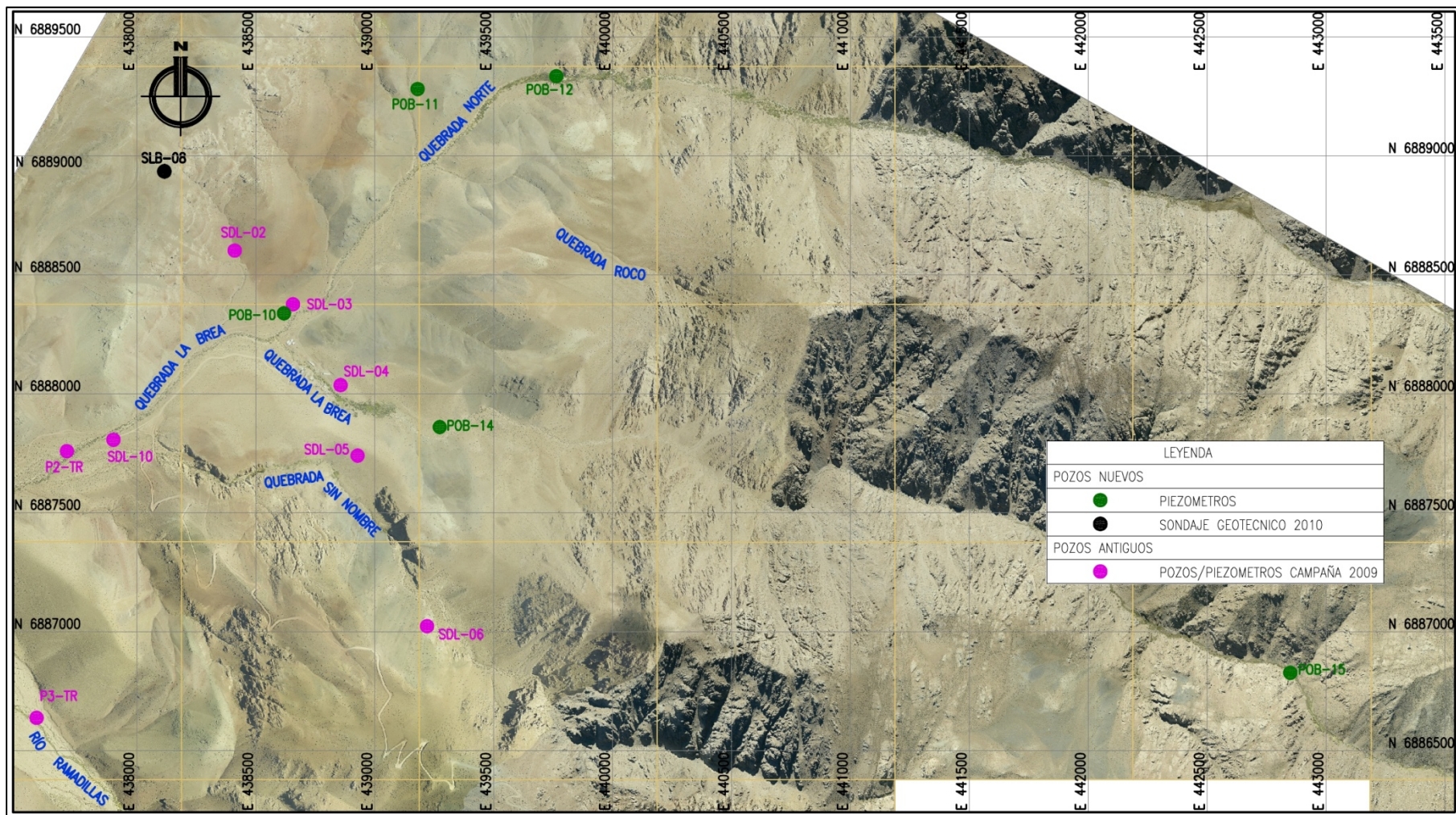


Figura 4.2 Esquema ubicación piezómetros
Pozos perforados para este estudio se muestran en verde. En rosado pozos antiguos.

4.1.2 Estratigrafía

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. Esto se ha realizado también para algunos sondeos anteriores (SDL-09, SDL-10, SDL-11 y SDL-12, P1-TR, P2-TR, P3-TR, P4-TR, WE-01 y WP-01), y por esa razón se adjuntan en el **Apéndice III**. Al respecto, se puede señalar que las principales litologías encontradas corresponden a:

Gravas y arenas

Se encuentran en la parte superior de los sondeos, alcanzado espesores de unos 45 m (en POB-7A). En algunos casos hay intercalaciones de horizontes con mayor presencia de finos (ej.: PBB-07).

Areniscas

En algunos pozos, bajo las gravas y arenas se observa una secuencia de arenas predominantemente rojizas, con algún grado de consolidación. Ejemplo de esto es el tramo que aparece en el POB-7B entre los 24 y 34 metros. En el caso del PRB-01, se observa en profundidad una arenisca media a fina gris oscura, con vetillas de yeso y pintas de óxidos de hierro.

Andesitas

Un buen ejemplo de este material es el que se observa en el POB-11 a partir de los 15 metros. En general, la parte superior de estas andesitas se muestra meteorizada y fracturada, lo que se puede ver en las fotografías superiores de este mismo sondeo. En los casos de los cutting, esto se observa por una presencia creciente de fragmentos de andesita antes de llegar a la roca más sana.

Brecha Sedimentaria

En el sondeo SLB-08 se observa intercalada con las areniscas, capas de brecha sedimentaria parda rojiza, clasto soportada, polimíctica, con matriz arcillosa y leve presencia de carbonatos.

Monzogranito

Este tipo se observa en los sondeos POB-12, POB-14 y POB-15, ubicándose por tanto hacia el sector oriental del área estudiada. En algunos sectores se encuentra fracturado, con paredes meteorizadas con limonitas y hematitas.

Brecha Andesítica

En el sondeo POB-14 se identificó bajo el monzogranito una secuencia de brecha andesítica. Presenta clastos de monzogranito y vetillas de calcita.

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 para esta campaña de terreno es la determinación de los parámetros hidráulicos o constantes elásticas (transmisividad (T), conductividad (k) y almacenamiento (S)) del sistema acuífero ubicado en cada sitio donde se dispondrá el campo de pozos. Estos valores, permitirán la calibración de un modelo numérico a través del cual se diseñará la barrera hidráulica definitiva para el control de las infiltraciones en caso de contingencia.

De acuerdo a lo comprometido en la RCA (**Apéndice I**) se realizó pruebas de bombeo en los pozos ubicados en la zona de la barrera hidráulica y en pozos perforados en los perfiles de control, que permitan estimar caudal pasante ($Q = TIL$).

Los datos de las pruebas de bombeo en la quebrada La Brea se encuentran en el **Apéndice IV**, en donde se adjuntan la siguiente información por prueba:

- datos de nivel medidos manualmente en el pozo bombeado y en los pozos de observación.
- gráficos con los datos de descenso y descensos residuales en los pozos de bombeo y de observación asociados.
- gráficos con los análisis numéricos para obtención de los parámetros hidráulicos.

4.2.1 Diseño de las Pruebas

Para realizar las pruebas de bombeo, se llevan a cabo las siguientes etapas:

- Prueba de Gasto Variable** (o de agotamiento): cuyo objetivo es determinar el caudal máximo a bombear durante la prueba de bombeo constante y definir la curva de agotamiento de cada pozo. Para ello SRK seleccionó los caudales y el tiempo para cada etapa de la prueba variable. Se registró los niveles dinámicos del pozo bombeado y de varios pozos de observación ubicados en las inmediaciones. Luego del bombeo se continuó con el registro de los niveles de agua (descenso residual), hasta alcanzar por lo menos un 95% de recuperación del nivel estático inicial.
- Prueba de Gasto Constante:** luego de la prueba anterior, se realizó una prueba de gasto constante, siendo SRK el encargado de determinar el caudal y la duración en tiempo de esta prueba. En general, la extensión de cada prueba fue de 24 horas continuas de bombeo a caudal constante, debiendo registrarse el nivel estático inicial y los niveles dinámicos durante todo este lapso en el pozo de bombeo y en varios pozos de observación aledaños. Se considera que, debido a que la barrera hidráulica evaluada se encuentra en la quebrada La Brea y no en el río Ramadillas como en el caso de la barrera presentada en el EIA, es suficiente bombear un caudal de 24 horas o estabilizado, puesto que la zona de recarga predominante proviene del flujo subterráneo proveniente de las partes altas de la cuenca La Brea. Siguiendo las prácticas habituales recomendadas por DGA (DGA, 2008), se consideró estabilización cuando se observa un descenso de 2 cm/hora, durante las últimas 3 horas de bombeo. La recuperación de niveles se extendió hasta haber alcanzado un 95% de recuperación de los niveles estáticos iniciales en los pozos monitoreados.
- 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 del borde del acuífero evaluado, puesto que se bombea durante un largo período. Para ello, en función de los resultados de las pruebas individuales, aplicando algunos métodos analíticos se determinó el caudal de bombeo en cada pozo de modo de garantizar la continuidad en el tiempo del alumbramiento constante de agua en cada punto. En función de las tendencias

observadas en el tiempo, se decidió detener el bombeo el día 9, ya que el compromiso adquirido de los 20 días de bombeo se fundaba en la ubicación de la barrera al otro lado del río Ramadillas, sitio bastante más distal y con potencial recarga desde el cauce de dicho río, de modo que para lograr captar la potencial pluma de contaminación era necesario generar un cono de depresión bastante extendidos en el área. En el caso del sitio para la barrera al pie de la presa de cada depósito, el escenario es distinto, por lo que no fue necesario prolongar la prueba hasta 20 días.

El registro de niveles se realiza en forma manual y con transductor de presión en forma simultánea lo que permite validar los datos. Se monitoreó los descensos en varios pozos de observación en cada caso.

En los siguientes puntos se detalla lo realizado en las pruebas de bombeo, tanto las que involucran la extracción desde un solo pozo (pruebas individuales), como las que se realizaron con la extracción simultánea desde 3 pozos (prueba simultánea).

4.2.2 Ejecución Pruebas Individuales

La **Tabla 4-3** muestra los pozos y caudales 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 utilizaron flujómetros análogos, lo que fueron comparados con mediciones de aforos volumétricos y totalizadores para validar los caudales medidos.

Para la evacuación de las aguas bombeadas y con objeto de evitar recirculación de las aguas se utilizaron contenedores para recibir el caudal bombeado, a partir del cual se extendieron mangas plásticas que llevaban el flujo aguas abajo. Un ejemplo de instalación utilizada se observa en la **Figura 4.3**, correspondiente al pozo PBB-01.

Tabla 4-3 Resumen Pruebas de Bombeo Realizadas

POZO	FECHA	PRUEBA	CAUDAL	NIVEL ESTATICO	NIDEL DINAMICO MAXIMO
			[l/s]	[mbnt]	[mbnt]
PBB-01	08-06-2010	VARIABLE	14,0 - 17,0 - 19,0	24,00	44,45
	09-06-2010	CONSTANTE	18	24,04	43,64
PBB-03	22-05-2010	CONSTANTE	0,66	27,17	42,40
PBB-06	27-05-2010	VARIABLE	8 - 10 - 13	8,83	20,96
PBB-07	12-06-2010	VARIABLE	4,3 - 6,3 - 8,1	20,83	29,12
	14-06-2010	VARIABLE	8,16 - 9,72 - 10,17	20,77	42,58
	15-06-2010	CONSTANTE	9	20,87	30,87
POB-08B	06-06-2010	VARIABLE	1,0 - 1,9 - 2,9 - 4,5 - 5,3	26,31	46,82
	03-06-2010	CONSTANTE	3	26,26	42,91



Figura 4.3 Equipos instalados en bombeo de pozo PBB-01

Los detalles de las pruebas realizadas se indican a continuación, agrupadas por pozo bombeado.

4.2.2.1 PBB-1

Se realizó una primera prueba de calibración el 1 de Junio para observar la depresión del nivel dinámico a cierto caudal y con esto programar las pruebas a caudal variable y caudal constante. Así se determinó instalar un equipo de mayor capacidad para el 8 de Junio realizar la prueba variable. Esta se programó en 3 etapas, realizándose la primera a 14 l/s por 2 horas. Posteriormente se detiene la prueba y se reinicia después de una recuperación, bombeando esta vez 17 l/s por 111 minutos, y una tercera etapa a 19 l/s por 122 minutos, para de ahí medir recuperación por 134 minutos. En todas las etapas los niveles dinámicos lograron estabilizarse. En la **Tabla 4-4** se pueden ver los descensos producidos durante el bombeo.

Tabla 4-4 Descensos durante bombeo variable en PBB-1

Etapas	Caudal [l/s]	Duración [min]	Descenso en Etapas (*) [m]	Descenso Acumulativo (*) [m]
1	14	120	5,62	5,62
2	17	111	4,01	9,63
3	19	122	10,82	20,45

(*): Medido en el pozo de bombeo.

A partir de estos datos se puede obtener la curva de descarga del pozo PBB-01, lo que se muestra en la **Figura 4-4** y en la que de acuerdo a metodología sugerida por DGA, se extrapolan los descensos a los 10.000 minutos, que se considera un régimen estacionario.

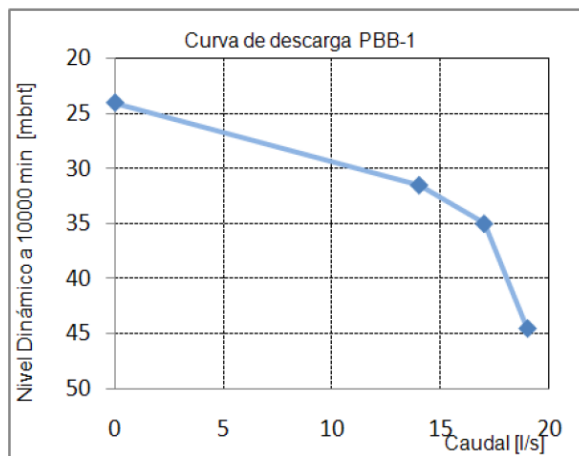


Figura 4.4 Curva de descarga de pozo PBB-01

Con esto se definió hacer la prueba de caudal constante a 18 l/s, que corresponde a una estimación de donde se produce un mayor cambio de pendiente de la curva de descarga de la **Figura 4.4**. La prueba comenzó una vez recuperados los niveles el 9 de junio y se extendió por 26 horas (1.560 minutos, ver **Figura 4.5**). Durante el bombeo, se logró estabilizar muy rápidamente los niveles en los primeros 20 minutos, en torno a los 43.1 mbnt, y en las últimas 3 horas el nivel se mantuvo constante, de forma que se cumplió con el criterio de detención del bombeo por estabilización antes definido.

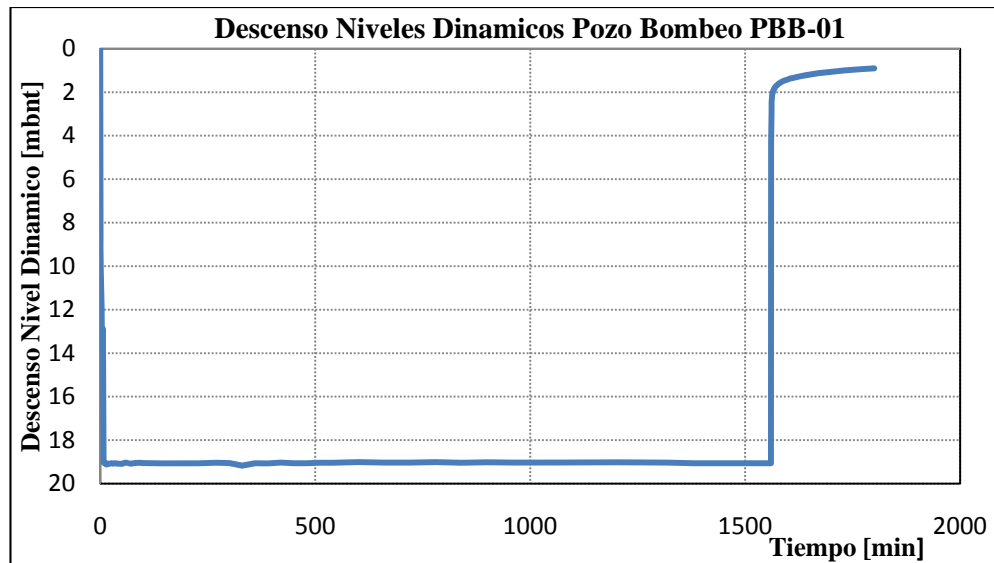


Figura 4.5 Descensos en PBB-01 durante bombeo constante de pozo PBB-01

Posteriormente se midió la recuperación de niveles por cuatro horas, llegando a un 95 % de recuperación.

4.2.2.2 PBB-3

El 21 de mayo se probó el caudal a extraer del pozo PBB-03, encontrando que a 2 l/s se producía un descenso en 3 minutos de más de 14 metros, lo que dejaba el nivel muy cerca de la bomba, lo que indicaba claramente el poco caudal que se podía extraer de este pozo. Dado esto, se define realizar la prueba a caudal constante a un flujo cercano a los 0.7 l/s para así mantener la prueba por el tiempo requerido de 24 horas. Por los bajos caudales involucrados, no se realiza prueba a caudal variable.

De esta forma, el 22 de mayo comienza prueba a caudal constante, que se extiende por 24 hrs (1440 minutos, ver **Figura 4.6**), a un caudal medio de 0.66 l/s. El descenso final luego de las 24 horas de bombeo fue de 14.92 m, y en las últimas 3 horas no se incrementó, por lo que se definió detener el ensayo.

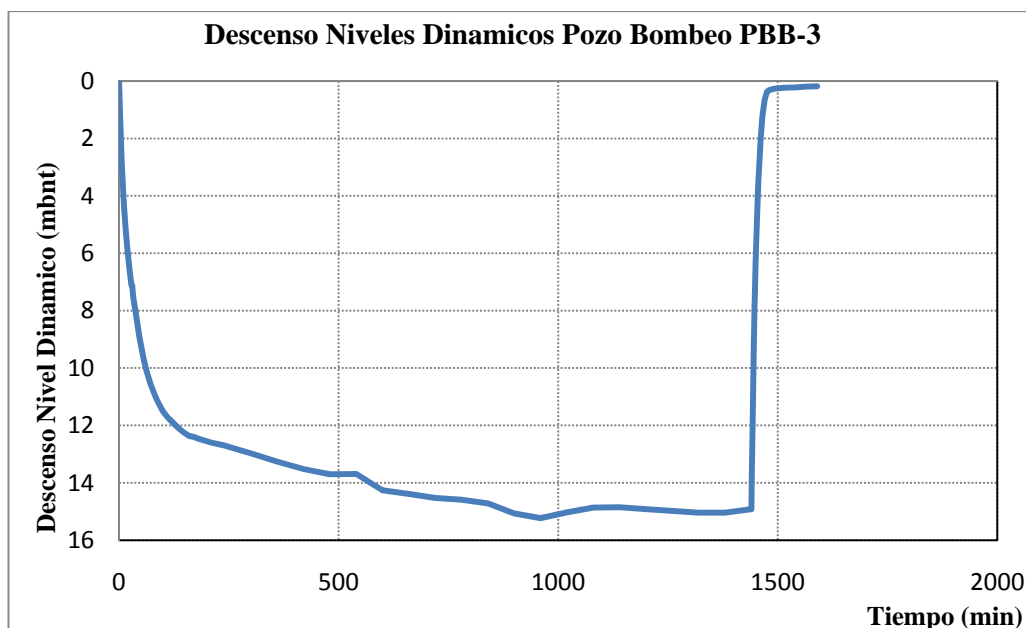


Figura 4.6 Descensos en PBB-03 durante bombeo constante de pozo PBB-03

Posteriormente se continuó midiendo manualmente la recuperación en el pozo por casi 3 horas, cuando se tuvo más de un 98 % de la misma.

4.2.2.3 PBB-7

El 12 de junio se realizó un bombeo de calibración en este pozo y el comienzo de un bombeo variable, con etapas a 4.3 l/s, 6.3 l/s y 8.1 l/s. Sin embargo, se determinó la necesidad de instalar un equipo de bombeo de mayor capacidad, con lo que el 14 de junio se realizó una segunda prueba de caudal variable, con una primera etapa de 8.16 l/s por 60 min. Posteriormente se intentó una etapa cercana a los 10 l/s, y por 30 minutos se promediaron 9.72 l/s. Sin embargo, al ajustar levemente la válvula, se produjo un descenso de nivel asociado al leve aumento de caudal que promedió 10.17 l/s en 60 minutos. Finalmente se abrió la válvula por completo, lo que llevó a un promedio de 9.92 l/s por 20 minutos, momento en que se detiene la prueba y se procede a medir recuperación por cerca de una hora, hasta obtener un 99 % de recuperación. En los últimos 10 minutos de bombeo, el nivel se recupera levemente.

En las **Tablas 4-5 y 4-6** se pueden ver los descensos producidos durante estos bombeos variables.

Tabla 4-5 Descensos durante bombeo variable en PBB-7 del 12 de Junio

Etapas	Caudal [l/s]	Duración [min]	Descenso acumulativo (*) [m]
1	4.3	70	3.38
2	6.3	120	5.55
3	8.1	120	8.29

Tabla 4-6 Descensos durante bombeo variable en PBB-7 del 14 de Junio

Etapa	Caudal [l/s]	Duración [min]	Descenso acumulativo (*) [m]
1	8.16	60	9.12
2	9.72	30	12.57
3	10.17	60	18.53
4	9.92	20	16.67

Para la obtención de la curva de descarga, se utilizaron los datos de las dos pruebas mencionadas, extrapolando los descensos a los 10000 minutos, cuyo resultado se puede ver en la **Figura 4.7**.

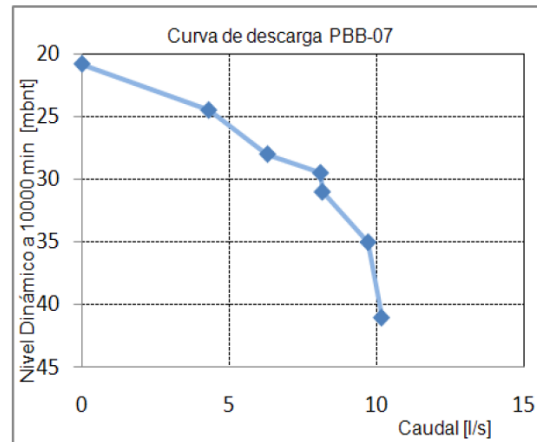


Figura 4.7 Curva de descarga de pozo PBB-07

Basado en esta información se definió hacer la prueba a caudal constante a los 9 l/s, lo que corresponde aproximadamente al cambio de pendiente de la curva de la **Figura 4.5**. Así, el 15 de junio, comenzó una prueba de caudal constante en este pozo, a 9 l/s por 24 horas (1440 minutos, ver **Figura 4.8**), alcanzando un descenso máximo de 11.93 m. En las últimas tres horas de bombeo, el descenso se incrementó a menos de 2 cm por hora, incluso descendiendo en la última medición, razón por la cual se definió detener el bombeo.

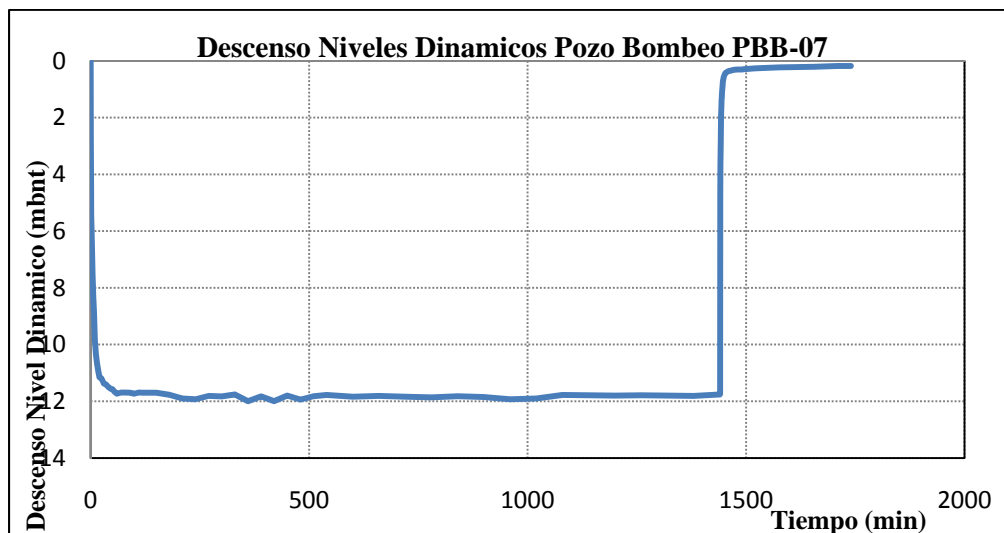


Figura 4.8 Descensos en PBB-07 durante bombeo constante de pozo PBB-07.

A continuación se midió la recuperación de niveles por 5 horas, cuando se alcanzó un 98 % de recuperación de los niveles.

4.2.2.4 POB-8B

La segunda semana de mayo se instalan equipos en este pozo, que no logran extraer caudales suficientes para estresar el acuífero, pero que muestran que es posible extraer unos 3 l/s en el largo plazo.

Con estos antecedentes, se instala un nuevo equipo de bombeo y el 3 de junio se inicia una prueba a caudal constante de 3 l/s. Esta prueba se extiende por 24 horas (1440 minutos, ver **Figura 4.9**) y alcanzando un descenso máximo de 16.65 m. Se mide a continuación la recuperación de niveles por 40 minutos, llegando rápidamente a un 97% de recuperación.

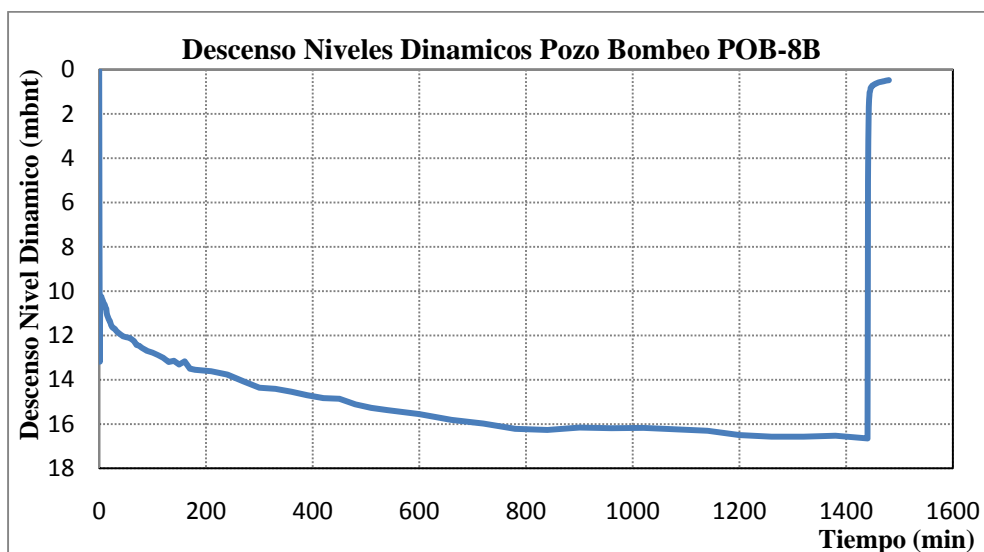


Figura 4.9 Descensos en POB-08B durante bombeo constante de pozo POB-08B.

