



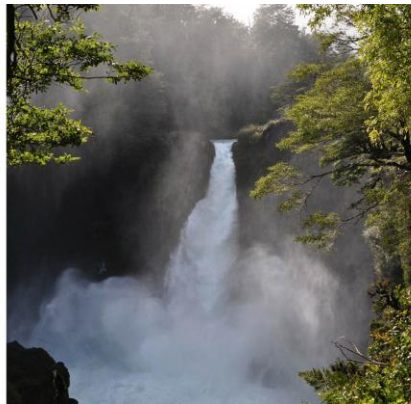
Informe Experto

Revisión Situación Hidrogeológica 2025

Cuenca Calama Sector Minera Centinela

Informe Rev 0

Octubre de 2025



Informe Experto

Revisión Situación Hidrogeológica 2025

Cuenca Calama Sector Minera Centinela

Código de Proyecto: [2023 - 317 - CENT]

Carlos Espinoza Contreras
Ingeniero Civil, Ph.D.

HIDROGEOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE SUSTENTABLE LTDA

Suecia 211, Oficina 701-A, Providencia - Santiago Chile

e-mail: contacto@hidromas.cl

website: www.hidromas.cl

REV.	Elaborado por:	Revisado por:	Aprobado por:	DESCRIPCIÓN
Rev.0	Carlos Espinoza Alexandra Cuéllar	Carlos Espinoza	Carlos Espinoza	Para Revisión
	[21.10.2025]	[24.10.2025]	[27.10.2025]	

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO	iii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Aspectos Generales	1
1.2 Objetivos de este Documento	2
2 ANTECEDENTES REVISADOS	4
2.1 Antecedentes Públicos Disponibles a octubre 2023	4
2.2 Antecedentes Utilizados para el Análisis	5
2.2.1 Antecedentes Proporcionados por Minera Centinela a Octubre de 2023	5
2.2.2 Informes Estudio de Impacto Ambiental DMH (2024) y Oficios Revisión DGA.....	5
2.2.3 Antecedentes Proporcionados por Minera Centinela a octubre de 2025	6
3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA DISPONIBLE	7
3.1 Aspectos Generales	7
3.2 Modelo Conceptual Hidrogeológico con Formaciones Opache y Calama.....	7
3.2.1 Contexto Global	7
3.2.2 Principales Resultados Revisión de Antecedentes	7
3.2.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual Área de Interés	10
3.2.4 Actualización Información Estratigráfica Sector de Interés (ITASCA, 2024).....	13
3.2.5 Actualización Información Generada para EIA DMH (2023) y otros Antecedentes	16
3.3 Rol Hidrogeológico Formación Jalquinche.....	18
3.3.1 Conceptualización Técnica Formación Jalquinche	18
3.3.2 Niveles Piezométricos Actuales en Área de Estudio	20
3.4 Relación Aporte de Agua a Vertiente La Cascada y Formación Opache	21
3.4.1 Contexto General.....	21
3.4.2 Funcionamiento Actual Vertiente La Cascada.....	22
3.4.3 Efecto de Pozos de Bombeo de Minera Centinela sobre Formación Opache	27
3.5 Resumen Efectos Externos sobre Vertiente La Cascada	30
4 CONCLUSIONES	31
4.1 Sobre el Modelo Conceptual en el Área de Estudio y la Vertiente La Cascada.....	31
4.2 Sobre La Situación de la Vertiente La Cascada	32

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Sector de Interés con Puntos Clave (Campo Pozos Calama).....	1
Figura 3-1: Ubicación Perfiles Hidrogeológicos SW y NW en el Sector Campo de Pozos de Calama	10
Figura 3-2: Perfiles Hidrogeológicos SW y NW en el Sector Campo de Pozos de Calama	11
Figura 3-3: Planta con Trazado de Perfiles Hidrogeológicos en Sector de Interés	13
Figura 3-4: Sección Hidrogeológica Correspondiente al Perfil A-A'	14
Figura 3-5: Sección Hidrogeológica Correspondiente al Perfil B-B'	15
Figura 3-6: Área de Estudio Información Hidrogeológica Proyecto Desarrollo Futuro DMH	17
Figura 3-7: Información Geofísica Complementaria	17
Figura 3-8: Perfil Hidrogeológico B, Área de Estudio Proyecto Desarrollo Futuro DMH	18
Figura 3-9: Esquema Modelo Conceptual Sector Calama	19
Figura 3-10: Piezometría Formación Opache (diciembre de 2022)	20
Figura 3-11: Piezometría Formación Calama (diciembre de 2022)	21
Figura 3-13: Usos de Terceros en torno a la Vertiente La Cascada.....	24
Figura 3-14: Desarrollo de Viviendas Rurales en entorno de la Vertiente La Cascada (2010 a 2022)	25
Figura 3-15: Intervención Antrópica de trazado Vertiente La Cascada (2019)	26
Figura 3-16: Bombeo histórico de los pozos de MC realizado desde el año 2002 hasta 2022	27
Figura 3-17: Caudal Vertiente Ojos de Opache ENAEX en relación con Bombeos desde Pozos MC	29
Figura 3-18: Caudal Vertiente La Cascada en relación con Bombeos desde Pozos MC	29

RESUMEN EJECUTIVO

Este informe experto tiene como objetivo principal revisar y analizar los antecedentes hidrogeológicos en el sector de Minera Centinela (MC) en la Cuenca de Calama. Específicamente, se busca determinar la posible relación técnica entre la operación histórica del campo de pozos de bombeo de Minera Centinela y la disminución de caudales observada en la **Vertiente La Cascada**. Minera Centinela operó su campo de pozos de bombeo desde el año 2002 hasta su cese el 31 de diciembre de 2022.

- **Sobre el modelo conceptual en el área de estudio y la Vertiente La Cascada**

El análisis se centra en la estratigrafía y el sistema de captación de agua en el área, el cual se compone de dos unidades principales:

- **Sistema Profundo:** Correspondiente a la **Formación Calama**, donde se encuentran cribados los pozos de bombeo de MC.
- **Sistema Somero:** Correspondiente a la **Formación Opache**, que es la fuente de alimentación de las aguas de origen somero, incluyendo la Vertiente La Cascada.

Ambos sistemas se encuentran separados por un estrato geológico de baja permeabilidad, denominado **Formación Jalquinche**, que actúa como un **acuitardo** (barrera semipermeable), dificultando la comunicación vertical entre ambos acuíferos.

- **Sobre la situación de la Vertiente La Cascada**

El informe concluye que **no existe una relación causal directa** del bombeo histórico de Minera Centinela (desde las Formaciones Opache y Calama) sobre la disminución de caudales de la Vertiente La Cascada.

Se sostiene que la situación que afectó el funcionamiento de la vertiente es atribuible a **otros factores** que presentan una mayor probabilidad y relación técnica, adecuadamente documentados en el análisis.

La conclusión de que no existe una relación causal directa entre la operación de los pozos de bombeo MC y la reducción del caudal de la vertiente La Cascada se basa en la combinación de al menos tres factores técnicos fundamentales:

1. **Existencia de un acuitardo que produce separación de dos acuíferos (Formación Opache y Formación Calama) con la consiguiente desconexión hidráulica entre ambos:** La zona de captación (cribas) de los pozos de MC está confinada a la Formación Calama (profunda), separada de la Formación Opache (somera) por el acuitardo Jalquinche, lo que ratifica que no existe una relación causal directa sobre los caudales de la vertiente La Cascada, que se alimenta de aguas someras, a causa de la operación de los pozos de MC localizados en la Formación Calama o acuífero inferior.
2. **Ubicación geográfica y sentido de flujo:** La Vertiente La Cascada se localiza al sur del Campo de Pozos de MC y **fuera del sentido de flujo regional** de las aguas subterráneas (el cual es este-oeste, según análisis piezométricos de ITASCA). Esta posición lateral sugiere que la vertiente no está en la trayectoria directa del cono de depresión generado por el bombeo.
3. **Evidencia de intervención de terceros y uso local:** Existen antecedentes que indican situaciones ajenas a la operación de MC como responsables directos de la disminución de caudal. Estas incluyen la **evidencia de uso local de aguas** en la cercanía de la vertiente, así como la **intervención directa de terceros** sobre la propia vertiente y su entorno.

- **Conclusión Final**

En síntesis, la evidencia revisada permite desestimar la relación causal directa entre el bombeo histórico de Minera Centinela y el estado de la Vertiente La Cascada, atribuyendo la situación a fenómenos hidrogeológicos locales y a la acción de terceros.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos Generales

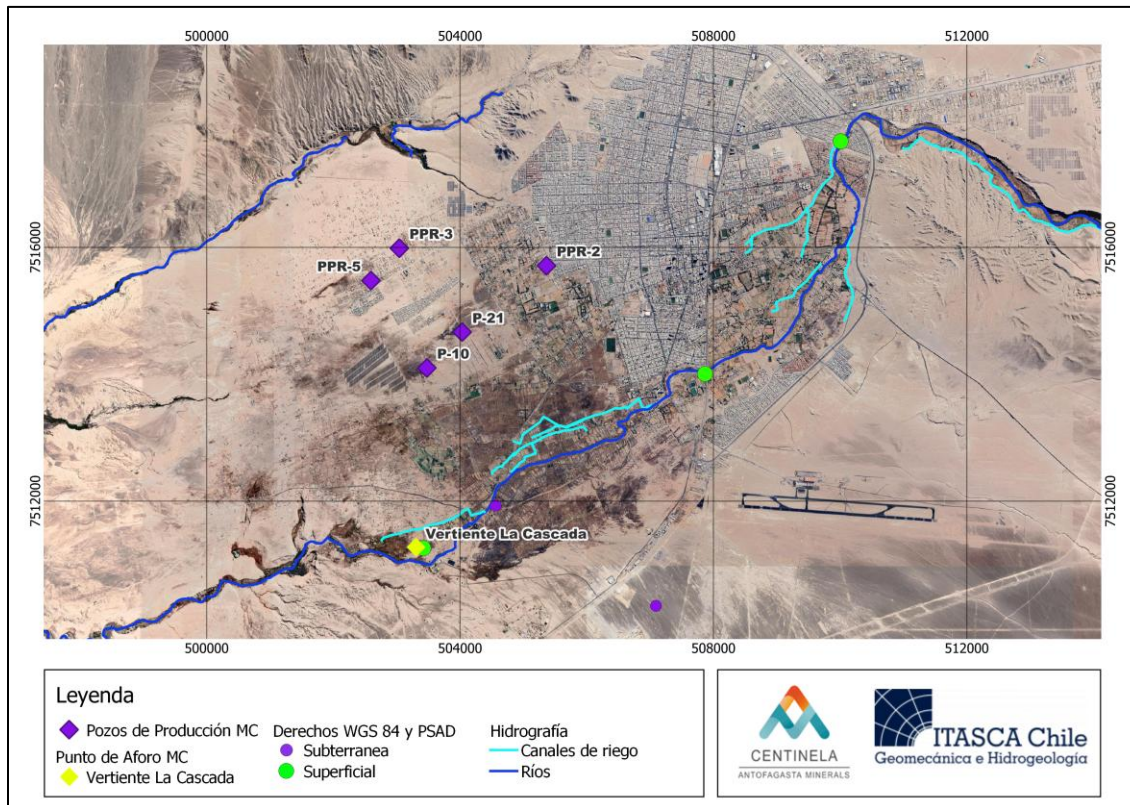
Minera Centinela (en adelante indistintamente Minera Centinela o MC) solicitó el apoyo de HIDROMAS para la revisión de antecedentes hidrogeológicos preparados en el marco del proceso sancionatorio D-254-2022 levantado por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), asociado al comportamiento hidrogeológico del acuífero de Calama.

Este proceso sancionatorio se inicia a partir de una denuncia considerada para la formulación de cargos cuya fecha de ingreso es el 19 de julio de 2019, y que hace referencia a una presentación realizada por Gabriel Lobos – especialista en fauna – donde relata la existencia de *"daño ambiental sufrido por el arroyo 'La Vertiente', único sitio donde habita la ranita del Loa, Telmatobius donkoi, especie en Peligro Crítico de acuerdo a la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN"*.

La Dirección Regional de la DGA señala que, con fecha 6 de junio de 2019, efectuó una inspección en el sector denominado Vertiente La Cascada, constatando la ejecución de una zanja cuyas dimensiones eran de 3 metros de profundidad, y 1 metro de ancho, que se extendía desde el nacimiento de la vertiente hasta el punto de aforo, el cual se encontraba con caudal nulo.

En la Figura 1-1 se presenta la zona de interés mostrando, en particular y como temas claves en este sector, los cinco pozos de bombeo de MC ubicados en la Formación Calama: PPR-2, PPR-5, P10, PPR-3 y P-21, así como la ubicación del sector de vertiente La Cascada y los canales de riego en la zona.

Figura 1-1: Sector de Interés con Puntos Clave (Campo Pozos Calama)



Fuente: ITASCA-INF-4028.012.01-Comportamiento Hidrogeológico Campo De Pozos De Calama. 2022

Durante el año 2023 HIDROMAS preparó dos documentos que contienen una revisión crítica de los antecedentes hidrogeológicos públicos disponibles, en la zona de interés, a la fecha de cierre de ambos documentos (enero y octubre de 2023). El último de estos documentos se reforzó con la información presentada en el informe técnico preparado por ITASCA (2023), denominado “Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada, R-1”.

Este nuevo informe de HIDROMAS del año 2025 complementa el análisis anterior a partir de una revisión de los antecedentes generados con posterioridad a la fecha de cierre del documento anterior (octubre de 2023), centrándose en la revisión de información del área de interés, proporcionada en las siguientes fuentes generales:

- ITASCA. Informe 4028.012.03. Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. R-2. 2023.
- ITASCA. Informe de Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril de 2024.
- SGA-DMH. Informes Hidrogeológicos Varios del Estudio de Impacto Ambiental Desarrollo Futuro DMH. 2023 a 2025.

De manera complementaria se han revisado los pronunciamientos de la autoridad sectorial (Dirección General de Aguas) en el marco del proceso ambiental del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Desarrollo Futuro DMH iniciado en julio de 2023¹.

1.2 Objetivos de este Documento

Tal como se ha indicado, este documento de revisión se centra de manera directa en el análisis de antecedentes preparados por ITASCA²³⁴⁵ para Minera Centinela en el marco de este proceso sancionatorio y en otros antecedentes públicos disponibles en el área.

En particular este reporte se enfoca en la revisión de los antecedentes que permiten analizar los siguientes hechos claves:

- Modelo conceptual con Formaciones Opache y Calama como principales unidades hidrogeológicas en este sector (estudios públicos y propios).
- Verificar que ambas unidades están hidrogeológicamente separadas por la Formación Jalquinche que actúa como un sistema acuitado con baja o nula conectividad vertical entre ambas formaciones.
- Confirmar que el nacimiento de vertientes se asocia con diversas fuentes de aporte de agua y en particular, debido a las condiciones hidrogeológicas, con el aporte de agua desde la Formación Opache (somera) y no con la Formación Calama (profunda).
- Verificar que los pozos de bombeo de MC se encuentran actualmente habilitados en la Formación Calama (sistema profundo) y por lo tanto su operación histórica durante ese período, no afectó el aporte a las vertientes y en particular a la vertiente La Cascada.
- Verificar que la operación de los pozos de bombeo de MC en el periodo de bombeo desde la formación Opache (somera) no influyó sobre los caudales de la vertiente La Cascada.

¹ https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id_expediente=2159674786

² ITASCA. Informe 4028.012.03. Profundización análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. R-1 y R-2. 2023.

³ ITASCA. Informe 4028.012.01. Comportamiento Hidrogeológico del Campo de Pozos de Calama. 2023.

⁴ ITASCA. Nota Técnica NOT – 4028.012.01 Rev. 0. 2022.

⁵ ITASCA. Informe de Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril de 2024.

