



Santiago, 29 de Septiembre de 2016

VPAC-2016-051



Superintendencia de Medio Ambiente
Dominique Hervé Espejo
Fiscal
Teatinos N° 280, piso 8
Santiago
PRESENTE

Ref.: Resolución Exenta N° 722, de fecha 05 de Agosto de 2016.

De mi consideración,

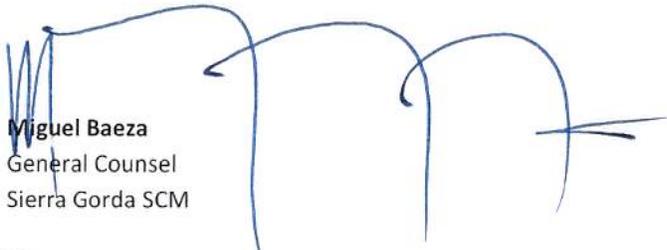
En relación a lo ordenado en el **Resuelvo Segundo** de la Resolución Exenta de la referencia, nos permitimos informar a Ud. lo siguiente:

1. **A lo requerido en el Punto 2.2.2** Remitir el informe de resultados de estudio geofísico que determine zonas de humedad en los alrededores de la piscinas. El informe deberá ser remitido en un plazo de 25 días corridos contados desde la notificación de la resolución que ordena la medida.

Como es de su conocimiento, respondiendo lo solicitado por la autoridad y mediante Carta **VPAC-2016-044 de fecha 30 de Agosto de 2016**, Sierra Gorda SCM entregó una primera versión de memorándum técnico desarrollado por la empresa HydraMetrix, el cual dio cuenta de los resultados de la evaluación geofísica desarrollada con el objetivo de identificar fuentes o cuerpos de agua que pudieran influir en el cambio de los niveles del agua subterránea del pozo CB-9. Sobre esa entrega, Sierra Gorda SCM señaló que el reporte elaborado por HydraMetrix, requería ser analizado en profundidad por el equipo asesor hidrogeológico que corresponde a la empresa ARCADIS para así poner en el contexto hidrogeológico del área del Proyecto los resultados del análisis presentado. Por tanto, en cumplimiento con ese compromiso, junto a la presente carta se entrega un resumen del informe de HydraMetrix en idioma Español el cual se complementa con el informe de análisis de ARCADIS N°4468-0000-GH-MMT-006 que entrega una contextualización Hidrogeológica del estudio Geofísico antes mencionado.

2. Copia de toda la información aquí presentada se entrega en formato físico y digital en CD-ROM.

Sin otro particular y esperando una buena acogida de lo planteado, saluda atentamente a usted,


Miguel Baeza
General Counsel
Sierra Gorda SCM

Cc:

- Gerencia Medio Ambiente Operaciones, SG SCM.
- Gerencia de Asuntos Corporativos y Sostenibilidad, SG SCM.

29 Agosto, 2016

Señores

Sierra Gorda SCM

Atan. Sr. Carlos Terrazas Anza - Jefe General de Operaciones Planta
Relaves, Aguas y Servicios
General Borgoño 934 Piso 10
Antofagasta
Chile

Re: HydraMetrix - Willowstick Estudio Geofísico para localizar y modelar vías preferenciales de agua en SGSCM.

Sub: Reporte Preliminar

Estimado Carlos Terrazas,

Este documento es el “Reporte Preliminar” que detalla los resultados obtenidos del estudio geofísico para modelar vías preferenciales de agua subterránea en Minera Sierra Gorda, Chile.

Introducción

El pozo de monitoreo CB-9 de la compañía Sierra Gorda ha experimentado un inusual y rápido incremento en el nivel de agua en un período de tiempo relativamente corto (Febrero 2015 a Abril 2016 aproximadamente). En este intervalo, el nivel de agua ha subido cerca de 30 metros y se ha mantenido.

Esto es muy inusual para una región árida y seca donde las aguas subterráneas son escasas.

Como consecuencia, la compañía Sierra Gorda ha solicitado determinar el origen de los aportes de agua del pozo CB-9.

Debido a las condiciones de la zona, hay solo 4 fuentes razonables que podrían afectar el nivel del pozo:

- 1.- Fuga desde el acueducto de agua salada.
- 2.- Fuga desde la piscina de agua salada.
- 3.- Fuga desde la piscina de agua industrial (ICV).
- 4.- Vía preferencial subterránea desde el Tranque de Relaves (Vea figura 1).



FIGURA 1 - POSIBLES CAUSAS DEL AUMENTO DE NIVEL EN POZO CB-9

Resumen Ejecutivo

Después de una evaluación y análisis cuidadoso de los datos geofísicos así como una consideración de todas las posibles fuentes de agua que podrían influir en el nivel del pozo CB-9, tres de las cuatro posibilidades se ha dejado fuera (explicación a continuación). La única restante posibilidad muestra múltiples líneas de evidencia y por tanto se concluye que la fuente de agua que se infiltra en el pozo CB-9 se origina en el Tranque de Relaves.

La esquina más cercana del Tranque está ubicada a aproximadamente 5 Kms al noroeste del pozo.

En resumen, los resultados de la investigación indican lo siguiente:

1) El agua salada del acueducto no es la fuente de la infiltración subterránea: Las razones son las siguientes:

- a. Después de un análisis cuidadoso de los datos geofísicos y los modelos de distribución de corriente eléctrica (ECD), no se encuentra evidencia que sugiera que el agua salada (la cual es altamente conductiva) escape de la tubería en el subsuelo a lo largo del acueducto. También, no hay pasos preferenciales de flujo que indiquen conexión entre la tubería y el pozo.
- b. La tubería de agua salada está principalmente sobre suelo (a excepción de cuando cruza la línea férrea). Si una fuga o quiebre existiera en la tubería que fuera capaz de aumentar en 30 metros el nivel del agua subterránea por un largo período de tiempo, se habría notado visual y claramente. Pero, ninguna fuga o quiebre se ha identificado hasta la fecha.
- c. Debido al costo de impulsar agua salada desde el océano hasta la mina, creemos que la tasa de impulsión es constantemente monitoreada y que un simple cálculo de balance de agua (cuanto entra y cuanto sale) puede confirmar que no hay un problema de filtraciones.

2) La piscina de agua salada no es la fuente de la infiltración subterránea: Las razones para esta conclusión son las siguientes:

- a. Después de un análisis cuidadoso de los datos geofísicos y los modelos de distribución de corriente eléctrica (ECD), no se encuentra evidencia que sugiera que el agua salada escape desde la piscina en el subsuelo y afecte el nivel del pozo CB-9. También no hay vías preferenciales de corriente eléctrica que salgan desde la piscina. Si agua salada escapara de la piscina, la corriente eléctrica habría seguido esas vías y revelado sus ubicaciones. Como esto no ha ocurrido, no se han encontrado vías preferenciales.
- b. La piscina de agua salada tiene una membrana sintética y por tanto es muy improbable que una fuga pudiera levantar el nivel de un pozo en 30 metros y mantenerse por un período de tiempo y que no fuera detectado visualmente.

3) La piscina de agua industrial (ICV) no es la fuente de la infiltración subterránea: Las razones para esta conclusión son las siguientes:

- a. Después de un análisis cuidadoso de los datos geofísicos y los modelos de distribución de corriente eléctrica (ECD), no se encuentra evidencia que sugiera que alguna cantidad de agua escape desde la piscina en el subsuelo y afecte el nivel del pozo CB-9. No hay pasos preferenciales de flujo que indiquen conexión entre la tubería y el pozo.