Posteriormente, el 6 de Junio se realiza una prueba a caudal variable, con 4 etapas de 60 minutos a 1.04 l/s, 1.85 l/s, 2.9 l/s y 4.5 l/s. Después de esta última etapa se abre la válvula, con lo que el caudal aumenta a unos 5.28 l/s, que produce que en 13 minutos los niveles se acerquen a la bomba, por lo que se detiene la prueba y comienza a medir recuperación.

En la **Tabla 4-7**, se pueden ver los descensos producidos durante el bombeo. Hay que señalar que en los primeros 2 minutos los caudales fueron de unos 2 l/s, hasta que se logró ajustar cerca de 1 l/s, lo que explica el descenso inicial que se muestra en la figura del **Apéndice IV**.

Tabla 4-7 Descensos durante bombeo variable en POB-8B

Etapas	Caudal [l/s]	Duración [min]	Descenso en Etapas (*) [m]	Descenso Acumulativo (*) [m]
1	1,04	60	0,76	0,76
2	1,85	60	0,55	1,31
3	2,90	60	1,75	3,06
4	4,50	60	5,46	8,52
5	5,28	13	11,99	20,51

(*): Medido en el pozo de bombeo.

A partir de estos datos, y extrapolando el descenso a los 10000 minutos, se puede obtener la curva de descarga del pozo POB-8B, que se muestra en la **Figura 4.10**. En este gráfico se observa que el mayor cambio de pendiente es cercano a los 3 l/s, caudal con el que se ejecutó la prueba de caudal constante.

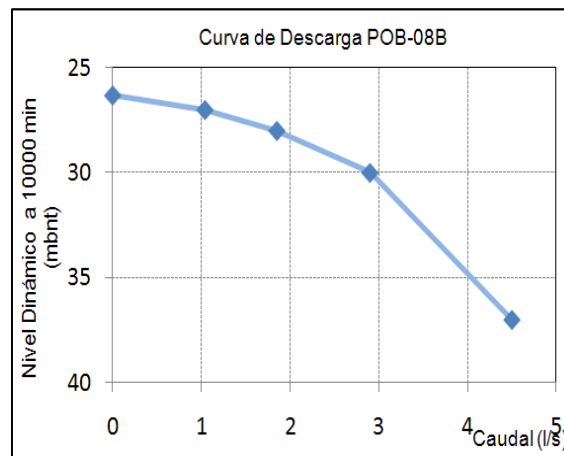


Figura 4.10 Curva de descarga de pozo POB-8B

4.2.2.5 PBB-6

El 27 de mayo se realizó prueba de caudal variable del pozo PBB-6. En la **Tabla 4-8** se pueden ver los descensos producidos durante el bombeo variable. A partir de estos datos, y extrapolando el descenso a los 10.000 minutos, se puede obtener la curva de descarga del pozo PBB-6, que se muestra en la **Figura 4.11**

Tabla 4-8 Descensos durante bombeo variable en PBB-6

Etapas	Caudal [l/s]	Duración [min]	Descenso en Etapas (*) [m]	Descenso Acumulativo (*) [m]
1	8	130	5,74	5,74
2	10	90	2,16	7,90
3	13	100	4,23	12,13

(*): Medido en el pozo de bombeo.

Una vez terminado el bombeo variable, se midió la recuperación por 2.5 horas, plazo en el cual se llegó a un 97% de recuperación del nivel.

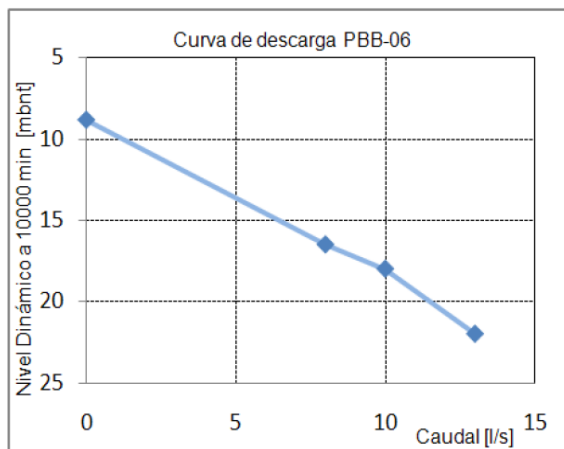


Figura 4.11 Curva de descarga de pozo PBB-06

La prueba de caudal constante no se realizó, sin embargo con los datos de la prueba de caudal variable y su recuperación ya es posible obtener los parámetros hidrogeológicos de interés. Por otra parte, este punto se encuentra alejado del sector propuesto para la ubicación de la barrera definitiva, sector en el que se concentraron los trabajos de terreno.

4.2.3 Ejecución Prueba Simultánea

Tal como señala la RCA, el objetivo de esta 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 (que se pueden observar en la **Figura 4.12**).

Con este fin, se procedió a realizar una prueba simultánea de exploración de 24 horas para determinar los pozos y los caudales que serían alumbrados en la prueba de larga duración. Los caudales usados en estos bombeos 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 el descenso en un punto de un campo de pozos, como el resultante de la suma de los efectos de cada pozo de bombeo.

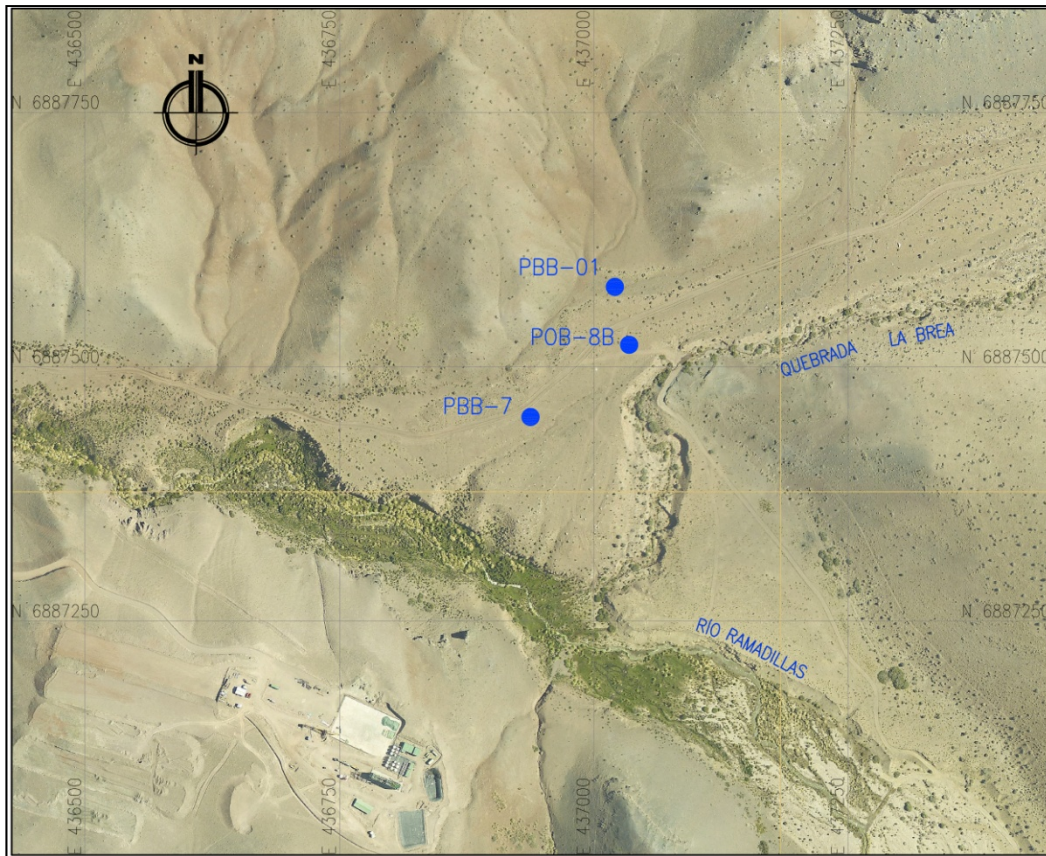


Figura 4.12 Esquema ubicación pozos de bombeo involucrados en los bombeos simultáneos.

4.2.3.1 Prueba de 24 hrs en pozos PBB-01, POB-08B y PBB-07

El 22 de junio se inició el bombeo por 24 horas, en forma simultánea, de los pozos PBB-01, POB-08B y PBB-07. Los detalles se observan en la **Tabla 4-9**.

Tabla 4-9 Bombeo simultaneo del 22 de junio

Pozo	Caudal bombeado [l/s]	Tiempo total bombeado [hrs]	Nivel Freático [mbnt]	Nivel Dinámico Máximo [mbnt]	Máximo Descenso [m]
PBB-01	13,0	24	24,57	44,14	19,57
POB-08B	1,9	24	26,93	42,24	15,31
PBB-07	9,6	24	21,05	35,24	14,19

Las tendencias en los descensos en los tres pozos fueron decrecientes y muy cercanas a la ubicación de la bomba por lo que se infiere que estos caudales no serían sostenibles para una prueba de larga duración.

4.2.3.2 Prueba de larga duración en pozos PBB-01, POB-08B y PBB-07

A la luz de la prueba anterior se definieron los caudales con los que se realizaría la prueba de larga duración. Así, el 30 de Junio se inició una prueba simultánea de larga duración en estos pozos, la que se extendió por 9 días y cuyos detalles se observan en la **Tabla 4-10**.

Tabla 4-10 Bombeo simultaneo del 30 de junio

Pozo	Caudal bombeado [l/s]	Tiempo total bombeado [hrs]	Nivel Freático [mbnt]	Nivel Dinámico Máximo [mbnt]	Máximo Descenso [m]
PBB-01	5.6	216	26.09	32.11	6.02
POB-08B	1.8	216	28.31	37.14	8.83
PBB-07	5.9	216	21.85	29.09	7.24

Para definir el momento de detención del bombeo, se estableció el mismo criterio de la DGA antes señalado, en cuanto a que el descenso no sea mayor a 2 cm/hora durante las últimas 3 horas de bombeo. Si bien esto se cumplió a los 2 días de bombeo, se prosiguió con el mismo, dado que esta tendencia a la baja de niveles, si bien era baja, se mantenía. Así, se prolongo la prueba por 9 días, manteniendo pequeñas variaciones de nivel, pero que en las últimas cuatro horas de bombeo, en ninguno de los tres pozos el descenso fue mayor a los 2 cm por hora.

4.2.4 Interpretación de las Pruebas de Bombeo

Para la interpretación de las pruebas de bombeo, los datos fueron cargados al software Aquifer Test Pro, que permite consolidar una base de datos, y realizar así estimaciones de los parámetros hidráulicos mediante la aplicación de diversos métodos numéricos, utilizando un ajuste manual de cada curva en la pantalla.

Los métodos de análisis de las pruebas utilizados fueron Theis, Cooper-Jacob y Neuman para el caso de las de bombeo y recuperación de Theis (o “Theis recovery”) para los datos de recuperación.

Los detalles de los análisis realizados, con los resultados en las estimaciones de transmisividad (**T**), conductividad (**k**) y almacenamiento (**S**), se indican a continuación, agrupados por pozo bombeado. Tal como se señaló anteriormente, los gráficos con los detalles de cada análisis están agrupados por prueba de bombeo en el **Apéndice IV**.

4.2.4.1 PBB-01

En estos bombeos, se utilizaron transductores de presión (o sensores) instalados en los pozos de observación POB-08B, PBB-03 y PBB-07, además de los datos manuales medidos en el pozo de bombeo.

La **Tabla 4-11** resume los resultados de los parámetros evaluados. Solo se analizó la prueba cuando el descenso involucrado permitía hacerlo, o cuando la serie de datos no contenía errores de medición. Así, en los casos en que no se calculó, se dejó un guion en la celda correspondiente.

Tabla 4-11 Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-01

	DATOS UTILIZADOS	Manuales del PBB-01				Sensor en el POB-08B			
BOMBEO	ANALISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Recuperación de Variable del 8 de junio	T [m2/día]	—	—	—	(*)	—	—	—	4.07E+02
	k [m/d]	—	—	—	(*)	—	—	—	9.88E+00
Constante del 9 de Junio y su recuperación.	T [m2/día]	6.78E+01	2.80E+01	2.86E+01	4.16E+02	1.63E+02	2.06E+02	1.19E+02	2.32E+02
	k [m/d]	1.48E+00	6.10E-01	6.23E-01	9.04E+00	3.54E+00	4.48E+00	2.60E+00	5.04E+00
	S	—	—	—	—	8.22E-05	6.41E-05	—	—

	DATOS UTILIZADOS	Sensor en el PBB-03				Sensor en el PBB-07			
BOMBEO	ANALISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Recuperación de Variable del 8 de junio	T [m2/día]	—	—	—	2.81E+02	—	—	—	(*)
	k [m/d]	—	—	—	6.82E+00	—	—	—	(*)
Constante del 9 de Junio y su recuperación.	T [m2/día]	2.05E+02	1.72E+02	1.81E+02	1.67E+02	1.00E+03	5.64E+02	7.36E+02	2.83E+03
	k [m/d]	4.46E+00	3.74E+00	3.93E+00	3.63E+00	2.18E+01	1.23E+01	1.60E+01	6.17E+01
	S	5.19E-04	1.27E-03	—	—	4.73E-03	1.01E-02	—	—

—: Método no permite calcular el parámetro.

(*): Descensos y descensos residuales despreciables, no permiten su análisis.

4.2.4.2 PBB-03

En estos bombeos, se utilizó el transductor de presión instalado en el pozo de observación POB-08B, además de los datos manuales medidos en el pozo de bombeo. La **Tabla 4-12** resume los resultados de los parámetros evaluados.

Tabla 4-12 Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-03

	DATOS UTILIZADOS	Manuales del PBB-03				Sensor en el POB-08B			
BOMBEO	ANALISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Constante del 22 de mayo y su recuperación.	T [m2/día]	1.67E+00	2.62E+00	1.57E+00	1.04E+00	2.64E+02	2.47E+02	6.87E+00	2.20E+02
	k [m/d]	3.90E-02	6.11E-02	3.67E-02	2.42E-02	6.17E+00	5.76E+00	1.60E-01	5.15E+00
	S	3.67E-03	—	—	—	7.50E-04	2.01E-03	—	—

—: Método no permite calcular el parámetro.

4.2.4.3 PBB-06

En este bombeo solo se analizaron los datos medidos en el pozo de bombeo. La **Tabla 4-13** resume los resultados de los parámetros evaluados.

Tabla 4-13 Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-06

	DATOS UTILIZADOS	Manuales del PBB-06			
BOMBEO	ANALISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Recuperación de Variable del 27 de mayo	T [m2/día]	—	—	—	7.52E+01
	k [m/d]	—	—	—	1.23E+00

—: Método no permite calcular el parámetro.

4.2.4.4 PBB-07

En estos bombeos, se utilizaron transductores de presión (o sensores) instalados en los pozos de observación POB-07A, POB-07B, POB-08B y PBB-01, además de los datos manuales medidos en el pozo de bombeo. La **Tabla 4-14** resume los resultados de los parámetros evaluados.

Tabla 4-14 Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo PBB-07

	DATOS UTILIZADOS	Manuales del PBB-07				Sensor en el POB-07A			
BOMBEO	ANALISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Recuperación de Variable del 14 de junio	T [m ² /día]	—	—	—	2.00E+01	—	—	—	(*)
	k [m/d]	—	—	—	4.16E-01	—	—	—	(*)
Constante del 15 de Junio	T [m ² /día]	3.77E+01	2.87E+01	2.10E+01	5.15E+02	8.54E+02	2.01E+02	4.00E+01	1.09E+03
	k [m/d]	7.67E-01	5.84E-01	4.27E-01	1.05E+01	1.74E+01	4.09E+00	8.14E-01	2.21E+01
	S	5.23E-03	—	—	—	9.53E-04	1.57E-02	—	—

	DATOS UTILIZADOS	Sensor en el POB-07B				Sensor en el POB-08B			
BOMBEO	ANALISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Recuperación de Variable del 14 de junio	T [m ² /día]	—	—	—	(*)	—	—	—	(*)
	k [m/d]	—	—	—	(*)	—	—	—	(*)
Constante del 15 de Junio y su recuperación.	T [m ² /día]	8.81E+02	7.77E+01	7.33E+02	6.90E+02	2.27E+02	(*)	3.11E+02	(*)
	k [m/d]	1.79E+01	1.58E+00	1.49E+01	1.40E+01	4.62E+00	(*)	6.32E+00	(*)
	S	1.35E-03	3.71E-02	1.16E-03	—	1.86E-02	—	—	—

	DATOS UTILIZADOS	Sensor en el PBB-01			
BOMBEO	ANALISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Recuperación de Variable del 14 de junio	T [m ² /día]	—	—	—	(*)
	k [m/d]	—	—	—	(*)
Constante del 15 de Junio y su recuperación.	T [m ² /día]	2.79E+02	(*)	(*)	(*)
	k [m/d]	5.68E+00	(*)	(*)	(*)
	S	9.52E-03	—	—	—

—: Método no permite calcular el parámetro.

(*): Descensos y descensos residuales despreciables, no permiten su análisis.

4.2.4.5 POB-08B

En estos bombeos, solo se analizaron los datos medidos en el pozo de bombeo. La **Tabla 4-15**, resume los resultados de los parámetros evaluados.

Tabla 4-15 Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo POB-08B

	DATOS UTILIZADOS	Manuales del POB-08B			
BOMBEO	ANÁLISIS UTILIZADO	Theis	Cooper-Jacob	Neuman	Theis Recovery
Recuperación de Variable del 6 de junio	T [m ² /día]	—	—	—	4.52E+00
	k [m/d]	—	—	—	1.05E-01
Constante del 3 de Junio y su recuperación.	T [m ² /día]	1.92E+01	1.95E+01	1.17E+01	1.01E+02
	k [m/d]	4.40E-01	4.46E-01	2.68E-01	2.31E+00
	S	1.34E-05	—	—	—

—: Método no permite calcular el parámetro.

4.2.4.6 Prueba de Bombeo Simultáneo

Se analizaron los datos de la prueba de bombeo simultánea de larga duración que se realizó por nueve días en los pozos PBB-01, POB-08B y PBB-07 (ver punto 4.2.3.2). Para esto se utilizó el análisis “Theis Forward Solution”, disponible con el software Aquifer Test Pro. Este análisis se basa en la teoría de superposición para calcular el descenso y está diseñado tanto para acuíferos confinados como para acuíferos libres. La **Tabla 4-16** muestra los parámetros hidráulicos y el detalle del ajuste estadístico de la evaluación. El detalle de estos análisis se adjunta al final de **Apéndice IV**.

Tabla 4-16 Parámetros hidráulicos calculados a partir de pruebas en pozo POB-08B

DATOS UTILIZADOS	Sensor del POB-07B	Manuales del SDL-09	Manuales del P1-TR	Sensor del PBB-03	Manuales del POB-7A	Mínimo	Máximo	Media Aritmética	Media Geométrica
T [m ² /día]	4,04E+02	8,00E+01	5,50E+02	1,70E+02	3,30E+02	8,00E+01	5,50E+02	3,07E+02	2,51E+02
k [m/d]	8,42E+00	1,67E+00	1,15E+01	3,54E+00	6,87E+00	1,67E+00	1,15E+01	6,40E+00	5,24E+00
S	4,68E-02	2,00E-02	2,00E-02	3,00E-03	1,00E-02	3,00E-03	4,68E-02	2,00E-02	1,41E-02
Error Medio	1,30E-03	-2,08E-02	-4,38E-03	-7,94E-02	-1,49E-02				
Error cuadrático	2,27E+01	6,31E-02	1,29E-02	9,44E+01	1,99E-01				
Varianza	6,99E-03	1,75E-03	3,49E-04	1,46E-02	4,86E-03				
Desviación estándar	8,36E-02	4,19E-02	1,87E-02	1,21E-01	6,97E-02				

4.2.4.7 Resumen de valores obtenidos y análisis preliminar.

En la **Tabla 4-17** se pueden observar un resumen de los valores obtenidos por pozo.

Tabla 4-17 Valores de T (m²/día) y K (m/día) obtenidos por pozo

Pozo	T min [m ² /día]	T máx [m ² /día]	T prom [m ² /día]	k min [m/d]	k máx [m/d]	k prom [m/d]
PBB-01	2,80E+01	2,83E+03	4,34E+02	6,10E-01	6,17E+01	9,54E+00
PBB-03	1,04E+00	2,64E+02	9,31E+01	2,42E-02	6,17E+00	2,18E+00
POB-08B	4,52E+00	1,01E+02	3,12E+01	1,05E-01	2,31E+00	7,14E-01
PBB-07	2,00E+01	1,09E+03	3,75E+02	4,16E-01	2,21E+01	7,63E+00
PBB-06	7,52E+01	7,52E+01	7,52E+01	1,23E+00	1,23E+00	1,23E+00

Los rangos de valores obtenidos son razonables de acuerdo a los antecedentes existentes (ver **Apéndice II**) y que se analizarán en el punto cinco de este informe. Se debe tener en cuenta que los datos de prueba de bombeo, al provenir de pozos habilitados en las distintas unidades, dan por ende un valor que no es asignable a una unidad específica, como los datos de pruebas de Lugeon que se entregan en el **Apéndice II** que por su diseño dan valores puntuales.

El rango de valores de T por pozo se debe en algunos casos a los diferentes pozos de observación utilizados para su cálculo. Así por ejemplo, los mayores valores de T obtenidos en el PBB-01 son los calculados a partir de los datos del PBB-07, lo que quizás podría corresponder a que en la dirección hacia este pozo el acuífero es levemente más permeable que hacia las otras direcciones investigadas. En otros casos la variabilidad esta mas asociada a los diferentes métodos de análisis utilizados.

Dado que todas las pruebas de bombeo se efectuaron en pozos recientemente realizados, no se cuenta con pruebas de bombeo antiguas con las que comparar estos valores. Sin embargo, es posible comparar relativamente estos valores con la de pozos cercanos. Así, en el pozo TR-04 ubicado en el sector de Quebrada La Brea a unos 90 metros aguas arriba del pozo PBB-03, se efectuó una prueba de caudal constante a partir del 27 de Agosto de 2008 extrayendo un caudal de 1.0 (l/s) por espacio de 48 horas. El nivel estático se encontró en 24.54 metros y el nivel dinámico alcanzó los 54.26 metros al final de la prueba. (Anexo 45 de adenda 1 de EIA,). El análisis de dicha prueba dio un valor de la transmisividad de 1.54 (m²/día) y el valor de la permeabilidad de 0.0194 (m/día). Si bien la profundidad del pozo TR-04 es de 104 m y por tanto no es comparable con el pozo más cercano, PBB-03, que solo tiene 48 m, los valores son del mismo orden de magnitud en ambos casos.

Por otra parte, los valores obtenidos para los parámetros, a partir de la prueba de bombeo simultáneo, son bastante similares a los obtenidos con las pruebas individuales de la presente campaña.

Si bien originalmente se consideraba realizar bombeos en 5 puntos de la zona de remediación, y además definir un perfil de control para aplicar el concepto de caudal pasante ($Q=TiI$), se considera que con los 5 pozos de bombeo perforados, la realización de 5 pruebas de caudal variable y 4 de caudal constante, mas la prueba simultanea en 3 pozos, se pudo cumplir con los objetivos de obtener los parámetros hidráulicos que permiten caracterizar la zona aguas abajo de la futura zanja cortafuga. En cuanto a la duración de las pruebas, no fue necesario esperar 3 días para obtener la estabilización de los niveles, ya que en todas las pruebas de caudal constante realizadas se cumplió con el criterio DGA de estabilización de niveles (descenso menor a 2 cm/hora durante las últimas 3 horas de bombeo).

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 (Ver **Apéndice V** para mayor detalle). Durante la segunda semana de Marzo de 2010 se midió un total de 114 estaciones distribuidas en 5 perfiles en el sector La Brea y 5 perfiles en el sector Caserones, con separación entre estaciones de 20 m y 50 m, según la localización del perfil (**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 fue replanteada en terreno con instrumental GPS GARMIN eTrex Vista.

Los datos geoelectricos se analizaron 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 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 generaron secciones de resistividad en una representación de grilla a color y modelos abatidos.

En la **Figura 4.14** se muestran las secciones de resistividad de las líneas obtenidas con los modelos de capas múltiples de la inversión ‘smooth model’, de los sectores de La Brea. 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 pueden 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 correlacionarían 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 pueden 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 -3000 $\Omega.m$ en La Brea y 300-4000 $\Omega.m$ en Caserones) asociada posiblemente a sedimentos secos y/o roca superficial.
- Bajo la sobrecarga anterior se observa una unidad relativamente conductora (10-300 $\Omega.m$ en La Brea y 50-300 $\Omega.m$ en Caserones), asociada posiblemente con roca alterada.
- Una unidad de alta resistividad (300-3000 $\Omega.m$ en La Brea y 300-4000 $\Omega.m$ en Caserones), 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 pueden mencionar la salinidad de los fluidos, el grado de saturación electrolítica y el nivel de fracturamiento de la roca.

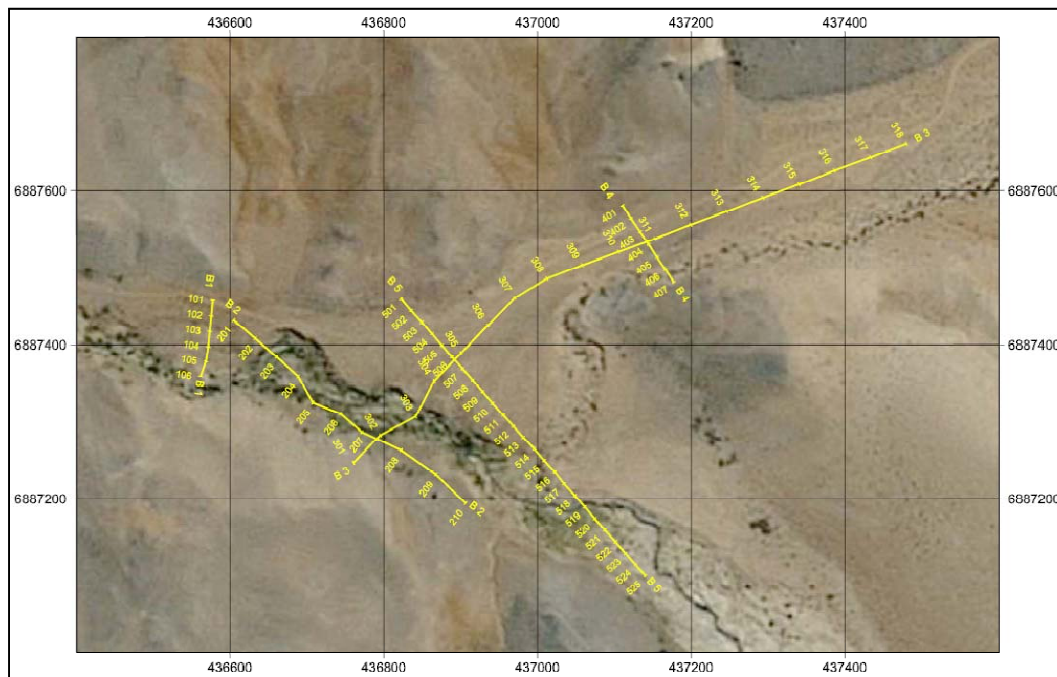


Figura 4.13 Planta de perfiles geofísicos sector La Brea.