- Verificar la existencia de intervención antrópica en la zona de nacimiento de la Vertiente La Cascada (usos locales de agua superficial y subterránea, construcción y limpieza de canales, construcción de viviendas rurales), lo que podría explicar la situación de reducción de los aportes de agua en ella.

2 ANTECEDENTES REVISADOS

2.1 Antecedentes Públicos Disponibles a octubre 2023

En el sector de la cuenca de Calama existen diversos estudios de carácter técnico que han sido preparados tanto por o para la Dirección General de Aguas, así como por terceros en el marco de estudios de carácter técnico o ambiental. A continuación, se listan documentos claves de esta revisión:

- AMPHOS 21. Plan de Vigilancia Ambiental División Ministro Hales - Informe Técnico Período Enero 2018 - Diciembre 2018 – CODELCO. 2019.
- AQUACONSULT. Estudio Modelamiento Hidrogeológico Subcuenca Cluster Toki para Proyecto Quetena. 2011.
- AGUAEX. Caracterización geofísica del subsuelo en el área Oeste del Acuífero de Calama (sectores Pozo de Lomas Bayas y La Cascada). Junio de 2020. 2020.
- Blanco, N. Estratigrafía y evolución tectono-sedimentaria de la cuenca cenozoica de Calama (Chile, 22°S). Barcelona: Tesis Doctoral, MS thesis, 68 pp. 2008.
- Blanco, N. Carta Chiu Chiu, Región de Antofagasta, Carta Geológica de Chile. 2009.
- Borgel, R. Geomorfología. Colección Geografía de Chile. Santiago: Instituto Geográfico Militar. 1983.
- DGA, SDT N° 153. Determinación de los derechos de aprovechamiento aguas subterráneas factibles de constituir en los sectores de Calama y Llaqui, cuenca del río Loa, II región. 2003.
- DGA-DICTUC INGENIERÍA. SDT N°216. Hidrogeología de la II Región y Asesoría para la Revisión de Informes de Estudio de Evaluación de Recursos Hídricos. Santiago: Dirección General de Aguas (DGA). 2005.
- DGA-Matriz. SIT N°295. Modelación Acuífero de Calama, Sector Medio de la Cuenca del Loa, Región de Antofagasta. Santiago: Dirección General de Aguas (DGA). 2012.
- DGA-Mayco. SIT N°324. Levantamiento Información Hidrogeológica Región de Antofagasta. Santiago: Dirección General de Aguas. 2013.
- DGA. SDT N°361. Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Calama y del río Salado, usando Herramientas Isotópicas”. 2014.
- DGA-KP. SIT N° 358. Sectorización de los Acuíferos de la Cuenca del Río Loa. Santiago, diciembre 2014, Dirección General de Aguas. 2014.
- DGA-KP. SIT N°339. Análisis Integrado del Río Loa.
- DGA-Hídrica. SIT N°421. Asesoría Técnica para la Sectorización de Acuíferos en Calama. Santiago, Octubre 2017. Dirección General de Aguas. 2017.
- DGA. Datos fluviométricos de datos en línea de la red hidrométrica de la DGA. 2020.
- DGA. Ord N°460. Minuta DCPRH N°29. 2019.
- Fuentes. F. Memoria para Optar al Título de Geólogo. Simulación Hidrogeológica de la Explotación del Acuífero Freático Ubicado en la Formación Opache, II Región, Norte de Chile. Universidad de Chile. 2009.
- HIDROMAS. Modelo Hidrogeológico Proyecto Lomas Bayas 2034 – Continuidad Operacional. 2020.
- ITASCA. Profundización del Pozo PPR-3: Pruebas de Bombeo. 2019.
- Minera El Tesoro (MET). Informes Trimestrales Monitoreo Hidrogeológico Sector Campo de Pozos Minera el Tesoro.
- Minera El Tesoro (MET). Plan de Alerta Temprana. 2010. Aprobado con Resolución Exenta DGA N°2431/2010.
- Minera Centinela. Modificación Plan de Alerta Temprana Pozo P-10. 2020. Montgomery & Associates Limitada, 2014.

- WSP. Servicios Hidrogeológicos Campo de Pozos - Informe Trimestral Niveles y Caudales Tercer Trimestre de 2019 - 2019 - Minera Centinela. 2019.
- WSP. Servicios Hidrogeológicos Campo de Pozos - Informe Trimestral Niveles y Caudales diferentes Trimestres entre 2020 y 2022. Minera Centinela.

2.2 Antecedentes Utilizados para el Análisis

2.2.1 Antecedentes Proporcionados por Minera Centinela a octubre de 2023

Para efectos del análisis de HIDROMAS de octubre de 2023 se dispuso de la siguiente información elaborada de manera directa para Minera Centinela por ITASCA:

- ITASCA. Informe 4028.012.03. Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. R-1. 2023.
- ITASCA. Informe 4028.012.01. Comportamiento Hidrogeológico del Campo de Pozos de Calama. 2023.
- ITASCA. Nota Técnica NOT – 4028.012.01 Rev. 0. 2022.

Es importante indicar que los tres documentos anteriores contienen un análisis técnico detallado de los datos de monitoreo disponibles, lo que ha permitido reforzar el conocimiento previo del sistema y, por lo tanto, son muy relevantes al momento de confirmar la situación del acuífero de Calama que ha sido ampliamente descrita en estudios anteriores.

En particular, para efectos del análisis técnico realizado el año 2023 se revisó la información asociada a los siguientes temas:

- Antecedentes y Modelo Conceptual
- Análisis de Piezometría
- Análisis de Caudales de aguas superficiales y vertientes.
- Estudio Hidroquímico e Isotópico.
- Relación de Caudales de la Cascada y Niveles
- Usos de Aguas Superficiales y Subterráneas por Terceros e Intervención del Área de Nacimiento Vertiente La Cascada.

2.2.2 Informes Estudio de Impacto Ambiental DMH (2024) y Oficios Revisión DGA

A continuación, se listan documentos claves de la revisión de los antecedentes proporcionados en el marco de la evaluación ambiental del proyecto Desarrollo Futuro DMH:

- SGA. EIA Desarrollo Futuro DMH. Julio 2023.
 - SGA. Capítulo 3.9. Línea de Base de Hidrogeología. EIA. Julio 2023.
 - SGA. Anexo 4-3. Actualización 2023 Modelo Hidrogeológico Conceptual. Informe de Actualización a junio 2022. EIA. Julio 2023.
 - SGA. Anexo 4-3. Actualización 2023 Modelo Hidrogeológico Numérico 3D de Flujo y Transporte de Sulfatos. Informe de Actualización a diciembre 2022. EIA. Julio 2023.
- SGA. ADENDA. Respuestas al Informe Consolidado de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y Ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental. Julio 2024.

- SGA. Anexo 19. Actualización Anexos del Capítulo 3.9 Hidrogeología del EIA. Adenda. Junio 2024.
- SGA. Anexo 22. Descripción litológica y perfiles de habilitación. Adenda. Junio 2024.
- SGA. Anexo 37. Figuras niveles de agua subterráneas. Adenda. Junio 2024.
- SGA. Anexo 38. Perfiles de habilitación. Adenda. Junio 2024.
- SGA. ADENDA COMPLEMENTARIA. Respuestas al Informe Consolidado de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y Ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental. Abril 2025.
 - SGA. Anexo 3-3. Actualización Línea base de Hidrogeología. Adenda Complementaria. Abril 2025.
 - SGA. Anexo 4-4. Actualización 2024 Modelo Hidrogeológico Conceptual. Informe de Actualización a Diciembre 2023. Adenda Complementaria. Diciembre 2024.
 - SGA. Anexo 4-5. Actualización 2024 Modelo Hidrogeológico Numérico 3D de Flujo y Transporte de Sulfatos. Informe de Actualización a Diciembre 2023. Adenda Complementaria. Abril 2025.
 - SGA. Anexo 24. Perfil Estratigráfico y Habilitación de Pozos. Adenda Complementaria. Abril 2025.
 - Codelco Norte. División Chuquicamata. Estudio Geofísico De Resistividad Mediante Transiente Electromagnético (TEM). Sector Opache, Suroeste Ciudad de Calama. Calama, Región de Antofagasta, Chile. Septiembre 2024.

A continuación, se listan los oficios preparados por DGA en el marco de la evaluación ambiental del proyecto Desarrollo Futuro DMH:

- 2023-09-23. ORD DGA 330/2023. EIA
- 2024-07-11. ORD DGA 251/2024. Adenda
- 2024-07-17. ORD DGA 259/2024. Adenda
- 2025-05-23. ORD DGA 204/2025. Adenda Complementaria

2.2.3 Antecedentes Proporcionados por Minera Centinela a octubre de 2025

De manera complementaria se dispuso de información más reciente elaborada de manera directa por o para Minera Centinela:

- ITASCA. Informe de Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024.
- ITASCA. NOTA TÉCNICA- 4028.015.05-R1. Análisis de alternativas para la recuperación del pozo de monitoreo LE-1. Enero 2024.
- ITASCA. Informe 4028.012.03. Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. R-2. 2023.
- Resultados del monitoreo de caudales de la vertiente actualizados a agosto de 2025.

3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA DISPONIBLE

3.1 Aspectos Generales

En esta sección se presenta un análisis de los antecedentes principales de la revisión, en relación con los temas claves identificados en los objetivos de este documento.

3.2 Modelo Conceptual Hidrogeológico con Formaciones Opache y Calama

3.2.1 Contexto Global

Minera Centinela (MC), ubicada en la Región de Antofagasta, cerca de la ciudad de Calama, realizaba hasta el 31 de diciembre de 2022 sus extracciones de aguas para el proceso de óxidos (ex Minera El Tesoro o MET) desde un campo de pozos ubicado al suroeste de esta ciudad, en una planicie entre dos ríos perennes, el río Loa hacia el sur y el río San Salvador hacia el norte (sector ojos de Opache) dentro de la cuenca hidrológica del río Loa (Figura 1-1).

Estudios técnicos realizados tanto por los organismos técnicos públicos como la Dirección General de Aguas, así como estudios de empresas del área productiva en la zona (CODELCO, Lomas Bayas, Minera El Tesoro) identificaron la presencia de dos unidades hidrogeológicas acuíferas o formaciones geológicas de interés en el área, las que se encontrarían localizadas una sobre la otra de manera vertical (Formaciones Opache y Calama), separadas por una formación de baja conductividad hidráulica que actuaría como una barrera o separación entre ambas (Formación Jalquinche).

3.2.2 Principales Resultados Revisión de Antecedentes

De manera particular, y tal como lo establece ITASCA (2022) es posible identificar la situación de las dos formaciones, Opache y Calama, en los siguientes estudios técnicos:

- DGA, SDT N° 153 (2003). Determinación de los derechos de aprovechamiento aguas subterráneas factibles de constituir en los sectores de Calama y Llalqui, cuenca del río Loa, II región. Este informe contiene los resultados de la evaluación hidrogeológica preliminar de los sectores de Calama y Llalqui, realizada con los antecedentes disponibles a la fecha. En este informe se reconocen dos formaciones geológicas como de interés acuífero: Formación Calama (Formación Calama), compuesta por gravas y arenas, y Formación Loa (Formación Loa), compuesta por las siguientes capas de techo a base: calizas, areniscas calcáreas y una capa compuesta por arcillas y limos arenosos que actúan como capa confinante de la Formación Calama. En estudios posteriores se incluye de manera explícita la Formación Opache o somera.
- DGA, SDT N°216 (2005). Análisis de los posibles impactos por extracción de agua en el acuífero de Calama. Este estudio técnico tuvo por objetivo realizar una evaluación de la situación del acuífero de Calama para establecer si las extracciones autorizadas y en operación habían producido una disminución en los caudales de las vertientes del sector. La conceptualización utilizada para el acuífero considera una unidad inferior confinada, desconectada hidráulicamente de la unidad somera.
- Minera El Tesoro, 2010. Plan de Alerta Temprana (PAT) Pozo P-10. Este documento tuvo como objetivo realizar el pronóstico, seguimiento, evaluación y verificación de los efectos que potencialmente se pudiesen producir con el ejercicio del derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas del pozo denominado P-10 (y el resto del campo de pozos) por parte de Minera El Tesoro. Este PAT fue

aprobado mediante Res. DGA N°2341 del año 2010 y postula que existe una desconexión hidráulica entre la formación Opache y la formación Calama.

- DGA-Matraz (2012). Estudio Acuífero de Calama. Sector Medio del Río Loa, SIT N° 295. El objetivo general del estudio para la DGA fue construir un modelo hidrogeológico del acuífero de Calama que, a partir de la integración de toda la información hidrológica disponible, permitiera dar coherencia y seguimiento de los distintos planes de seguimiento, monitoreo y control de las extracciones existentes. En este estudio se establece que existe conexión hidráulica entre la formación acuífera superior y las vertientes, así como desconexión hidráulica entre el acuífero superior y el acuífero inferior. En efecto, la información geomorfológica aportada en dicho estudio sustenta la tesis de que el acuífero superior, o Formación Opache, se drena a través de una serie de vertientes, de las cuales, Ojos de Opache es la principal. No se identifican afloramientos naturales asociados con el acuífero inferior o Formación Calama.
- Montgomery & Associates Limitada, 2014. En este estudio se llevó a cabo una actualización del modelo conceptual previo del Campo de Pozos de Calama, así como del modelo numérico de flujo. En este informe se incorpora en el modelo la Formación acuífera superior, con el objetivo de analizar el posible impacto del bombeo desde la Formación Calama (inferior), sobre la Formación Opache (superior) y a las aguas superficiales, en concreto, sobre la vertiente Ojos de Opache. Se lleva a cabo, a su vez, una actualización de la geometría de los acuíferos, en base a la nueva geofísica existente y, se evalúa en detalle, la recarga por infiltración de agua de riego.
- DGA-KP. 2014. Análisis Integrado del Río Loa, SIT N.º 339. El objetivo de este estudio para la DGA fue disponer de una herramienta que permitiese evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca y realizar su gestión, tanto superficial como subterráneamente. En este estudio se identifican de manera específica las dos unidades hidrogeológicas previamente señaladas en el área: superior e inferior.
- DGA (2014). Evaluación Hidrogeológica del Acuífero de Calama y del río Salado, usando Herramientas Isotópicas". SDT N°361. Estudio realizado internamente por la Dirección General de Aguas en el cual se reconoce la existencia de dos unidades hidrogeológicas de interés en el área: acuífero superior (Formación Opache) e inferior (Formación Calama).
- DGA-KP, Dic 2014. Sectorización de los Acuíferos de la Cuenca del Río Loa, SIT N.º 358. Este documento desarrollado por la DGA cuenta con una recopilación de todos los trabajos previos realizados en el sector del acuífero de Calama y su principal objetivo se enfoca en la sectorización de los acuíferos de la cuenca del río Loa. Este trabajo aporta con la definición técnica del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC⁶) que representa al acuífero de Calama, y que ha sido usada como base de la delimitación del acuífero de Calama.
- Jordan et al., 2015. Architecture of the aquifers of the Calama Basin, Loa catchment basin, northern Chile. Este informe desarrolla una actualización de la geología del acuífero de Calama, identificando de mejor forma la geometría de las distintas formaciones, en particular, aquella que indica la extensión del acuitardo que separa el sistema superior del sistema inferior. Asimismo, se cuenta con una descripción detallada de las formaciones que cruzan los ríos Loa y San Salvador en su recorrido.
- DGA-Hídrica, 2017. Asesoría Técnica para la Sectorización de Acuíferos en Calama, SIT N.º 421. El estudio tiene por objetivo principal realizar una propuesta para la sectorización hidrogeológica para los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) del acuífero de Calama, y así analizar las conexiones hidráulicas entre éstos. Según este informe de la DGA, en toda la zona del campo de

⁶ Sector hidrogeológico de aprovechamiento común (SHAC): Acuífero o parte de un acuífero que por sus características hidrológicas se puede gestionar o administrar de manera independiente.

pozos de Calama las formaciones acuíferas superior e inferior, se encuentran separadas entre sí, por el acuitado constituido por la formación Jalquinche.