- b. Las muestras de agua del pozo muestran aumentos de nivel de TDS, lo que sugiere que la fuente de agua no puede ser agua fresca.
- c. La piscina de agua industrial tiene una membrana sintética y por tanto es muy improbable que una fuga pudiera levantar el nivel de un pozo en 30 metros y mantenerse por un período de tiempo y que no fuera detectado visualmente.
- d. Cuando se realizó la investigación geofísica, una zanja recorría todo el contorno de la piscina y terminaba en la elevación inicial. La zanja estaba seca y no mostraba signos de fugas.

4) El agua del Tranque de Relaves, localizado a aproximadamente 5 Kms al noroeste del pozo CB-9 es con seguridad la fuente de agua que ha aumentado el nivel del pozo. Las razones para esta conclusión son las siguientes:

- a. Después de revisar cuidadosamente los datos geofísicos y los modelos de distribución de corriente eléctrica, encontramos evidencia que indica una zona de fractura subsuelo al noroeste del pozo CB-9 o entre el pozo CB-9 y el Tranque de Relaves. Dos modelos ECD indican una concentración de flujo preferencial al noroeste del pozo CB-9. Esto prueba que hay una conexión entre el agua del Tranque y el agua que está alrededor del pozo CB-9.
- b. El agua del pozo CB-9 parece encontrar un equilibrio de nivel cerca o un poco más bajo que el nivel del agua del Tranque. Hemos recibido información de que el agua del pozo comienza a estabilizarse en una elevación entre 1625 y 1630 msnm. Esto sugiere que la fuente de agua debe tener un suministro constante sobre este nivel. El afluente del Tranque calza con esta descripción.
- c. Las muestras de agua del pozo muestran un aumento del nivel de TDS. Si el acueducto o la piscina de agua de mar no filtran (como se ha concluido), entonces la única fuente de agua contaminada es la del Tranque.
- d. Inesperadas pérdidas de agua del Tranque pueden haberse pasado por alto debido a una falta de monitoreo debido a que se desea una pérdida de agua (por evaporación y no por una fuga en el subsuelo).

La investigación desarrollada por HydraMetrix/Willowstick han probado una evidencia contundente en identificar la fuente del agua infiltrada en pozo CB-9. Los objetivos del estudio se han cumplido.

Antecedentes

La tecnología usada por HydraMetrix llamada Willowstick es un método geofísico rápido y no invasivo diseñado específicamente para identificar, mapear y modelar vías preferenciales de agua subterránea.

La razón de por qué nuestra tecnología puede identificar las fuentes que originan un cambio de nivel en el pozo CB-9 es porque está basada en el principio de que el flujo del agua en el subsuelo incrementa la conductividad de los materiales de la tierra por los que fluye. Para ello debe tener en cuenta que desde la óptica de la conductividad de la tierra, el agua del subsuelo es relativamente un buen conductor. Como consecuencia, se logra establecer una corriente entre la colocación de dos electrodos ubicados estratégicamente.

Los materiales de la tierra son fundamentalmente aislantes eléctricos con un rango de conductividad que va desde 10^{-12} a 10^{-17} mho/m. En cambio, las mediciones de conductividad obtenidas en terreno van desde 10^{-1} to 10^{-8} mho/m (varias veces una magnitud más alta). Esta diferencia se produce porque la corriente eléctrica viaja primariamente a través de iones disueltos en las vías preferenciales de agua subsuelo.

Por lo tanto, como la corriente eléctrica fue llevada a pasar por el pozo CB-9, tendió a concentrarse en las vías preferenciales de agua subsuelo.

Reconociendo que los caminos de flujo de agua subterránea preferencial son por lo general el facilitador principal de la conducción eléctrica en un entorno típico geológico, la tecnología Willowstick identifica y ubica flujos de agua subterránea gracias a la detección de cambios en la intensidad del campo electromagnético como también con los cambios en la densidad de la corriente eléctrica.

No hay otra tecnología geofísica que calce mejor para identificar la fuente de agua que incluye en el nivel del pozo CB-9.



Contextualización Hidrogeológica del Estudio Geofísico Willowstick en Pozo CB-9

CÓDIGO ARCADIS: N° 4468-0000-GH-MMT-006_0

SEPTIEMBRE 2016

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCIÓN
A	Nombre Firma	P. Ortega	L. Achurra	A. Palacios	Coordinación Interna
	Fecha	21.09.16	21.09.16	26.09.16	
B	Nombre Firma	P. Ortega	L. Achurra	A. Palacios	Revisión y Aprobación Cliente
	Fecha	26.09.16	26.09.16	26.09.16	
0	Nombre Firma	P. Ortega	L. Achurra	A. Palacios	Aprobación Cliente
	Fecha	28.09.16	28.09.16	28.09.16	

CONTACTOS

ALEJANDRA PALACIOS
Jefe de Proyecto

T +56223816229
e alejandra.palacios@arcadis.com

Arcadis.
Av. Antonio Varas 621
Providencia, CP 7500966
Santiago | Chile

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	3
2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	3
2.1 Ubicación del pozo CB-9.....	3
2.2 Contexto Hidrogeológico General	4
3 RESEÑA SOBRE EL METODO GEOFÍSICO WILLOWSTICK.....	7
4 RESULTADOS DEL ESTUDIO WILLOWSTICK.....	8
5 DISCUSIONES	10
5.1 Sobre el Método Willowstick.....	10
5.2 Sobre las Hipótesis de trabajo.....	10
5.3 Filtración de Piscina de agua de Mar.....	11
5.4 Filtración desde Depósito de Relaves	13
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	15

FIGURAS

Figura 2-1: Mapa de ubicación pozo CB-9.....	4
Figura 2-2: Modelo Conceptual Hidrogeológico	6
Figura 3-1: Configuración de electrodos #2 en planta. Dipolo Horizontal.....	8
Figura 5-2: Resultados Isotópicos. Muestras corresponden a julio 2016	12
Figura 5-3: Ubicación de calicatas (en rojo) realizadas en agosto de 2016.	12
Figura 5-4: Cota de pozo CB-9 y laguna del depósito de relaves	13
Figura 5-5: Evolución de TDS para CB-9, Pis (pis. agua de mar) y MSG-1 (depósito de relaves).....	14
Figura 5-6: Evolución de CE in situ para CB-9, Pis (pis. agua de mar) y MSG-1 (dep. relaves).....	14

1 INTRODUCCIÓN

El pozo CB-9 se construyó con el objeto de monitorear el agua subterránea en el margen sur del sector mina-planta y depósito de relaves dentro de las instalaciones del proyecto Sierra Gorda. Este pozo fue construido entre enero y febrero del año 2011, por la empresa perforista GEOTEC Boyles Bros (GBB), y bajo la supervisión de la empresa Schlumberger Water Services (SWS). El pozo fue perforado mediante sistema de aire reverso y habilitado en PVC de 3", sin aportes de agua desde la roca durante la perforación, sin embargo en noviembre de 2011 se midió el primer nivel de 78,86 metros bajo el nivel de terreno (mbnt).