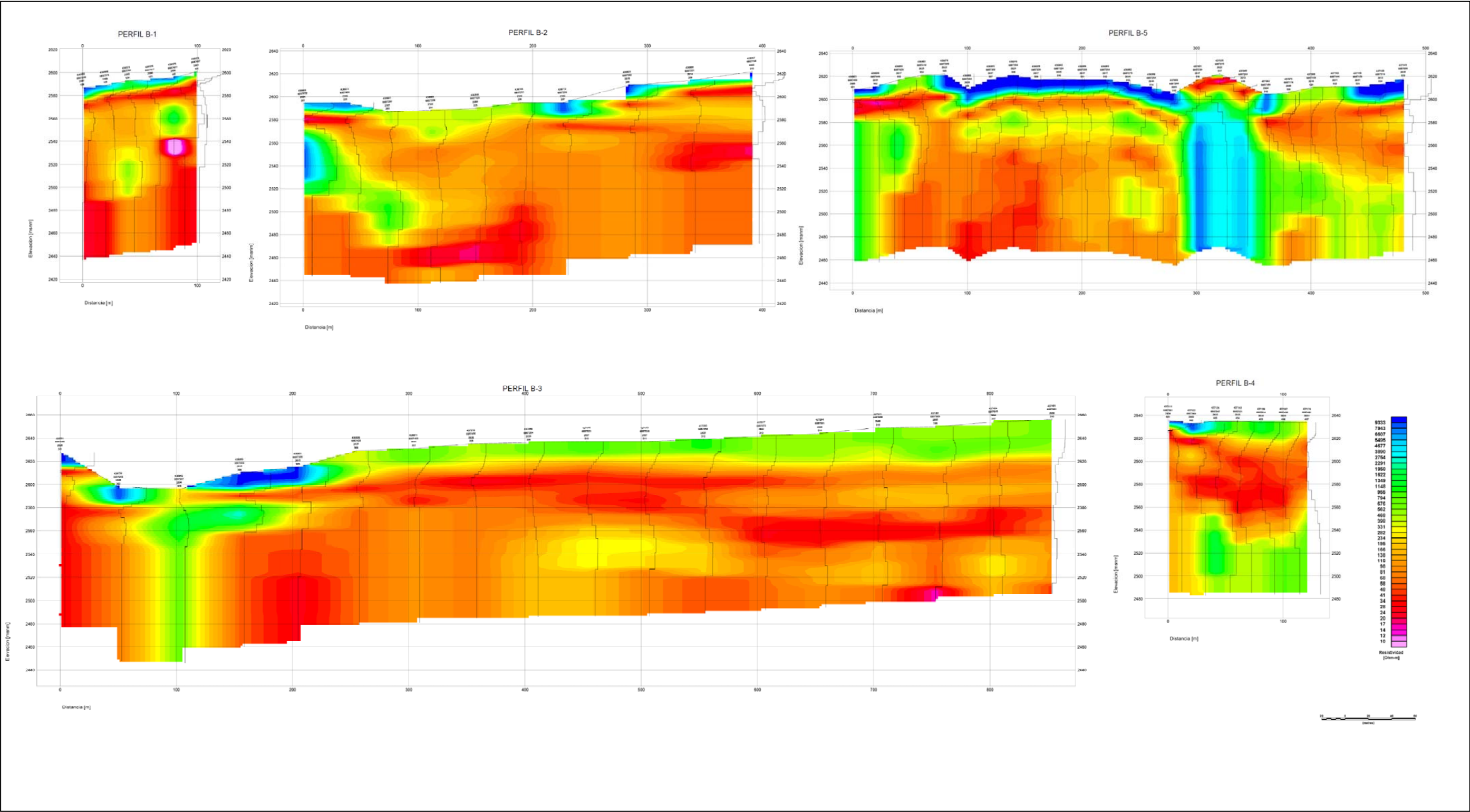


Figura 4.14 Secciones de resistividad en sector La Brea, de las líneas obtenidas con los modelos de capas múltiples de la inversión ‘smooth model’.

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.

En forma paralela geólogos de MLCC junto con geólogos de ARCADIS visitaron el área de modo de validar la inexistencia de estructuras mayores en la zona de la quebrada La Brea donde se situará el depósito de Lamas. En esa oportunidad, se verificó que no hay evidencias de un control estructural de dicha quebrada y que el contacto entre el intrusivo y la secuencia jurásica es por discordancia de erosión.

4.4.1 Metodología

Este levantamiento consistió en puntos de control estructural y geotécnico, donde se registraron los sistemas estructurales de las diaclasas presentes y se midieron o estimaron las diferentes variables físicas que caracterizan el comportamiento geotécnico del macizo rocoso. En total se levantaron 5 puntos en sectores accesibles al norte de la Quebrada La Brea, (**Figura 4.15**).

Con las mediciones de discontinuidades se elaboraron 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

Del análisis detallado de los puntos de control levantados en el área de la Quebrada La Brea, los sistemas estructurales principales de diaclasas muestran cambios con basculamientos desde rumbos NW a EW, mostrando orientaciones subparalelas a la quebrada, con inclinaciones subverticales preferencialmente hacia el norte. Las diaclasas se caracterizan por mostrar rellenos milimétricos con hematita, jarosita, calcita con leve arcilla y persistencias mayores a 20m y las fallas presentan aperturas centimétricas con relleno de hematita y arcillas principalmente y persistencias mayores a 10 m.

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

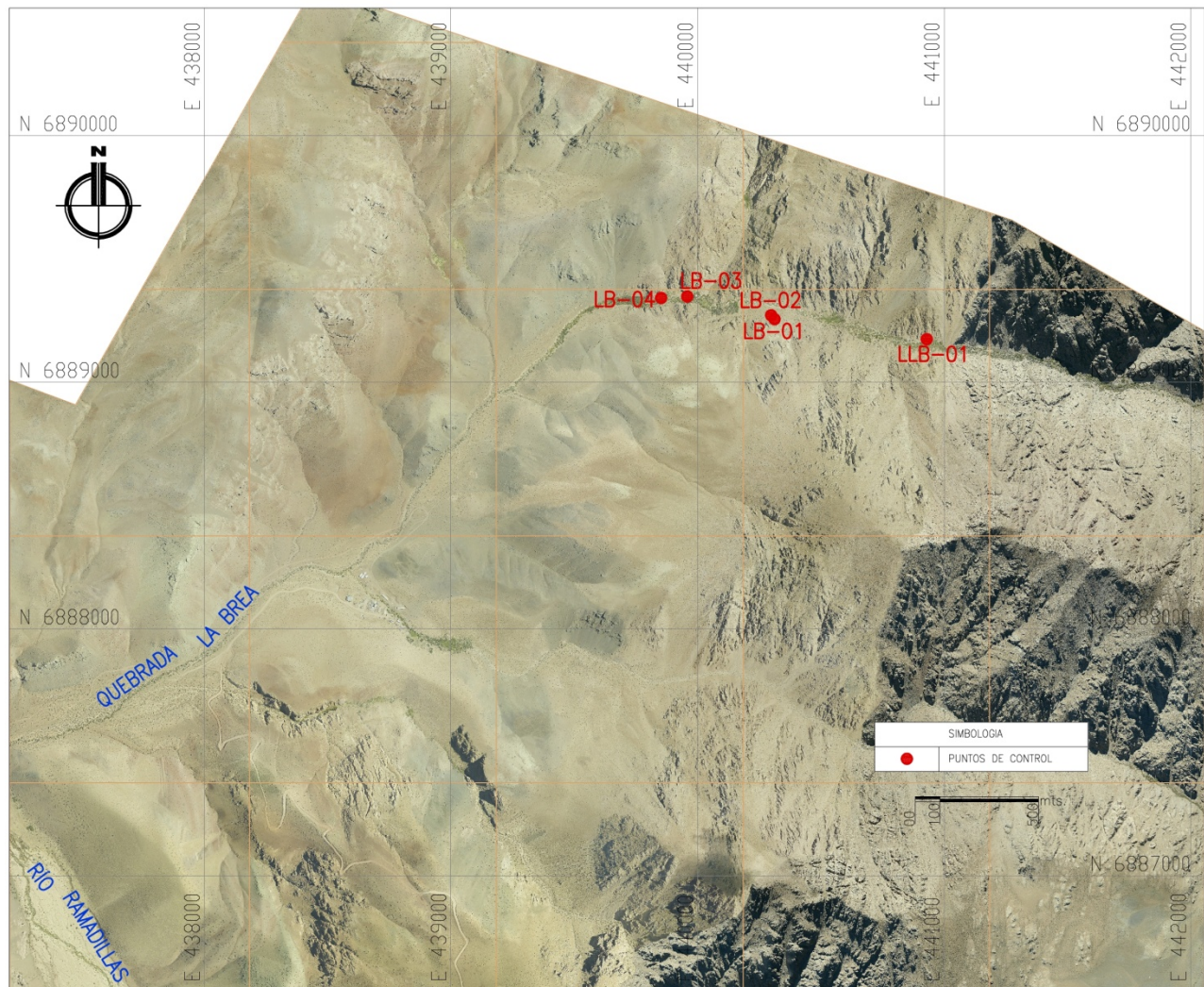


Figura 4.15 Ubicación de Puntos de Control en Quebrada la Brea.

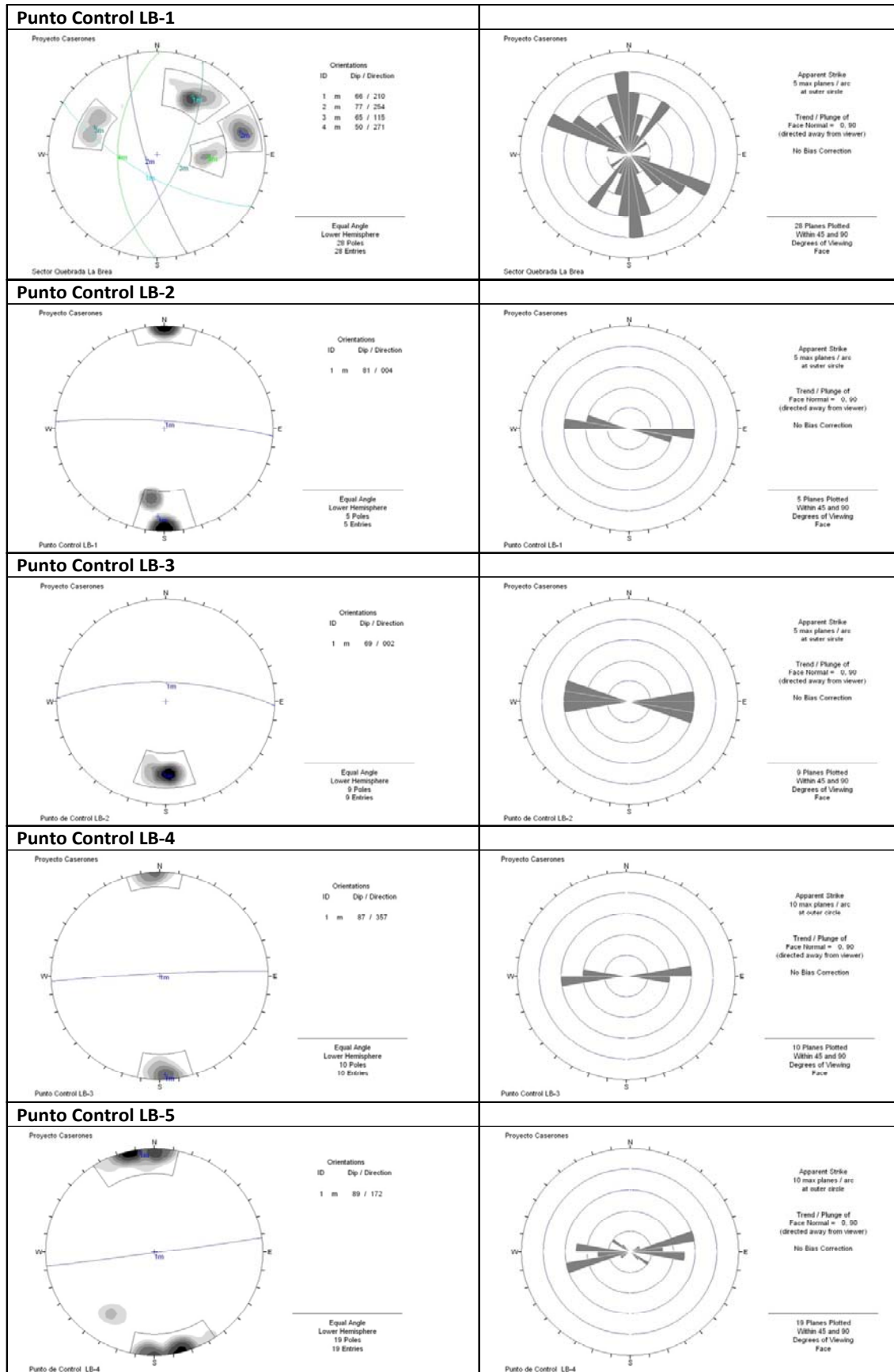


Figura 4.16 Estereograma de polos y roseta de orientación para los puntos de control

4.5 Control de Niveles

Se analizó la variación de los niveles de aguas subterráneas usando la información de los pozos existentes en la cuenca de La Brea. Para ello se contó con la información de 15 puntos. La **Tabla 4-18** entrega información sobre los pozos, como ubicación, cota y profundidad.

Tabla 4-18 Pozos con niveles en sector La Brea

Pozo	Tipo Sondaje	Coordenada UTM		Cota Terreno msnm	Cota Collar msnm	Profundidad Perforación mbnt	Largo Collar msnt
		Norte (m)	Este (m)				
P1-TR	HG	6.887.336,69	437.185,67	2.614,52	2.614,57	50	0,00
P2-TR	HG	6.887.758,53	437.706,45	2.666,68	2.666,71	120	0,27
P3-TR	HG	6.886.638	437.579	2.632,87	2.632,92	46	0,30
P4-TR	HG	6.887.548	437.149	2.630,13	2.630,18	104	0,40
WE-01	HG	6.887.032	437.238	2.611,68	2.611,82	150	1,30
WP-01	HG	6.887.020	437.244	2.612,07	2.612,11	73	1,20
SDL-02	GT	6.888.602	438.412	2.773,53	2.774,33	60	0,80
SDL-03	GT	6.888.376	438.659	2.752,05	2.753,2	70	1,15
SDL-04	GT	6.888.036	438.857	2.780,53	2.781,98	60	1,45
SDL-07	GT	6.888.079	439.200	2.887,69	2.888,2	60,1	0,51
SDL-08	GT	6.887.081	438.596	2.892,28	2.893,28	55	1,00
SDL-09	GT	6.887.699	437.123	2.655,27	2.655,57	75	0,30
SDL-10	GT	6.887.806	437.902	2.679,48	2.680,43	54,5	0,95
SDL-11	GT	6.887.568	437.167	2.630,42	2.631,77	82,1	1,35
SDL-12	GT	6.887.461	437.272	2.654,40	2.654,8	61	0,40

La información completa de los niveles de agua están disponibles en el **Apéndice VI**. La **Figura 4.17** muestra los niveles de agua medidos en los 4 años de monitoreo en la cuenca de La Brea. La ubicación de estos pozos se puede observar en la **Figura 5.1a**.

En los pozos ubicados en la cuenca de La Brea se tiene que los que registran menores profundidades son los pozos WE-01 y WP-01, con valores menores a 10 mbnt. Los que registran mayores profundidades son los pozos SDL-07, SDL-08 y SDL-09, todos con valores próximos a 60 mbnt.

De acuerdo a la información existente, se tiene que el pozo WE-01 es el que presenta mayor cantidad de datos sobre niveles, registrando valores mensuales desde abril del 2007 hasta mayo del 2010. Los pozos P1-TR, P2-TR, P3-TR, P4-TR y WP-01 presentan información mensual desde noviembre del 2008 hasta mayo 2010. Por otro lado, los pozos SDL-03, SDL-04, SDL-07, SDL-08, SDL-09, SDL-10 y SDL-12 son los que presentan menor información, contando con aproximadamente 3 mediciones cada uno, todas realizadas en el año 2010.

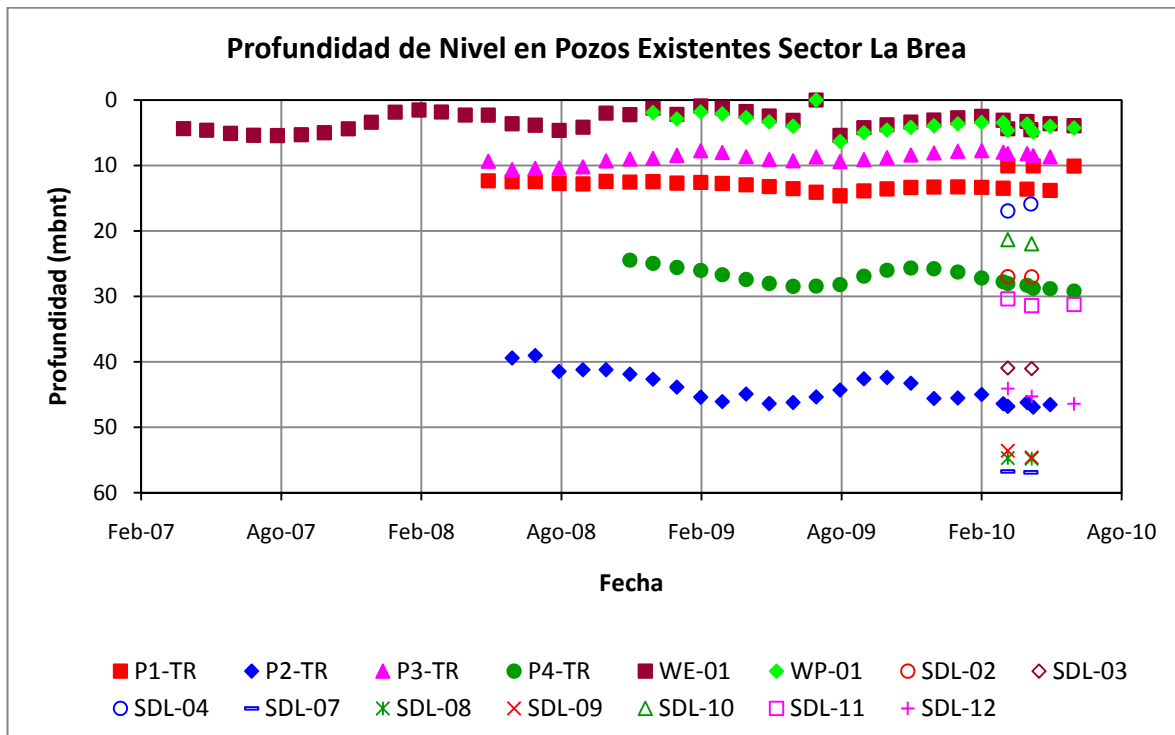


Figura 4.17 Niveles Estáticos en Cuenca La Brea

Por otro lado, con la finalidad de observar de mejor forma las variaciones estacionales y/o anuales de los niveles se presenta la **Figura 4.18** con los niveles piezométricos de los pozos con mayor data, esto es, los pozos P1-TR, P2-TR, P3-TR, P4-TR, WE-01 y WP-01.

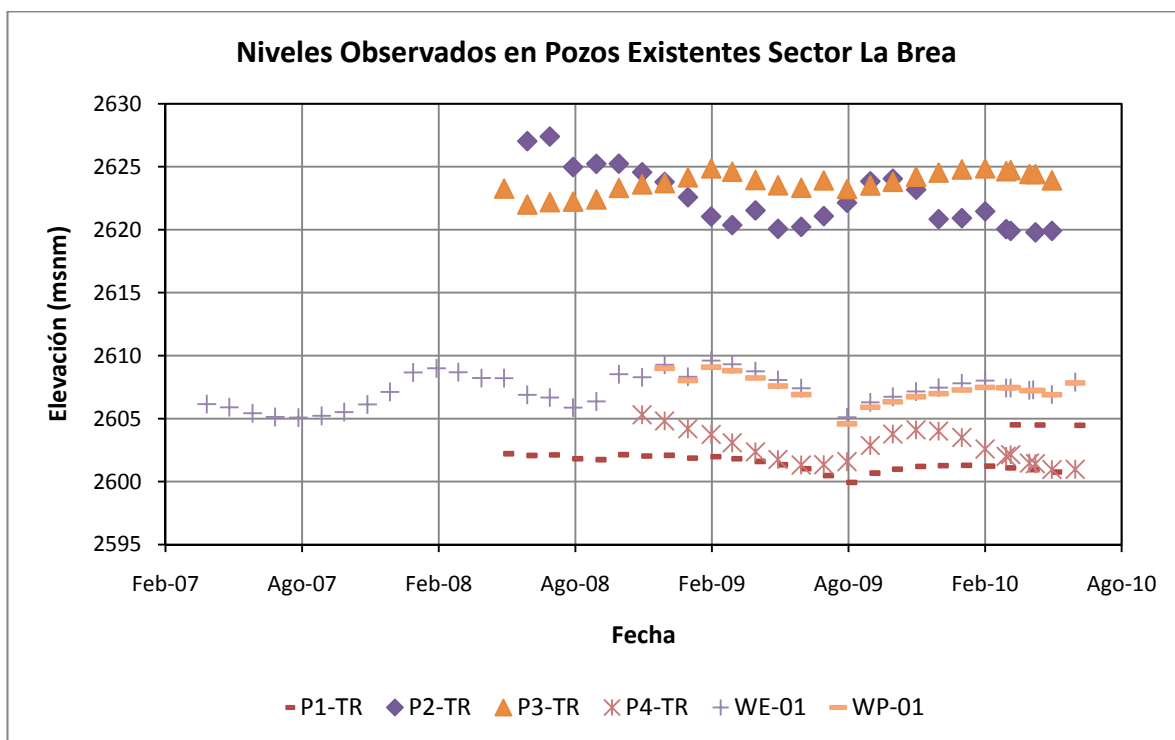


Figura 4.18 Niveles Piezométricos en Cuenca La Brea

Al observar la **Figura 4.18** se tiene que el pozo con mayor data, correspondiente al pozo WE-01, presenta una oscilación estacional de niveles, descendiendo en los meses de invierno y recuperándose durante los meses de verano. Este comportamiento se mantiene a lo largo de los tres años en los que se tiene registro, con una fluctuación de hasta 4.5 m entre una y otra estación del año que hace variar el nivel piezométrico entre 2610 y 2605 msnm aproximadamente. El pozo WP-01 presenta niveles muy similares a los del pozo WE-01, sus niveles fluctúan entre 2604 y 2609 msnm aproximadamente. Los pozos P1-TR y P3-TR muestran la misma tendencia de oscilación, pero en un rango de valores más restringido, o sea, las variaciones de nivel son menos marcadas que las observadas en los pozos anteriores, sus niveles varían alrededor de 2600 y 2604 msnm en el primero de ellos y entre 2622 y 2625 msnm en el segundo de ellos. El pozo P4-TR se observa igualmente con una oscilación similar, pero con un desfase aparente de entre 1 a 2 meses, el cual adelanta la oscilación respecto a los pozos anteriores, los niveles observados se ubican aproximadamente entre 2601 y 2605 msnm. En tanto, el pozo P2-TR presenta oscilación con un desfase aproximado de 4 meses respecto de WE-01, reproduciendo dicha tendencia con anterioridad, los niveles medidos se ubican aproximadamente entre 2627 y 2633 msnm.

Se observa que todos los pozos presentan variaciones durante el período en el que se cuenta con mediciones, y que usualmente se muestran aumentos en la profundidad en los meses de invierno (mayo, junio y julio). Durante los meses más cálidos (noviembre a marzo) se observa que la profundidad disminuye.

De forma de complementar esta información de niveles de agua, se presenta a continuación los datos de niveles de los pozos construidos durante esta campaña. El detalle de las mediciones se adjunta en el **Apéndice VI**, en tanto que en la **Figura 4.19** se grafican los niveles de estos nuevos puntos. Hay que tener presente que los primeros datos de nivel en un punto inmediatamente después de su perforación no representan directamente las condiciones del acuífero, pero en este caso, se han mantenido en general las tendencias esperadas, lo que habla de que los datos son representativos.

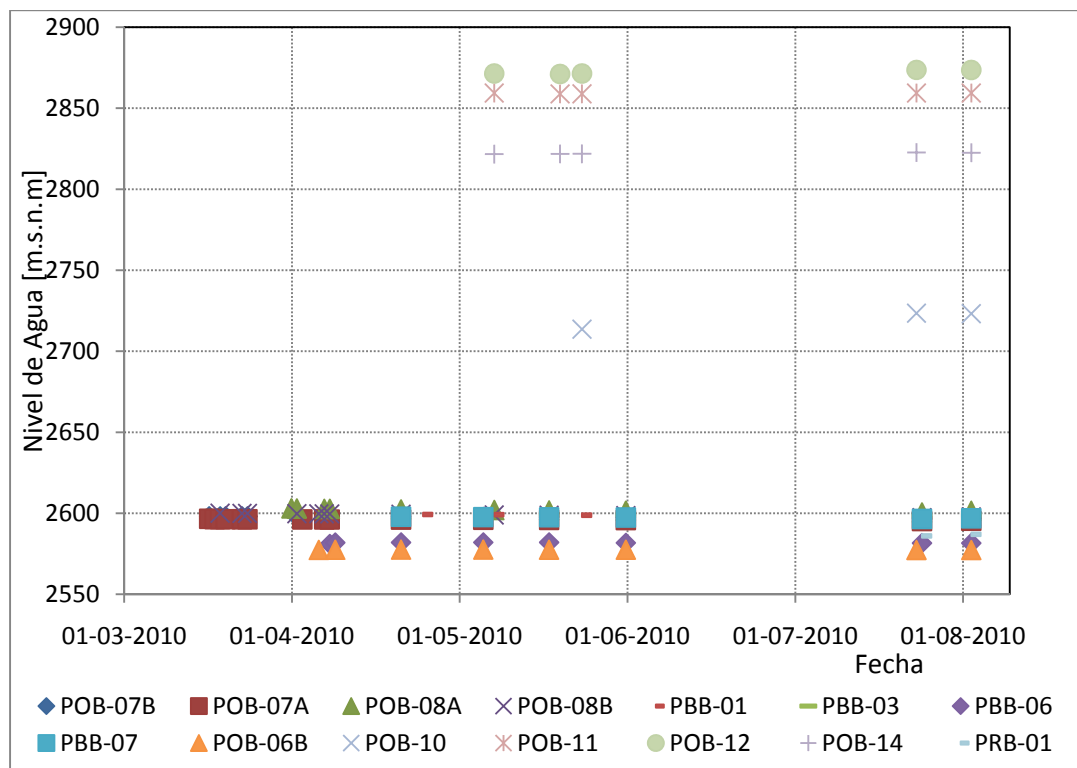


Figura 4.19 Niveles de agua en los pozos perforados en la presente campaña

Por otra parte, en la **Figura 4.20** se grafican los niveles para un ciclo comprendido entre marzo y agosto, donde se puede comprobar lo mencionado anteriormente en relación a la fluctuación estacional de los niveles, con aumentos en la profundidad en los meses de invierno (mayo, junio y julio).