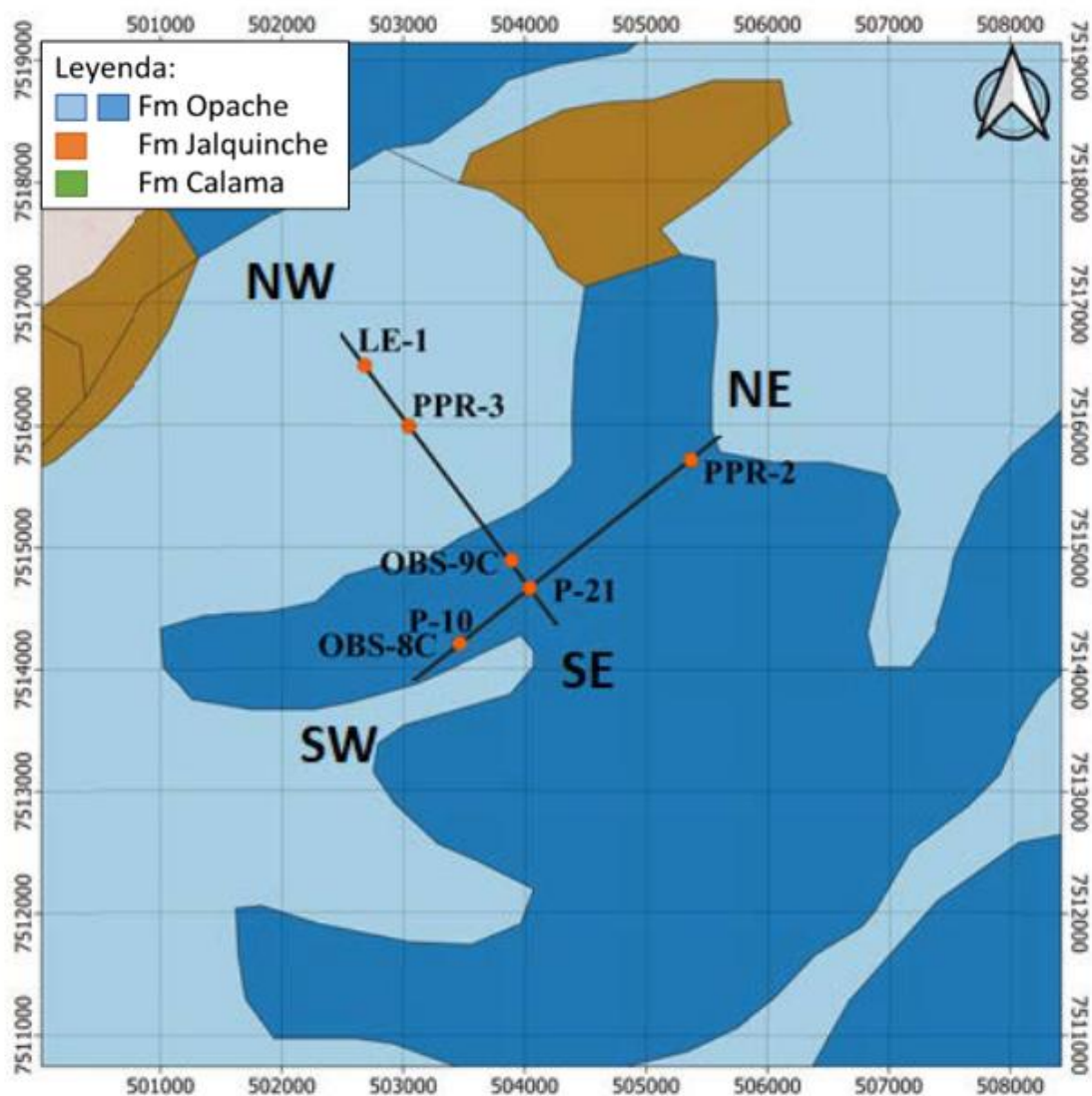
- DGA. Res Ex 460. 2019. Contiene Minuta DCPRH N°29 del 16 de septiembre de 2019 concluye que no es posible confirmar que hay desconexión entre la formación Opache y Calama, en particular debido a la falta de herramientas isotópicas o trazadores confiables en el largo plazo. No obstante lo anterior, en el mismo documento (Recomendación 7) se reconoce que los niveles de agua subterránea en la Formación Opache (acuífero superior) son estables en el tiempo, lo que desde el punto de vista hidráulico da cuenta de una separación de efectos del bombeo generado en el acuífero inferior y que no habrían afectado al sistema superior (Formación Opache).
- Lomas Bayas-Hidromas, 2020. Desarrollado por Hidromas para la compañía minera Lomas Bayas en el marco de la Evaluación Ambiental del proyecto “Proyecto Lomas Bayas 2034 – continuidad operacional”. Este informe generó la consolidación de la información disponible y, en base a nuevos análisis, entregó un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para el sector del acuífero de Calama. En dicho informe también se utiliza la conceptualización de desconexión hidráulica entre la unidad somera del acuífero (Formación Opache) y la unidad profunda (Formación Calama).
- ITASCA (2023) destaca que la vertiente La Cascada, que drena la Formación Opache, se encuentra desconectada hidráulicamente de la Formación Calama, y sus caudales están influidos por las variaciones de cada uno de los factores que componen el balance hídrico del acuífero superior en términos de entradas y salidas de aguas:
 - Los antecedentes analizados (tanto históricos como actuales), no permiten determinar que exista una relación directa entre los caudales de la vertiente La Cascada, las extracciones que realizó MC entre 2002 a 2010 en la Formación Opache y los niveles de agua subterránea la Formación Opache. Esta independencia de comportamiento es consistente con el carácter kárstico de este acuífero, que compartimentaliza el flujo subterráneo, pudiendo algunos sectores tener una baja conectividad hidráulica entre sí.
 - Lo anterior, indica que el comportamiento de los caudales de la vertiente no tiene ninguna relación con los bombeos efectuados desde la Formación Opache ni con los niveles de los pozos de observación de esta unidad.
 - En efecto, el caudal de la vertiente La Cascada parece estar correlacionado con los caudales del río Loa en La Cascada, mostrando ambos, marcadas oscilaciones estacionarias. Esto podría ser indicativo de un proceso de recarga del río Loa a la Formación Opache en esta zona. Sin embargo, no se puede establecer una correlación directa entre ambos, pues muy probablemente el caudal de la vertiente se ve afectada por otros procesos hídricos aguas arriba, como la extracción de agua de terceros.
 - De esta forma, los descensos de caudal reportados en la vertiente La Cascada desde el inicio del registro en 1994, no serían atribuibles a los bombeos de MC desde el campo de pozos de Calama, y pueden tener origen, además de la recarga por el río Loa, en factores externos como, por ejemplo, al uso e intervención directa de terceros sobre la propia vertiente y su entorno (usuarios a nivel local, extracciones de agua cercanas a la vertiente, intervenciones urbanas, entre otras). Este hecho queda reforzado por la presencia de un gran número de usuarios de aguas superficiales localizados aguas arriba de la vertiente, es decir, hacia el este según el sentido de flujo regional (con dirección este-oeste), sobre los cuales MC no tiene control.

3.2.3 Modelo Hidrogeológico Conceptual Área de Interés

El primer modelo hidrogeológico conceptual del área del Campo de Pozos de Calama se estableció en base a lo referido en el SDT N° 153 agosto de 2003 de la DGA y la información hidrogeológica levantada por Minera Centinela en terreno (estratigrafía, niveles, caudales, y ensayos hidráulicos entre otros antecedentes).

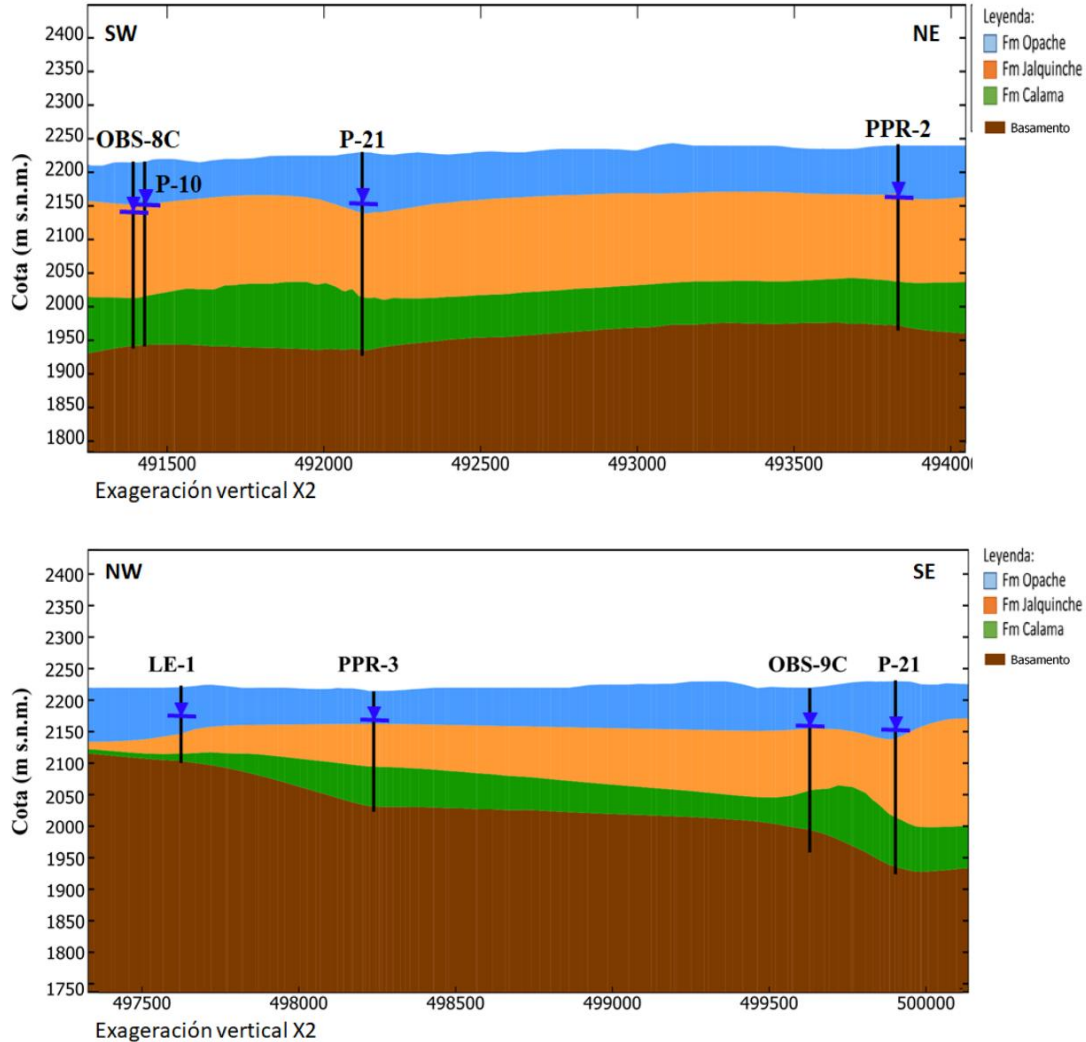
En las Figura 3-1 y Figura 3-2 se presenta el área de interés, junto con secciones hidrogeológicas en que se identifican las tres formaciones antes señaladas. En las figuras se incluyen de manera esquemática los pozos de bombeo y de monitoreo en el área, indicando su profundidad y los niveles de agua subterránea en ellos. En las leyendas de cada figura se indican el significado de los colores utilizados en ellas.

Figura 3-1: Ubicación Perfiles Hidrogeológicos SW y NW en el Sector Campo de Pozos de Calama



Fuente: modificado de ITASCA-INF-4028.012.01. Comportamiento Hidrogeológico Campo de Pozos de Calama. 2023

Figura 3-2: Perfiles Hidrogeológicos SW y NW en el Sector Campo de Pozos de Calama



Fuente: modificado de ITASCA-INF-4028.012.01. Comportamiento Hidrogeológico Campo de Pozos de Calama. 2023

Tal como indica ITASCA (2023), la caracterización hidrogeológica que permite sustentar el modelo conceptual hidrogeológico se ha basado en la información disponible en una serie de estudios (Jordan et al., 2015; DGA, 2017; Lomas Bayas, 2020 entre otros), incluido el SDT N° 153 agosto de 2003 de la DGA, y en la información levantada por Minera Centinela en el área.

De esta forma, esta caracterización cuenta con información estratigráfica de pozos (de los cuales 33 pertenecen a MC y conforman la red de monitoreo de la compañía), perfiles geofísicos (cuatro en sector del Campo de Pozos), mapas y perfiles geológicos, mapas hidrogeológicos, monitoreo de niveles y caudales, hidroquímica, isotopía, extracciones, precipitaciones, entre otras variables, que permiten caracterizar el sistema hidrogeológico del sector.

Este modelo conceptual fue presentado en el proceso de solicitud de aprobación del Plan de Alerta Temprana del Pozo P-10, que fue aprobado mediante la Resolución DGA N° 2341/2010, y es consistente con la conceptualización reportada en distintos estudios de la DGA y de otros titulares como fue mencionado en el informe “Comportamiento Hidrogeológico del Campo de Pozos” (ITASCA, enero 2023).

De esta forma, en dicha conceptualización se establece que, dentro del acuífero de Calama, se reconocen tres formaciones de interés, dos de ellas con importancia acuífera:

- **Formación Opache (Acuífero Superior):** compuesta de calizas y en menor proporción de areniscas calcáreas de color gris claro pertenecientes a las formaciones Chiu-Chiu, Opache y Jalquinche (miembro superior). Se distribuye en la parte central de la zona de estudio y aflora en el borde del valle de los ríos Loa y San Salvador y en la Quebrada Opache con un espesor que fluctúa entre los 30 y 130 m, pero en general se sitúa entre 30 y 70 m.

Se ha caracterizado como un acuífero de carácter libre que es capaz de almacenar cantidades importantes de agua subterránea cuando se presentan fracturas y/o cavernas por la disolución de la caliza. En cuanto a sus parámetros hidráulicos se le asignan valores de permeabilidad (K) entre 0,1 y 300 m/d.

El flujo subterráneo en esta formación presenta una componente principal en sentido este-oeste, fluyendo desde las zonas topográficas más altas, hacia zonas de menor elevación con un gradiente hidráulico de 0,01 hasta su salida hacia el oeste, aguas abajo de los ríos San Salvador y Loa.

- **Formación Jalquinche (Estrato Intermedio):** Se compone de arenas, arcillas y limos con evaporitas de color rojizo. Dentro de los estratos limo-arcillosos se intercalan algunos niveles arenosos de mayor permeabilidad y, también hacia los bordes, rocas ígneas de muy baja a nula permeabilidad pertenecientes a la Ignimbrita Artola.

Esta unidad se correlaciona con el miembro inferior de la formación Jalquinche, formación Lasana y Chiquinaputo. Se desarrolla en el Campo de Pozos, extendiéndose hacia el sur hasta el sector Ojos de Opache. Presenta espesores que en el sector del campo de pozos de MC varía entre 70 y 140 m. En concreto, durante la perforación de los pozos P-21 y PPR- 3 el 2019 se reportaron espesores de 100 y 70 m respectivamente.

Hidráulicamente funciona como unidad confinante respecto a la unidad acuífera subyacente (separa hidráulicamente las Formaciones Opache y Calama). En efecto, su baja permeabilidad $< 1 \times 10^{-3}$ m/d (según valores de referencia Todd, 1980 y Maidment 1993) limita la conexión hidráulica entre la formación superior (Formación Opache) e inferior (Formación Calama). Este hecho hace que exista una diferencia en la carga hidráulica entre ambas formaciones y, por tanto, su piezometría sea trazada de manera independiente.