El nivel estático de este pozo se mantuvo estable entre noviembre de 2011 y noviembre de 2014, en valores en torno a la cota 1.600 msnm, lo que equivale a 80 mbnt, aproximadamente. A partir de diciembre de 2014 el nivel del pozo comenzó a evidenciar un aumento paulatino. De esta manera, entre mayo de 2015 y abril de 2016 el pozo experimentó una tasa de ascenso de 1,4 m/mes acumulando un ascenso total de 15,7 m aproximadamente. Entre abril y mayo de 2016 el pozo experimentó un ascenso abrupto de 7 m. Entre mayo de 2016 hasta la fecha, el pozo continúa en ascenso con una tasa de 2,9 m/mes.

En un principio y a raíz de este aumento de nivel se planteó la hipótesis de una filtración en la piscina de agua de mar, dada su cercanía con el pozo CB-9. Por otra parte, se han planteado también las siguientes hipótesis:

1. Filtración desde depósito de relaves (lagunas secundarias)
2. Aumento natural del pozo debido a cambios en el régimen de esfuerzos de la zona de roca fracturada

Para determinar el origen de este ascenso se han realizado, por parte de Arcadis los siguientes análisis: (1) Análisis isotópicos de deuterio y oxígeno-18 (2015, mayo 2016 y julio 2016), (2) Análisis químicos constantes (desde octubre 2014 a agosto 2016), (3) Perfilaje de conductividad eléctrica (julio 2016) e (4) Inspección con cámara del interior del pozo (julio 2016), entre otros.

En este contexto y de forma adicional a los estudios y/o análisis ya mencionados, SGSCM encargó a HydraMetrix un estudio por medio del método geofísico de exploración de aguas Willowstick. Esta herramienta induce un campo magnético al energizar las aguas subterráneas con una corriente alterna de bajo voltaje y amperaje. La metodología se basa en que, el agua comparada con los materiales terrestres, es un buen conductor de la electricidad, por lo tanto el método sería capaz de identificar zonas de mayor conductividad eléctrica en la sub-superficie.

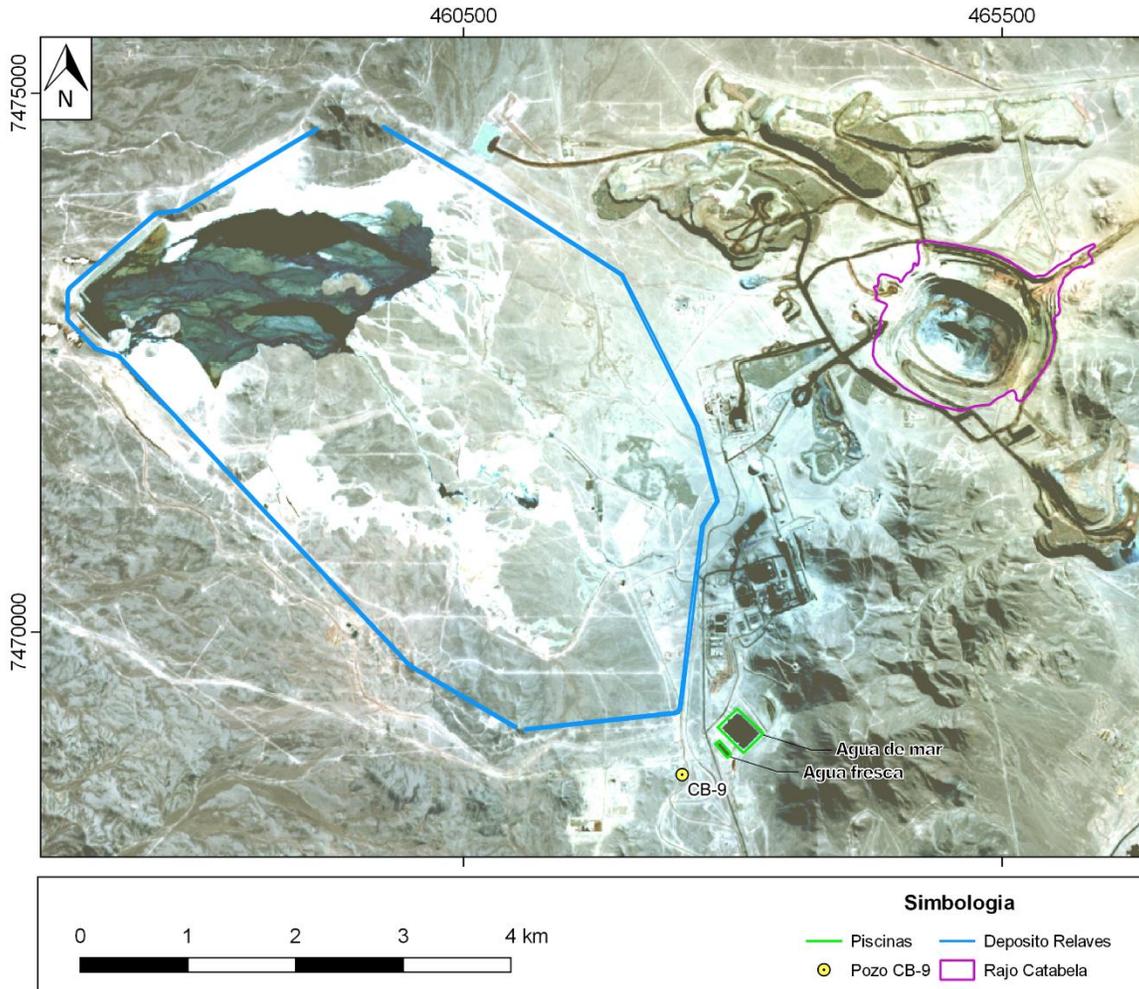
Este memo técnico tiene como objetivo contextualizar los resultados e interpretación de la investigación mediante Willowstick en el pozo CB-9. De esta manera, se presenta un análisis del método y como sus resultados e interpretaciones se relacionan con el modelo conceptual hidrogeológico de la zona. Finalmente, se plantean las conclusiones del estudio.

2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

2.1 Ubicación del pozo CB-9

El pozo CB-9 se encuentra ubicado al sur del depósito de relaves e inmediatamente al suroeste de las piscinas de mar y de agua fresca. En la Figura 2-1 se presenta el mapa de ubicación del pozo CB-9 con respecto a las instalaciones de SGSCM. Los polígonos azules, morado y verdes determinan el depósito de relaves, rajo Catabela y las piscinas, respectivamente.

Figura 2-1: Mapa de ubicación pozo CB-9



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Contexto Hidrogeológico General

A continuación se presenta un resumen del contexto hidrogeológico del área de las instalaciones de Sierra Gorda, abarcando desde Pampa Lina en el este, hasta el depósito de relaves en el oeste. Así también, se presenta en detalle cómo se distribuye la hidrogeología en torno al pozo CB-9.

En términos generales, el área se ha conceptualizado en base a 3 unidades hidrogeológicas principales, de base a techo; el basamento rocoso (UH-3), roca fracturada-meteorizada (UH-2) y depósitos aluviales superficiales (UH-1). El flujo subterráneo en el sector de Pampa Lina ocurre principalmente a través de los depósitos aluviales, donde se ha reconocido la presencia de un acuífero libre (en el entorno de los pozos de los cuales se tiene información) con una conductividad hidráulica entre 0,1 y 5 m/d. El agua de este acuífero tiene una salinidad (TDS) menor a 20 g/L y composición principalmente clorurada sódica.