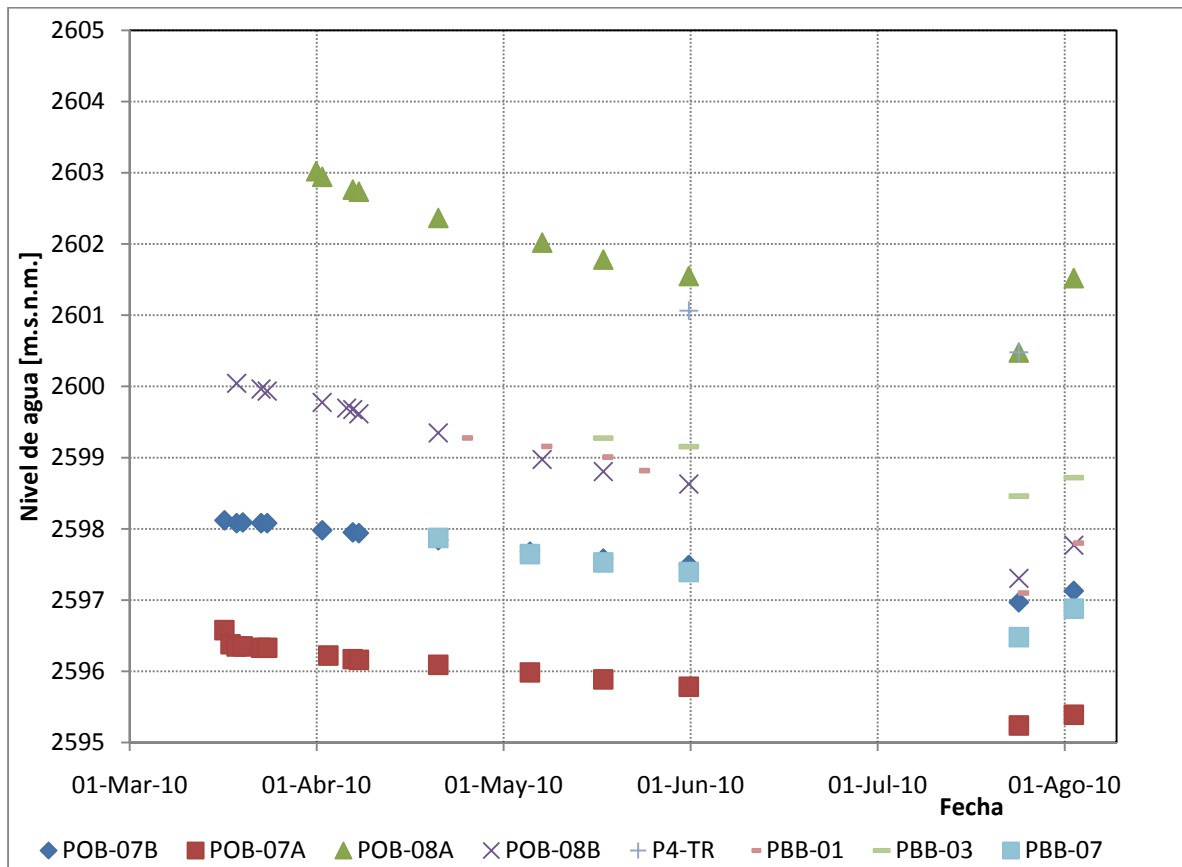


Figura 4.20 Niveles de agua en los pozos perforados en la presente campaña (detalle).

4.6 Hidroquímica

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 con ocasión al presente estudio se monitorearon los parámetros de T°, pH, TDS y Conductividad del agua subterránea in situ, durante el desarrollo de las pruebas de bombeo en los pozos PBB-1, PBB-07 y PBB-8B en la quebrada La Brea (**ver Tabla 4-19**).

Tabla 4-19 Parámetros de Calidad de Agua In Situ

Pozo	Fecha	Hora	Q [l/s]	Temp °C	pH	TDS ppt	Conductividad mS
PBB-01	09/06/2010*	10:37	4	14,2	7,35	0,42	0,71
	05/07/2010*	12:18	5	13,7	7,38	0,43	0,72
PBB-07	16/06/2010	10:50	9	14,5	7,09	0,43	0,72
	16/06/2010	14:48	9	16,0	7,26	0,48	0,83
	16/06/2010*	16:30	9	15,7	7,34	0,49	0,83
	05/07/2010*	12:27	6	15,2	7,45	0,37	0,64
POB-08B	04/06/2010	11:40	3	15,9	6,93	0,46	0,78
	04/06/2010	12:30	3	16,7	6,88	0,46	0,77
	04/06/2010	14:40	3	17,3	6,96	0,47	0,81
	04/06/2010*	15:15	3	17,1	7,04	0,48	0,79
	05/07/2010*	12:35	2	15,1	7,37	0,44	0,74

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

También se tomó una muestra por pozo para realizar análisis físico químico en laboratorio los que se señalan con asterisco en la tabla anterior.

Los parámetros analizados, los métodos de análisis para cada elemento y los resultados obtenidos se encuentran en la siguiente tabla y los certificados de Laboratorio se encuentran en el **Apéndice VII:**

Tabla 4-20 Resultados de Laboratorio para Calidad de Agua en La Brea

		Identificación		PBB-01		PBB-07		POB-08B	
		Tipo de Agua		Subterránea		Subterránea		Subterránea	
		Fecha Muestreo		09-Jun-10		05-Jul-10		04-Jun-10	
		Hora Muestreo		14:20		12:10		16:30	
		Certificado ALS		SE1000456-1		SE1000562-1		SE1000483-1	
				SE1000562-3		SE1000562-3		SE1000442-1	
				SE1000562-2					
	Parámetro	Unid ades	método de análisis	PBB-01		PBB-07		POB-08B	
Metales Disueltos			Digestión ácida, usando tanto Hotblock como Horno Microonda o Filtración (EPA Method 3005A). El análisis instrumental es por Inducción de Plasmaacoplado - Espectrofotometría de emisión óptica (EPA Method 6010B) y por inducción Plasma acoplado - espectrofotometría de masa (EPA Method 6020A) (1)(5)						
Plata Disuelto (Ag)	mg/l	<0.000050		<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	
Aluminio Disuelto (Al)	mg/l	<0.0050		<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	
Arsénico Disuelto (As)	mg/l	0.00091		0.00087	0.00103	0.00086	0.00156	0.00072	
Boro Disuelto (B)	mg/l	0.097		0.103	0.097	0.100	0.115	0.093	
Bario Disuelto (Ba)	mg/l	0.0183		0.0177	0.0183	0.0137	0.0187	0.0153	
Berilio Disuelto (Be)	mg/l	<0.0025		<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Bismuto Disuelto (Bi)	mg/l	<0.0025		<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Calcio Disuelto (Ca)	mg/l	109		99.0	109	80.0	102	93.5	
Cadmio Disuelto (Cd)	mg/l	<0.00025		<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	
Cobalto Disuelto (Co)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	
Cromo Disuelto (Cr)	mg/l	<0.0025		<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Cobre Disuelto (Cu)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	
Hierro Disuelto (Fe)	mg/l	<0.030		<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	
Potasio Disuelto (K)	mg/l	3.2		<2.0	2.7	<2.0	2.9	<2.0	
Litio Disuelto (Li)	mg/l	0.0474		0.0375	0.0463	0.0361	0.0438	0.0344	
Magnesio Disuelto (Mg)	mg/l	37.3		32.1	31.4	26.2	39.3	34.1	
Manganeso Disuelto (Mn)	mg/l	0.00233		0.00192	0.00286	0.00198	0.00559	0.00279	
Molibdeno Disuelto (Mo)	mg/l	0.00092		0.00069	0.00101	0.00084	0.00084	0.00068	
Sodio Disuelto (Na)	mg/l	34.7		29.1	29.7	26.5	37.3	30.3	
Níquel Disuelto (Ni)	mg/l	<0.0025		<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Fósforo Disuelto (P)	mg/l	<0.30		<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	
Plomo Disuelto (Pb)	mg/l	<0.00025		<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	
Antimonio Disuelto (Sb)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	
Selenio Disuelto (Se)	mg/l	<0.0050		<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	
Silicio Disuelto (Si)	mg/l	12.2		10.0	11	9.79	11.9	10.0	
Estañó Disuelto (Sn)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	
Estroncio Disuelto (Sr)	mg/l	0.687	0.620	0.656	0.52	0.965	0.794		
Titanio Disuelto (Ti)	mg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010		
Talio Disuelto (Tl)	mg/l	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050		
Uranio Disuelto (U)	mg/l	0.0159	0.0136	0.0132	0.00948	0.0159	0.0127		
Vanadio Disuelto (V)	mg/l	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050		
Zinc Disuelto (Zn)	mg/l	0.0298	0.0105	0.019	0.0074	0.0098	0.0069		
Mercurio Disuelto (Hg)	mg/l	Cold-Vapor Atomic Absorption Spectrometric Method. APHA 3112-B, page 3-23 to 3-24, 21st ed.2005 (1)		<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	
Metales Total			Digestión ácida, usando tanto Hotblock como Horno Micronda o Filtración (EPA Method 3005A). El análisis instrumental es por Inducción de Plasmaacoplado - Espectrofotometría de emisión óptica (EPA Method 6010B) y por inducción Plasma acoplado - espectrofotometría de masa (EPA Method 6020A) (1)(5)						
Plata Total (Ag)	mg/l	<0.000050		<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	<0.000050	
Aluminio Total (Al)	mg/l	0.0086		<0.0050	0.0061	<0.0050	<0.0050	0.298	
Arsénico Total (As)	mg/l	0.00099		0.00089	0.00122	0.00093	0.00169	0.00076	
Boro Total (B)	mg/l	0.1		0.110	0.103	0.104	0.117	0.100	
Bario Total (Ba)	mg/l	0.0184		0.0184	0.0191	0.0141	0.0191	0.0167	
Berilio Total (Be)	mg/l	<0.0025		<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Bismuto Total (Bi)	mg/l	<0.0025		<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Calcio Total (Ca)	mg/l	114		105	147	84.5	106	101	
Cadmio Total (Cd)	mg/l	<0.00025		<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	
Cobalto Total (Co)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	
Cromo Total (Cr)	mg/l	<0.0025		<0.0025	0.0026	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Cobre Total (Cu)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	0.00054	<0.00050	
Hierro Total (Fe)	mg/l	<0.030		<0.030	0.083	<0.030	0.054	<0.030	
Potasio Total (K)	mg/l	3.3		2.1	2.8	<2.0	3.0	2.2	
Litio Total (Li)	mg/l	0.0482		0.0392	0.0483	0.0364	0.0446	0.0368	
Magnesio Total (Mg)	mg/l	40		33.4	34.9	27.4	41.1	36.4	
Manganeso Total (Mn)	mg/l	0.00246		0.00207	0.00449	0.00204	0.00600	0.00292	
Molibdeno Total (Mo)	mg/l	0.00097		0.00094	0.00102	0.00084	0.00086	0.00081	
Sodio Total (Na)	mg/l	36.9		29.5	31.3	27.1	37.6	31.9	
Níquel Total (Ni)	mg/l	<0.0025		<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	<0.0025	
Fósforo Total (P)	mg/l	<0.30		<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30	
Plomo Total (Pb)	mg/l	<0.00025		<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	<0.00025	
Antimonio Total (Sb)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	
Selenio Total (Se)	mg/l	<0.0050		<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	<0.0050	
Silicio Total (Si)	mg/l	12.5		10.4	11.4	10.2	12.0	10.6	
Estañó Total (Sn)	mg/l	<0.00050		<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	
Estroncio Total (Sr)	mg/l	0.689	0.670	0.688	0.529	0.969	0.880		
Titanio Total (Ti)	mg/l	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010		
Talio Total (Tl)	mg/l	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050	<0.00050		
Uranio Total (U)	mg/l	0.0165	0.0144	0.0154	0.01	0.0167	0.0138		
Vanadio Total (V)	mg/l	<0.0050	<0.0050	0.0052	<0.0050	<0.0050	<0.0050		
Zinc Total (Zn)	mg/l	0.0327	0.0120	0.0208	0.0078	0.0105	0.0084		
Mercurio Total (Hg)	mg/l	Cold-Vapor Atomic Absorption Spectrometric Method. APHA 3112-B, page 3-23 to 3-24, 21st ed.2005 (1)		<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	<0.00005	

Tabla 4.20 Resultados de Laboratorio para Calidad de Agua en La Brea – (Continuación)

		Identificación	PBB-01		PBB-07		POB-08B	
		Tipo de Agua	Subterránea	Subterránea	Subterránea	Subterránea	Subterránea	Subterránea
		Fecha Muestreo	09-Jun-10	05-Jul-10	16-Jun-10	05-Jul-10	04-Jun-10	05-Jul-10
		Hora Muestreo	14:20	12:10	16:30	12:20	15:20	12:30
		Certificado ALS	SE1000456-1	SE1000562-1	SE1000483-1	SE1000562-3	SE1000442-1	SE1000562-2

Parámetro		Unidades	método de análisis	PBB-01		PBB-07		POB-08B	
Parámetros Físico Químicos									
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	Titration Method. APHA 2320-B, page 2-27 to 2-29, 21st ed.2005 (1)	130	163	151	129	165	161	
Alcalinidad Bicarbonato	mg/L CaCO3		130	163	151	129	165	161	
Alcalinidad Carbonato	mg/L CaCO3		<1	<1	<1	<1	<1	<1	
Conductividad	µs/cm	Laboratory Method. APHA 2510-B, page 2-47 to 2-48, 21st ed.2005 (1)	920	957	900	802	909	922	
pH	pH	Electrometric Method, APHA 4500-H+-B, page 4-90 to 4-94, 21st ed.2005 (1)	7.93	7.70	7.85	8.01	7.80	7.55	
Parámetros Inorgánicos									
Cloruro (Cl)	mg/l	Argentometric Method. APHA 4500-Cl-B, page 4-70 to 4-71, 21st ed.2005 (1)	16	15	15	15	14	14	
Cianuro Total (CN)	mg/l	Total Cyanide after distillation by Flow Injection Analysis .APHA 4500 CN- C y 4500 CN- N, page 4-39 to 4-40-page 4-53 to 4-54, 21st ed.2005 (1)	<0,002	<0.01	<0,01	<0.01	<0,01	<0.01	
Nitrogeno Nitrito (N- NO2)	mg/L	Cadmium Reduction Flow Injection Method. APHA 4500-NO3-I, page 4-127 - 4-129, 21st ed.2005 (1)	<0,01	<0.01	<0,01	<0.01	<0,01	<0.01	
Nitrogeno Nitrato (N- NO3)	mg/L		0.5	0.32	0.4	1.21	0.28	0.35	
Sulfato (SO4)	mg/l	Gravimetric Method with Drying of Residue. APHA 4500-SO4-D, page 4-187 to 4-188, 21st ed.2005 (1)	343	336	318	263	323	325	

(1) "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" 21th Ed. 2005 APHA WWA.

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, Fe²⁺, Fe³⁺, NH₄, Mn, Ni, Zn

Aniones: Cl, F, SO₄, CO₃, HCO₃, NO₃

Los balances calculados son menores al 10%, por lo que se consideran válidos (ver **Tabla 4-21**):

Tabla 4-21 Resultados Balance Iónico Muestras en La Brea

Pozo	Fecha de muestreo	Suma Aniones (meq/L)	Suma Cationes (meq/L)	Balance (%)
PBB-01	09-Jun-10	9,78	10,7	-4,49
PBB-01	05-Jul-10	10,13	9,35	4,01
PBB-07	16-Jun-10	9,57	11,67	-9,87
PBB-07	05-Jul-10	8,06	7,72	2,16
POB-08B	04-Jun-10	9,88	10,41	-2,66
POB-08B	05-Jul-10	9,84	9,54	1,54

4.6.1 Clasificación según el Diagrama de Piper

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 calidad en los tres pozos bombeados y son del tipo sulfatadas cálcicas.

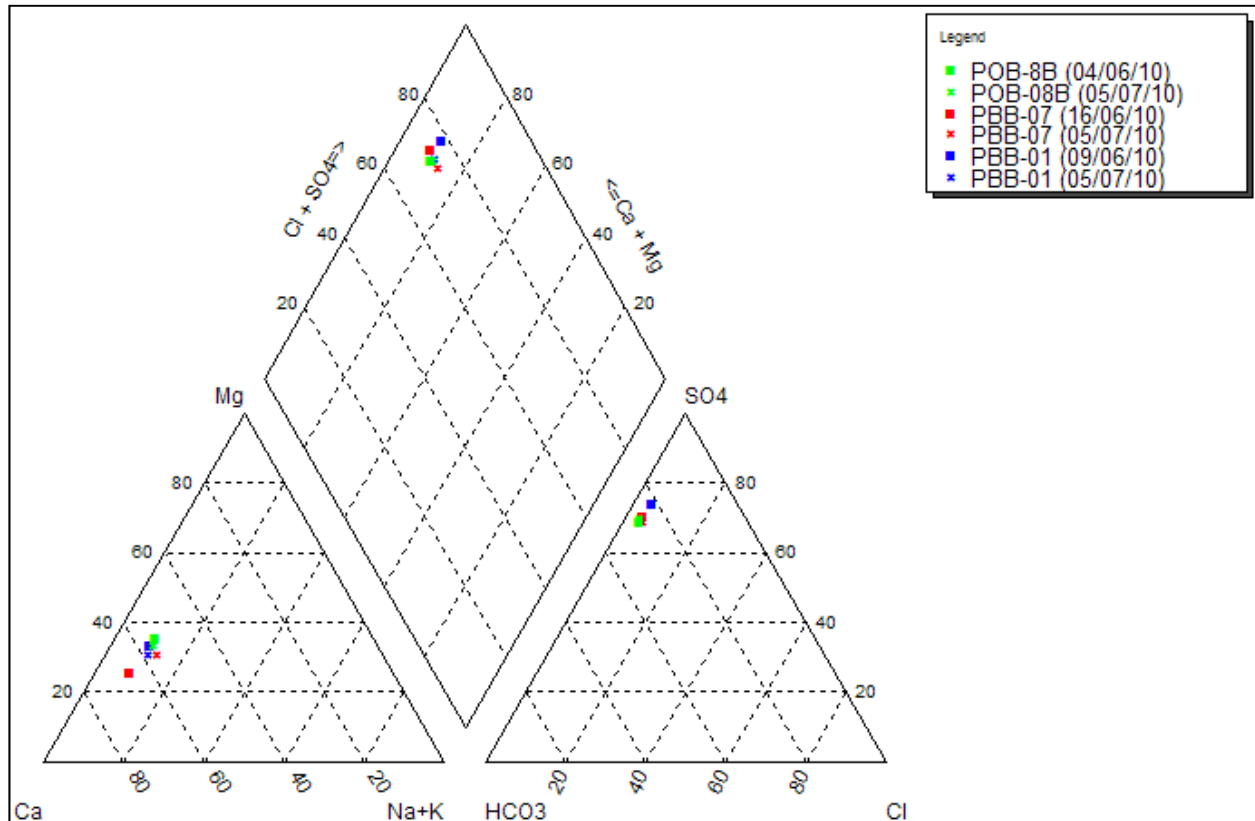


Figura 4.21 Diagrama de Piper

4.6.2 Diagramas de Stiff

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 sólo por su forma.

En estos gráficos, que pueden verse en la **Figura 4.22**, se corrobora que las aguas subterráneas alumbradas en la quebrada La Brea son similares.

4.6.3 Conclusiones Hidroquímica

Las aguas subterráneas alumbradas desde la barrera hidráulica ubicada al pie de la presa del depósito de las Lamas en la quebrada La Brea tienen una composición fisicoquímica similar y corresponde a aguas del tipo sulfatadas cálcicas y neutras.

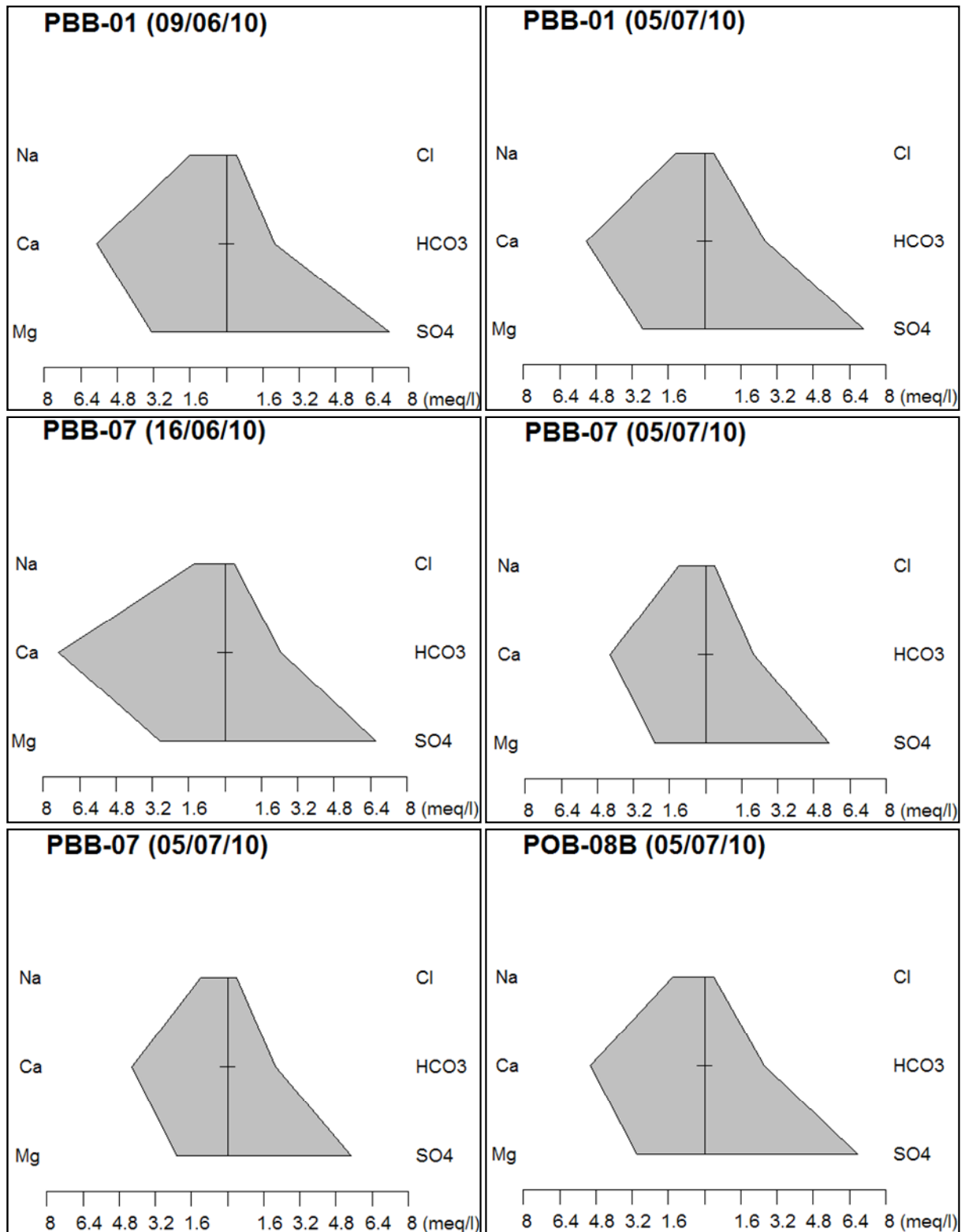


Figura 4.22 Diagramas de Stiff.

5 Hidrogeología

Los trabajos de terreno realizados, tales como perforación de nuevos sondeos y pruebas de permeabilidad, junto a la revisión de los antecedentes existentes, permiten presentar una hidrogeología conceptual más detallada, sin embargo es conceptualmente muy similar que la establecida en el modelo anterior.

A continuación se describen las características de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de la quebrada La Brea.

5.1 Unidades hidrogeológicas

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

En el **Apéndice III** se muestran, junto a la descripción detallada de cada sondeo perforado durante esta campaña, columnas litológicas que agrupan unidades litológicas. Por otro lado, se cuenta con pruebas de permeabilidad realizadas en sondeos geotécnicos (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 para las distintas unidades.

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 esta compilada en el **Apéndice VI**.

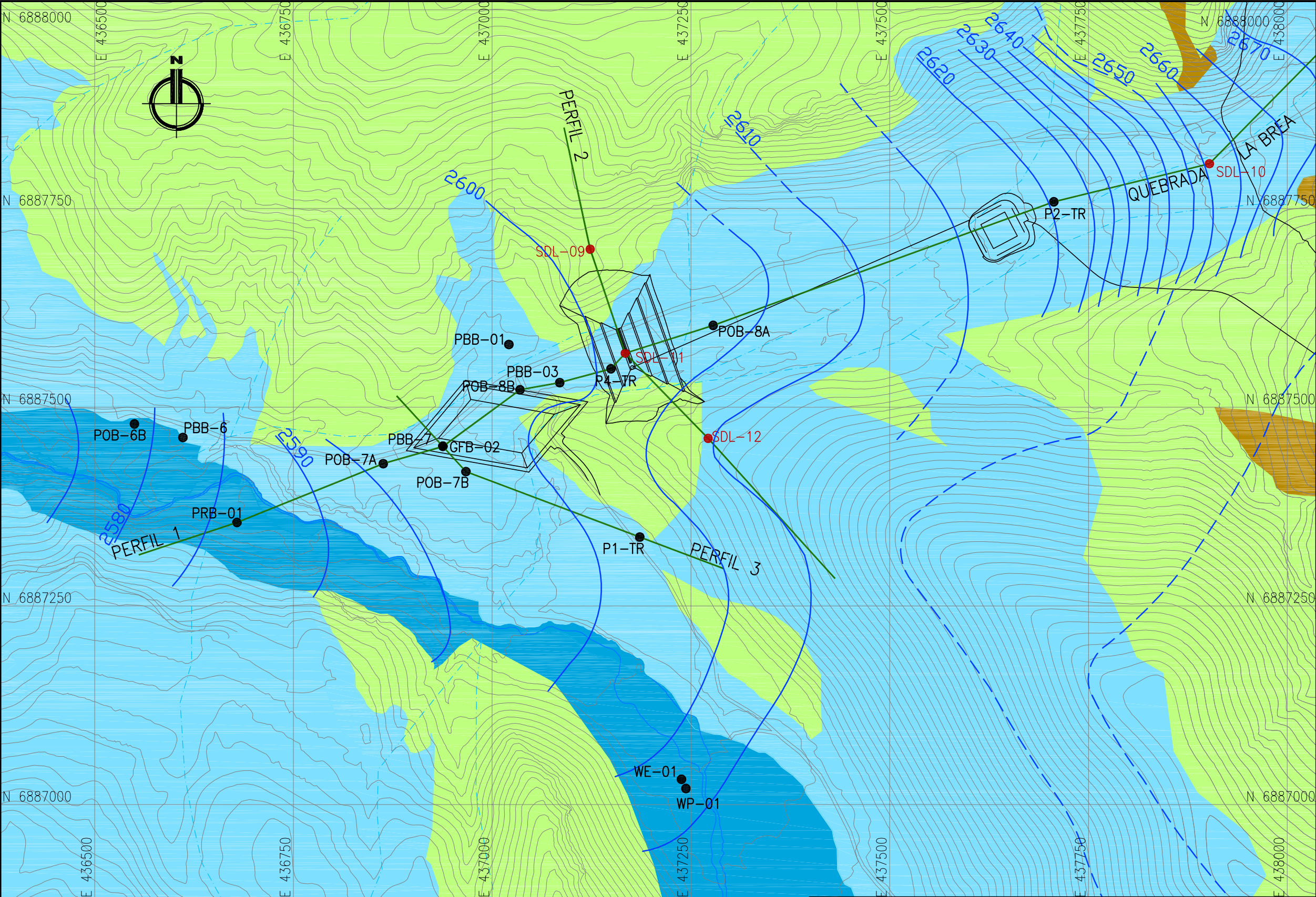
Con toda esta información reunida se definieron cinco unidades hidrogeológicas, cuyas características se describen a continuación y cuya disposición espacial se aprecia en el mapa hidrogeológico de la **Figura 5.1**. Además se realizaron 3 perfiles hidrogeológicos, donde se pueden apreciar las unidades 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 36 y 46m reconocidos en los pozos WE-01 y WP-01 respectivamente. Los niveles de agua subterránea registrados se encuentran muy cercanos al nivel del río por lo que se supone una conexión entre acuífero y curso superficial.