- **Formación Calama (Acuífero Inferior):** constituida por gravas con matriz arenosa a areno-limosa, pertenecientes al miembro clástico de la Formación Calama. Se distribuye por toda la zona de estudio y presenta un espesor variable entre 40 y 80 m.

En el Campo de Pozos de Calama presenta un comportamiento hidráulico de carácter confinado a semiconfinado. Este hecho se puso de manifiesto durante la perforación de los pozos LE-1 y LE-2 donde, una vez perforada la Formación Calama, los niveles ascendieron. Se le asigna un rango de K entre 0,2 y 3,0 m/día.

El flujo de agua subterráneo presenta una componente principal este-oeste, donde el agua fluye con gradiente hidráulico promedio de 0,02. En el Campo de Pozos de Calama se registra un cambio de gradiente hidráulico, reflejado en un mayor espaciamiento entre la isopiezas, debido probablemente a cambios litológicos asociados con una zona de mayor permeabilidad. Además, se observa como la piezometría se encuentra influenciada por el bombeo desde los pozos profundos de MC.

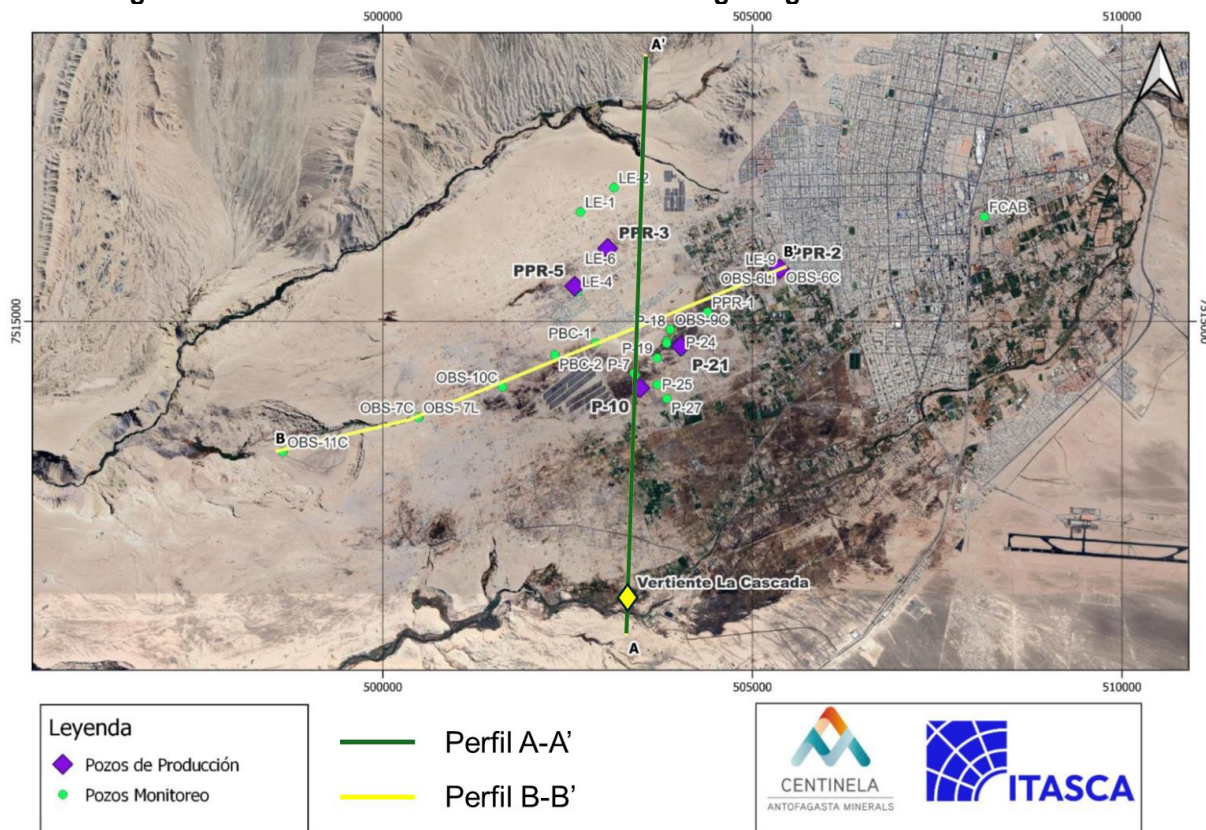
3.2.4 Actualización Información Estratigráfica Sector de Interés (ITASCA, 2024)

Información complementaria sobre la estratigrafía del área de interés fue presentada por ITASCA en un informe del año 2024, en el que se resume la visita a terreno realizada como parte de la diligencia probatoria Res. Ex N°3/ROL D-254-2022. En dicha actividad participaron profesionales de la SMA, junto con profesionales de Minera Centinela, así como especialistas en ecología e hidrogeología que asesoran a la compañía.

En la Figura 3-3 se muestra una vista aérea del campo de pozos donde se trazan dos perfiles hidrogeológicos. Un perfil Norte-Sur indicado como A-A' y un perfil Este-Oeste indicado como B-B'. El perfil hidrogeológico A-A', que incluye la ubicación de la Vertiente La Cascada, se muestra en la Figura 3-4, mientras que el perfil hidrogeológico B-B' se muestra en la Figura 3-5.

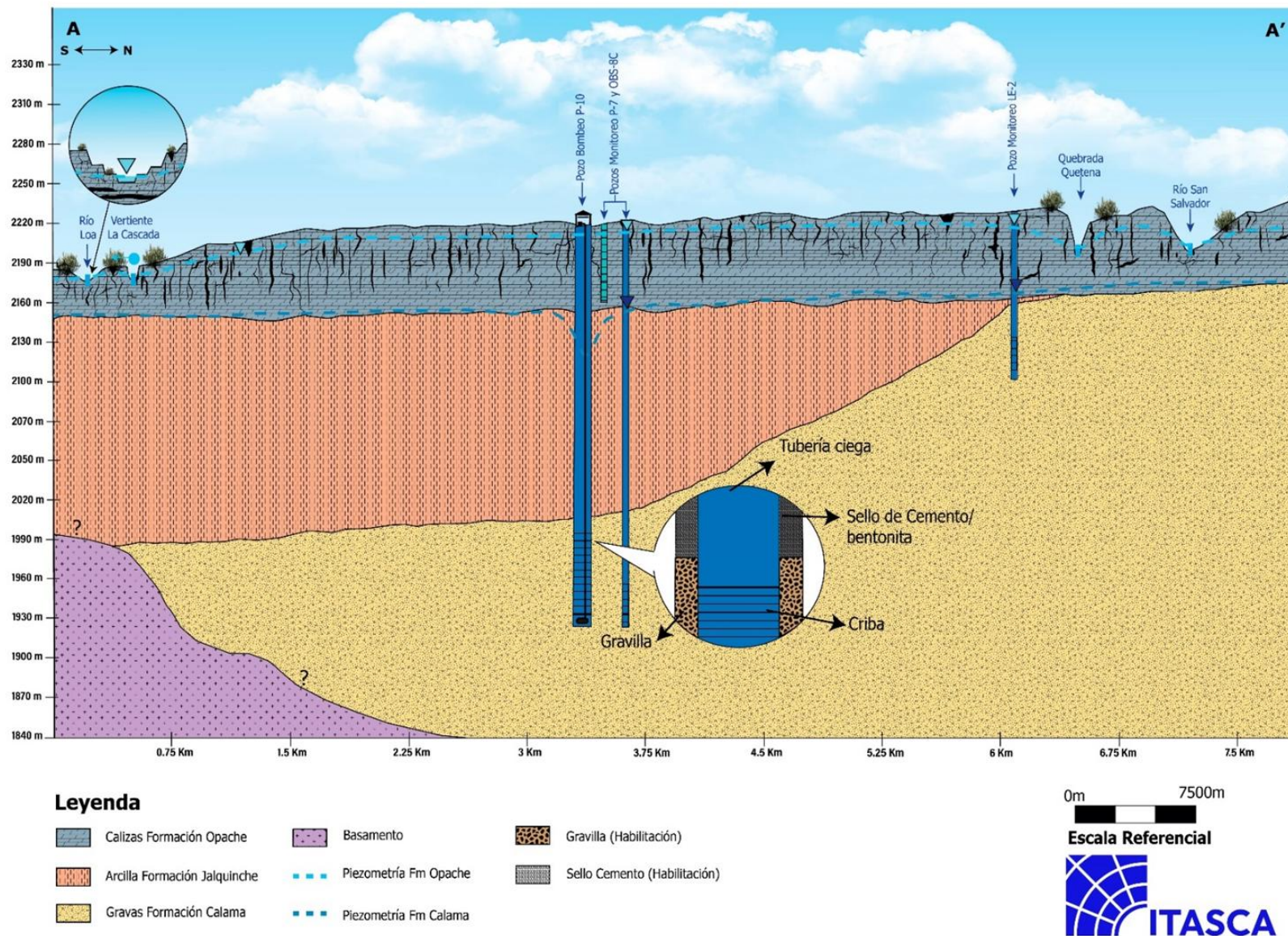
Tal como lo indica ITASCA (2024), y según lo que se observa en la Figura 3-4, “el acuífero conformado por la Formación Opache es de tipo libre, y el flujo subterráneo circula principalmente por unidades de rocas carbonatadas (calizas) y sedimentos detríticos como arenas, gravas, y arcillas. El flujo subterráneo en esta formación presenta una componente principal en sentido este-oeste, fluyendo desde las zonas topográficas más altas, hacia zonas de menor elevación con un gradiente hidráulico de 0,01 hasta su salida hacia el oeste, aguas abajo del río San Salvador y Loa.”.

Figura 3-3: Planta con Trazado de Perfiles Hidrogeológicos en Sector de Interés



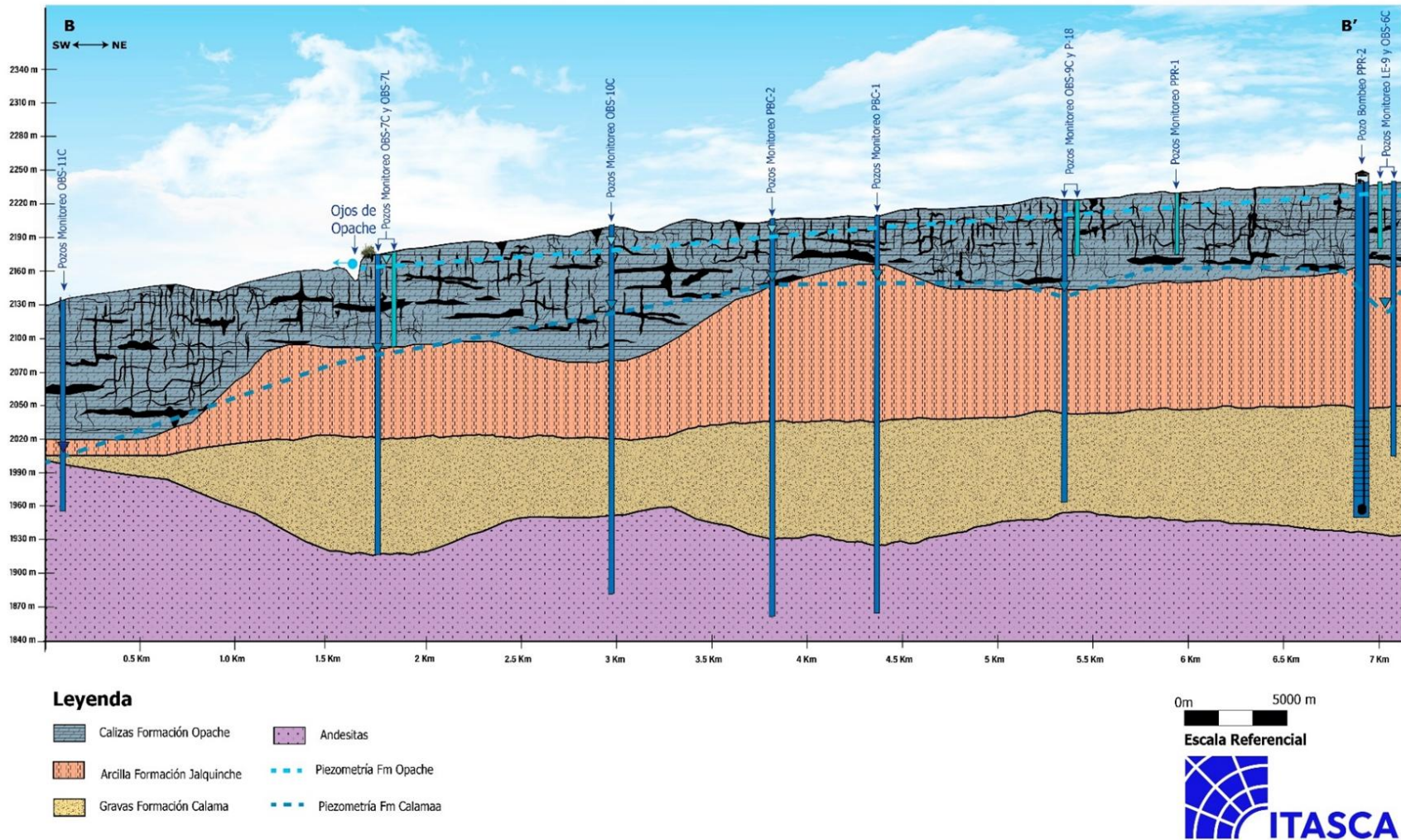
Fuente: modificado de ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

Figura 3-4: Sección Hidrogeológica Correspondiente al Perfil A-A'.



Fuente: ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

Figura 3-5: Sección Hidrogeológica Correspondiente al Perfil B-B'.



Fuente: ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

Por otra parte, también citando a ITASCA (2024), y en particular según lo mostrado en la Figura 3-5, “el acuífero conformado por la Formación Calama es de carácter confinado en todo el Campo de Pozos y el flujo subterráneo se mueve fundamentalmente por sedimentos de grano medio y fino, conformado por gravas y arenas. El sentido de flujo subterráneo presenta una componente principal este-oeste, donde el agua fluye con gradiente hidráulico promedio de 0,02”.

La desconexión hidráulica entre las Formaciones acuíferas Opache y Calama, reforzada por la Formación Jalquinche, genera una diferencia en su carga hidráulica o nivel de energía, que se traduce en niveles de agua subterránea distintos en ambos estratos, lo que se visualiza de manera específica en los niveles freáticos y piezométricos que se describen de manera esquemática en las Figura 3-4 y Figura 3-5.

3.2.5 Actualización Información Generada para EIA DMH (2023) y otros Antecedentes

En el marco de este informe se ha analizado información técnica asociada en particular a los estudios públicos generados con posterioridad a octubre del año 2023. Lo anterior tiene como objetivo general verificar si los supuestos claves del análisis hidrogeológico de Minera Centinela siguen siendo válidos a la luz de nuevos antecedentes.

En particular, se ha revisado la información provista por Codelco en el proceso de evaluación ambiental del Proyecto Desarrollo Futuro DMH, en el cual se ha hecho la entrega formal de información en tres instancias:

- SGA. EIA Desarrollo Futuro DMH. Julio 2023.
- SGA. ADENDA. Respuestas al Informe Consolidado de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y Ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental. Julio 2024.
- SGA. ADENDA COMPLEMENTARIA. Respuestas al Informe Consolidado de Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones y Ampliaciones al Estudio de Impacto Ambiental. Abril 2025.