En el sector occidental, donde se ubica el proyecto (depósito de relaves, sector mina e instalaciones), los depósitos aluviales se encuentran secos, siendo la unidad de roca fracturada la de mayor relevancia hidrogeológica. Ensayos hidráulicos de corta duración indican valores de conductividad

hidráulica entre los 10^{-5} y 10^{-1} m/d. De esta manera, en esta zona, el agua se almacena en fracturas producto de antiguos eventos de recarga y por aportes de agua ascendente desde mayor profundidad a través de estructuras. Los caudales asociados a estos flujos son muy reducidos, reflejando la baja permeabilidad y dificultad de transmisión del agua subterránea, lo que conceptualmente se asemeja al funcionamiento de un acuicludo y no al de un acuífero. La química de este dominio es principalmente clorurada-sódica, sin embargo a diferencia de Pampa Lina, las aguas subterráneas de este sector presentan una salinidad (TDS) del orden de 70 – 90 g/L.

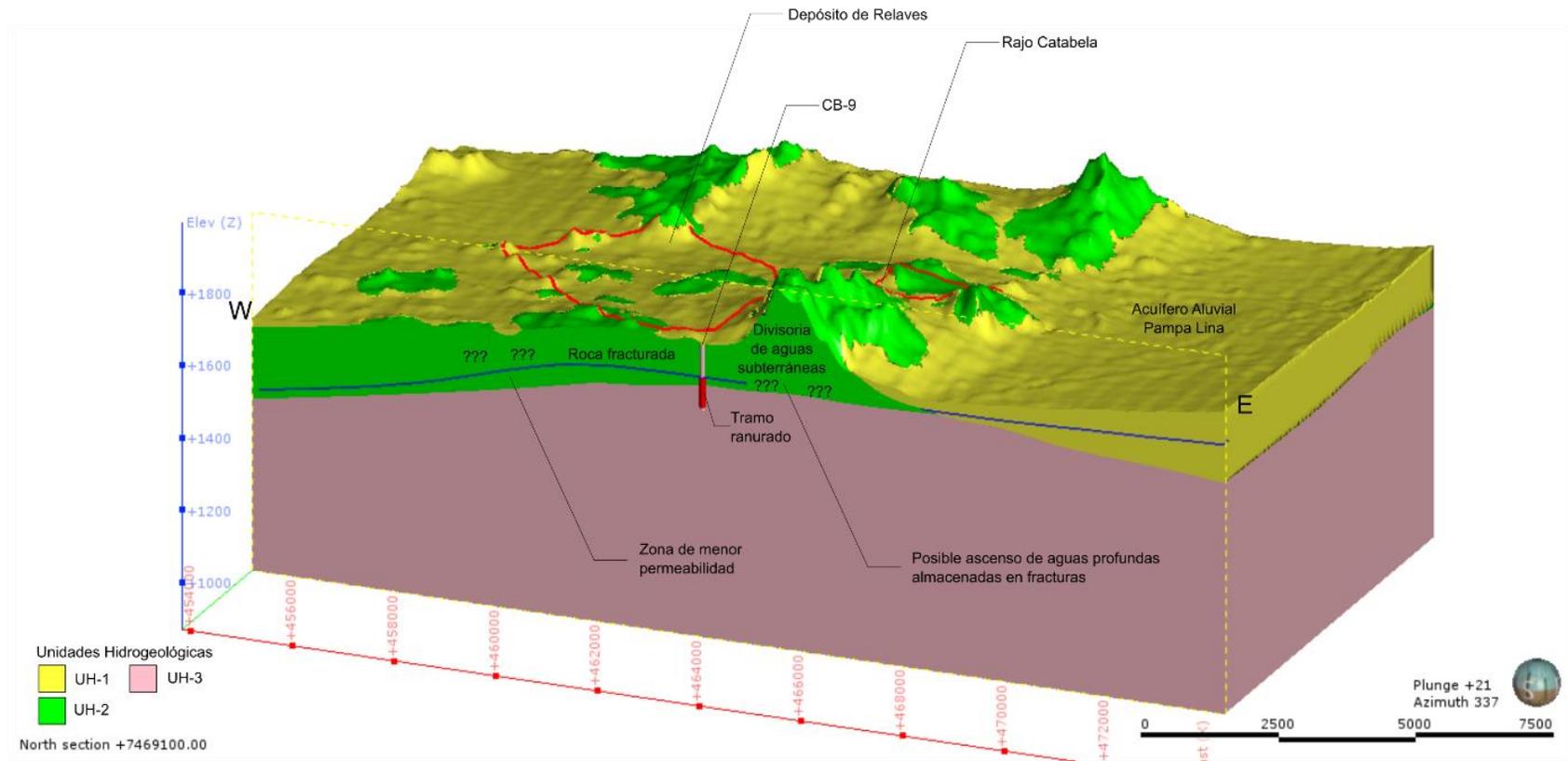
En los cerros que dividen superficialmente el sector de Pampa Lina de la zona occidental, existe un nivel piezométrico en la roca más elevado que en los alrededores, lo que indicaría un gradiente vertical ascendente. Por lo tanto, conceptualmente se interpreta que existe un flujo vertical en esta zona que lleva fluidos más salinos que se encuentran almacenados a mayor profundidad en la roca, y posiblemente con un alto período de residencia. Finalmente, el mayor potencial hidráulico en estos cerros induce un flujo reducido de agua hacia el este (sector mina-depósito de relaves) y oeste (Pampa Lina) a través de la roca.

El pozo CB-9 se encuentra emplazado al oeste de los cerros que dividen los dominios hidrogeológicos. Esta zona posee poca información geológica e hidrogeológica. De esta manera, el pozo CB-9 ha constituido el punto de observación más relevante para caracterizar las unidades hidrogeológicas y el sistema de aguas subterráneas en esta zona. La unidad aluvial en esta zona es poco potente (2 m en el CB-9), siendo la roca la unidad de mayor relevancia. Litológicamente, la roca que atravesó este pozo corresponde a una monzonita.

En la

Figura 2-2 se presenta el modelo 3D realizado en Leapfrog 3D. En aquella figura se puede notar la ubicación del pozo CB-9 con respecto a los dominios hidrogeológicos e instalaciones mineras importantes.

Figura 2-2: Modelo Conceptual Hidrogeológico



Fuente: Elaboración propia

- UH-1: Depósitos aluviales superficiales
- UH-2: Roca fracturada-meteorizada
- UH-3: Basamento rocoso

3 RESEÑA SOBRE EL METODO GEOFÍSICO WILLOWSTICK

En el presente apartado, se realiza una reseña general de cómo funciona el método geofísico Willowstick. Es importante resaltar que esta reseña está basada en información proporcionada por la empresa Willowstick Technologies.

El método Willowstick es una aplicación del método geofísico de resistividad magneto-métrica o MMR, por sus siglas en inglés. Ambos métodos se basan en que la corriente viaja por el medio de menor resistividad, así que de esta manera, las zonas conductoras “concentran” la corriente con respecto a las zonas de rocas que la rodean. En general, este tipo de método es efectivo para mapear cuerpos elongados, donde la corriente se induce paralela al cuerpo en estudio. La canalización de la corriente por estos cuerpos genera un campo magnético anómalo que puede ser medido en superficie, y que no es sensible a variaciones en conductividad cercanas a los puntos de medición.