Las permeabilidades registradas están en el orden de 1 a 6 m/d y las transmisividades entre 75 y 480 m²/d.



ESQUEMA DE COLORES DE CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS
(Struckmeier, W;Margat,J.,1995)

INTERGRANULAR FLUJO FISURADO


ACUIFEROS

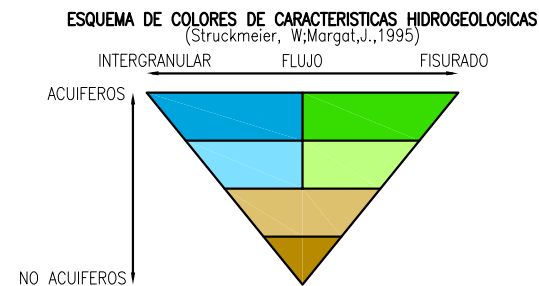
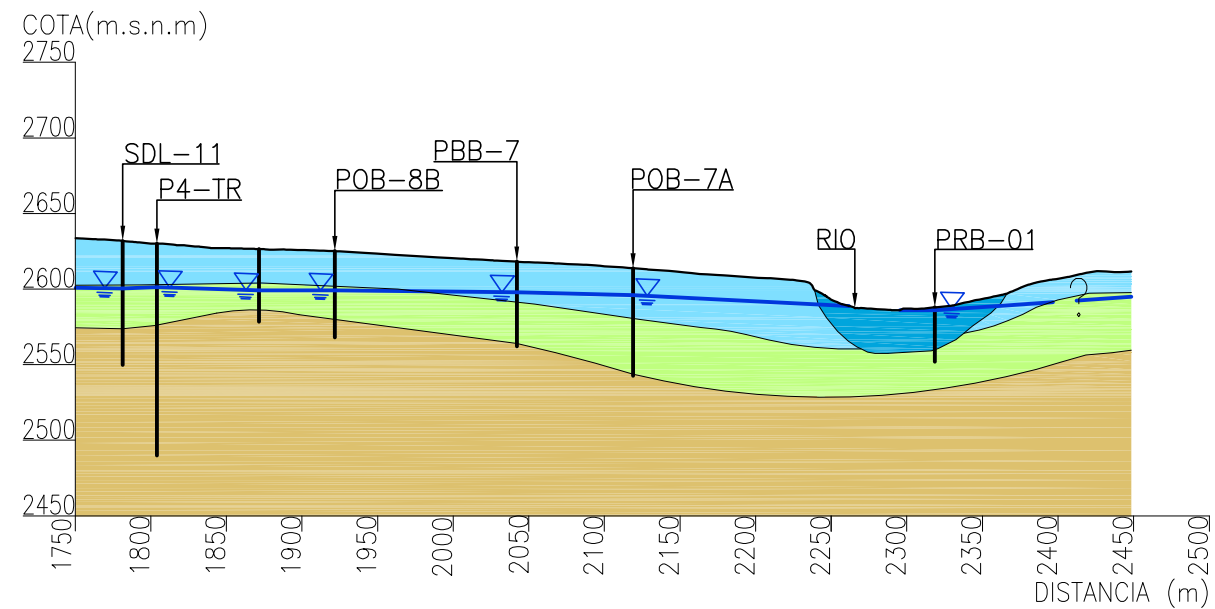
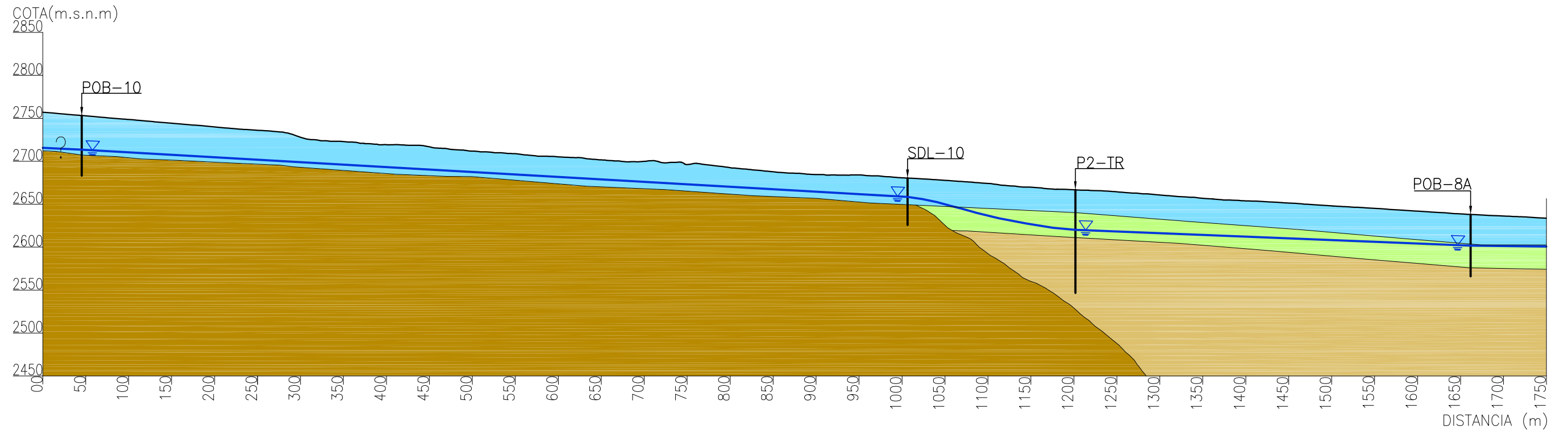
NO ACUIFEROS

UNIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	FORMACIONES
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESCENCIALMENTE INTERGRANULAR			
A.1		ALTA A MEDIA	Qf
A.2		MEDIA A BAJA	Qa
B. ROCAS CON FLUJO ESCENCIALMENTE A TRAVES DE FRACTURAS			
B.2		MEDIA A BAJA	RSVa
C. ROCAS CON LIMITADO A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRANEAS			
C.1		BAJA A MUY BAJA	RSVf
C.2		MUY BAJA A NULA	RI

LEYENDA

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

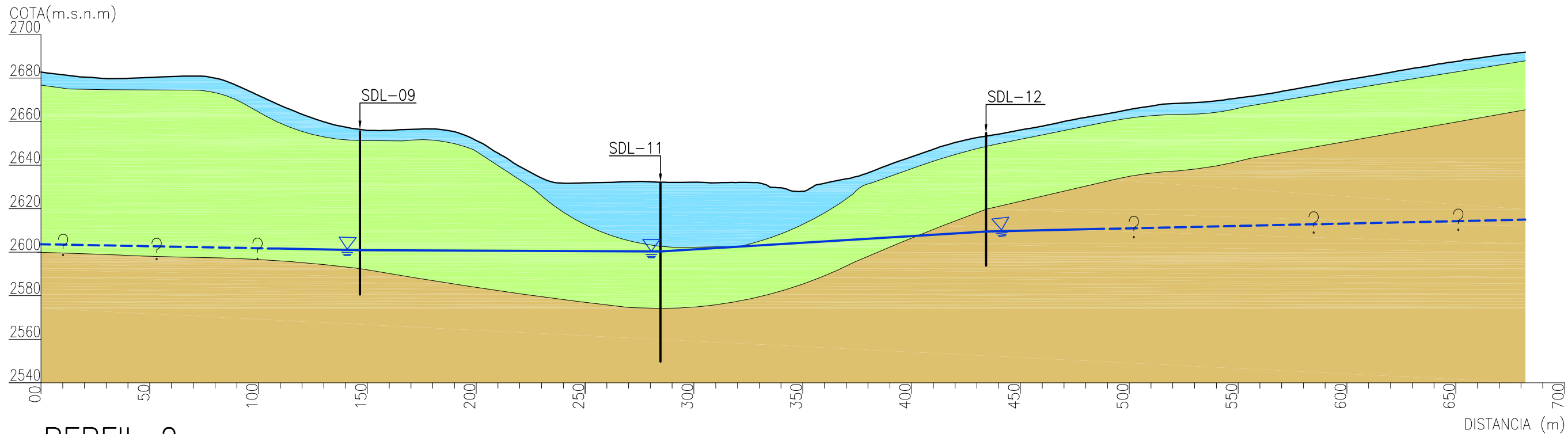
													PREPARADO POR:  SRK Consulting Engineers and Scientists				CLIENTE  CASERONES PROYECTO DE MINERIA LUMINA COPPER CHILE S.A.				PROYECTO ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS			
													DIBUJO	N. MORALES		AGOSTO 2010	CLIENTE	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TITULO: DETALLE MAPA HIDROGEOLOGICO SECTOR LA BREA			
													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. PROJ.	APROBACION SRK	APROBACION CLIENTE	REV.	FECHA	NUMERO DE PLANO	REV.	DESCRIPCION			SRK	NOMBRE	FIRMA	FECHA	N° PROYECTO	ESCALA	N° FIGURA	REV.
																					02-2161-02	1:12.500	5.1.b	0



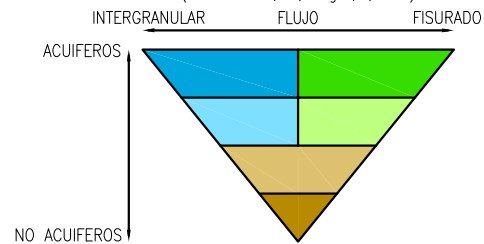
UNIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	FORMACIONES
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESCENCIALMENTE INTERGRANULAR			
A.1		ALTA A MEDIA	Qf
A.2		MEDIA A BAJA	Qa
B. ROCAS CON FLUJO ESCENCIALMENTE A TRAVES DE FRACTURAS			
B.2		MEDIA A BAJA	RSVa
C. ROCAS CON LIMITADO A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRANEAS			
C.1		BAJA A MUY BAJA	RSVf
C.2		MUY BAJA A NULA	RI

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

PREPARADO POR:												CLIENTE				PROYECTO			
																ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS			
DIBUJO N. MORALES AGOSTO 2010												CLIENTE	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TITULO:			
PROYECTO C. FERNANDEZ AGOSTO 2010												ING.PROYECTO			00/00/00	PERFIL HIDROGEOLOGICO 1 SECTOR LA BREA			
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.
SRK NOMBRE FIRMA FECHA																02-2161-02	1:5.000	5.2	0
REV.	FECHA	REVISION	POR	ING.PROY.	JEFE. PROY.	APROBACION SRK	APROBACION CLIENTE	REV.	FECHA	NUMERO DE PLANO	REV.	DESCRIPCION							

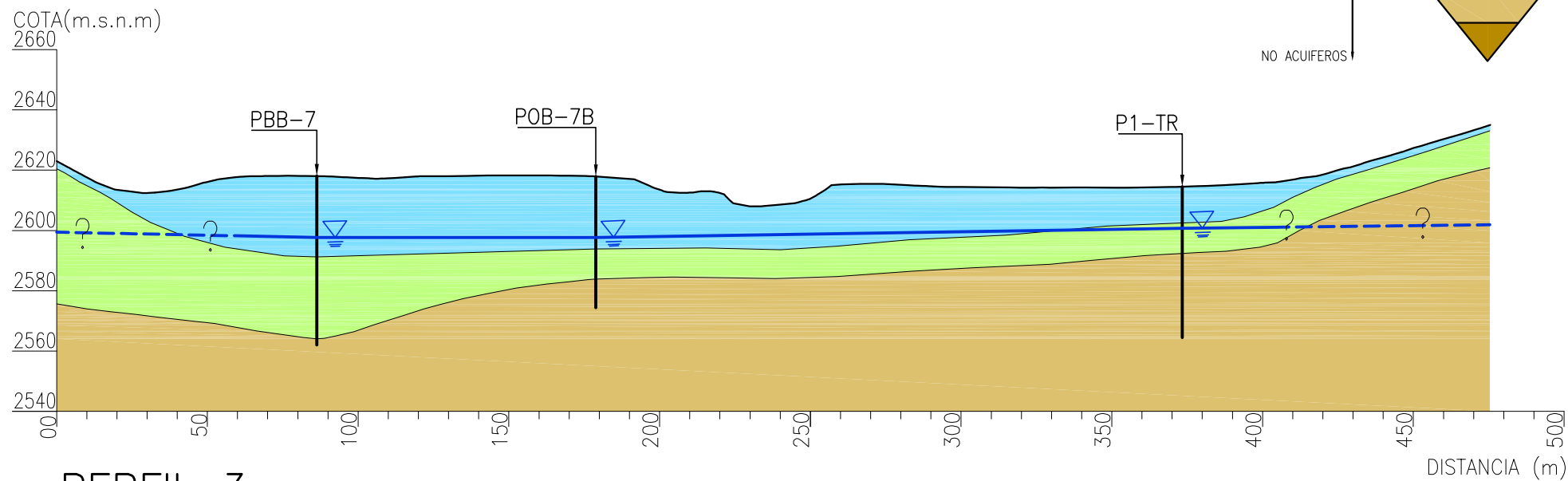


ESQUEMA DE COLORES DE CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS
(Struckmeier, W;Margat,J.,1995)



UNIDAD	SIMBOLO	IMPORTANCIA HIDROGEOLOGICA RELATIVA	FORMACIONES
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESSENCIALMENTE INTERGRANULAR			
A.1		ALTA A MEDIA	Qf
A.2		MEDIA A BAJA	Qa
B. ROCAS CON FLUJO ESCENCIALMENTE A TRAVES DE FRACTURAS			
B.2		MEDIA A BAJA	RSVa
C. ROCAS CON LIMITADO A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRANEAS			
C.1		BAJA A MUY BAJA	RSVf
C.2		MUY BAJA A NULA	RI

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



PREPARADO POR:				CLIENTE				PROYECTO			
								ESTUDIOS HIDROGEOLOGICOS COMPLEMENTARIOS			
DIBUJO	N. MORALES		AGOSTO 2010	CLIENTE	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TITULO: PERFILES HIDROGEOLOGICOS 2 Y 3 SECTOR LA BREA			
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.
SRK	NOMBRE	FIRMA	FECHA					02-2161-02	1:2.000	5.3	0

5.1.2 Qa Depósitos aluviales

Se encuentran en los cursos de las quebradas La Brea y otras afluentes a esta. Corresponden principalmente a depósitos aluviales y en menor medida 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. Se incluyen además en esta unidad los depósitos coluviales, de remoción en masa y otros depósitos no consolidados de baja permeabilidad.

Los espesores encontrados varían desde unos pocos metros en las nacientes de la quebrada La Brea (POB-10 a POB-15) hasta 45m (POB-7A) en las cercanías de la confluencia con el río Ramadillas.

En esta unidad se realizaron más de 40 ensayos de permeabilidad, cuyos resultados indican Conductividades hidráulicas en el orden de 10^{-2} a 10^{+2} m/d con un promedio de 24 m/d. La Transmisividad calculada es de $5,7 \cdot 10^{+2}$ m²/d en promedio y el coeficiente de almacenamiento de 10^{-2} .

Niveles de agua subterránea se encuentran en la mitad inferior de esta unidad.

5.1.3 RSVa Rocas Sedimentarias y Volcánicas Meteorizadas

Corresponden a rocas sedimentarias (principalmente areniscas y conglomerados) y volcánicas (lavas andesíticas) alteradas tanto por meteorización como fracturamiento.

Las litologías que abarca esta unidad corresponden a la parte superior de la serie de estratos volcánicos y sedimentarios de las formaciones litológicas La Ternera, Lagunillas y Quebrada Seca, dispuestos en paquetes de decenas de metros, con manteos de 25 a 30° al oeste, que se encuentran en el sector noroeste de la quebrada La Brea y en parte de la ladera este sobre las rocas intrusivas. Ambas litologías están afectadas por la meteorización generalizada, pero las permeabilidades medidas en estratos específicos de rocas sedimentarias, en general, presentan mayor permeabilidad que los estratos volcánicos. Esta diferencia se debe a la mayor porosidad primaria de las areniscas y conglomerados, además del retrabajo secundario de matriz. Pero también se encuentran estratos volcánicos con gran cantidad de vesículas y reemplazo mineral. Finalmente, las características hidráulicas generalizadas no varían de manera significativa.

Esta unidad puede encontrarse bajo los depósitos fluviales o aluviales en las quebradas o en superficie, cubierta por delgadas capas de coluvio, en las laderas de la quebrada. El grado de alteración va disminuyendo con la profundidad hasta encontrar las rocas menos alteradas. Dicho límite inferior se determinó por criterios litológicos, pruebas de permeabilidad y métodos geofísicos, realizados en estudios actuales y previos, encontrándose espesores de entre 20 y 50m. Los respaldos de las pruebas de permeabilidad están en el **Apéndice II** y de los mapeos en **Apéndice III**.

De esta unidad se poseen la mayor cantidad de datos, registrándose un amplio rango de permeabilidades entre 10^{-3} y 10^{+1} m/d, con un promedio de 2,98 m/d. Los valores de transmisividad obtenidos promedian 10^{+2} m²/d y un coeficiente de almacenamiento de 10^{-3} .

La variabilidad en el rango de conductividades hidráulicas se explica por la anisotropía de los estratos y sus diferentes litologías lo que implica una disminución de permeabilidad en profundidad.

En la mayoría de los sondeos, esta unidad se encuentra saturada, con niveles estáticos sobre su límite superior, es decir en la mitad inferior de los depósitos aluviales.

5.1.4 RSVf Rocas Sedimentarias y Volcánicas Frescas

Corresponden a las mismas rocas de la unidad anterior sin alteración o meteorización, por lo que sus características hidráulicas corresponden a acuitardos.

Se han registrado permeabilidades entre 10^{-1} y 10^{-3} m/d, esto es, hasta 2 órdenes de magnitud menores que la unidad superior.

5.1.5 RI Rocas Intrusivas

En esta unidad se agrupan todas las rocas intrusivas con edades desde paleozoicas a cenozoicas. Esta unidad aflora en la parte oriental del área estudiada y se encuentra muy cerca de la superficie en el sector norte.

Las rocas más antiguas están en mayor medida afectadas por meteorización y fracturamiento, sobretodo en zonas donde ellas a su vez han sido intruidas. Pero esta mayor conductividad está muy restringida localmente.

Las escasas pruebas realizadas indican una permeabilidad promedio de $6 \cdot 10^{-2}$ m/d. Estas permeabilidades están calculadas en la parte superior de esta unidad, que es la que se encuentra más afectada por meteorización y erosión previa a la depositación de otras unidades sobre ella. Es por esto que se consideran como permeabilidades máximas para esta unidad.

5.1.6 Distribución de las unidades hidrogeológicas

Si bien es posible definir puntualmente en cada pozo existente las unidades hidrogeológicas mencionadas, la disposición espacial se las mismas se trabaja en perfiles que den cuenta de la conceptualización general, tal como se muestra en las **Figura 5.2 y Figura 5.3**. Sin embargo, se puede ejemplificar esta delimitación de las unidades, para un sector como el de la futura zanja de control de infiltraciones, representada por el sondaje SDL-11.

En este punto, trabajos anteriores (Ref. 8), han reconocido superficialmente un estrato de depósitos aluviales de hasta 30 m de espesor compuestos por gravas arenosas con contenidos de finos variables. Bajo las unidades de suelo se reconoce una secuencia sedimentaria compuesta por rocas volcánicas y sedimentarias, la cual presenta una calidad geomecánica de mala a regular, reconociéndose la roca impermeable bajo los 66 m de profundidad. Esta información, junto a las pruebas hidráulicas y geofísica se condensa en el lado izquierdo de la **Figura 5.4**. Con esta información se delimitan las unidades hidrogeológicas ya definidas, lo que se representa en el lado derecho de la misma figura. Este caso particular sirve también para mostrar que el nivel freático, que generalmente se encuentra en la mitad inferior de los depósitos aluviales, en algunos casos puntuales se ubica muy cerca del límite superior de la unidad de rocas meteorizadas.

Finalmente en la **Tabla 5-1** se resumen los rangos de valores y sus promedios para los parámetros hidráulicos de las unidades definidas.

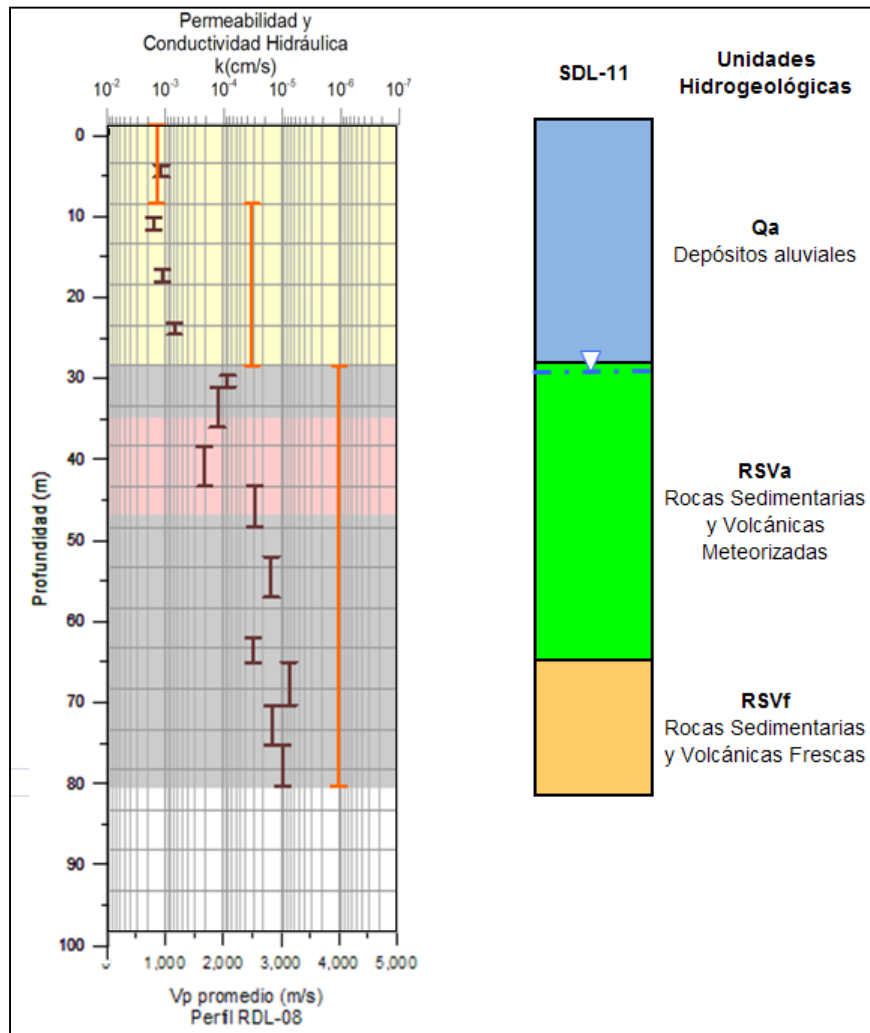


Figura 5.4 Delimitación de unidades Hidrogeológicas.

Tabla 5-1 Resumen parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica

		Qf	Qa	RSVa	RSVf	RI
K [m/d]	Max	6,99E+00	2,21E+01	6,17E+01	2,59E-01	3,46E-01
	Min	1,23E+00	3,46E-03	2,59E-03	1,73E-03	1,73E-03
	Prom.	3,16E+00	2,43E+00	2,98E+00	2,21E-02	6,19E-02
	N° datos	5	43	77	28	9
T [m²/día]	Max	4,81E+02	1,09E+03	2,83E+03		
	Min	7,52E+01	4,00E+01	1,04E+00		
	Prom.	2,17E+02	5,71E+02	2,29E+02		
	N° datos	5	8	45	0	0
S	Max		3,71E-02	1,86E-02		
	Min		9,53E-04	0,00E+00		
	Prom.		1,13E-02	3,53E-03		
	N° datos	0	5	16	0	0

5.2 Piezometría

Líneas de isopiezas generalizadas, elaboradas a partir de mediciones de niveles registradas entre abril y mayo del presente año, se muestran en la **Figura 5.1**. Se dibujaron estas líneas en las unidades que presentan permeabilidades tales que fueron consideradas como parte del acuífero.

La mayoría de los sondeos existentes se ubica en la parte central de la quebrada y los niveles se muestran coherentes entre sí, reflejándose muy bien la superficie equipotencial. Lo contrario ocurre hacia los bordes de la cuenca, donde sólo se tienen sondeos en ubicaciones clave para definir el flujo en un ámbito más regional.

De las líneas equipotenciales se desprende que el movimiento del acuífero ocurre desde aguas arriba de la quebrada La Brea hacia la confluencia con el río Ramadillas, con un gradiente hidráulico, calculado en el eje de la quebrada, que varía entre 0,10 a 0,05 en la sección superior y 0,03 aguas abajo. Se observa claramente un cambio de pendiente asociado al límite entre el dominio intrusivo (unidad RI) y la aparición de la unidad RSV.

El sector norte y este, donde el intrusivo se encuentra muy cercano a la superficie y el acuífero es prácticamente inexistente, las isopiezas responden a la topografía de la zona.

Por otro lado, las líneas de isopiezas hacia el oeste de la quebrada no presentan un quiebre drástico, dando la impresión de una continuidad lateral del flujo, al menos hasta encontrar el núcleo más impermeable del cordón sedimentario que allí se encuentra. No se tienen datos en esta zona, por lo que las líneas no poseen una continuidad definida.

En cuanto a la relación con las unidades hidrogeológicas, el nivel de agua se ubica principalmente en la mitad inferior de la unidad de depósitos aluviales y en algunos casos, en la parte superior de las rocas alteradas.

Si se compara esta piezometría con la presentada en el EIA (Ref. 15) y que se adjunta en el **Apéndice II**, se observa que no hay grandes diferencias, sino más bien que el trabajo de construcción de nuevos piezómetros ha permitido refinar la ubicación de la tabla de agua logrando una mejor cobertura.