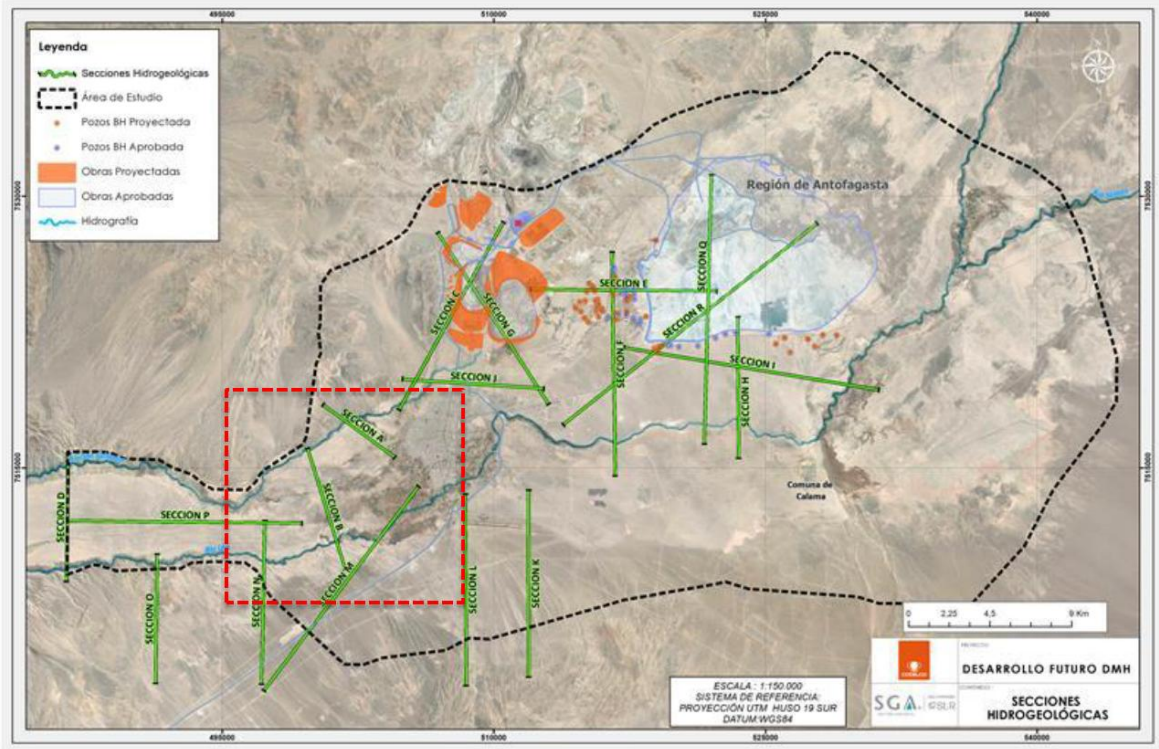
Adicionalmente, se han analizado los oficios generados por parte de DGA en el contexto de su revisión de los trabajos presentados por Codelco en el EIA en evaluación ambiental.

Para efectos de este análisis en la Figura 3-6 se incorpora el área de estudio del EIA del Proyecto Desarrollo Futuro DMH, el que incluye el sector en que se localiza la vertiente La Cascada, así como los perfiles hidrogeológicos trazados en el área. En la Figura 3-7 se presenta la información de geofísica que se incorpora en la Adenda Complementaria (Abril de 2025) en la que se observan algunos perfiles geofísicos en el área de localización de la vertiente La Cascada y también hacia sectores localizados aguas abajo de ella.

En la Figura 3-8 se puede verificar que la nueva información, y en particular la interpretación hidrogeológica propuesta por Codelco para el área de interés mantiene las unidades hidrogeológicas previamente discutidas, con un acuífero superior de características kársticas (Formación Opache), ubicada por sobre un estrato confinante (Formación Jalquinche), y finalmente un acuífero inferior en condiciones confinadas (Formación Calama), lo que ratifica el entendimiento hidrogeológico del área.

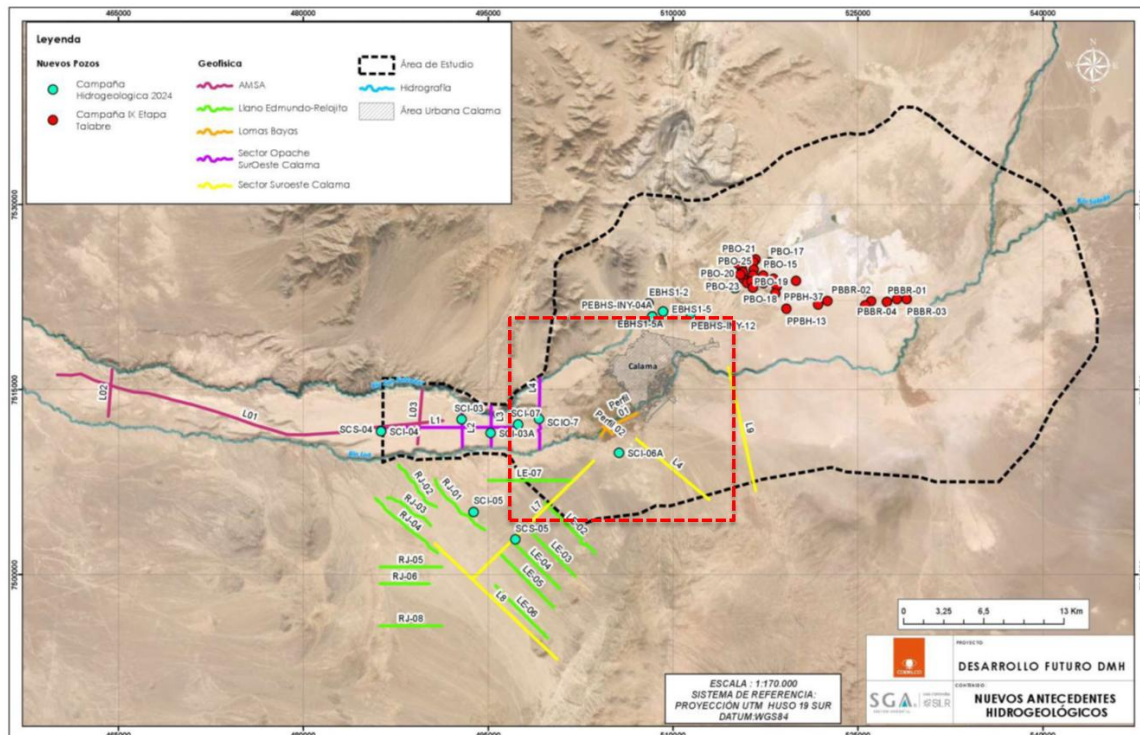
En los oficios de consultas generados por la Dirección General de Aguas no hubo comentarios y/o observaciones sobre lo propuesto técnicamente por Codelco. Todo lo anterior, permite concluir que la información más actualizada es coincidente con nuestro entendimiento técnico y que ello no ha sido objeto de ninguna clase de reparos por parte de la Dirección General de Aguas

Figura 3-6: Área de Estudio Información Hidrogeológica Proyecto Desarrollo Futuro DMH



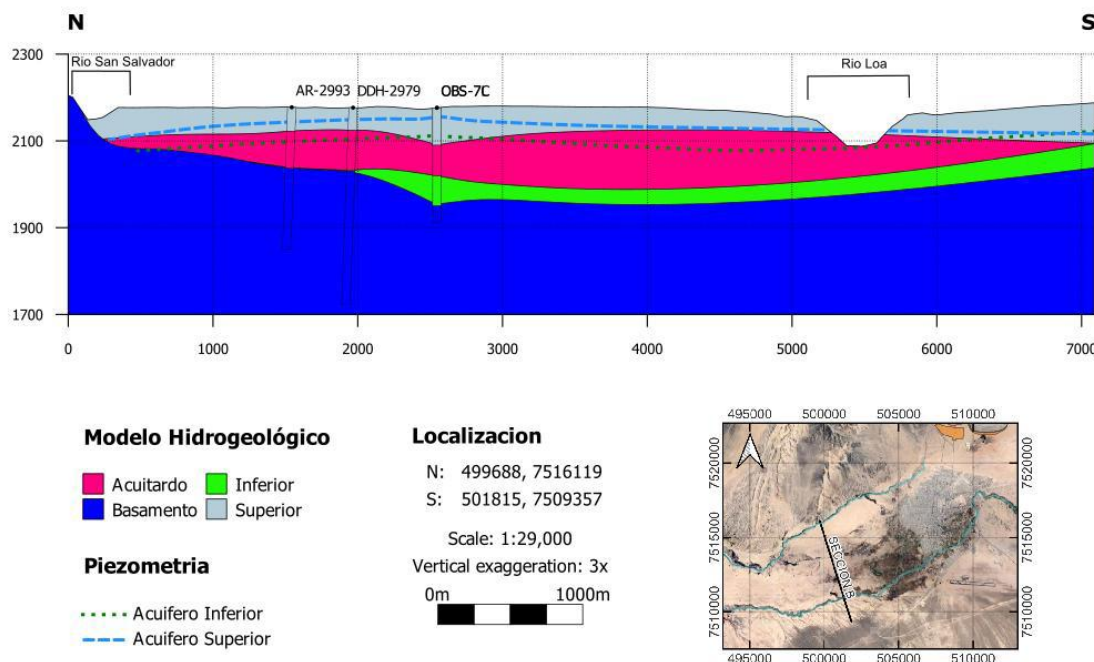
Fuente: modificado de Adenda Complementaria Proyecto DMH Desarrollo Futuro (SGA, 2025)

Figura 3-7: Información Geofísica Complementaria



Fuente: modificado de Adenda Complementaria Proyecto DMH Desarrollo Futuro (SGA, 2025)

Figura 3-8: Perfil Hidrogeológico B, Área de Estudio Proyecto Desarrollo Futuro DMH



Fuente: modificado de Adenda Complementaria Proyecto DMH Desarrollo Futuro (SGA, 2025)

3.3 Rol Hidrogeológico Formación Jalquinche

3.3.1 Conceptualización Técnica Formación Jalquinche

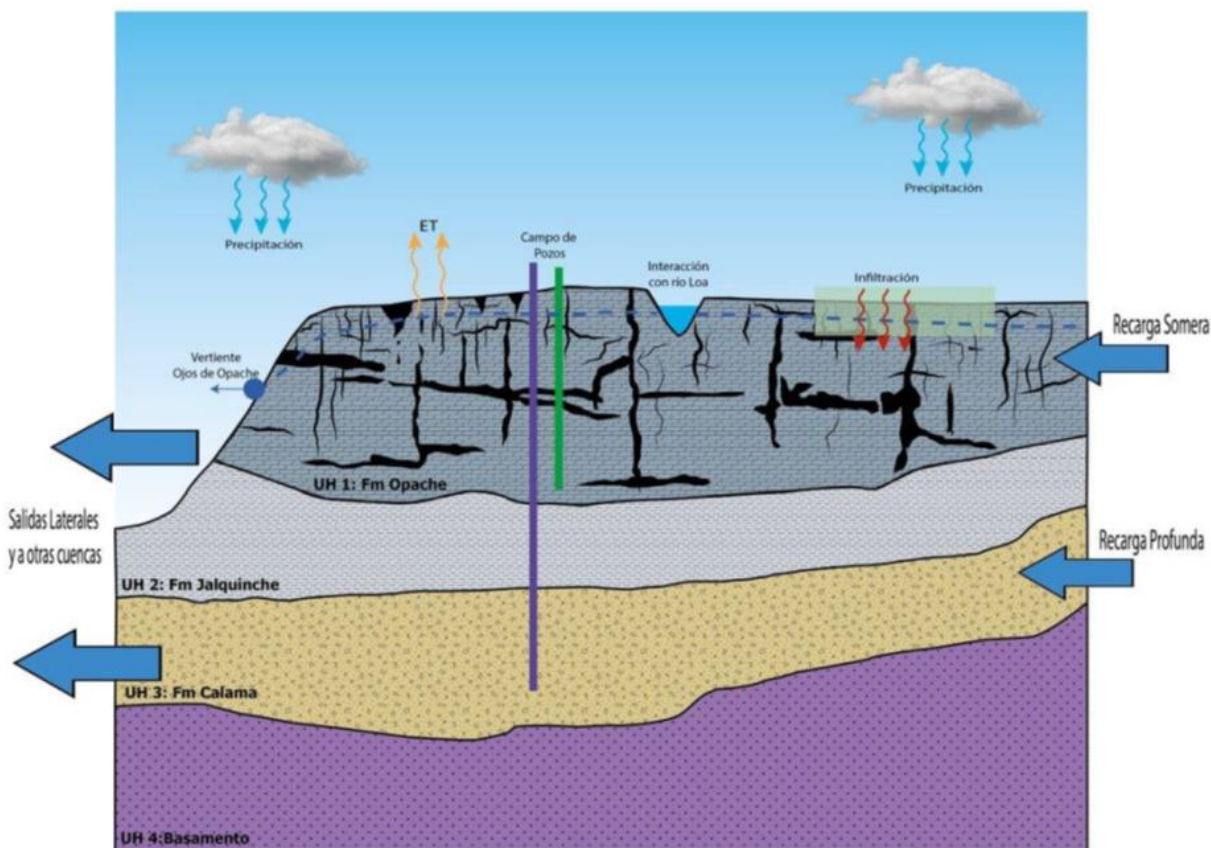
De acuerdo a lo anteriormente señalado, la conceptualización técnica que se ha ido elaborando a través de diversos estudios establece que dentro del acuífero de Calama se reconocen dos formaciones acuíferas principales: la primera y más superficial (Formación Opache o Loa Superior), constituida por calizas y areniscas cuya principal característica es su comportamiento tipo karst y su conexión con las vegas, vertientes y ríos existentes en la superficie; y la segunda, más profunda (Formación Calama), constituida principalmente por gravas que forman un acuífero confinado.

Ambas unidades acuíferas están desconectadas hidráulicamente por la presencia de un acuitardo arcilloso (Formación Jalquinche o Loa Inferior), presente en toda la zona del Campo de Pozos de Calama.

En la Figura 3-9 se resume el entendimiento hidrogeológico presentado el año 2020 como parte de la modificación del Plan de Alerta Temprana de Minera El Tesoro en el que se observa la Formación Jalquinche localizada entre las Formaciones Opache y Calama.

El rol de acuitardo o capa confinante que separa las dos unidades acuíferas de importancia (Formaciones Opache y Calama) ha sido abordado y ratificado de manera técnica en diversos estudios previos ya sea a través de información de terreno (ITASCA, 2022; SGA-DMH, 2025) o a través del uso de modelos hidrogeológicos que han verificado dicha situación de manera explícita en estudios integrales (DGA-KP, 2014; ITASCA, 2020; HIDROMAS, 2020).

Figura 3-9: Esquema Modelo Conceptual Sector Calama



Fuente: ITASCA-INF-4028.012.03 R-2. Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. Octubre 2023

No obstante lo anterior, la Minuta DCPRH N°29 del 16 de septiembre de 2019, incluida en el ORD DGA N°460, concluye que no es posible confirmar que hay desconexión de largo plazo entre la formación Opache y Calama, en particular debido a la falta de información isotópica o trazadores confiables.

En el mismo documento (Minuta DCPRH N°29, Recomendación 7) la DGA reconoce que los niveles de agua subterránea, en la Formación Opache (acuífero superior), han sido estables (no han mostrado efectos del bombeo de pozos habilitados en la Formación Calama) en el tiempo que se realizó el bombeo desde el acuífero inferior (pozos de MC), lo que desde el punto de vista hidráulico (Formación Jalquinche funcionando como un acuífero semiconfinado o acuitardo) da cuenta de una separación efectiva, hasta la fecha de dicha información (2019), entre los flujos subterráneos en los dos sistemas acuíferos en el área.