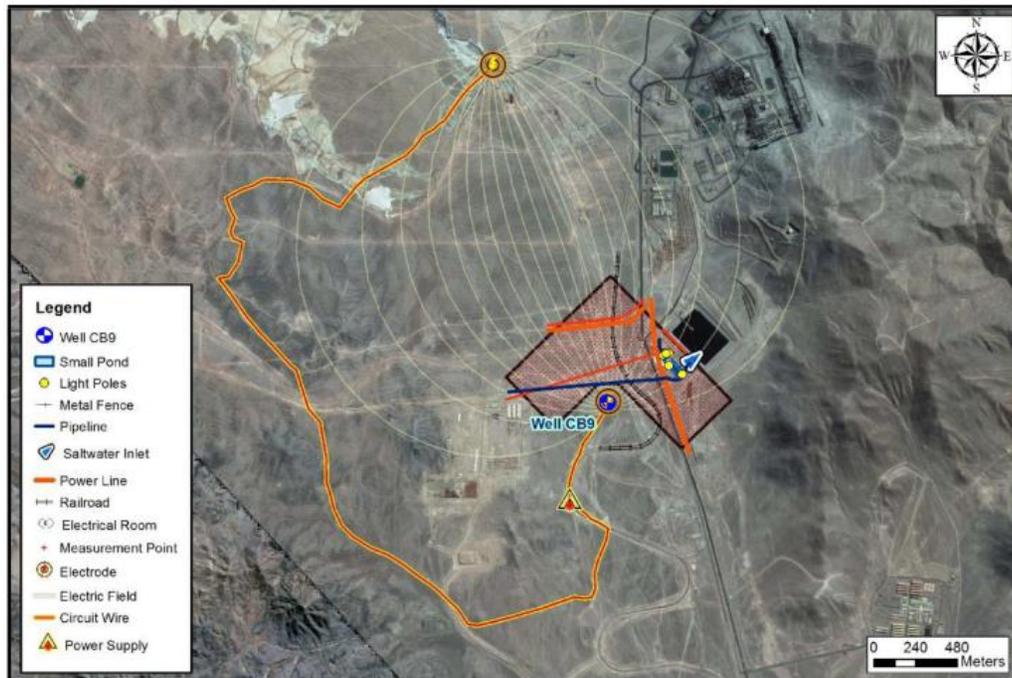
El método de Willowstick incorpora corriente a los cuerpos de agua mediante el uso de dos electrodos, los cuales se instalan de acuerdo a dos configuraciones posibles:

1. Dipolo horizontal: Ambos electrodos son puestos en contacto con agua subterránea o en las zonas de interés.
2. Dipolo vertical: Un electrodo se coloca en la zona alta y otro en la zona baja en una recta vertical.

La medición del campo magnético se realiza mediante bobinas que son dispuestas en una grilla equiespaciada en la zona de estudio. Para disminuir la interferencia del cable que une los circuitos, este se dispone en un “loop” que circunvala el área de estudio. Así también, se debe tener cuidado en identificar todas las fuentes de electricidad que puedan interferir con las mediciones.

Para el estudio realizado en Sierra Gorda, en el pozo CB-9, primero se intentó una configuración en dipolo vertical la cual no dio resultados por lo poco conductor del suelo que conforma la sobrecarga. Posteriormente, se optó por una configuración en dipolo horizontal, situando un electrodo en contacto con el depósito de relaves y el otro electrodo en contacto con el agua dentro del pozo. En la Figura 3-1 se muestra la configuración en planta de los electrodos (configuración #2 en dipolo horizontal), el cable que une el circuito, las zonas de líneas de energía y la red de medición (puntos rojos), entre otros.

Figura 3-1: Configuración de electrodos #2 en planta. Dipolo Horizontal.



Fuente: Willowstick Groundwater Investigation of Sierra Gorda Mine. Final Report.

4 RESULTADOS DEL ESTUDIO WILLOWSTICK

En esta sección, se presenta un resumen de los principales hallazgos y conclusiones realizados por Willowstick Technologies al aplicar el método Willowstick en el pozo CB-9. Se debe tomar en cuenta que lo que se expone en esta sección es la opinión técnica de Willowstick Technologies y no la opinión de este consultor.

El estudio por el método Willowstick planteó cuatro posibles causas de infiltración que podrían estar generando el aumento de nivel en el pozo CB-9:

1. Filtración desde el acueducto de agua de mar
2. Filtración desde la piscina de agua de mar
3. Filtración desde la piscina de agua fresca
4. Filtración desde el depósito de relaves

Tras el análisis de los resultados, se descartaron las hipótesis 1, 2 y 3 numeradas anteriormente y a partir del análisis de las mediciones se interpretó que la cuarta hipótesis (filtración desde el depósito de relaves) era la más probable. Los argumentos indicados por Willowstick son los siguientes:

1. Filtración desde el acueducto de agua de mar:
 - a. No hay evidencia de rotura de cañería.
 - b. Método no mostró zona conductiva hacia la cañería
2. Filtración desde la piscina de agua de mar
 - a. Método no mostró zona preferencial de corriente eléctrica desde o hacia la piscina de agua de mar.

- b. Supone improbable que la geomembrana de la piscina pueda tener una filtración lo suficiente grande para elevar el nivel del pozo en 30 m.
3. Filtración desde la piscina de agua fresca
- a. Método no mostró zona preferencial de corriente eléctrica desde o hacia la piscina de agua de fresca.
 - b. Mezcla con aguas menos salinas tendrían que diluir las muestras de agua del CB-9, hecho que no ha sucedido.
 - c. Cuando se realizó la investigación, simultáneamente se excavó una trinchera del largo y profundidad de la piscina. Aquella trinchera no mostró evidencia de filtraciones.
4. Filtración desde el depósito de relaves
- a. Los modelos mostraron que la zona preferencial de acumulación de corriente eléctrica ocurre hacia el noroeste del pozo CB-9
 - b. El nivel en CB-9 pareciera estar en equilibrio o un poco más bajo que el nivel de agua del depósito de relaves.
 - c. Muestras de CB-9 muestran un aumento de TDS, lo que se correspondería con una mezcla con aguas desde el depósito de relaves.
 - d. Supone que pérdidas de agua desde el depósito de relaves no se han detectado debido a la falta de monitoreo.

5 DISCUSIONES

A continuación se presentan las discusiones y conclusiones en relación al método Willowstick y a las interpretaciones realizadas a partir de la investigación en el pozo CB-9.

5.1 Sobre el Método Willowstick

En términos generales, el método geofísico de MMR (Willowstick es una aplicación específica de MMR) se ha utilizado para identificar zonas minerales poco conductivas o altamente conductivas alojados en un medio conductivo; ejemplos de esto son depósitos de Zinc (esfalerita) o mineralización diseminada. Adicionalmente, el método tiene la tendencia (parcialidad) a orientar las zonas de conductividad anómala de forma paralela a las estructuras. Por esta razón, se utiliza en general para identificar cuerpos minerales alargados paralelos a zonas de fallas. De esta manera, Willowstick constituye una aplicación de este método a la exploración de aguas subterráneas.