Tabla 5-2 Niveles estáticos considerados para Isopiezas

Sondaje	Coordenadas UTM		Cota de Terreno (mbnt)	Fecha medición	Nivel Estático (mbnt)	Cota Nivel (mbnt)
	Norte	Este				
Sondajes Hidrogeológicos						
PBB-01	6.887.579,36	437.021,35	2.622,47	08May10	23,31	2599,16
PBB-03	6.887.530,95	437.085,26	2.626,36	12May10	27,26	2599,10
PBB-06	6.887.462,13	436.611,41	2.590,55	06May10	8,50	2582,05
PBB-07	6.887.450,73	436.938,36	2.617,85	06May10	20,20	2597,65
POB-06B	6.887.478,51	436.550,32	2.586,51	06May10	8,96	2577,55
POB-07A	6.887.428,59	436.863,32	2.613,75	06May10	17,77	2595,98
POB-07B	6.887.418,77	436.967,46	2.617,89	06May10	20,21	2597,68
POB-08A	6.887.602,54	437.278,08	2.638,03	08May10	36,01	2602,02
POB-08B	6.887.521,92	437.035,33	2.624,75	08May10	25,77	2598,97
POB-10	6.888.375,97	438.659,26	2.753,22	24May10	39,62	2713,60
POB-11	6.889.360,44	439.222,93	2.878,10	08May10	18,70	2859,40
POB-12	6.889.349,42	439.665,96	2.878,73	08May10	7,33	2871,40
POB-14	6.887.843,96	439.292,93	2.837,91	08May10	16,25	2821,66
POB-15	6.886.827,00	442.850,00	3750,81	09May10	24,10	3726,71
PRB-01	6.887.354,54	436.678,90	2.588,14	25May10	1,98	2586,16
P1-TR	6.887.336,69	437.185,67	2.614,52	01May10	13,81	2600,71
P2-TR	6.887.758,53	437.706,45	2.666,68	01May10	46,53	2620,15
P3-TR	6.886.637,70	437.579,12	2.632,87	01May10	8,71	2624,16
P4-TR	6.887.548,41	437.149,45	2.630,13	01May10	28,82	2601,31
WP-01	6.887.020,25	437.243,68	2.612,07	01May10	4,01	2608,06
WE-01	6.887.031,87	437.238,09	2.611,68	01May10	3,61	2608,07
Sondajes Geotécnicos						
SDL-02	6.888.602,17	438.412,10	2.774,33	07Abr10	27,02	2747,31
SDL-04	6.888.036,37	438.857,18	2.781,98	06Abr10	15,89	2766,09
SDL-07	6.888.079,33	439.200,00	2.888,20	06Abr10	56,87	2831,33
SDL-08*	6.887.081,00	438.596,00	2.892,28	07Abr10	47,63	2837,49
SDL-09	6.887.698,90	437.123,29	2.655,57	07Abr10	54,60	2600,97
SDL-10	6.887.806,48	437.902,20	2.680,43	07Abr10	21,96	2658,47
SDL-11	6.887.568,02	437.167,38	2.631,77	07Abr10	31,40	2600,37
SDL-12	6.887.460,87	437.271,65	2.654,80	07Abr10	45,27	2609,53

NOTA: * Sondaje inclinado 60°

5.3 Síntesis Modelo Hidrogeológico Conceptual

El primer concepto establecido se refiere a que en el área se encuentra un solo cuerpo acuífero, de características freáticas, constituido por varias unidades hidrogeológicas con sus respectivas características. Se encuentra limitado hacia el norte y este por cuerpos intrusivos de muy baja permeabilidad. Hacia el oeste se conjetura un límite con los sectores impermeables de las rocas volcano-sedimentarias.

Hacia el sur, el acuífero se junta con el del río Ramadillas, en un sector amplio donde la quebrada La Brea se abre en un abanico aluvial. En esta zona los niveles de los pozos conforman una superficie muy plana, que se ubica al nivel del río Ramadillas o puntualmente por sobre él, dependiendo de las estaciones del año y la cantidad de lluvias ocurridas en la zona.

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. La cuenca de La Brea está inserta en un sistema en que los cauces superficiales tienen un régimen nival, es decir, los caudales aumentan en los meses estivales, producto del derretimiento de la nieve caída durante el invierno. Del análisis de niveles subterráneos realizado (**Sección 4.5**) se puede apreciar una tendencia similar; los niveles son más profundos en invierno y se hacen más superficiales en verano, evidenciando una correlación directa, en que la recarga se produce muy rápidamente.

Esta conceptualización no difiere de la información presentada anteriormente en el EIA (Ref. 15). Los trabajos realizados han permitido una mayor cobertura de datos de nivel de agua, y una mejor caracterización de las unidades litológicas, que junto a los resultados de las pruebas de bombeo han permitido definir las unidades hidrogeológicas mencionadas.

6 Modelo Numérico

En el sector de La Brea se han presentado dos versiones de modelación numérica.

El modelo presentado en el EIA (SITAC, 2009), 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 La Brea.

Posteriormente, en Agosto de 2010 se entregó una nueva versión del modelo que incorporaba los resultados obtenidos durante la campaña de prospección hidrogeológica del 2010, y la nueva y óptima ubicación de la barrera hidráulica.

En aquel momento se decidió investigar en profundidad el sitio ubicado inmediatamente aguas debajo de la zanja corta fuga, es decir la mas óptima ubicación de la barrera hidráulica. El dominio del modelo numérico de flujo se extendió fuera del área cubierta por materiales no consolidados, para incluir lateralmente algunas unidades de rocas. Entre estas, lo más destacable fue la identificación de la unidad de rocas sedimentarias y volcánicas meteorizadas. También se incorporó la recarga generada por infiltración de las precipitaciones.

En el presente informe se entrega una actualización de esta versión del modelo. La necesidad de esta actualización del modelo se debe a:

- El modelo de agosto fue calibrado en estado estacionario en forma satisfactoria, y en flujo transiente reflejaba el caudal bombeado durante la prueba de larga duración y las tendencias generales en los pozos observados.
- Si bien lo anterior es suficiente para hacer validas las simulaciones predictivas presentadas en Agosto, un mejor ajuste de las tendencias y niveles del modelo en flujo transiente permite una mayor confiabilidad en las simulaciones.
- Dado lo anterior se realizaron ajustes al dominio del modelo y en los parámetros hidráulicos. En los siguientes capítulos se desarrollan las características del modelo.
- Estas mejoras permitieron un mejor ajuste, especialmente en los niveles (lo que se muestra en el pto. 6.4.2).

Se debe tener presente que 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 lamas en la quebrada La Brea. Con base en estos resultados se diseñará dicha barrera y construirá posteriormente, asegurando una nula contaminación hacia las aguas naturales del río Ramadillas.

La actualización aquí presentada permite tener una calibración estacionaria y transiente de mayor precisión para los parámetros de las unidades hidrogeológicas lo que consecuentemente permite tener mejores simulaciones predictivas con resultados de mayor confiabilidad.

Por otra parte, en las simulaciones que aquí se presentan se intentó optimizar los caudales a extraer por la barrera hidráulica, de manera que fuesen más cercanos tanto al caudal pasante natural, que calculado mediante Darcy es del orden de 11,5 l/s, como al caudal bombeado durante la prueba simultanea que fue de 13,3 l/s para las condiciones hidrogeológicas en el momento de realización de este ensayo.

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 activo del modelo tiene una superficie aproximada de 5 km² en la vecindad de la ubicación del muro del Depósito de Lamas. La grilla de diferencias finitas contiene un total de 21.024 celdas (144 filas por 146 columnas) en un total de 3 layers (**Figura 6.1**).

La grilla ha sido formulada de modo de tener una mayor discretización en el área sur poniente del modelo, lugar en donde se concentra la mayor cantidad de información disponible y donde se desplazaría la potencial pluma de contaminación, permitiendo una mejor representación del flujo contaminado y de su captación mediante el bombeo de los pozos de contingencia pertenecientes a la barrera hidráulica.

La dimensión horizontal de las celdas esta en un rango de 2 m., en la zona de los pozos, hasta los 420 m., en las zonas donde se tiene escasa información. La dimensión vertical de las celdas varía desde 3 m a 100 m.

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

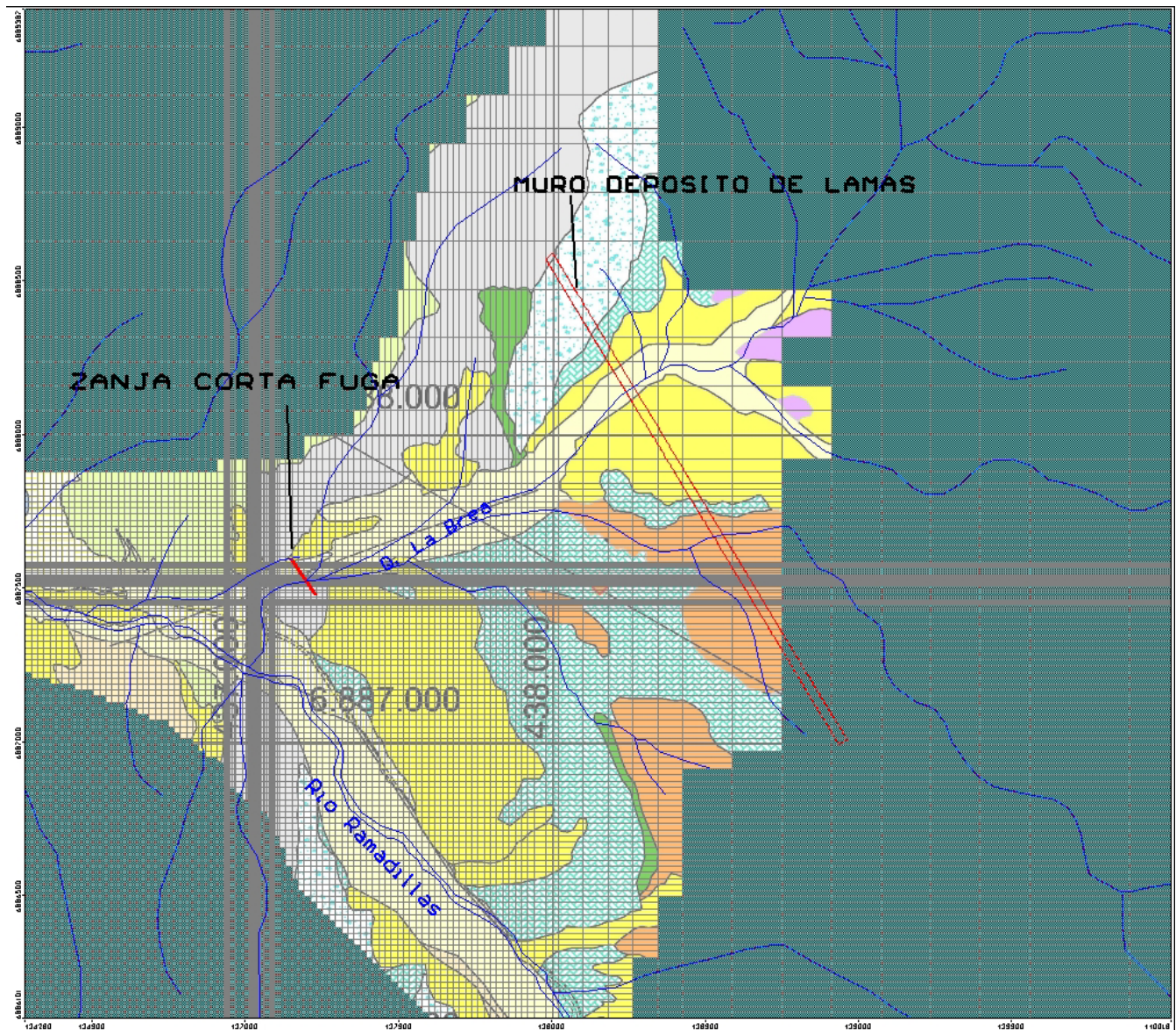


Figura 6.1 Grilla y Dominio del Modelo (en verde se observa la zona inactiva del modelo)

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 (Kh) y vertical (Kv), coeficiente de almacenamiento confinado (Ss) y coeficiente de almacenamiento específico o capacidad específica (Sy), 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 10 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 Hidrogeológica	Distribución Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica		Coeficiente de Almacenamiento	
		Horizontal (Kh)	Vertical (Kv)	Confinado (Ss)	Específico (Sy)
		(m/d)	(m/d)	(1/m)	(adim)
Depósitos Fluviales (Qf)		2 a 8	0.2 a 8	0.0001	0.2
Depósitos Aluviales (Qa)		2.4	0.24	0.0001	0.1
Rocas Sedimentarias y Volcánicas Alteradas (RSVa)	Desde superficie hasta los 10m de profundidad	1	1	1.E-05	0.005
	En Layer 2, subyaciendo a los Depósitos Fluviales	3	0.3	5.E-05	0.005
	En Layer 2, subyaciendo a los Depósitos aluviales	1	0.1 a 1	5.E-05	0.005
	En Layer 2, hacia las laderas	0.1	0.1-0.01	1.E-05	0.005
Rocas Sedimentarias y Volcánicas Frescas (RSVf)	Subyaciendo a RSVa, bajo depósitos aluviales y fluviales	0.3	0.3	5.E-06	0.005
	Subyaciendo a RSVa, hacia las laderas	0.03	0.03	5.E-06	0.005
Rocas Intrusivas (RI)	En Layer 1 y 2	0.06	0.06	1.E-05	0.005
	En Layer 3	0.003	0.003	1.E-06	0.005

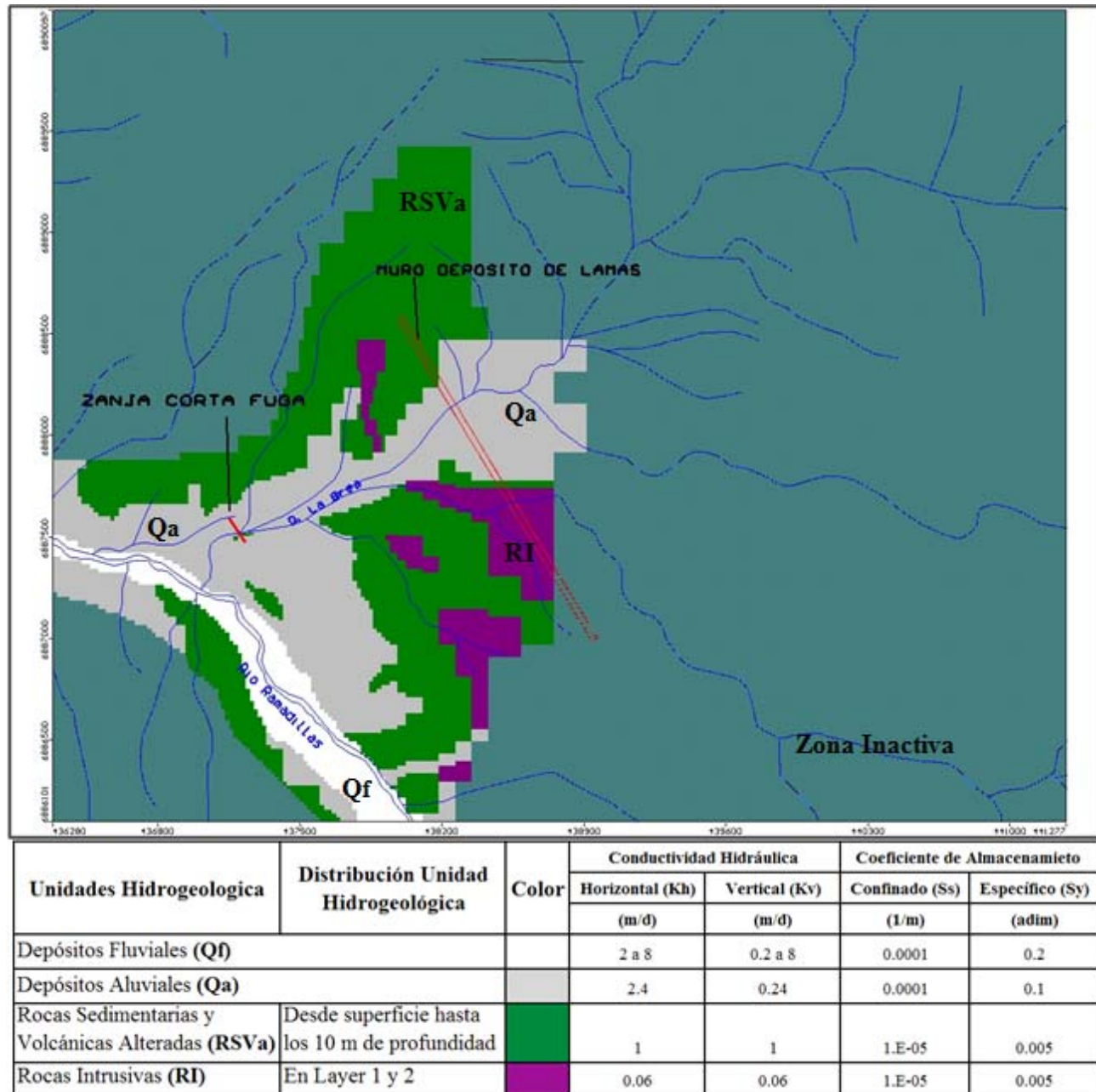


Figura 6.2 Distribución de de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 1

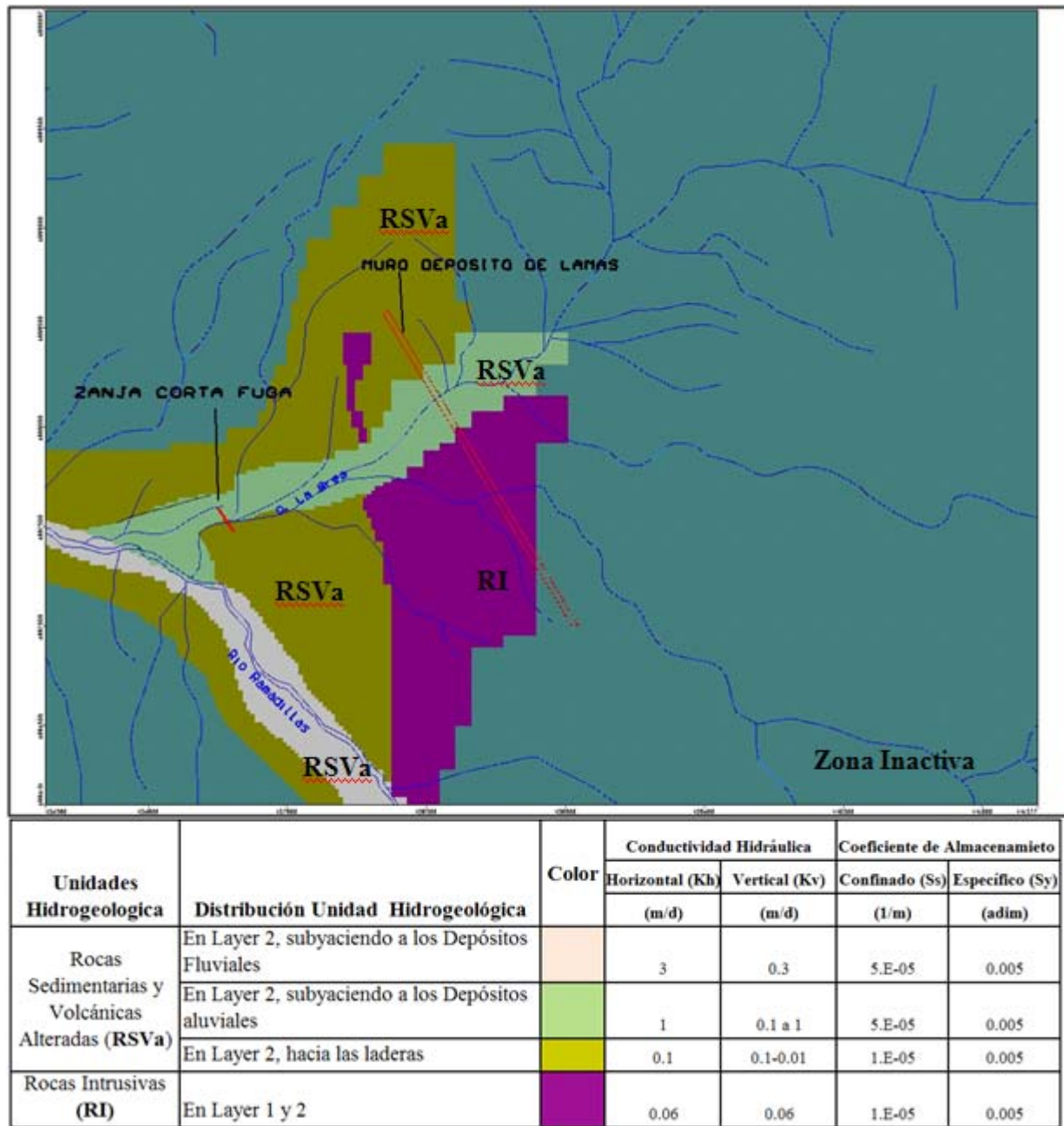
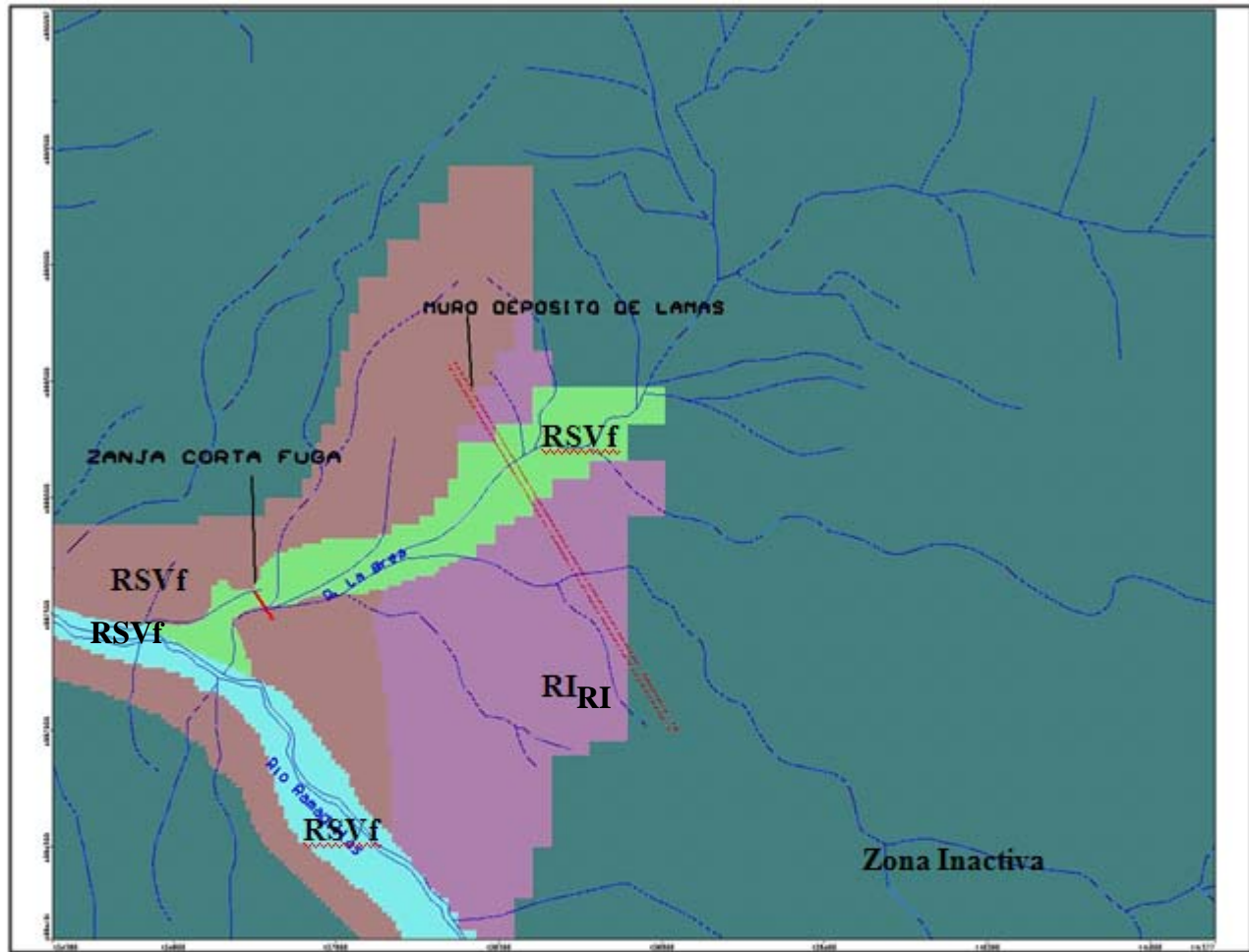


Figura 6.3 Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 2



Unidades Hidrogeológica	Distribución Unidad Hidrogeológica	Color	Conductividad Hidráulica		Coeficiente de Almacenamiento	
			Horizontal (Kh)	Vertical (Kv)	Confinado (Ss)	Específico (Sy)
			(m/d)	(m/d)	(1/m)	(adim)
Rocas Sedimentarias y Volcánicas Frescas (RSVf)	Subyaciendo a RSVa, bajo depositos aluviales y fluviales		0.3	0.3	5.E-06	0.005
	Subyaciendo a RSVa, hacia las laderas		0.03	0.03	5.E-06	0.005
Rocas Intrusivas (RI)	En Layer 3		0.003	0.003	1.E-06	0.005

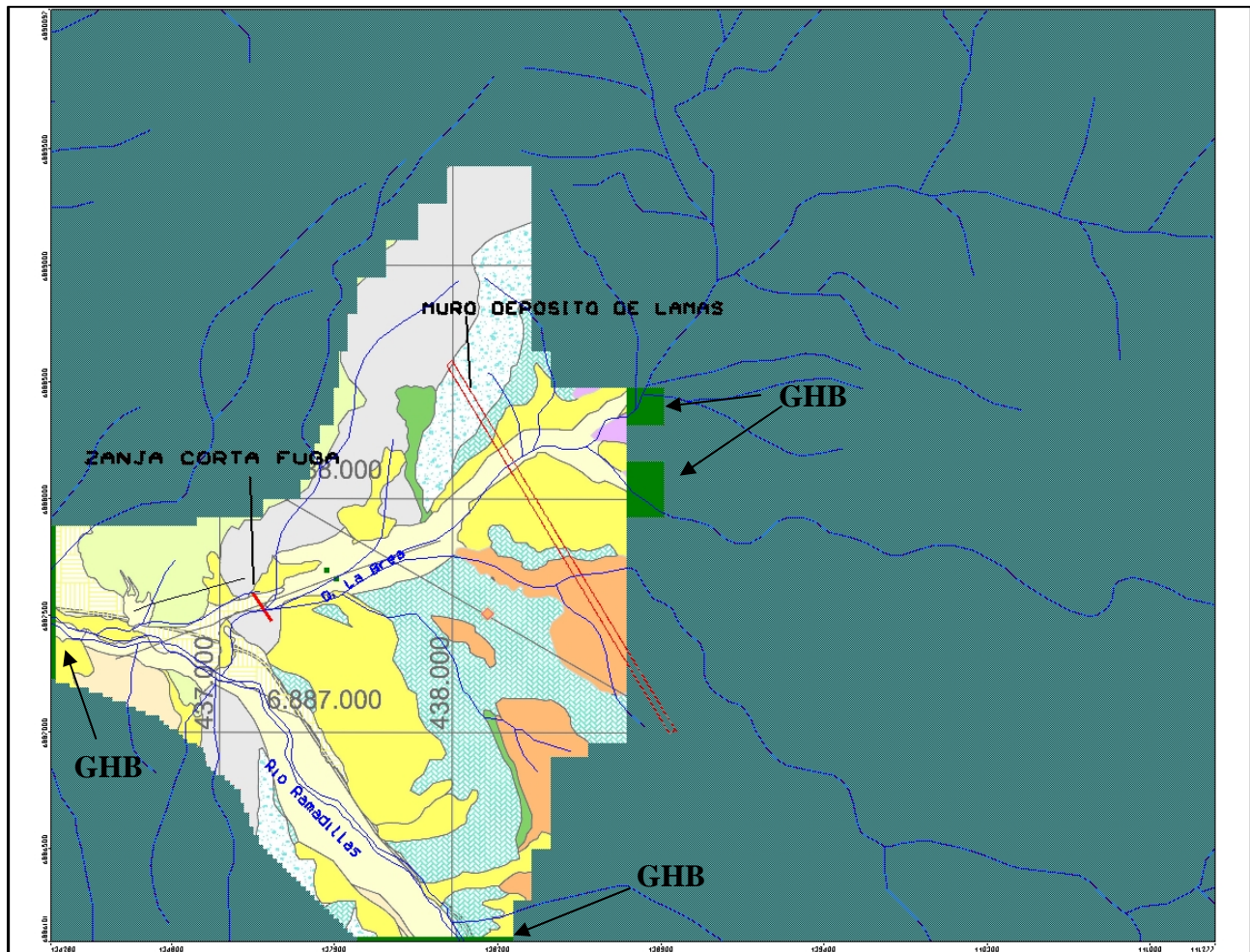
Figura 6.4 Distribución de zonas de Conductividad Hidráulica y Almacenamiento en Layer 3

6.2.2 Simulación de Entradas y Salidas por Flujos Subterráneos

Para simular el escurrimiento subterráneo en la quebrada Ramadillas se ha empleado la condición de borde GENERAL HEAD BOUNDARY (GHB) (carga hidráulica y conductancia) 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 la quebrada Ramadillas en dirección aguas abajo también se ha simulado como un GHB igualmente calibrado.