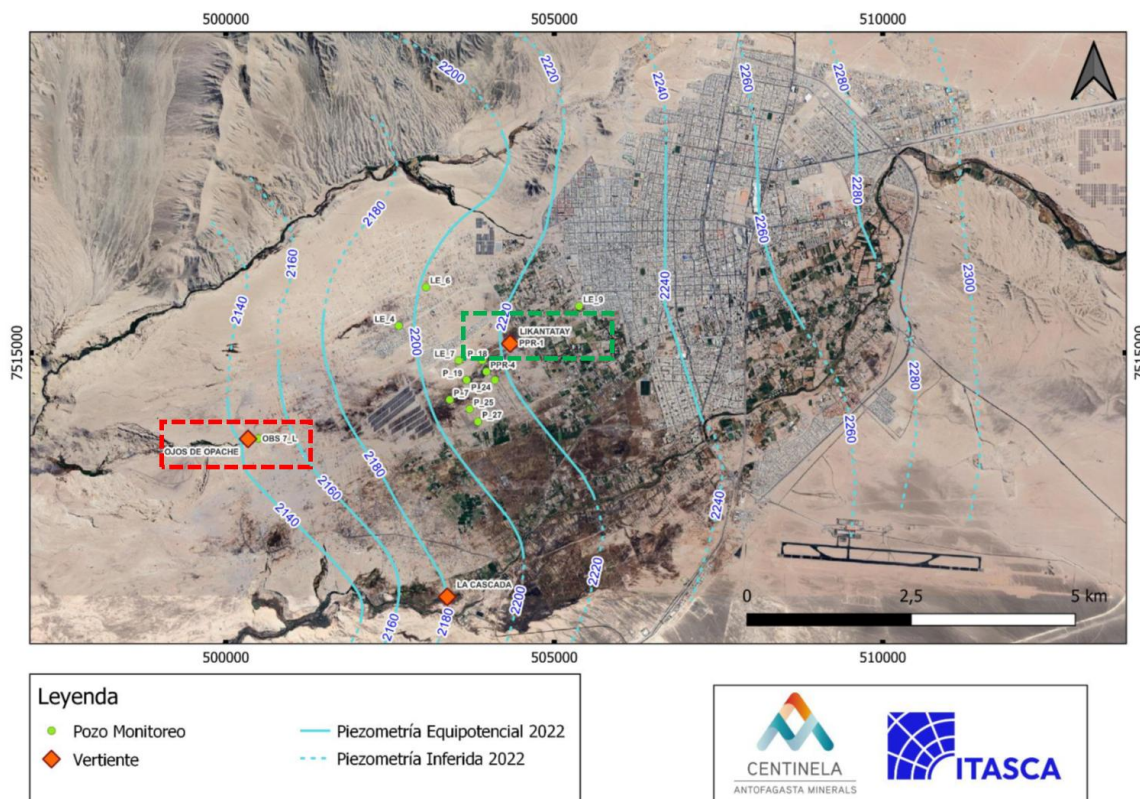
La situación anterior, estabilidad de mediciones de niveles de agua subterránea en el acuífero superior ante bombeos en el acuífero inferior (hecho ratificado por DGA en el ORD N°460 de 2019), es lo que se ha utilizado históricamente para concluir sobre la situación de desconexión hidráulica entre los sistemas acuíferos superior e inferior en el área, y que se ratifica con los entendimientos hidrogeológicos en el área de estudio y que ha sido confirmado por diversos estudios e información más actualizada.

3.3.2 Niveles Piezométricos Actuales en Área de Estudio

De acuerdo con ITASCA (2024), la desconexión hidráulica entre las Formaciones acuíferas Opache y Calama (producido por la presencia de la unidad Jalquincha) genera una diferencia en su carga hidráulica, que se traduce en niveles piezométricos diferentes en ambos estratos. Lo anterior, se corrobora con valores de niveles de agua subterránea medidos en la red de pozos de monitoreo de Centinela.

Con la información medida de niveles a diciembre de 2022, ITASCA (2024) generó mapas piezométricos para las unidades acuíferas Opache (Superior, kárstica y libre) y Calama (Inferior, confinada), los que se muestran en las Figura 3-10 y Figura 3-11. En este caso, diciembre de 2022 representa el último mes de bombeo de todos los pozos de bombeo habilitados en la Formación Calama (PPR-2, PPR-3, PPR-5, P-10 y P-21).

Figura 3-10: Piezometría Formación Opache (diciembre de 2022)

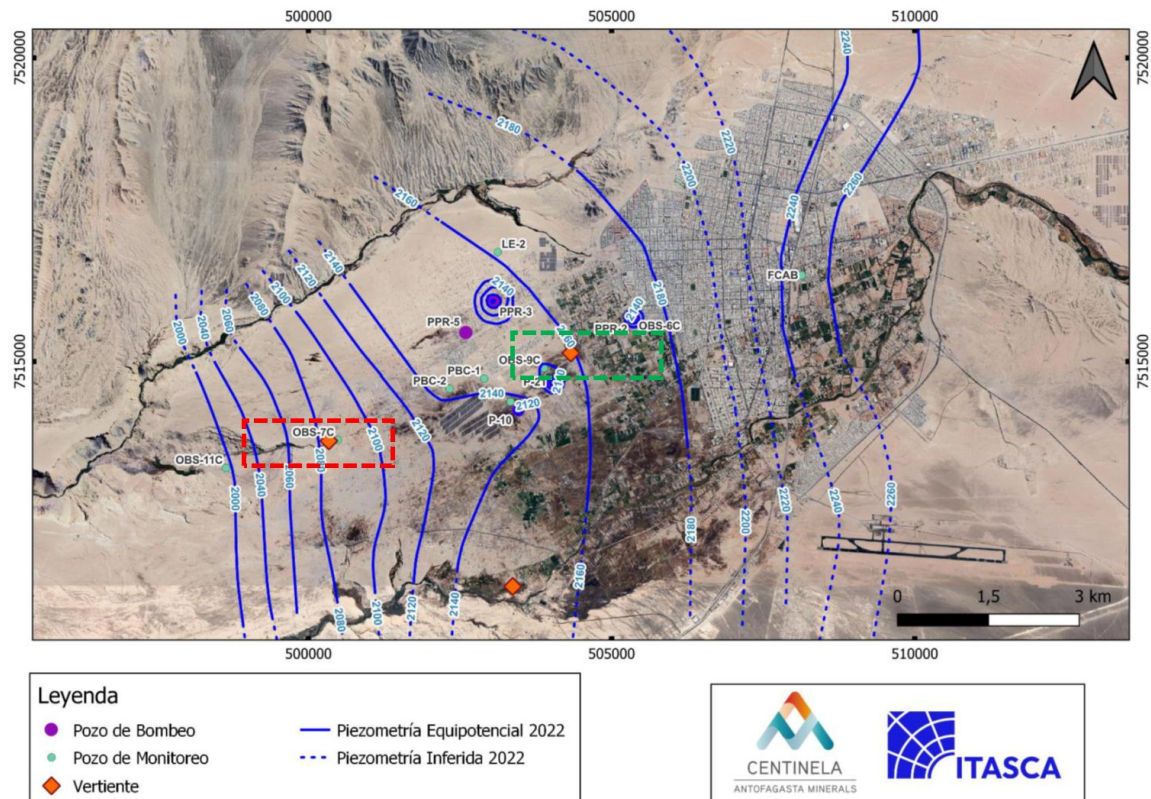


Fuente: ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

Los mapas de equipotenciales demuestran que los niveles en las Formaciones Opache y Calama presentan diferencias de entre 40 y hasta 80 m. Por ejemplo, al comparar el nivel en las cercanías de la vertiente Likantatay (ver rectángulo verde en Figura 3-10), este se encuentra a una cota de 2220 m s.n.m en la Formación Opache y de 2160 m s.n.m en la Formación Calama (ver rectángulo verde en Figura 3-11).

La misma comparación en el sector Ojos de Opache Nacimiento (cercanías de OBS_7L) muestra que el nivel en la Formación Opache se encuentra a 2140 m s.n.m mientras que en la Formación Calama el nivel se encuentra a 2080. En ambos puntos, situados entre ellos a una distancia mayor a 4 Km, la diferencia de nivel piezométrico es de aproximadamente 60 m.

Figura 3-11: Piezometría Formación Calama (diciembre de 2022)



Fuente: ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

Lo anterior da cuenta del rol de la formación intermedia o acuitardo (Formación Jalquinche) como separador de las condiciones hidrogeológicas en los acuíferos superior (Formación Opache) y el acuífero inferior (Formación Calama).

Con base a la información anterior es importante recalcar que las equipotenciales mostradas en estas figuras representan un sistema que ha sido bombeado de manera continua durante los últimos 20 años, en los cuales se ha podido verificar que no existe relación directa entre los niveles piezométricos de las Formaciones Opache y Calama, producto del rol de la Formación Jalquincha como acuitardo, lo que ratifica la falta de relación entre los caudales de la vertiente La Cascada y la operación de los pozos de bombeo de MC, localizados en la Formación Calama o acuífero inferior.

3.4 Relación Aporte de Agua a Vertiente La Cascada y Formación Opache

3.4.1 Contexto General

De acuerdo con ITASCA (2022 y 2023), en el área del campo de pozos de Calama existe una fuerte caída de la topografía del terreno lo que genera que la Formación Opache (acuífero superior) termine aflorando en distintas vertientes hasta drenarse por completo, incorporando sus caudales a los cursos superficiales de los ríos Loa y San Salvador. Se evidencia, por tanto, la conexión de la Formación Opache – en términos de aporte de aguas – con las vegas, vertientes y ríos existentes en la superficie.

Es importante destacar en todo caso que el acuífero superior (Formación Opache) no es la única fuente de aporte de agua a las vertientes, habiendo otros aportes de agua (derrames de agua de riego, y aporte de Río Loa, por ejemplo), según la ubicación particular de las vertientes en el área de interés.

La situación anterior también se ve reflejada en los modelos conceptuales presentados por DGA-KP (2017) e HIDROMAS (2020), en los que las vertientes del área (Ojos de Opache, Likantatay y La Cascada) se asocian con la unidad acuífero superior.

En ese mismo sentido, es importante indicar que los caudales en las vertientes están influidos por las variaciones históricas de cada uno de los factores que componen el balance hídrico del acuífero superior, todos ellos interconectados entre sí:

- El río Loa se constituye como componente principal que regula las salidas de la cuenca y, por tanto, ejerce el papel de regulador principal de las salidas de la cuenca y de las descargas aguas abajo de las vertientes. Por otro lado, el caudal del río Loa está, a su vez, regulado por el embalse Conchi.
- A esta cadena de procesos conectados, se le suma la elevada antropización de la zona de estudio, con derechos de aprovechamiento de agua superficiales y subterráneos otorgados a lo largo de toda la cuenca, con extracciones mediante bombeos y canales de riego que toman las aguas desde los ríos y vertientes.
- Junto con ello, en la última década se ha observado un aumento de viviendas rurales al poniente de la ciudad de Calama que también podrían estar haciendo uso de aguas superficiales como subterráneas.

Los análisis realizados por ITASCA (2022, 2023 y 2024) dan cuenta de la situación para algunas de las vertientes en el área de interés, lo que se resume en los puntos siguientes para la Vertiente La Cascada.

3.4.2 Funcionamiento Actual Vertiente La Cascada

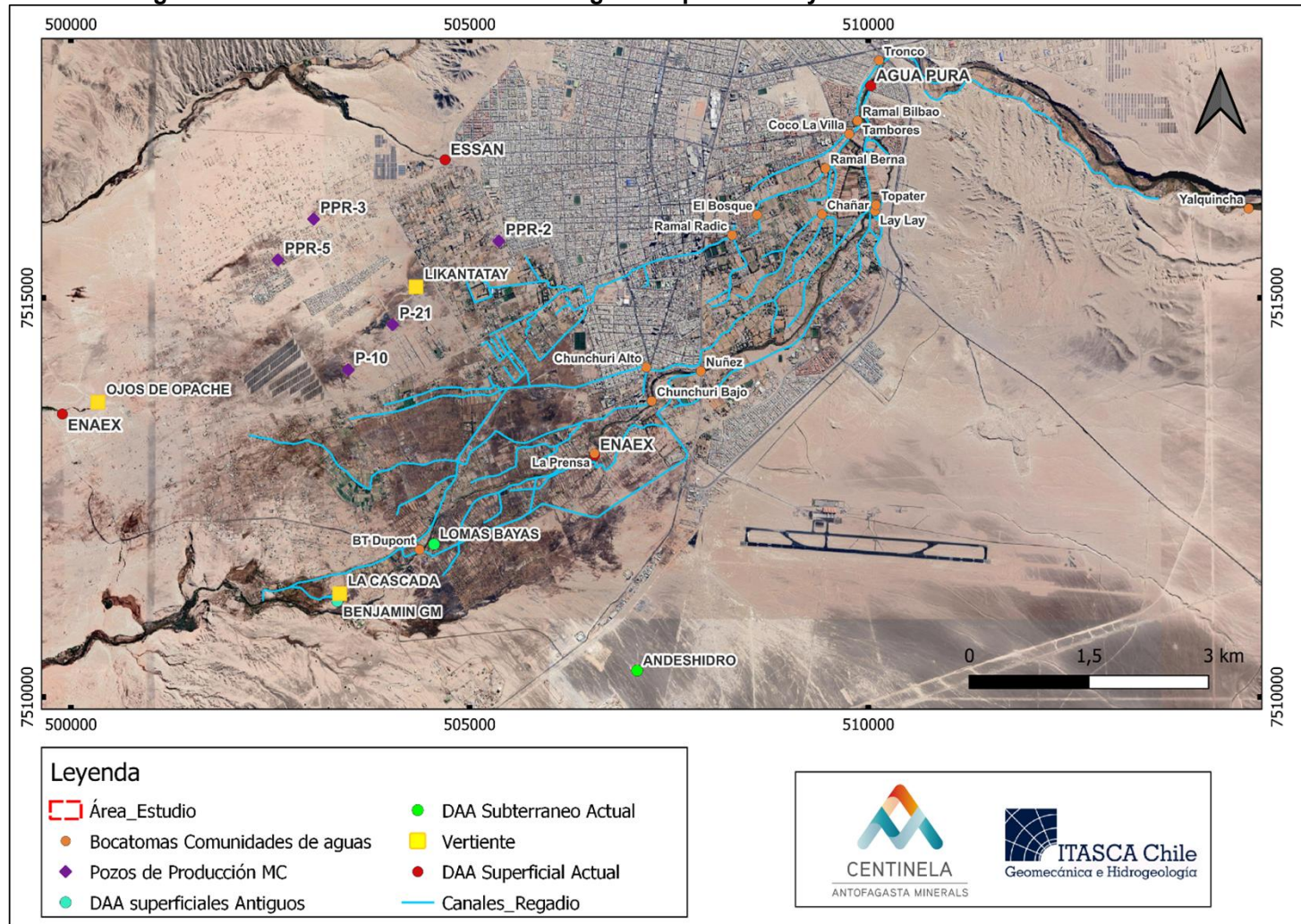
La vertiente La Cascada se encuentra al sur del Campo de Pozos y al este de la estación río Loa en La Cascada. Esta vertiente aporta sus aguas hacia el río Loa a través de una quebrada y, según el modelo conceptual tiene un aporte de agua desde diferentes fuentes, siendo una de ellas los aportes de aguas desde la Formación Opache.

Según los antecedentes disponibles, en el entorno más cercano de la vertiente existen otros usuarios, tanto de aguas superficiales como de aguas subterráneas. En imágenes satelitales del área es posible observar canales de riego que toman sus aguas del río Loa, y que recorren los campos de cultivo hasta su intersección con otros canales de riego, lo que se observa en las Figura 3-12 y Figura 3-13.

Por otro lado, en las inmediaciones de la vertiente, se puede apreciar el creciente desarrollo de viviendas rurales (destacadas en amarillo), las que eventualmente podrían estar haciendo uso de aguas tanto superficiales como subterráneas, lo que se observa en la Figura 3-14.

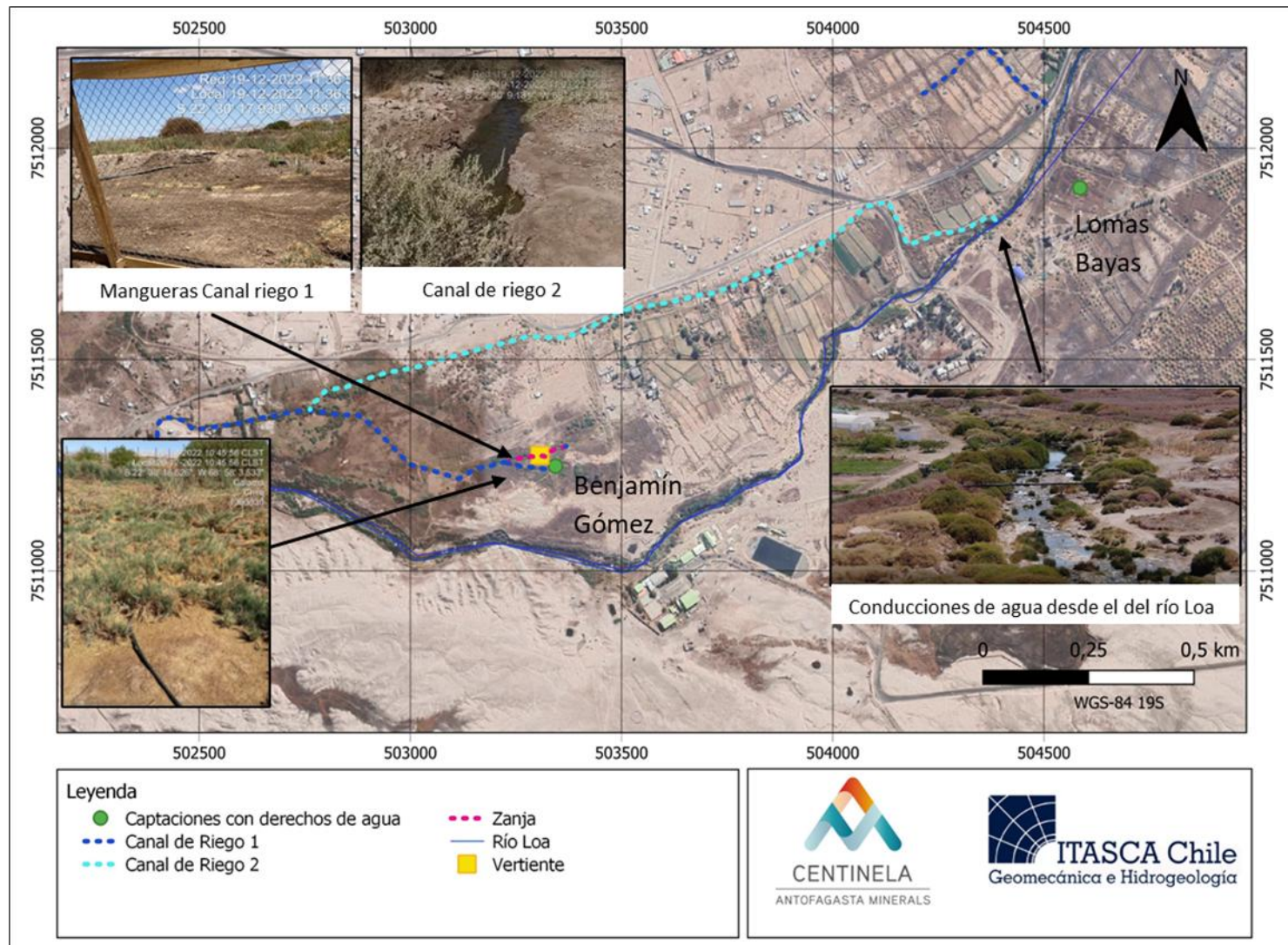
Lo anterior se complementa con información reportada por la SMA en ORD N°352 de julio de 2019, en la cual se constató la presencia de una zanja que se extiende desde el nacimiento de la vertiente hasta el punto de aforo, la cual, según fotointerpretación (ITASCA, 2023), tiene una extensión de 150 m y conecta con el canal de riego 1 referido en la Figura 3-13. Esta zanja se observa de manera específica en imágenes satelitales que datan del año 2004 a la fecha, y en las cuales se pueden observar trabajos de movimientos de tierras atribuibles a la limpieza de la vegetación ribereña y/o profundización del canal hasta la zona de la vertiente. En particular en la Figura 3-15 se observa la intervención antrópica del trazado de la Vertiente La Cascada.

Figura 3-12: Ubicación de Usuarios de Aguas Superficiales y Subterráneas en Área de Interés



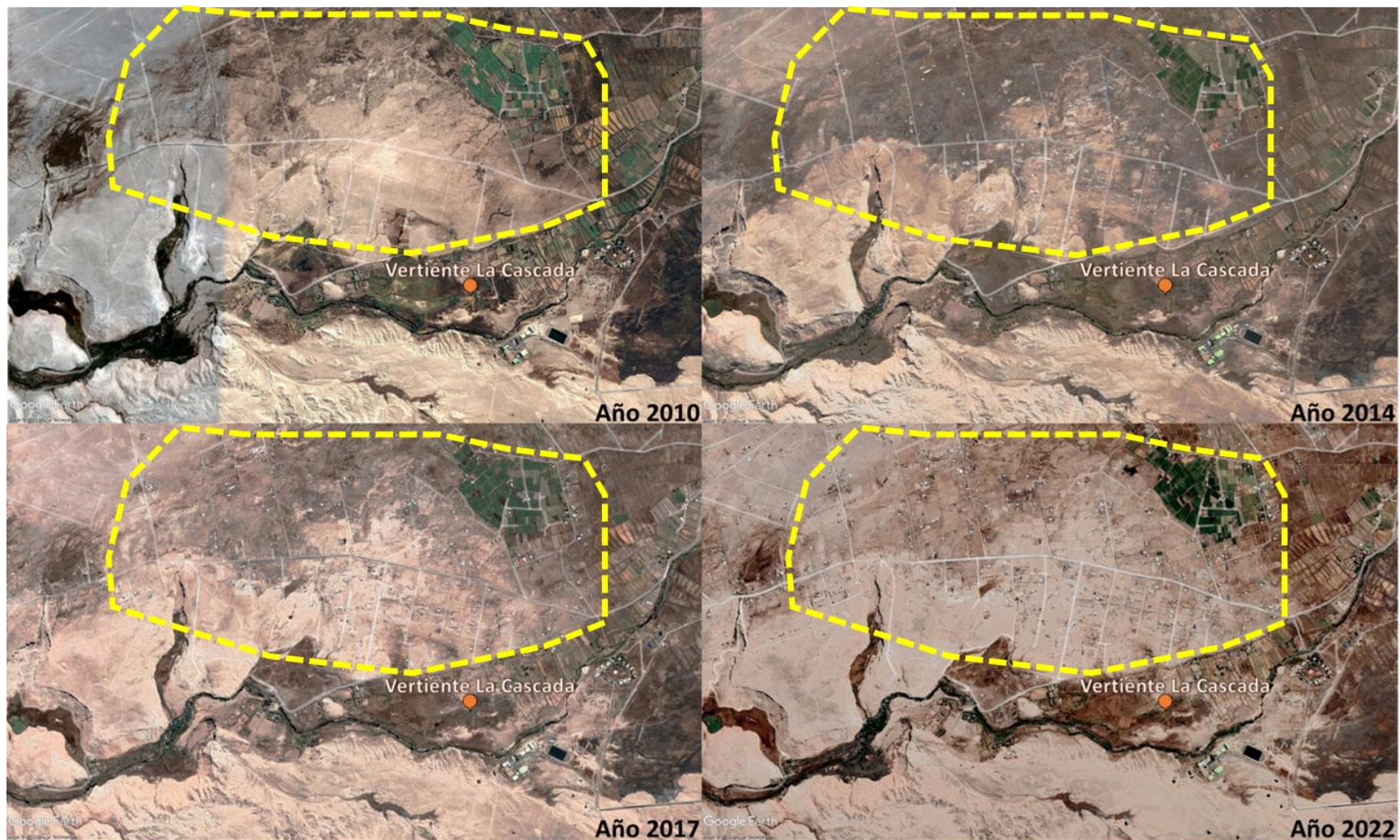
Fuente: ITASCA-INF-4028.012.03 - Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. 2023

Figura 3-13: Usos de Terceros en torno a la Vertiente La Cascada



Fuente: ITASCA-INF-4028.012.03 - Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. 2023

Figura 3-14: Desarrollo de Viviendas Rurales en entorno de la Vertiente La Cascada (2010 a 2022)



Fuente: ITASCA-INF-4028.012.03 - Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. 2023

Figura 3-15: Intervención Antrópica de trazado Vertiente La Cascada (2019)



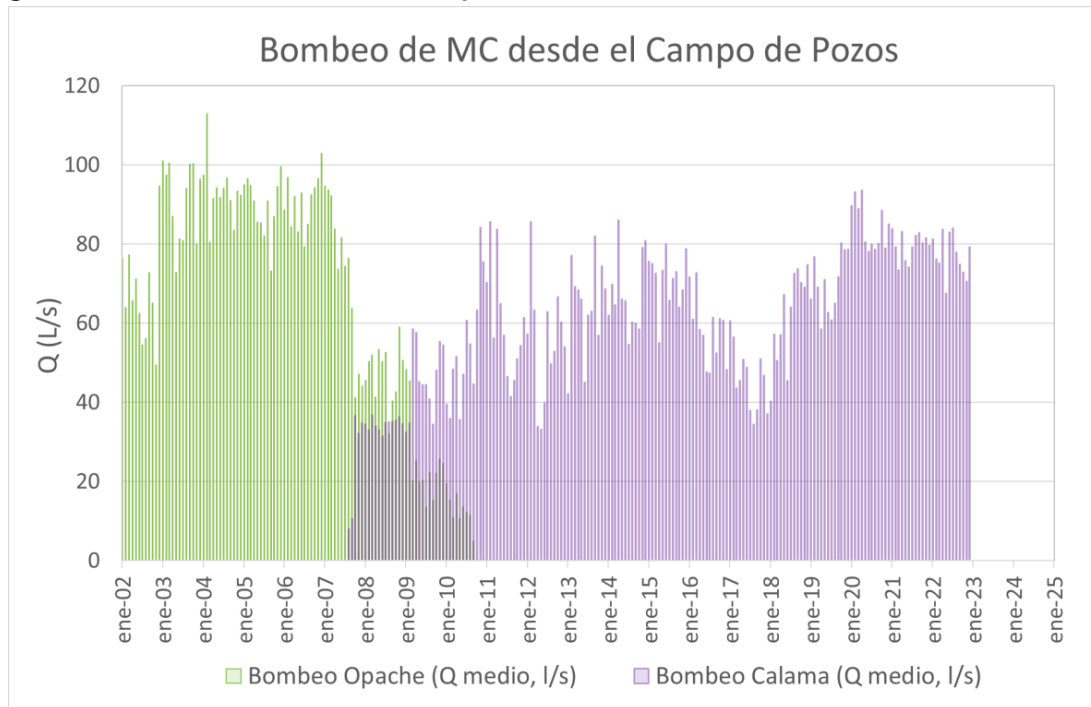
Fuente: ITASCA-INF-4028.012.03 - Profundización Análisis Hidrogeológico de la vertiente La Cascada. 2023

3.4.3 Efecto de Pozos de Bombeo de Minera Centinela sobre Formación Opache

Tal como lo señala ITASCA (2022) las extracciones de MC en el campo de pozos de Calama se iniciaron el año 2002 con el bombeo de agua subterránea desde la formación superior (Formación Opache) a través de los pozos PPR-2, PPR- 3, PPR-5 y P-21 (Figura 1-1).

El bombeo desde pozos localizados en la formación superior, entre otras cosas, dio lugar a descensos paulatinos en los caudales de las vertientes cercanas a ellos, como Ojos de Opache (que manifiesta efectos más rápidos por la extracción de agua subterránea debido a su ubicación en la dirección del flujo regional). Por lo anterior se estableció como medida de control disminuir paulatinamente el bombeo desde la Formación Opache mediante la profundización de los pozos de bombeo para realizar la extracción desde la Formación Calama, más profunda, con una muy baja a nula influencia hidráulica con la Formación Opache que estaría en contacto con las vertientes en el área. Así, en octubre de 2007, se realizó la profundización del pozo PPR-2, sumándose el pozo PPR-5 a partir de marzo de 2009, y el pozo P-10 que se iniciaron a finales del año 2010. En la Figura 3-16 se presentan los caudales de bombeo mensuales de los pozos de bombeo de MC desde las Formaciones Opache y Calama.

Figura 3-16: Bombeo histórico de los pozos de MC realizado desde el año 2002 hasta 2022



Fuente: ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

Finalmente, para recuperar la capacidad de bombeo del Campo de Pozos de Calama hasta alcanzar el caudal máximo autorizado de 98 L/s, durante el año 2019 se llevó a cabo la profundización y puesta en servicio de los pozos PPR-3⁷ y P-21, los que extraen agua de la Formación Calama (aprobado por Res. Ex. 267/2019 SEA Antofagasta). Cabe resaltar, que la profundización de pozos de extracción desde la Formación Opache (superior) a la Formación Calama (inferior), implementada desde el año 2007 a la

⁷ ITASCA. Profundización del Pozo PPR-3: Pruebas de Bombeo. 2019.

actualidad, tuvo como objetivo minimizar los impactos sobre la vertiente Ojos de Opache y los sistemas bióticos relacionados con las aguas superficiales, dada la baja conexión hidráulica entre ambas formaciones.

En consecuencia, la explotación de los pozos de bombeo de Minera Centinela desde la Formación Calama (inferior) no tiene incidencia en los cambios observados en los caudales aforados en las vertientes del sector (en particular la Vertiente La Cascada), las que están vinculadas con las condiciones hidrológicas de la Formación Opache (superior), así como con condiciones locales resultantes de efectos más bien de tipo antrópico o de reducción de la recarga.

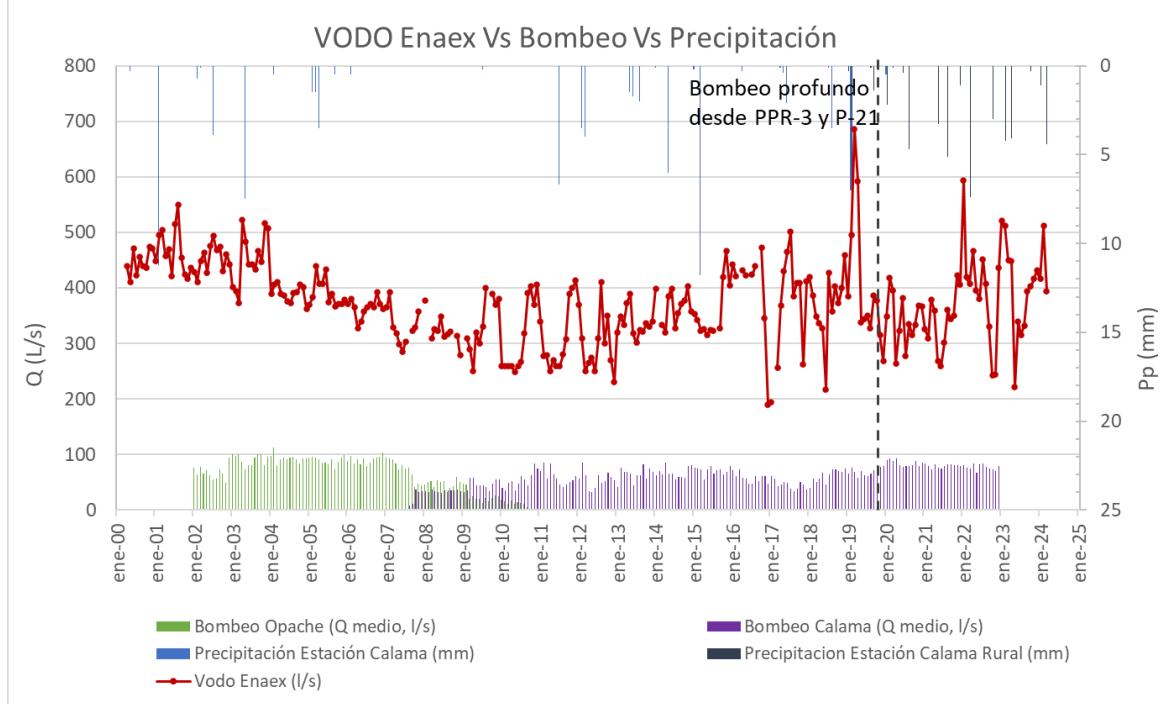
Adicionalmente, y tal como se señala en la Sección 4 del informe de ITASCA (2023), la información disponible sobre caudales en la vertiente La Cascada y niveles de agua subterránea en el área de estudio, así como la naturaleza kárstica de la Formación Opache (sistema compartimentalizado), permite indicar que la operación histórica de los pozos de Minera Centinela no ha producido efectos sobre los caudales de la vertiente La Cascada, durante el período de tiempo que el bombeo se realizó desde pozos cribados en la Formación Opache (hasta el año 2009).

De esta forma se puede indicar que el comportamiento de los caudales de la Vertiente La Cascada responde a causas distintas al bombeo que realiza MC desde la Formación Calama (es decir, efectos del bombeo no generan cambios en aporte de aguas someras hacia la vertiente La Cascada), pudiendo estar más relacionado a lo que ocurre en superficie con otros usuarios de la cuenca. En efecto, los datos y análisis presentados por ITASCA (2022, 2023 y 2024) permiten verificar que no hay una relación directa entre el bombeo que realizó Minera Centinela en la Formación Calama con los niveles observados en la Formación Opache, y por lo tanto, tampoco con los caudales de la vertiente La Cascada.

De acuerdo con la información disponible, ITASCA (2024) concluye que el análisis de los caudales de las vertientes y su relación con los bombeos efectuados por MC en el Campo de Pozos de Calama pone de manifiesto un comportamiento diferente entre la vertiente Ojos de Opache y la vertiente La Cascada:

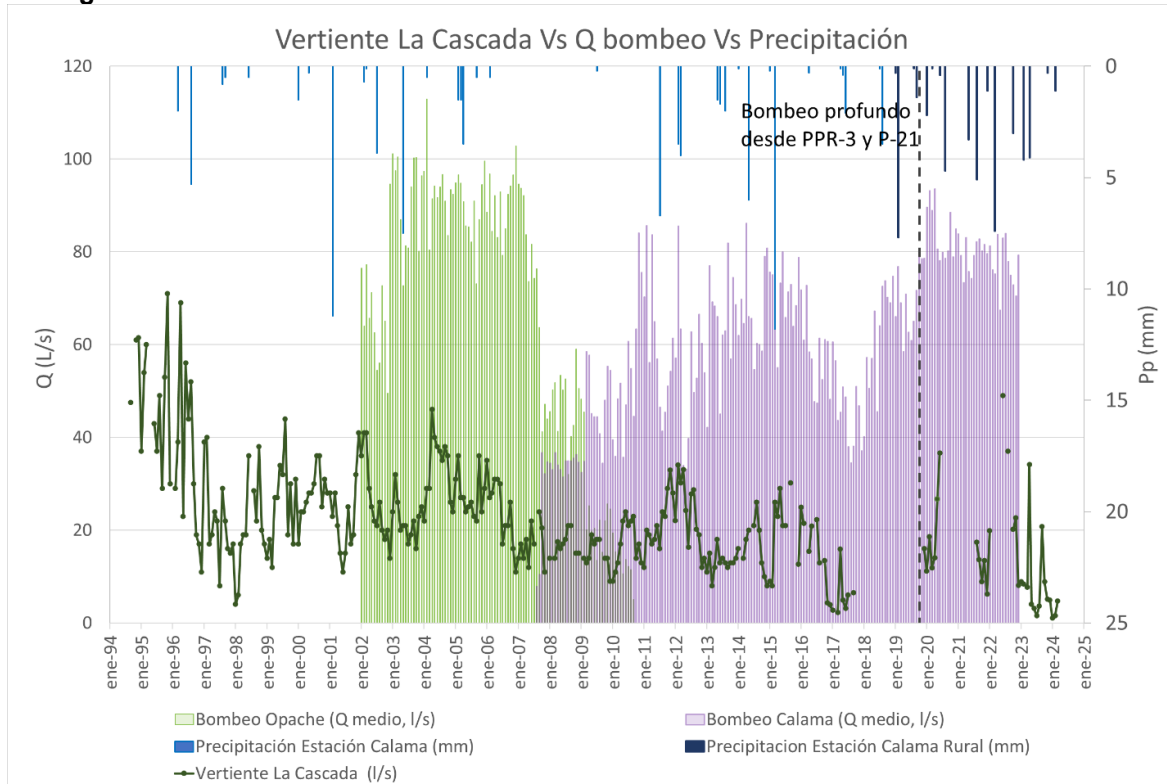
- La vertiente Ojos de Opache se localiza al oeste, aguas abajo del campo de pozos de MC. Según el modelo conceptual, esta vertiente opera como un dren que permite el afloramiento de gran parte del caudal de la formación Opache. Al analizar los caudales de la vertiente Ojos de Opache en el punto de monitoreo VODO Enaex, se observa que con anterioridad a la profundización de los pozos PPR-2, PPR-5 y P10 (antes del año 2010), los caudales eran claramente descendentes, debido, entre otros, al bombeo desarrollado desde la Formación Opache (Figura 3-17). La profundización posterior de estos pozos permitió una paulatina y constante recuperación de los caudales de la vertiente Ojos de Opache, la que continúa hasta la actualidad (marzo 2024).
- Por su parte, la vertiente La Cascada se localiza al sur del Campo de Pozos de Calama. Esta vertiente registra un comportamiento distinto a la vertiente Ojos de Opache, con caudales en descenso desde el inicio del registro en 1994, cuando todavía no se había iniciado el bombeo desde el Campo de Pozos (Figura 3-18). Por otro lado, desde el cese de las extracciones de MC desde la Fm Opache en 2010, la vertiente Ojos de Opache muestra una estabilización y recuperación, mientras que La Cascada mantuvo una tendencia a la baja hasta 2017. Adicionalmente, a partir del inicio del bombeo profundo en los pozos PPR-3 y P-21 en 2019 y, consecuentemente, de un aumento de los caudales totales de bombeo desde la Formación Calama, los registros de caudal de la vertiente han aumentado. Por último, no se registra un aumento de los caudales tras el cese del bombeo desde el Campo de Pozos de Calama, alcanzado su caudal mínimo histórico en julio de 2023. Después, los caudales de la vertiente se recuperaron de ese mínimo histórico, pero a marzo 2024 siguen con una tendencia descendente.

Figura 3-17: Caudal Vertiente Ojos de Opache ENAEX en relación con Bombeos desde Pozos MC



Fuente: ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

Figura 3-18: Caudal Vertiente La Cascada en relación con Bombeos desde Pozos MC



Fuente: ITASCA. Informe Experto. Acta de inspección personal de fiscal instructor de la SMA, de 11 de octubre de 2023. Abril 2024

El análisis anterior, descrito de manera detallada en ITASCA (2024), pone en evidencia que el bombeo efectuado por MC desde el Campo de Pozos de Calama (desde 2002 hasta fines de 2022) tuvo escasa o nula relación con el comportamiento de la vertiente La Cascada. Este hecho se explica como consecuencia principalmente de dos factores:

- La desconexión existente entre la formación Opache y la formación Calama, la cual ha sido estudiada, revisada y validada por la autoridad ambiental y por la autoridad sectorial competente, con base en una amplia y completa información hidrogeológica disponible.
- Como consecuencia del carácter kárstico del acuífero de la Formación Opache, el que compartimentaliza el flujo subterráneo, teniendo algunos sectores del sistema acuífero una muy baja conectividad hidráulica entre ellos.

3.5 Resumen Efectos Externos sobre Vertiente La Cascada

Todo lo anteriormente señalado permite concluir que no hay una relación causal entre el bombeo histórico de MC (desde 2002 hasta fines de 2022, desde las Formaciones Opache y Calama) y la reducción de los caudales de la vertiente La Cascada debido a la existencia de otras situaciones que, con mayor probabilidad y relación técnica, serían las responsables directas de la disminución de caudales de la Vertiente La Cascada.

Este hecho se atribuye a la combinación de al menos tres factores:

- Pozos de bombeo tienen sus zonas captantes (cribas) en la Formación Calama (profunda) y separada por un acuitardo (Formación Jalquinche) con la Formación Opache (somera), por lo tanto, es muy poco probable que su operación pueda afectar a la vertiente La Cascada que se alimenta de aguas de origen somero.
- Vertiente La Cascada se localiza al sur de Campo de Pozos, fuera del sentido de flujo regional este – oeste (como se observa en el análisis de piezometría presentado por ITASCA).
- La evidencia adicional de uso local de aguas en la cercanía de la vertiente, así como la intervención directa de terceros sobre la propia vertiente y su entorno.

4 CONCLUSIONES

4.1 Sobre el Modelo Conceptual en el Área de Estudio y la Vertiente La Cascada

Este documento de revisión se centró de manera directa en el análisis de antecedentes preparados por ITASCA para Minera Centinela (MC) en el marco de este proceso sancionatorio, revisando además información pública y de terceros en el área de interés.

En particular este reporte se enfocó en la revisión de antecedentes específicos que permiten establecer los siguientes hechos claves en el área de Calama, en que se localizan los pozos de bombeo del Minera Centinela:

- Existe un modelo conceptual técnicamente documentado y validado por diversos autores (ámbito público y privado) que ratifica la existencia de las Formaciones Opache y Calama como principales unidades hidrogeológicas en el área. Las cribas o ranurados de los pozos de bombeo de Minera Centinela se localizan, en la actualidad, en la unidad más profunda (Formación Calama).
- Pozos de bombeo de MC operaron entre los años 2002 y 2010 desde la Formación Opache (acuífero superior), profundizándose desde el año 2010 hasta la Formación Calama (acuífero inferior). El bombeo termina a fines del año 2022.
- Se ha establecido con antecedentes técnicos diversos que las dos unidades hidrogeológicas anteriores se encuentran hidrogeológicamente separadas por la Formación Jalquinche, que actúa como un sistema acuitado, con baja o nula conectividad vertical, localizado entre las Formaciones Opache y Calama.
- La Dirección General de Aguas (Res Ex 460. 2019, que contiene Minuta DCPRH N°29 del 16 de septiembre de 2019) concluyó que no es posible confirmar que haya una desconexión de largo plazo entre la Formación Opache y Formación Calama, en particular debido a la falta de información isotópica o trazadores confiables en el largo plazo.
- No obstante lo anterior, en el mismo documento (Recomendación 7) se reconoció que los niveles de agua subterránea en la Formación Opache (acuífero superior) han sido estables en el tiempo, lo que desde el punto de vista hidráulico da cuenta de una separación de efectos durante el período en el cual se desarrolló el bombeo por parte de Minera Centinela, en el acuífero inferior.
- Adicionalmente, y con base a la información presentada en mapas de equipotenciales generados por ITASCA (2024) para las formaciones Opache y Calama en el año 2022, se ha podido verificar que no existe relación directa entre los niveles piezométricos de las Formaciones Opache y Calama, producto del rol de la Formación Jalquincha como acuitado.
- Lo anterior implica que los caudales de bombeo que se desarrollaron en la unidad acuífero inferior por los pozos de Minera Centinela (Formación Calama) no han producido efectos sobre los niveles de agua subterránea de la unidad acuífera superior (Formación Opache), la que es una de las fuentes de aporte de agua de las vertientes y cursos superficiales.
- Tal como se establece en ITASCA (2022, 2023 y 2024), en el área del campo de pozos de Calama existe una fuerte caída de la topografía del terreno lo que genera que la Formación Opache (acuífero superior) termine aflorando en distintas vertientes hasta drenarse por completo, incorporando sus caudales a los cursos superficiales de los ríos Loa y San Salvador. Se evidencia, por tanto, la conexión de la Formación Opache con las vegas, vertientes y ríos existentes en la superficie, no así la conexión de estos sistemas con la Formación Calama.
- La situación anterior también se refleja en los modelos conceptuales presentados por DGA-KP (2017) e HIDROMAS (2020), en los que los aportes de agua a las vertientes del área (Ojos de Opache y La Cascada) se asocian con la unidad acuífero superior (Formación Opache).

- Es importante destacar en todo caso que el acuífero superior (Formación Opache) no es la única fuente de aporte de agua a estas vertientes, habiendo otros aportes de agua (Río Loa, por ejemplo), según la ubicación particular de las vertientes en el área de interés.
- La información disponible sobre niveles de agua subterránea en el área de estudio, así como la naturaleza kárstica de la Formación Opache (presencia de sectores aislados debido a compartimentalización), permite indicar que la operación histórica de los pozos de Minera Centinela no ha producido efectos sobre los caudales de la vertiente La Cascada, durante el período de tiempo que el bombeo se realizó desde pozos cribados en la Formación Opache.
- Información actualizada da cuenta de un grado importante de intervención antrópica de la zona de nacimiento de la Vertiente La Cascada (usos locales de agua superficial y subterránea, construcción y limpieza de canales, construcción de viviendas rurales, así como la posible construcción de pozos para aprovechamiento de agua subterránea para consumo humano), todo lo que podría explicar de manera más clara y directa la situación de reducción de los aportes de agua en ella.

4.2 Sobre La Situación de la Vertiente La Cascada

De esta forma se puede indicar que el comportamiento de los caudales de la Vertiente La Cascada (reducción) no responde al bombeo que ha realizado Minera Centinela desde la Formación Calama, pudiendo estar relacionado de manera directa a lo que ocurre en superficie con otros usuarios de la cuenca (uso de aguas a nivel local, intervenciones urbanas en el área, entre otras).

Por lo anterior, y con base en la información técnica disponible y aportada por Minera Centinela, así como los antecedentes públicos revisados, es posible concluir que los pozos de bombeo de Minera Centinela se encuentran cribados en la Formación Calama (sistema profundo) y por lo tanto su operación – que terminó el 31 de Diciembre de 2022 – no están relacionados con la situación que afectó el funcionamiento de la Vertiente La Cascada, sino que existen otros factores, adecuadamente documentados que permiten explicar la situación del área.

En efecto, los antecedentes revisados permiten concluir que no hay una relación causal entre la operación histórica de los pozos de bombeo de MC (desde 2002 hasta fines de 2022, desde las Formaciones Opache y Calama) sobre los caudales de la vertiente La Cascada, debido a la existencia de otras situaciones que, con mayor probabilidad y relación técnica, son las responsables directas de la disminución de caudales de la Vertiente La Cascada.

Este hecho se atribuye a la combinación de al menos tres factores:

- Pozos de bombeo tienen sus zonas captantes (cribas) en la Formación Calama (profunda) y separada por un acuitardo (Formación Jalquinche) con la Formación Opache (somera), por lo tanto, es muy poco probable que su operación pueda afectar a la vertiente La Cascada que se alimenta de aguas de origen somero.
- Vertiente La Cascada se localiza al sur de Campo de Pozos, fuera del sentido de flujo regional este – oeste (como se observa en el análisis de piezometría presentado por ITASCA).
- La evidencia adicional de uso local de aguas en la cercanía de la vertiente, así como la intervención directa de terceros sobre la propia vertiente y su entorno.