En virtud de lo anterior, existe la posibilidad de que el método esté mostrando zonas de alta conductividad relativa que no necesariamente estén relacionadas con la presencia de aguas subterráneas. Por ejemplo, la corriente puede estar tomando como caminos preferenciales zonas con alteración hidrotermal y/o con mineralización metálica. Por ello, este método no debe ser evaluado de forma aislada, sino que se deben complementar los antecedentes obtenidos con resultados de campo adicionales (perforaciones, geofísica adicional, ensayos de bombeo, etc.)

Adicionalmente a lo expuesto, existe en el sitio de estudio una cantidad considerable de zonas conductivas artificiales en superficie que pueden estar interfiriendo en las lecturas. Entre ellas se cuentan, línea de tren, cables eléctricos y tubería de agua de mar. El reporte no explica ni explicita cómo fueron enmascaradas estas zonas, ni tampoco cómo afectan a la interpretación. Se puede observar, que se les asignó un “buffer” alrededor de ellas, cuyas estaciones de medición que quedaron dentro del buffer no se tomaron en cuenta, sin embargo no se explica de qué forma se definió ese buffer

5.2 Sobre las Hipótesis de trabajo

De las cuatro hipótesis planteadas por Willowstick Technologies, solo dos de ellas Arcadis había tomado en cuenta anteriormente, y que corresponden a filtraciones desde la piscina de agua de mar y depósito de relaves. Las filtraciones desde el acueducto de agua de mar y la piscina de agua fresca se habían descartado desde un principio por razones similares a las esgrimidas por Willowstick Technologies, donde se puede mencionar lo siguiente:

1. Filtración desde acueducto de agua de mar: Esta hipótesis se había descartado por la falta de evidencia de filtraciones desde el acueducto, el cual está instalado sobre la superficie o semi-enterrado.
2. Filtración desde piscina de agua fresca: Una mezcla de aguas de la roca junto con aguas de la piscina de agua fresca produciría una dilución de las aguas subterráneas de la roca, situación que no se ha observado en el registro histórico hidroquímico del pozo CB-9.

Finalmente, cabe mencionar que estas fuentes quedan descartadas como causas del aumento de nivel del pozo CB-9.

5.3 Filtración de Piscina de agua de Mar

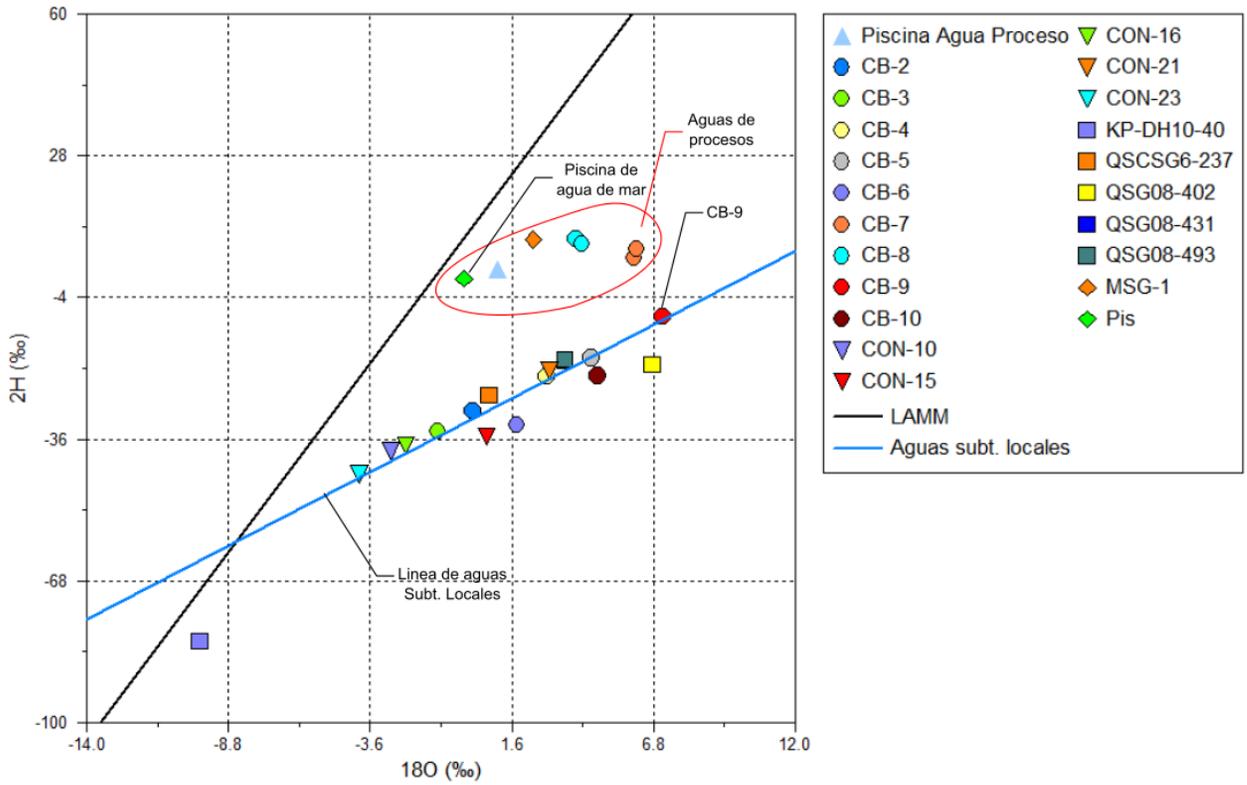
La investigación de Hydrametrix descartó como fuente del aumento del nivel del CB-9, la filtración desde la piscina de agua de mar. El principal argumento para descartarlo consiste en que los resultados del método ECD (Distribución de Corriente Eléctrica) Willowstick no mostraron una zona conductiva en dirección hacia o desde la piscina de agua de mar. Adicionalmente, se menciona que es poco probable que la geo-membrana tenga una rotura lo suficiente grande para generar un aumento de 30 m en el pozo.

Este resultado es coherente con estudios anteriores realizados por ARCADIS, los que no fueron concluyentes sobre una posible filtración desde la piscina de agua de mar. El argumento a favor de esta hipótesis es principalmente la cercanía de la piscina al pozo. Sin embargo, los análisis isotópicos (Figura 5-1) mostraban las aguas del CB-9 cercanas a la composición isotópica de las aguas de proceso. Sin embargo, dado que, no se tienen composiciones isotópicas base, es decir una muestra del agua pre-ascenso de nivel del CB-9, no se pudo concluir de forma contundente sobre estos análisis. Por otra parte, la mayor evidencia en contra de la hipótesis de filtraciones desde las piscinas corresponde a que no existen evidencias químicas claras de la influencia del agua de mar sobre el agua del pozo. En efecto, la piscina de agua de mar tiene un agua de composición principal clorurada-sódica y de menor salinidad en comparación al agua del pozo CB-9, que tienen una composición principalmente clorurada-magnésica de mayor salinidad. De esta manera, una mezcla entre ambas debería haber mostrado una dilución de las aguas del CB-9, situación que no se ha identificado con la información disponible hasta la fecha.

Por otra parte, y como fue en su momento informado a la SMA, entre el 6 y 13 de agosto se realizaron dos calicatas en sector de piscinas de agua de mar y de agua de fuente externa. Las calicatas se desarrollaron a lo largo de cada una de estas piscinas, con longitudes de 130 y 50 m, respectivamente, profundidades entre 4 y 4,5 m, ambas en la dirección del pozo CB-9, tal como se muestra en la Figura 5-2. No se detectaron evidencias de agua en las calicatas mencionadas.