La quebrada La Brea propiamente tal, no tiene escurrimiento superficial continuo en el área del dominio del modelo. Por lo tanto, sólo se ha conceptualizado un flujo subterráneo entrante a través de un GHB el cual ha sido calibrado.



La precipitación media anual considerando el área total de la cuenca hidrográfica La Brea de aproximadamente 62 km² se encuentra entre 70 y 90 mm/año (Sección 3.4). Para el modelo se consideró una precipitación media de 80 mm/año como representativa del área de La Brea y una infiltración promedio de 6% del total de la lluvia caída. Con esto se tiene que la recarga al acuífero por precipitación es del orden de 10 l/s, caudal que se ha calibrado en la sección pasante evaluada en el sector de la zanja. Por otro lado, la recarga por precipitación directa en los 5 km² del dominio activo corresponde a 1,5 l/s.

Se distribuyeron estas recargas con la condición de borde RECHARGE y a través del flujo que subterráneo que ingresaría por la parte alta del dominio del modelo que se ha conceptualizado como un GHB (ver sección anterior).

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 automática 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 Lamas.

Antes de ser utilizado para predicciones, el modelo numérico de La Brea 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 sondajes y pozos (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. Inicialmente se bombearon 3 pozos durante 24 horas, luego se cambia la configuración de pozos y se bombeo 24 horas nuevamente. En seguida hubo un prueba de bombeo simultánea fallida de 1,5 días y finalmente la prueba de bombeo de 9 días en los tres pozos finales (ver Sección 4.2). Todas las etapas de la prueba de larga duración fueron incluidas en la modelación en estado transiente.

6.3.1 Calibración Estacionaria

Se ha calibrado la recarga por concepto de infiltración de las precipitaciones, el flujo subterráneo aportado por el río, la salida del flujo hacia aguas abajo del la confluencia del río Ramadillas y las permeabilidades, para replicar la ubicación de la superficie equipotencial existente en mayo del 2010. Esto permite definir las direcciones de flujo y gradiente hidráulico en el acuífero freático existente.

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 6-2** 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.

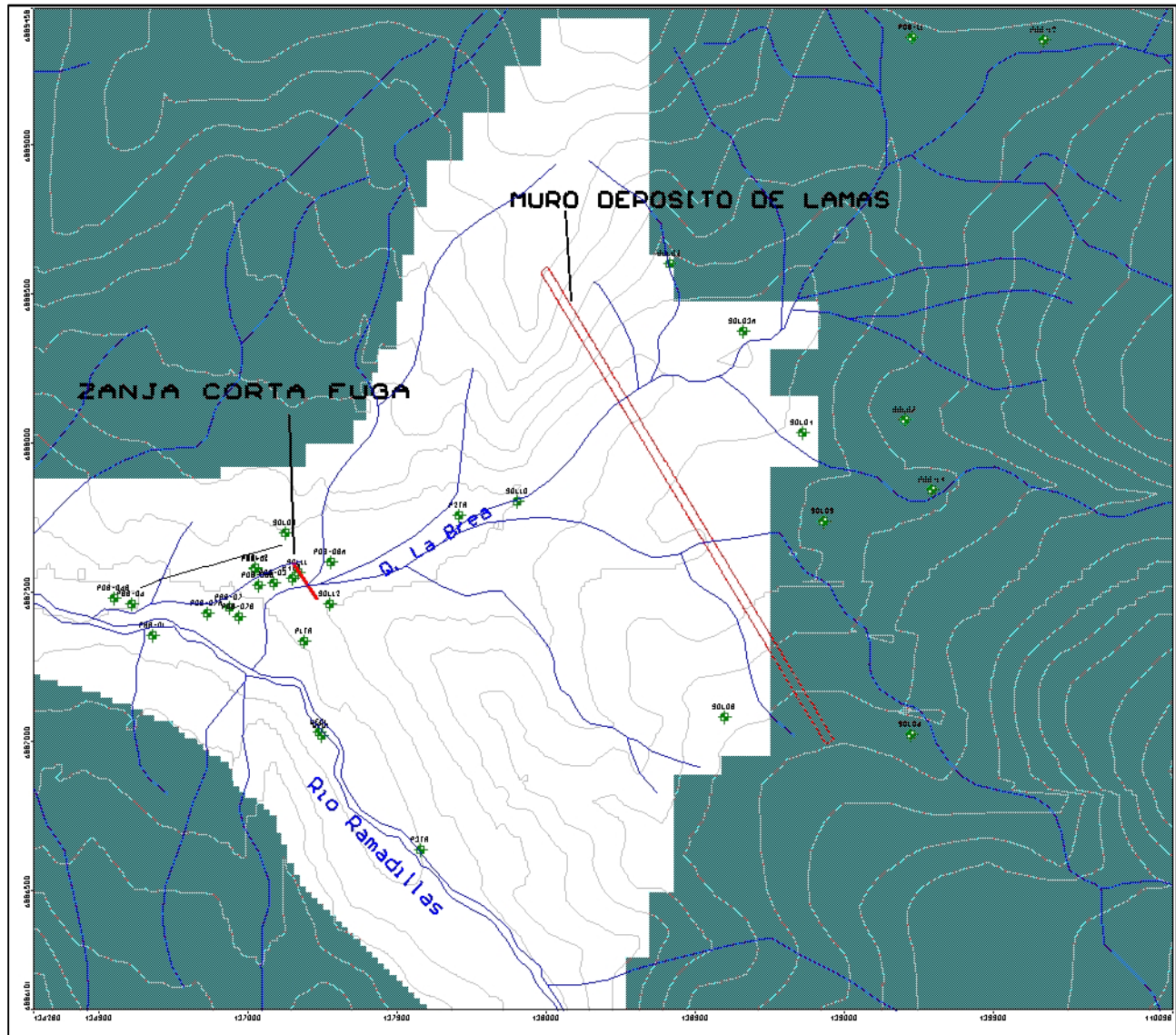


Figura 6.6 Ubicación de pozos de observación de niveles

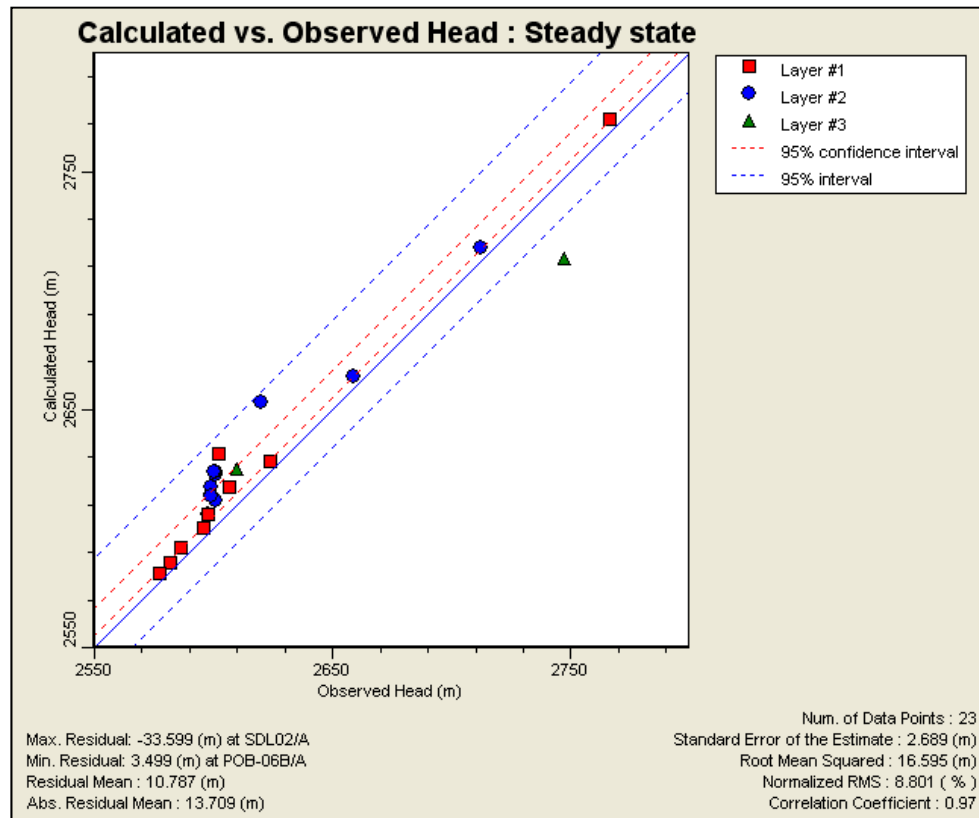


Figura 6.7 Gráfico Calibración Niveles Estado Estacionario

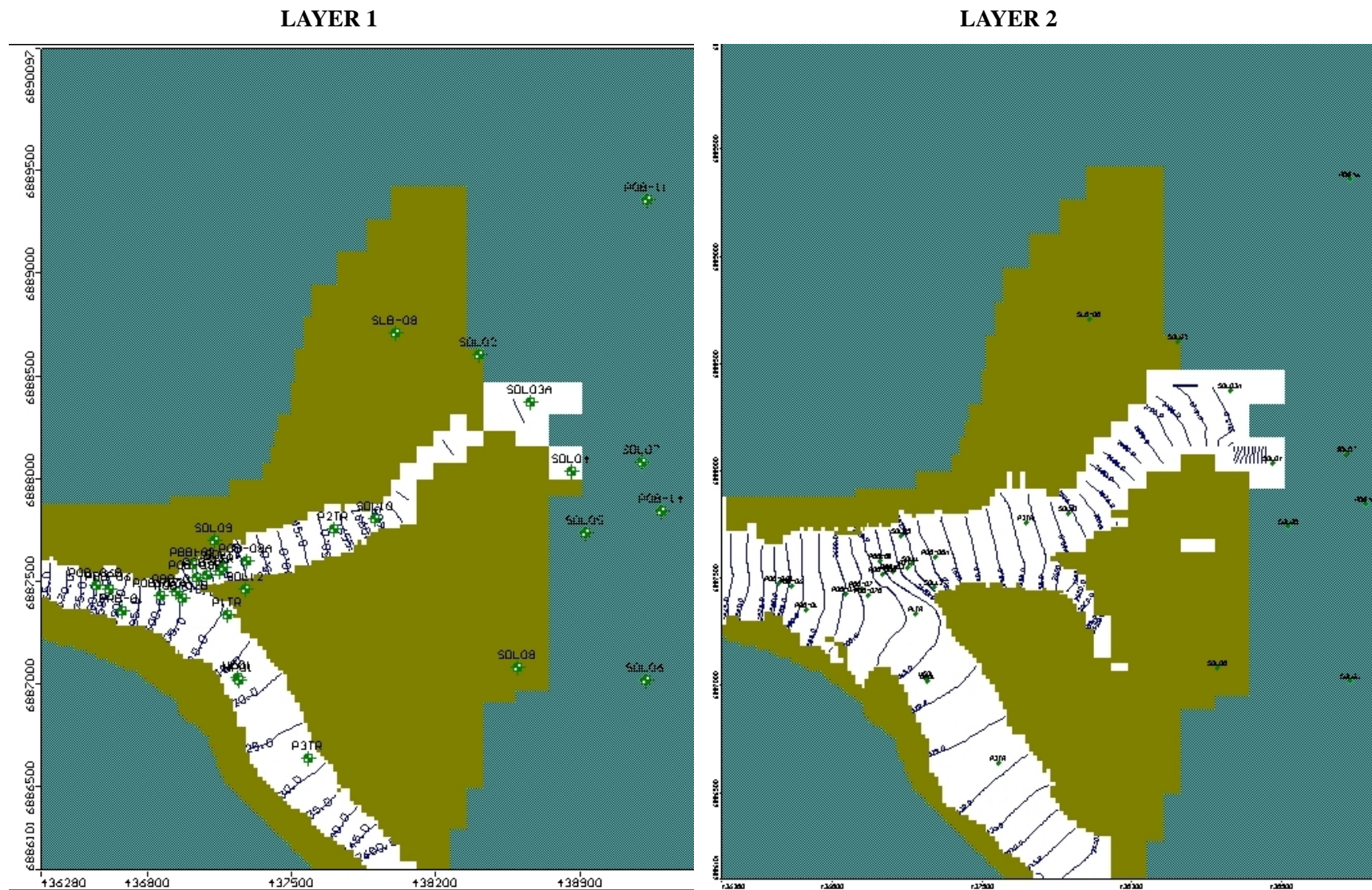


Figura 6.8 Curvas Equipotenciales Estado Estacionario

Tabla 6-2 Balance de Masa Global

Item	Entradas	Salidas
	(L/s)	(L/s)
Recarga por Precipitación	1.6	-
Flujo subterráneo Cabecera Q. La Brea	9.9	-
Flujo Subterráneo río Ramadillas	14.0	25.5
Total	25.50	25.46
Discrepancia		0.17%

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 30 de Junio y el 9 de julio de 2010 en los pozos PBB-1, PBB-3, PBB-7 y POB-08B 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.

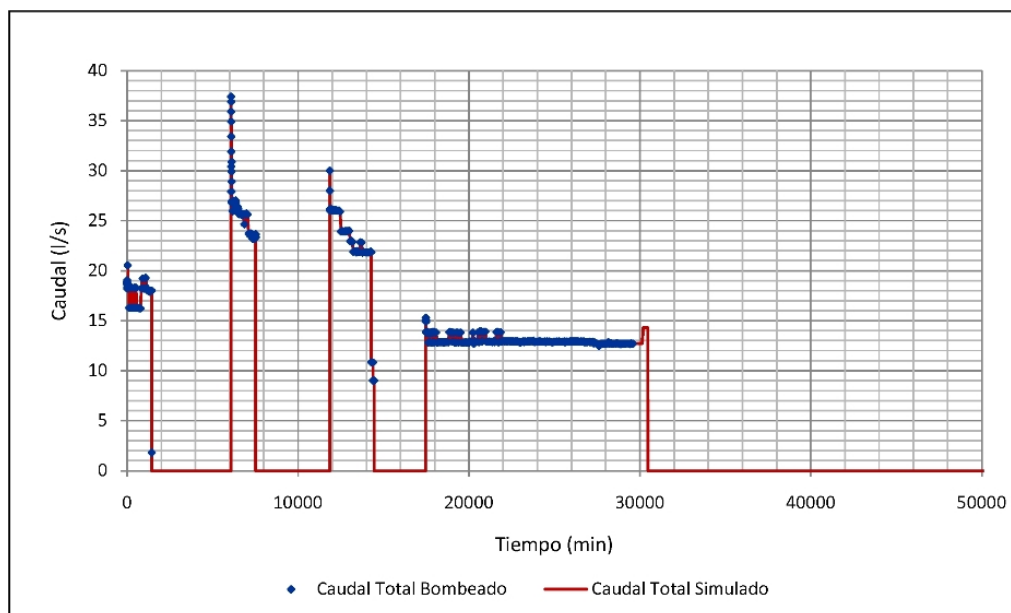


Figura 6.9 Calibración del Caudal de Bombeo Simultánea de Larga Duración

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.

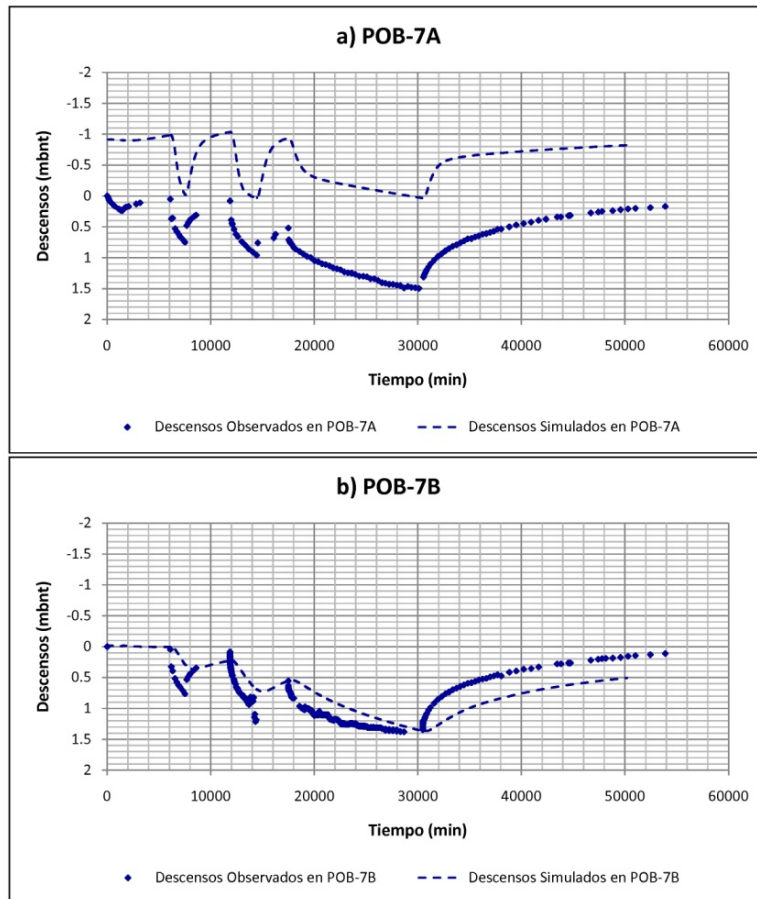


Figura 6.10 Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación cercanos a batería de bombeo

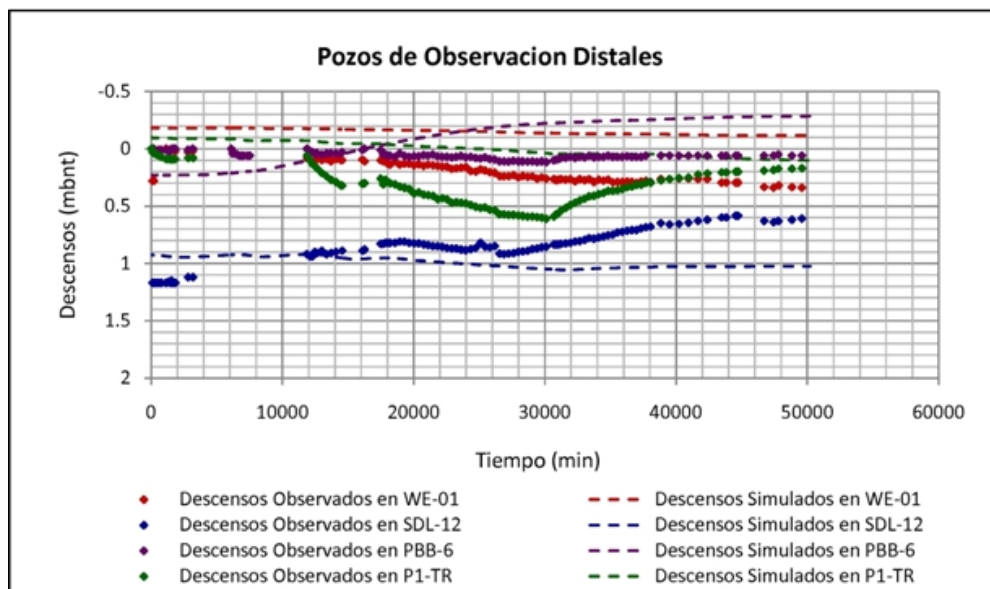


Figura 6.11 Descensos Observados versus Simulados en pozos de observación distantes a batería de bombeo

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 lamas

Estudios anteriores de Arcadis (Ref.2) 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.

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

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

Parámetro	Unidad	Valor Máximo Planta Piloto Aguas Relaves	Conc. Máxima Pozo WE-01*	Límites norma NCh 1.333 riego
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 5 escenarios de simulación en los cuales se ha representado diferentes situaciones de infiltración así como distintas 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 el caudal infiltrado llegue a ser cercano al caudal que pasa naturalmente en el sector. Como en este caso el flujo pasante calculado mediante la ley de Darcy es del orden de 11,5 l/s, se simulará la inyección de 10 l/s de solución contaminante.

En cuanto a la simulación de los caudales a bombear por la barrera hidráulica, se definió probar el sistema con caudales cercanos tanto al caudal pasante natural, como al caudal bombeado durante la prueba simultánea que fue de 13,3 l/s para las condiciones hidrogeológicas en el momento de realización de este ensayo. Así se optó por simular un caudal total a extraer por la barrera de 12 l/s.

Es necesario señalar que esto no implica que este sea exactamente el caudal 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. A la inversa, si las condiciones hidrogeológicas implicasen un aumento de niveles, el caudal que podría ser obtenido por la barrera hidráulica podría ser mayor.

Finalmente también se sensibilizó 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 3 pozos de bombeo ubicados estratégicamente y con un caudal de 12 l/s, similar al caudal total extraído durante la prueba de bombeo simultánea.
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 3 pozos de bombeo ubicados estratégicamente y con un caudal de 12 l/s, similar al caudal total extraído durante la prueba de bombeo simultánea.
3. **Escenario 3:** Inyección de 10 l/s con 1 gr/l de contaminación durante 3 años continuos. Puesta en marcha inmediata de la barrera hidráulica con 3 pozos de bombeo ubicados estratégicamente y con un caudal de 12 l/s, similar al caudal total extraído durante la prueba de bombeo simultánea. Este escenario se considera conservador, debido a que la magnitud del flujo inyectado supera en 10 veces las estimaciones realizadas.
4. **Escenario 4:** 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 de 12 l/s, similar al caudal total extraído durante la prueba de bombeo simultánea.
5. **Escenario 5:** Inyección de 10 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 de 12 l/s, similar al caudal total extraído durante la prueba de bombeo simultánea.

Para visualizar la variación de las concentraciones en el tiempo se ubicaron 7 líneas de control transversal a la dirección de flujo constituida por 3 o 4 puntos de observación. De estas líneas las que se destacarán en el análisis son:

- **Línea L1:** Ubicada entre la zanja corta fuga y la barrera hidráulica.
- **Línea L3:** Ubicada en la quebrada La Brea justo antes de la confluencia con el río Ramadillas, es decir, antes de la dilución.
- **Línea L5:** Ubicada en el río Ramadillas justo después de la confluencia con la quebrada La Brea.

Los pozos de la Barrera Hidráulica se identifican como R (1), R (2) y R (30).

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 L3, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 12 l/s, la concentración máxima alcanzada es de solo 0,0059 mg/l. Este valor corresponde a un factor de $5,9 \text{ E-6}$ 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 L3, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 12 l/s, la concentración máxima alcanzada es de solo 0,00578 mg/l. Este valor corresponde a un factor de $5,78 \text{ E-6}$ 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 L3, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 12 l/s, la concentración máxima alcanza un pick de 0,367 mg/l. Este valor corresponde a un factor de $3,67 \text{ E-4}$ 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 en la línea de control L2, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 12 l/s, la concentración máxima alcanza un pick de 0,00598 mg/l. Este valor corresponde a un factor de $5,98 \text{ E-6}$ respecto de la carga de 1 gr/l inyectada.

6.4.4.5 Escenario 5

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

En la **Figura 6.17** se puede apreciar que, pasada la barrera de contingencia en la línea de control L3, después de iniciada la inyección y la inmediata puesta en marcha del bombeo de contingencia de 12 l/s, la concentración máxima alcanza un pick de 0,339mg/l. Este valor corresponde a un factor de $3,39 \text{ E-4}$ 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 6-4** 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.