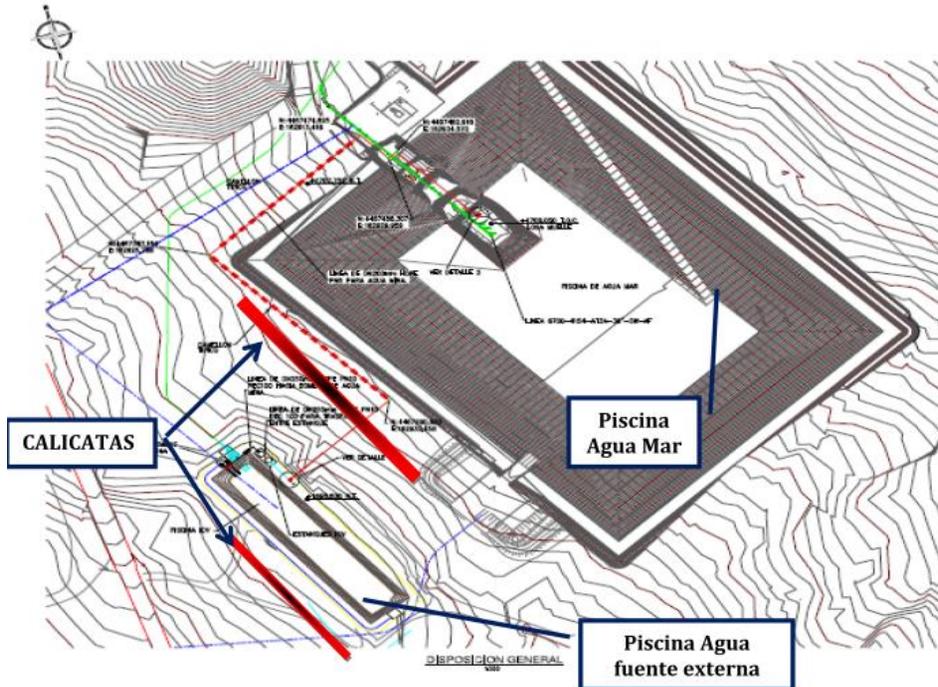
Por lo tanto, con la información disponible a esta fecha se sostiene que no existen evidencias de filtraciones desde la piscina de agua de mar que puedan estar influenciando el nivel de agua en el pozo CB-9.

Figura 5-1: Resultados Isotópicos. Muestras corresponden a julio 2016



*Muestra MSG-1 proviene de laguna principal del depósito de relaves
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-2: Ubicación de calicatas (en rojo) realizadas en agosto de 2016.



Fuente: VPAC-2016-043

5.4 Filtración desde Depósito de Relaves

La investigación por medio del método Willowstick concluyó que la causa más probable del aumento del nivel del CB-9 corresponde a una filtración desde el depósito de relaves. Esta filtración llegaría a la zona fracturada de la roca y provocaría el aumento del CB-9 por medio de un set de estructuras de orientación noroeste-sureste principalmente.

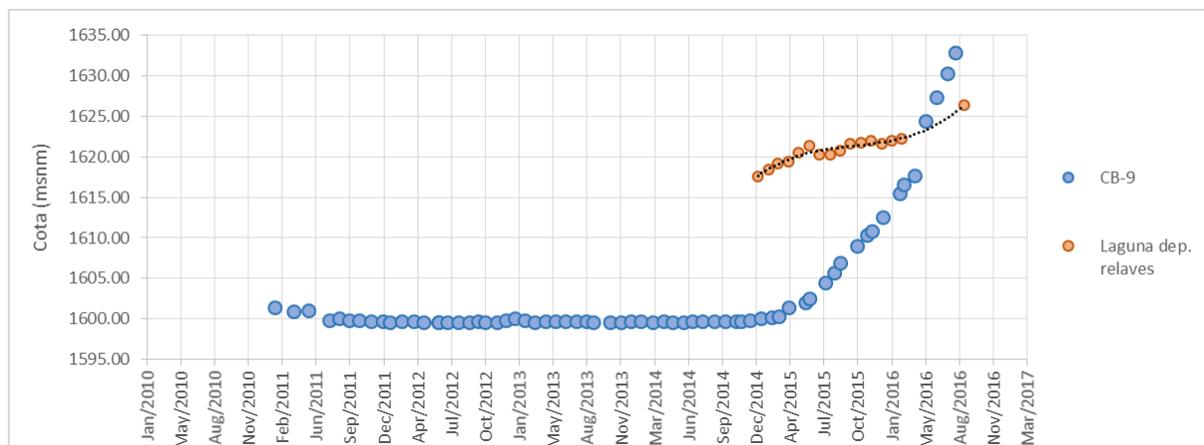
Los argumentos presentados para afirmar esta situación, se basan primero en que, los modelos generados a partir del método Willowstick muestran una zona de mayor conductividad en dirección noroeste desde el CB-9. De forma adicional se plantean los siguientes argumentos:

1. Nivel del CB-9 está estable a un nivel similar al del espejo de agua del depósito de relaves.
2. Química de CB-9 ha aumentado en salinidad lo que se correspondería con una mezcla con aguas del depósito de relaves (más salinas).

El primero de estos argumentos no se corresponde con los datos obtenidos por ARCADIS en los monitoreos mensuales y trimestrales, dado que el nivel del pozo CB-9 no se ha estabilizado y a la fecha continúa incrementando su nivel (Figura 5-3). Por otro lado, en el reporte de Willowstick se menciona que la cota de agua del pozo CB-9 está levemente debajo de la cota de la laguna del depósito de relave. Según la información que tiene ARCADIS, tomada de las batimetrías mensuales que realiza Sierra Gorda, el nivel del pozo se encuentra casi 4 m sobre la cota de la laguna principal del depósito de relaves (Figura 5-3). Sin embargo, en la laguna donde se instaló uno de los electrodos, y en piscinas aledañas que se forman en las zonas donde se descarga el relave, se observaron cotas (tomadas de Google Earth) entre 1660 y 1670 msnm.

De esta manera, considerando exclusivamente la información del gradiente hidráulico, no es posible que la laguna principal del depósito de relaves esté filtrando hacia el pozo CB-9. Se debe chequear cotas de las piscinas secundarias, cercanas a la descarga del relave, para determinar gradiente hacia CB-9.

Figura 5-3: Cota de pozo CB-9 y laguna del depósito de relaves

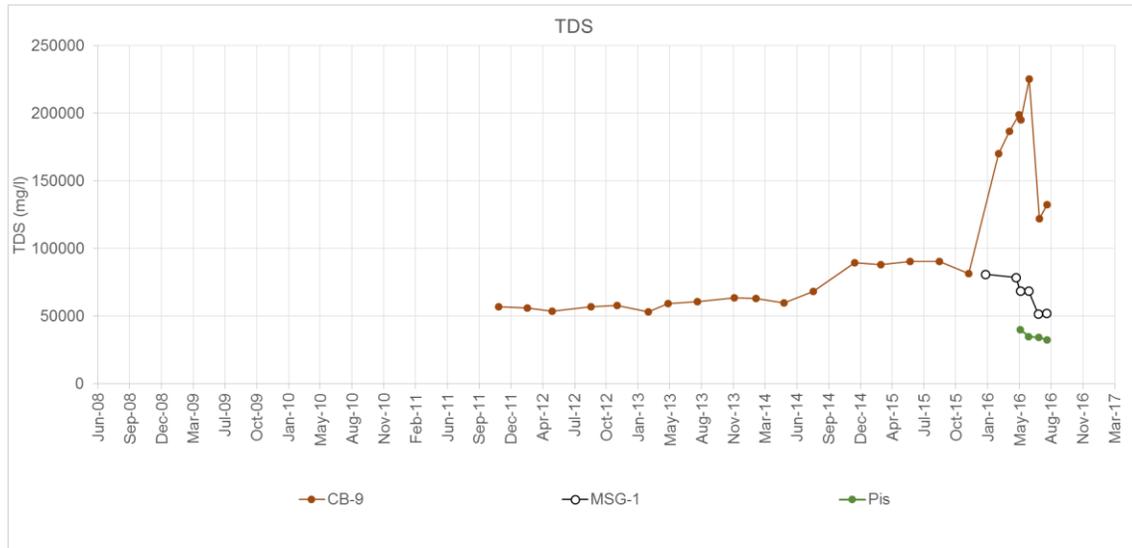


Por otra parte, es efectivo que el pozo evidenció a partir de agosto y diciembre de 2014 un aumento de los TDS, pasando desde 60 mg/L a 90 mg/L como se muestra en la Figura 5-4. Sin embargo, las medidas de conductividad eléctrica, tanto de terreno como de laboratorio, no muestran esa tendencia ascendente, por el contrario los valores se han mantenido bastante estables como se muestra en la Figura 5-5.

Adicionalmente, como se puede observar en la Figura 5-1, la composición isotópica del agua en el pozo CB-9 difiere de la composición del depósito de relaves.

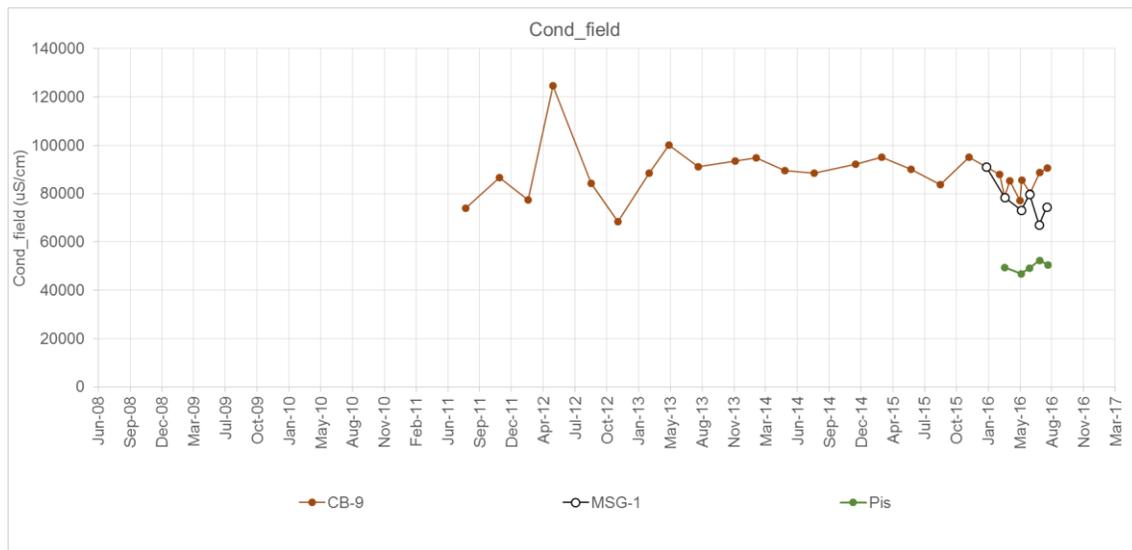
De todo lo anterior, se desprende que los antecedentes químicos e isotópicos no son concluyentes respecto a una relación entre el agua del depósito de relaves y el aumento de nivel en el pozo CB-9.

Figura 5-4: Evolución de TDS para CB-9, Pis (pis. agua de mar) y MSG-1 (depósito de relaves)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-5: Evolución de CE in situ para CB-9, Pis (pis. agua de mar) y MSG-1 (dep. relaves)



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los resultados del método Willowstick muestran una zona de mayor conductividad eléctrica hacia el noroeste del pozo CB-9, dato que hay que considerar como un antecedente más para la determinación de la(s) causa(s) del ascenso de nivel en el pozo. La interpretación realizada por la empresa de geofísica concluye la existencia de una zona de falla o fractura que genera un flujo preferencial hacia el pozo. Sin embargo, no existen antecedentes geológicos que sustenten esta estructura. Considerando que el sector está altamente mineralizado, en caso de existir dicha estructura, la alta conductividad también podría estar relacionada a la presencia de metales.

Por último, la información hidrogeológica de toda el área, incluyendo el sector mina donde la componente estructural tiene una mayor importancia, indican valores de permeabilidad muy bajos para la roca, lo que no es consistente con un aumento del nivel en el pozo producto del inicio de la depositación de relaves sólo unos meses antes.

Sin perjuicio de lo expuesto, a la fecha no es posible descartar del todo la hipótesis planteada por la empresa Hydrametrix a partir del método Willowstick, y se hace necesario desarrollar nuevos estudios de diagnóstico que permitan explicar el incremento en el nivel del pozo CB-9.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Debido a que el método Willowstick tiene la tendencia a orientar las zonas de conductividad anómala de forma paralela a las estructuras, existe la posibilidad de que el método esté mostrando zonas de alta conductividad relativa que no necesariamente estén relacionadas con la presencia de aguas subterráneas. Por ejemplo, la corriente puede estar tomando como caminos preferenciales zonas con mineralización metálica. Por ello, este método no debe ser evaluado de forma aislada, sino que se deben complementar los antecedentes obtenidos con resultados de campo adicionales (perforaciones, geofísica adicional, ensayos de bombeo, etc.)
- El método Willowstick descartó como causas del aumento del nivel de CB-9 las hipótesis siguientes: filtraciones desde la piscina de agua de mar, piscina de agua fresca y acueducto de agua de mar. Adicionalmente, la información disponible actualmente (hidroquímica, isotopía, observaciones de terreno, etc) también indicaría que estas hipótesis no serían la causa del aumento de nivel del CB-9.
- El reporte de Willowstick propone como posible causa del aumento del CB-9 una filtración por medio de fracturas desde el depósito de relaves, lo que sólo se sustenta en una anomalía conductiva, pero no en antecedentes geológicos e hidrogeológicos categóricos. Es necesario realizar una investigación más robusta para confirmar esta hipótesis, debido a que existen argumentos a favor y en contra, como se discutió en la sección anterior. Adicionalmente, los gradientes hidráulicos de la zona (cotas piezométricas) muestran que el nivel del pozo CB-9 está por sobre el nivel de la laguna principal del depósito de relaves. Se descarta entonces, que la laguna principal este filtrando hacia el pozo CB-9. De esta manera, una siguiente hipótesis a investigar puede ser replantada de la siguiente manera: Filtración desde lagunas secundarias (cercañas a la zona de descarga) del depósito de relaves.

Arcadis

Av. Antonio Varas 621
Providencia, Santiago
T: +56 2 2381 6000

arcadis.com