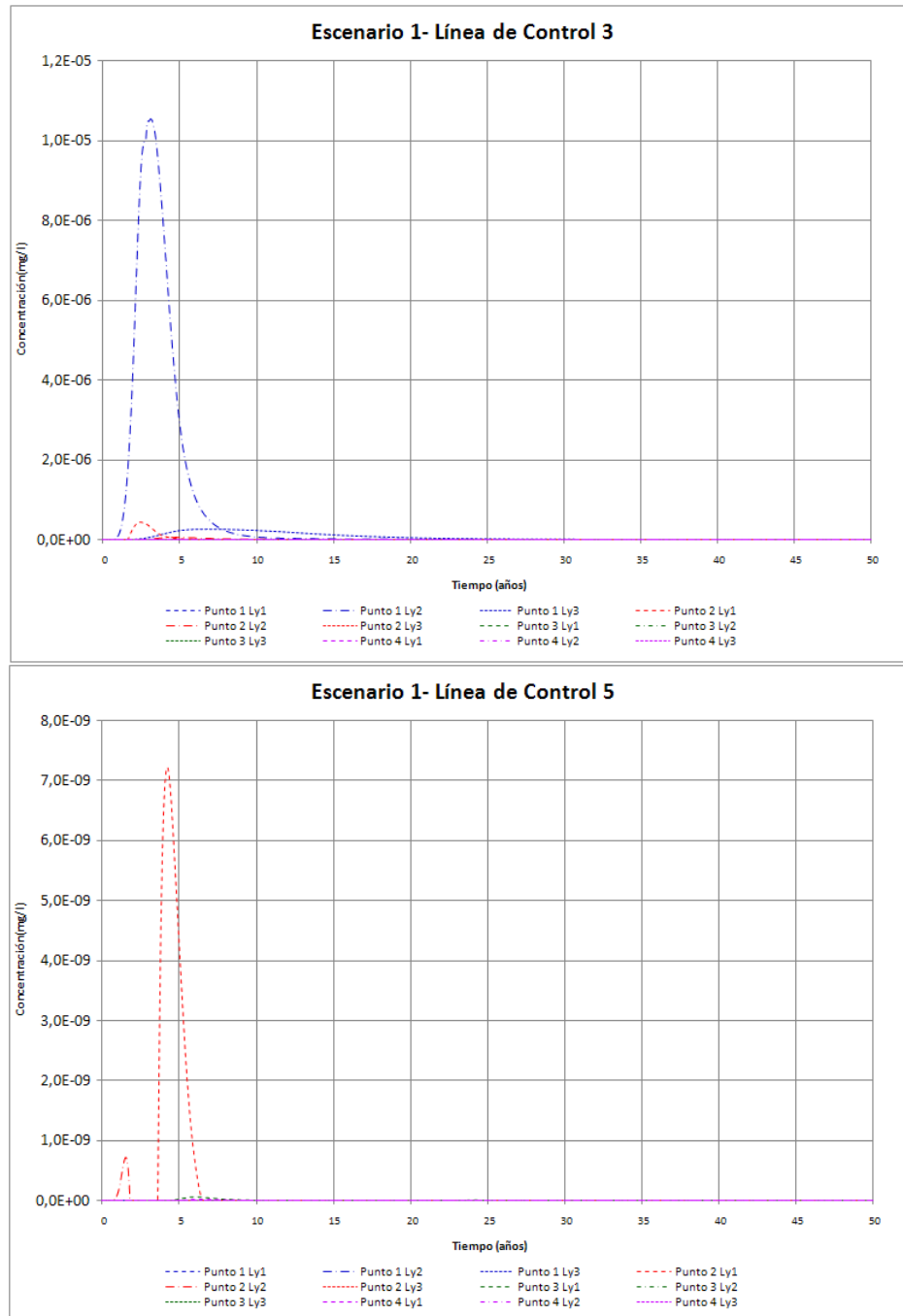


Figura 6.13 Concentración vs Tiempo Escenario 1 – Línea 3 y Línea 5

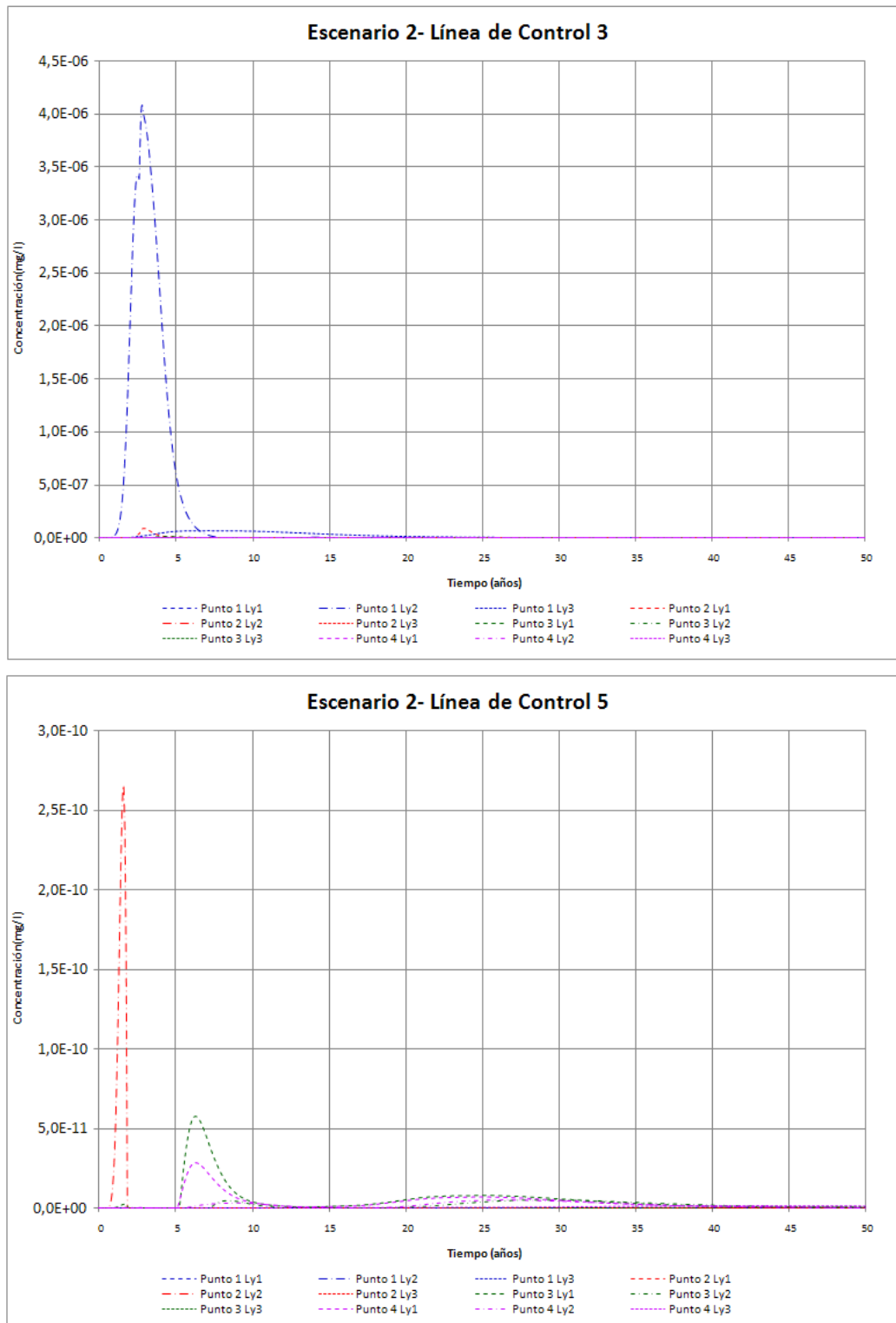


Figura 6.14 Concentración vs Tiempo Escenario 2 – Línea 3 y Línea 5

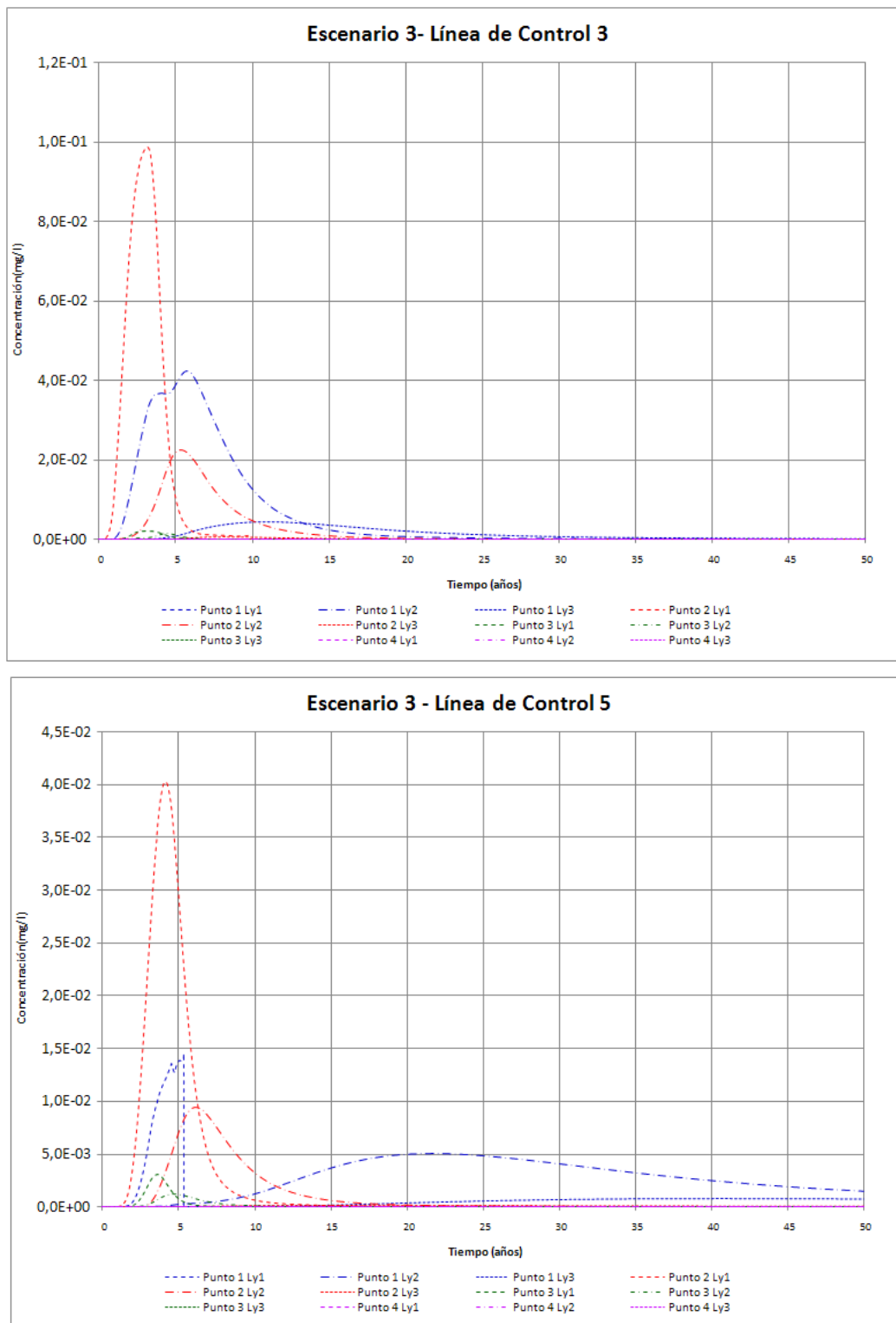


Figura 6.15 Concentración vs Tiempo Escenario 3 – Línea 3 y Línea 5

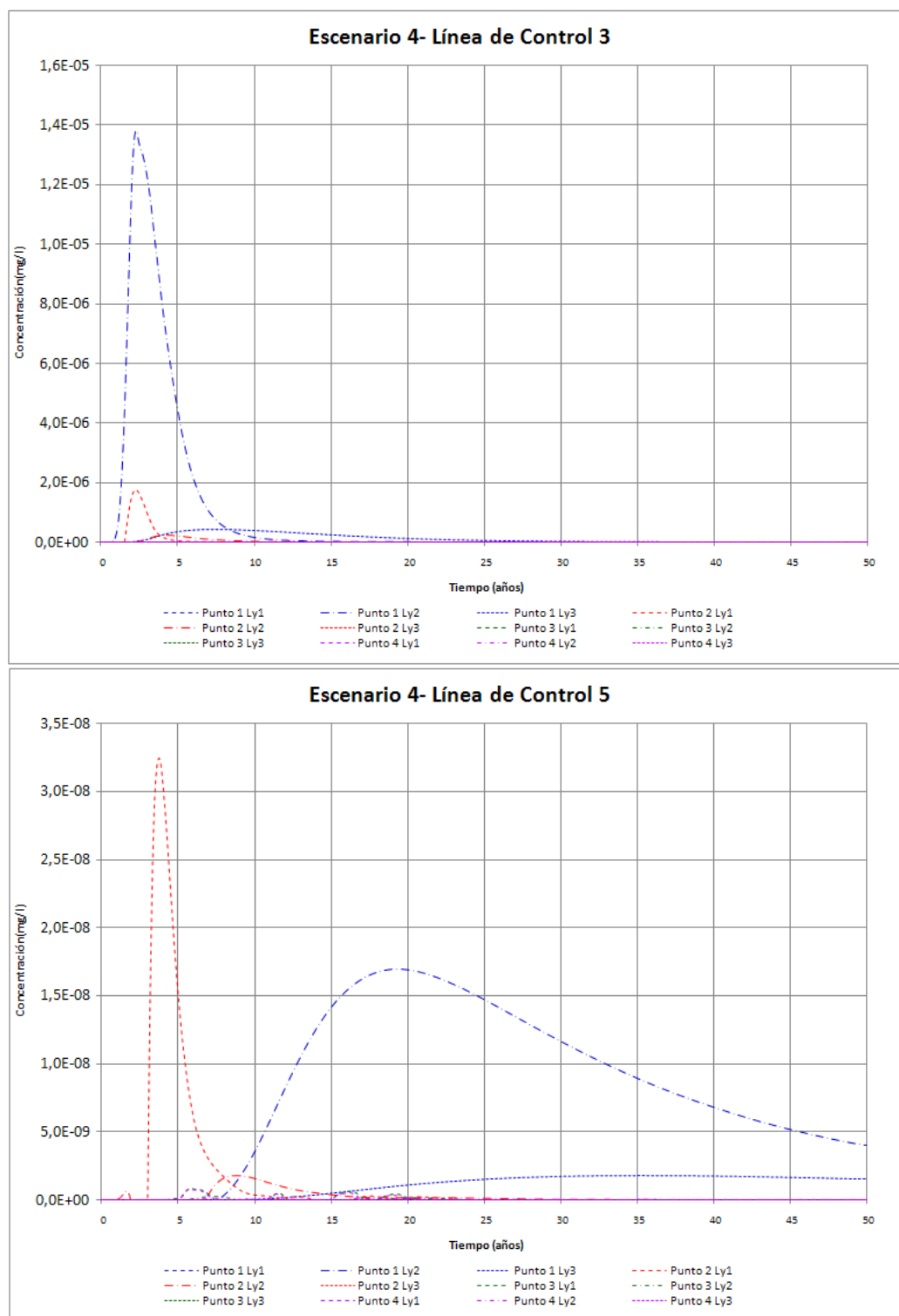


Figura 6.16 Concentración vs Tiempo Escenario 4 – Línea 3 y Línea 5

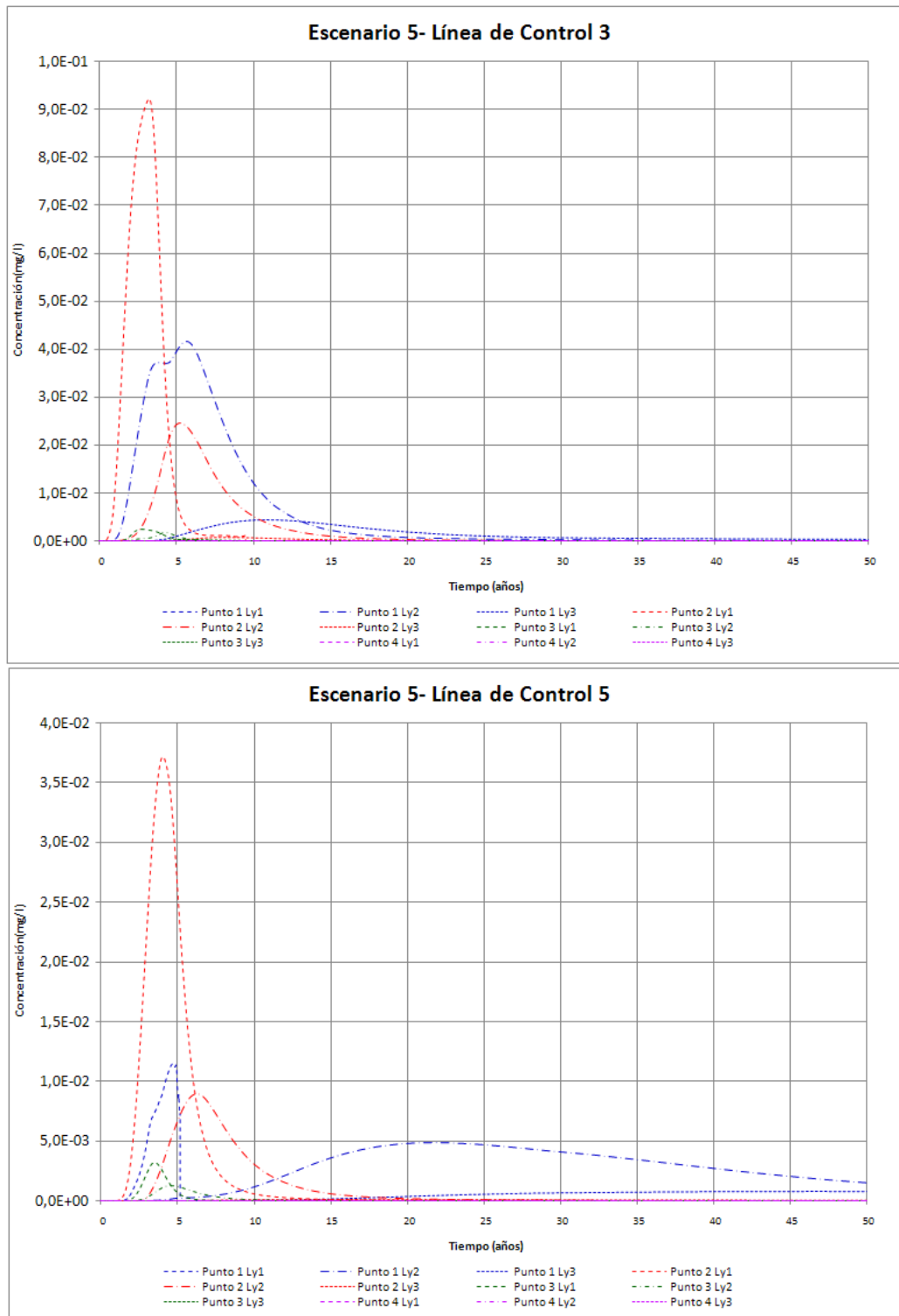


Figura 6.17 Concentración vs Tiempo Escenario 5 – Línea 3 y Línea 5

Tabla 6-4 Calidad de las Aguas usadas en el Modelo

Máxima concentración en línea de control (mg/L)					1,05E-05	7,22E-09	4,08E-06	2,66E-10	9,86E-02	4,03E-02	1,38E-05	3,24E-08	9,21E-02	3,72E-02
Factor					1,05E-08	7,22E-12	4,08E-09	2,66E-13	9,86E-05	4,03E-05	1,38E-08	3,24E-11	9,21E-05	3,72E-05
Parámetro	Unidad	Aguas Relaves (Peor caso :Valor Maximo Planta Piloto)	Linea Base Natural (Peor Caso: Max Con. en WE-01)	Límites norma (Neh 1333 riego)	Escenario 1: 1l/s, 1gr/L, 1 año, bombeo inmediato 12 L/s (3 pozos)		Escenario 2: 1l/s, 1gr/L, 3 años, bombeo inmediato 12 L/s (3 pozos)		Escenario 3: 10l/s, 1gr/L, 3 años, bombeo inmediato 12 L/s (3 pozos)		Escenario 4: 1l/s, 1gr/L, 1 año, bombeo inmediato 12L/s (2 pozos)		Escenario 5: 1l/s, 1gr/L, 3 años, bombeo inmediato 12L/s (2 pozos)	
		Aguas Relaves	Pozo WE-01*		L3	L5	L3	L5	L3	L5	L3	L5	L3	L5
Aluminio	mg/L	2,92	1,12	5	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120	1,120
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	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	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	0,0	0,0
Boro	mg/L	2,45	0,1	0,75	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Cadmio	mg/L	0,01	0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cianuro	mg/L	0,02	0	0,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cloruro	mg/L	190	25,7	200	25,70	25,70	25,70	25,70	25,72	25,71	25,70	25,70	25,72	25,71
Cobalto	mg/L	0,05		0,05	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cobre	mg/L	0,06	0,25	0,2	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250
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	0,0	0,0
Fluor	mg/L	0,5	0,7	1	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Hierro	mg/L	0,03	62	5	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00
Litio	mg/L	0,29		2,5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Manganeso	mg/L	0,02	0,82	0,2	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820
Mercurio	mg/L	0,001	0	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Molibdeno	mg/L	0,1	0,04	0,01	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
Níquel	mg/L	0,05		0,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Plata	mg/L	0,01		0,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Plomo	mg/L	0,05	1,466	5	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466	1,466
Selenio	mg/L	0,001	0	0,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sodio Porcentual	%	39,5		35										
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	-	460	500										
Sulfatos	mg/L	795	212,4	250	212,400	212,400	212,400	212,400	212,478	212,432	212,400	212,400	212,473	212,430
Vanadio	mg/L	0,1		0,1	0,000	0,000	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	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.

La actualización aquí presentada, permite por tanto tener simulaciones predictivas de mayor precisión con resultados más confiables.

Se simularon diversos escenarios de inyección de contaminación y en todos ellos se mostró la efectividad de la barrera hidráulica. Las configuraciones elegidas para la captura de la pluma de contaminación están constituidas por 2 a 3 pozos habilitados en las unidades de roca alterada y roca menos permeable (Layer 2 y 3), según se muestra en la **Figura 6.12**. Por tanto el modelo indica que una barrera conformada por dos pozos de extracción permite cumplir con el objetivo de cero contaminación.

Esto significa que la calidad resultante del acuífero este por debajo de 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**. Aun más, el cumplimiento ocurre antes de la confluencia de la quebrada La Brea 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 La Brea 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 Lamas.

7 Conclusiones

A la luz de los nuevos antecedentes de terreno se pueden validar los estudios anteriores realizados en la quebrada La Brea para el sistema de control de infiltraciones y por tanto validar los diseños de los sistemas del depósito de lamas.

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 solo acuífero, de características freáticas, constituido por varias unidades hidrogeológicas con sus respectivas características.
- Las principales unidades se pueden agrupar en:
 - Depósitos Fluviales, ubicados principalmente en el curso del río Ramadillas.
 - Depósitos Aluviales, en los cursos de las quebradas La Brea y otras afluentes a esta.
 - Rocas Sedimentarias y Volcánicas Alteradas, ubicadas bajo los depósitos anteriores o en superficie, y cuyo grado de alteración va disminuyendo con la profundidad. Rocas Sedimentarias y Volcánicas Frescas, es decir las mismas rocas de la unidad anterior sin alteración o meteorización, por lo que sus características hidráulicas corresponden a acuitardos.
 - Rocas Intrusivas que aflora en la parte oriental del área estudiada, encontrándose muy cerca de la superficie en el sector norte.
- En general, las unidades presentan un amplio rango de permeabilidades. Esto se ha visto en los resultados de las pruebas hidráulicas y bombeos y es consistente con la variabilidad de su litología y grado de alteración.
- El nivel de agua se ubica principalmente en la mitad inferior de la unidad de depósitos aluviales y en algunos casos en la parte superior de las rocas alteradas.
- No existe fallas estructurales mayores que pudieran generar canales preferenciales de flujo hacia otras quebradas.
- La recarga del sistema ocurre como infiltración de las precipitaciones que caen sobre la cuenca de la quebrada La Brea, en las partes altas como percolación de la fusión de nieve y líquidas en las partes más bajas.
- El gradiente hidráulico en la quebrada La Brea es de entre 5 y 10% en la sección superior y 3% aguas abajo del muro, lugar en que se ubicarán las obras de control de infiltraciones.
- La dirección de flujo subterráneo sigue el gradiente topográfico y el lineamiento de la quebrada La Brea, hasta confluir al sistema albergado en la río Ramadillas.
- En cuanto a la química las aguas subterráneas corresponden a aguas del tipo sulfatadas cálcicas y neutras.

El diseño del depósito de lamas considera una serie de medidas para impedir episodios de contaminación, que incluyen entre otros: la máxima recuperación de agua desde las lamas antes de su depositación, 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 La Brea 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.

El compromiso de cero contaminación conlleva mantener las condiciones naturales de las aguas del sector, lo que implica que, en el caso de que la calidad natural del agua cumpla la norma de agua para riego (NCh 1.333), esta se mantengan 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, que corresponde al entregado en agosto 2010.

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, para efectos de este estudio se simuló 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). También se sensibilizó con un caudal de infiltración de 10 l/s.

Posteriormente, se realizó una actualización de este modelo, que es la que se presenta en este informe. Este modelo representa el sistema acuífero en cuanto a sus características hidráulicas, condiciones de borde, recargas y niveles, tanto en situación estacionaria como al reproducir el bombeo simultáneo de nueve días, de manera más precisa que modelo entregado en agosto 2010. Consecuentemente, las simulaciones predictivas son de mayor precisión con resultados más confiables.

Además con esta actualización del modelo se pudo realizar simulaciones con un caudal de extracción de la barrera hidráulica más óptimo, y que al ser más similar al caudal natural pasante es más factible de obtener.

Finalmente, la conjunción y actualización del Modelo Conceptual, el Modelo Numérico, el diseño del Depósito de Lamas 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 a 3 años, el bombeo en la barrera hidráulica permite cumplir el objetivo de mantener las condiciones naturales del sistema. . Es más, el modelo indica que una barrera conformada por dos pozos de extracción permite cumplir con el objetivo de cero contaminación.

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 Lamas, 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, Oct. 2009, 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. ARCADIS, Julio 2010, Estudio Hidrológico de Crecidas Quebrada La Brea.
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 Ramadillas, 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. SCHLUMBERGER WATER SERVICES, Septiembre 2008, Modelo Numérico Hidrogeológico Preliminar Proyecto Caserones.
18. SGS, Mayo 2010, Informe resultados calidad química de la potencial futura agua de relaves
19. SITAC, Septiembre 2009, Caracterización del Sistema Hidrogeológico Quebrada La Brea Proyecto Caserones, MLCC.

- 20.SITAC, Octubre 2009, Modelo Hidrogeológico de Transporte de Masa y Remediación Actualizado Sector Quebrada La Brea, MLCC.
- 21.SITAC, Mayo 2008, Perforación de Tres Pozos Exploratorios Sector Ramadillas y La Brea Proyecto Tranque de Relaves, MLCC.
- 22.SITAC, Septiembre 2009, Caracterización del Sistema Hidrogeológico Quebrada Caserones Proyecto Caserones, MLCC.
- 23.SITAC, Octubre 2009, Modelo Hidrogeológico de Transporte de Masa y Remediación Actualizado Sector Quebrada Caserones, MLCC
- 24.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.
- 25.SITAC, Marzo 2008, Estudio Hidrológico en Crecida Quebrada Caserones y Quebrada La Brea, Cuenca del Río Copiapó.
- 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, Septiembre 2009, Prueba De Bombeo De Larga Duración Del Pozo Wp 01 Sector Rio Ramadillas, III Región
- 28.SITAC, Mayo 2008, Perforación de tres Pozos Exploratorios Sector Ramadillas, La Brea. Proyecto Tranque de Relaves, Minera Lumina Chile
- 29.SITAC, Pruebas De Bombeo Pozos WE-01, WE-02, WE-03, WE-04 y WEO-04.
- 30.SITAC, Antecedentes de la Construcción y Pruebas de Bombeo: Pozos TR Y WP
31. 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- La Brea

Revisión


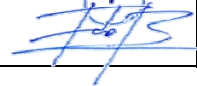
A

Emitido para

Aprobación

No. de Copia

1

Nombre/Cargo	Empresa	Copia(s)	Fecha	Preparado por	Firma
René Orellana	MLCC	Digital y 1 a 3	31-01-11	I. Santibañez /F. Pérez	
Archivo	SRK	4	31-01-11	I. Santibañez/ F. Perez	

Revisión Técnica:

B. Labarca

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

No. de Copia

Fecha	Rev.	Cambio(s)	Autorizado por	Firma

Firma de Aprobación para
envío a Cliente: