Flow Hydro Consulting

Memorándum Técnico

Para:	Manuel Bucci – Gerencia de Aguas y Relaves, Codelco.
De:	Flow Hydro Consulting Group
Fecha:	12 de noviembre de 2026
Ref.:	Actualización y robustecimiento del Plan de Vigilancia Ambiental, Codelco DRT (Rev. 2)

1 INTRODUCCIÓN

La División Radomiro Tomic de Codelco cuenta actualmente con un Plan de Vigilancia Ambiental (PVA), cuyo objetivo es detectar eventuales cambios en las aguas subterráneas próximos a sus instalaciones, y establecer si ellos están relacionados o no a sus operaciones. Dicho seguimiento se lleva a cabo mediante un monitoreo sistemático de nivel y calidad del agua subterránea a través de una red de pozos distribuidos en el Sector RT y Pampa Cere.

Actualmente, en el marco del Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto "Continuidad del Proceso de Lixiviación y Adecuaciones al Proyecto Minero División Radomiro Tomic", se contempla, entre otras cosas, la ampliación de la carpeta para la depositación de los ripios secundarios hacia el norte de la actual infraestructura de producción minera. Esta ampliación, no sólo modificará la distribución de las obras respecto a la red de monitoreo, sino que también cubrirá parte de los pozos contemplados en el PVA actual.

En este contexto, Flow presenta a Codelco en este memorándum técnico un diseño actualizado y robustecido del PVA, basado en la definición de nuevos puntos de medición. Estos puntos se proponen al norte de los nuevos botaderos, para el establecimiento de una línea de base, y al sureste, en Pampa Cere, para la detección aguas abajo de cualquier cambio en las variables monitoreadas. Además, esta nueva configuración de la red monitoreo permitirá complementar la caracterización y avance de posibles filtraciones hacia dicho sector.

Para la implementación de los nuevos puntos se contempla la utilización de pozos ya existentes y la perforación de nuevos. Con esto no sólo se busca suplir aquellos que dejarán de estar operativos por la ampliación de los botaderos, sino que también complementar la red de monitoreo actual.

De este modo, en el presente memorándum se describe brevemente el contexto hidrogeológico del sector, en conjunto al PVA vigente, indicando sus puntos, variables y frecuencia de monitoreo. A continuación de ello, se evalúa el número y ubicación de los pozos de monitoreo respecto a las nuevas obras proyectadas, así como también su estado de operatividad actual. Finalmente se presenta el diseño actualizado y mejorado del PVA.

2 CONTEXTO DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DE LA DIVISION RT

En el área de estudio de la faena Radomiro Tomic, presentada en el reporte "Actualización Modelo Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2024"[1], se han descrito 6 unidades hidrogeológicas (Figura 1 y Figura 2), de las cuales 2 constituyen acuíferos. Estas 2 unidades son: la Unidad Hidrogeológica 2 (UH-2), conformada por unidades cársticas – detríticas ubicadas en el sureste del área de estudio, que constituye el Acuífero Superior (ACS), de tipo semiconfinado a libre; y la Unidad Hidrogeológica 5 (UH-5) conformada por sedimentos gravo-arenosos semiconsolidados, que constituyen al Acuífero Inferior o Principal (ACI), de tipo libre en sector de instalaciones RT y Pampa Cere, y de tipo confinado en Pampa Carbonatera. Además, ambos acuíferos (superior e inferior) están separados por dos unidades de acuitardo (UH-3 y UH-4) en el sector Pampa Carbonatera. No obstante, se ha estimado que al menos al oeste del Salar Cere el acuífero inferior (UH-5) estaría en conexión hidráulica con el superior (UH-2), posiblemente alimentándolo de manera local. Por último, debajo de la UH-5 subyace el basamento (UH-6), representado por rocas volcanosedimentarias estratificadas e ígneas intrusivas, con distintos grados de fracturamiento y una permeabilidad media-baja (UH-6a) a muy baja (UH-6b).

Considerando este contexto hidrogeológico, y a partir de la información recopilada desde la amplia red de monitoreo de la división – 146 pozos de monitoreo de niveles freáticos (periodo de registro 1997 a 2024) y 67 estaciones para el monitoreo de calidad de las aguas (data comprendida entre 2003-2023) – se ha caracterizado la ocurrencia de infiltraciones de aguas industriales en el sector de instalaciones de la división RT, principalmente provenientes desde el sector del botadero de ripios secundarios. Esta recarga antrópica ha dado origen a una pluma sulfatada desde el complejo industrial hacia el sector de Pampa Cere (Figura 1), movilizándose a través del acuífero principal (ACI), siguiendo la dirección de flujo del sector (al SE).

A partir del análisis de relaciones iónicas, índices de saturación y análisis multivariable realizado[2], se evidenció que existen 2 procesos que controlan principalmente la calidad química en la zona de estudio:

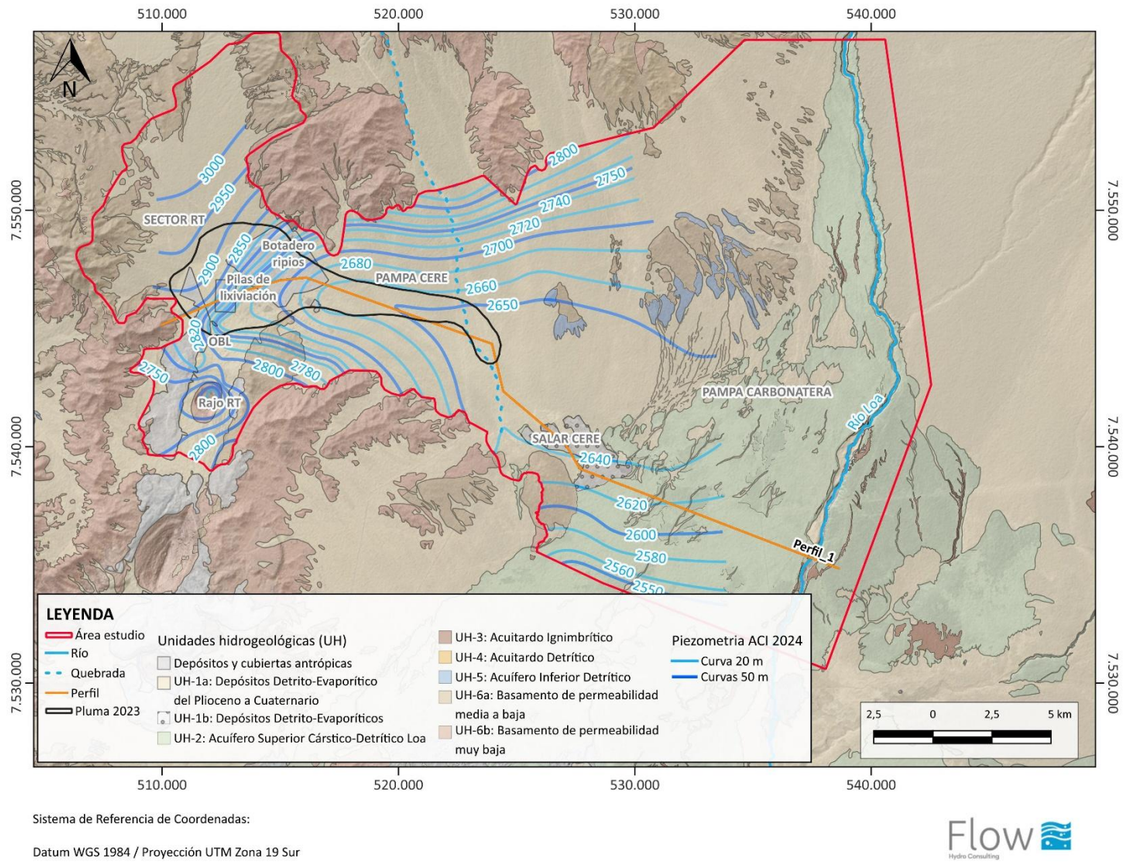
1) meteorización de silicatos y sulfuros de las aguas de procesos con una isotopía más enriquecida en $\delta^{18}O$ y empobrecida en $\delta^{34}S$; y

2) meteorización de rocas sedimentarias con niveles evaporíticos que involucra la disolución de yeso, calcita y/o haluros y con aguas empobrecidas con respecto a $\delta^{18}O$, con una posible recarga a mayor altura que las aguas de proceso. Este último proceso contribuye con altas concentraciones de cloruros y/o sulfatos en las aguas naturales, encontrándose concentraciones de sulfato que varían entre 400 y 1.200 mg/L.

En particular, los antecedentes de calidad química de las aguas subterráneas a diciembre 2023 indican que el frente de avance de la pluma se encuentra contenida (poco avance) en las cercanías de los pozos P-8 y PCAR-1 (Figura 2) ubicados en Pampa Cere, abarcando un ancho aproximadamente del orden de 850 m. La distancia recorrida por esta pluma desde el complejo industrial, en 25 años de operación minera, alcanza 8 km de longitud.

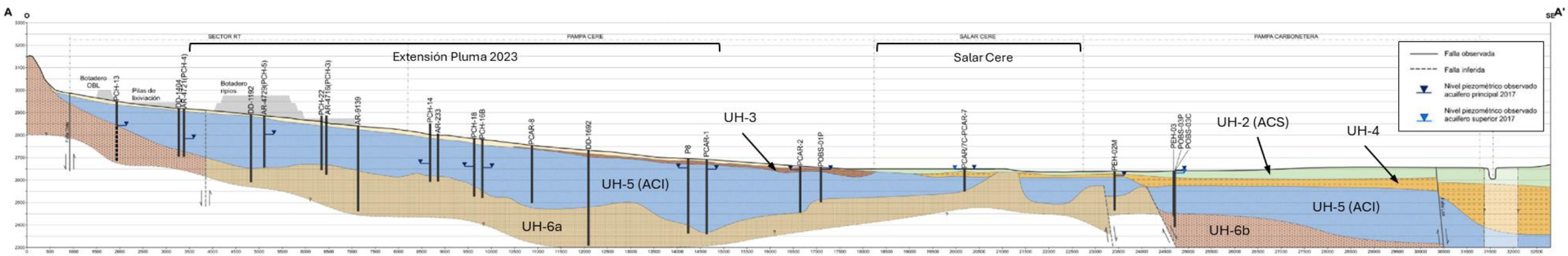
[1] Flow (2024). Actualización Modelo Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2024.

[2] Flow (2024). Caracterización Hidroquímica de la Pluma y Potenciales Fuentes.



Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2024)

Figura 1: Contexto hidrogeológico del área de operaciones de la División Radomiro Tomic.



Fuente: Elaboración propia en base a Flow (2024)

Figura 2: Perfil hidrogeológico a lo largo del área de estudio (traza en Figura 1).

3 DESCRIPCIÓN DEL PLAN DE VIGILANCIA ACTUAL

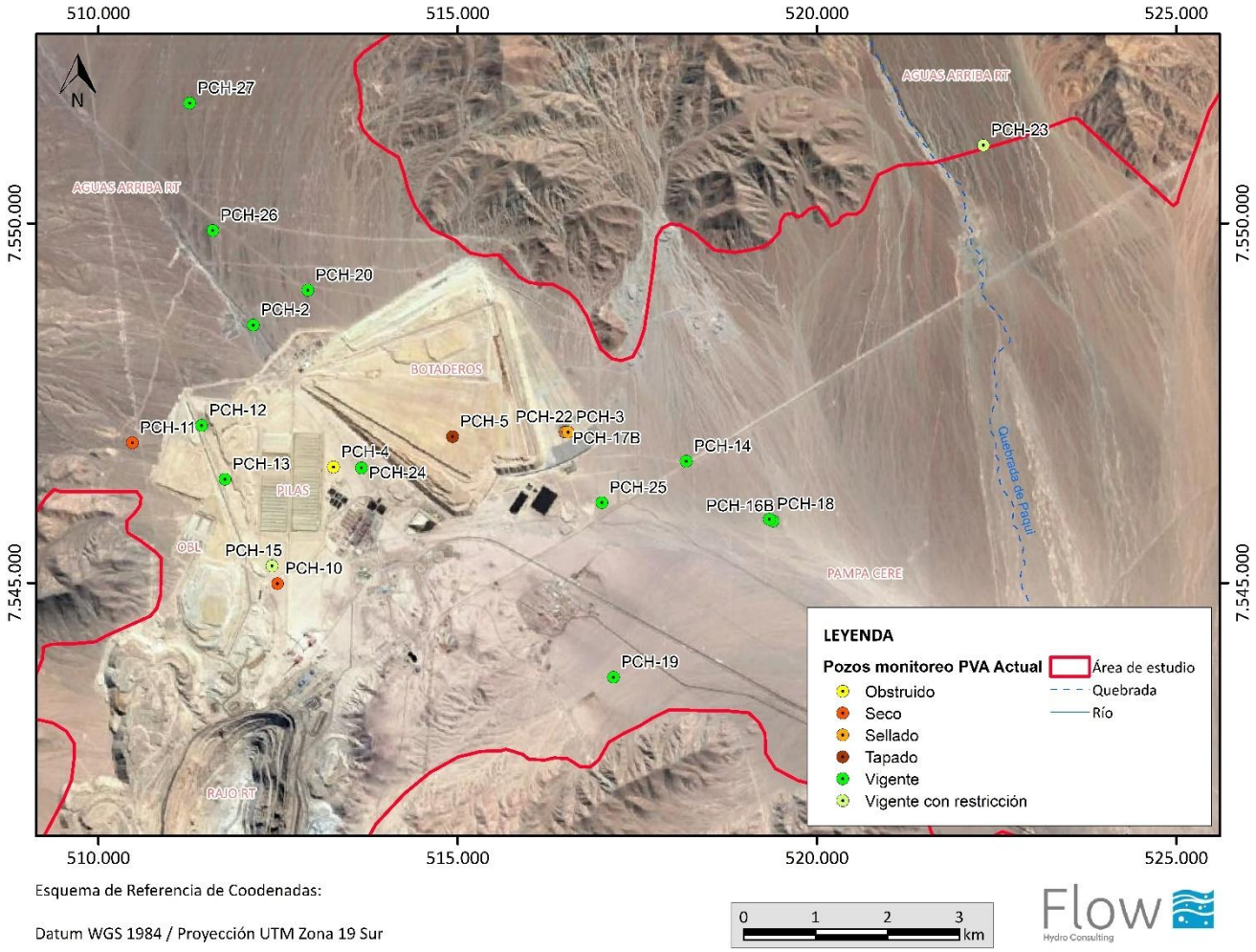
Actualmente el Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) de la División Radomiro Tomic (DRT) responde a los compromisos de seguimiento presentados en la Resolución de Calificación Ambiental N°132/2012 del proyecto "Ampliación Lixiviación Secundaria de Ripios", e incluye los puntos de monitoreo comprometidos en las Resoluciones de Calificación Ambiental de proyectos previos al mencionado. En total se han evaluado y aprobado 8 proyectos, en los cuales se han presentado compromisos asociados al PVA como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1: Compromisos ambientales adquiridos en el programa de seguimiento de la componente agua subterránea

Proyecto	**RCA (N°/año)**	**Compromisos ambientales**
Mina Radomiro Tomic	15/12 Ene. 1996	Construcción de pozos monitoreo PCH-2, PCH-3, PCH-4, PCH-5
Lixiviación Secundaria de Ripios	115/1998	• Monitoreo mensual de CE y pH • Análisis de elementos químicos importantes ante cambios significativos de CE y pH.
Lixiviación de Minerales de Baja Ley. DUMP 2	216/2002	• Construcción de nuevo pozo de monitoreo PCH-6* junto a pilas de lixiviación • Monitoreo mensual de CE, pH y sulfatos en nuevo pozo
Lixiviación de Minerales de Baja Ley. DUMP 2, Fase III	276/2006	Construcción de pozo de observación adicional PCH-10**
Lixiviación de Minerales de Baja Ley. DUMP 2, Fases IV-V	418/2009	• Construcción de los pozos PCH-11*, PCH-12 y PCH-13 • Monitoreo hidroquímico e isotópico
Extracción y movimiento de minerales Mina Radomiro Tomic, Quinquenio (2008-2012)	0309/2008	• Se comprometieron los pozos PCH-14, PCH-15, PCH-16B, PCH-17B, PCH-18, PCH-19, PCH-20, PCH-22 y PCH-23. • Actualización de modelos hidrológicos e hidrogeológicos conceptuales y numéricos.
Ampliación Lixiviación Secundaria de Ripios	132/2012	• Ampliación de la red de monitoreo. Los 7 pozos utilizados se actualizan a un total de 20. • Construcción de los pozos PCH-24, PCH-25, PCH-26 y PCH-27
Actualización Proyecto Minero División Radomiro Tomic	0121/2021	• Limpieza mecánica, purga y monitoreo de los pozos PCH-16B, PCH-14, PCH-18, PCH-20 y PCH-25 • Ampliar monitoreo geofísico TEM y NanoTEM en sector de PCH-20 y PCH-25, con frecuencia anual. • Análisis de concentración de elementos disueltos, cada dos años (comprende campaña de muestreo, análisis de laboratorio y modelación) • Monitoreo isotópico

Fuente: Elaboración propia
*Pozos secos desde su construcción. En el caso del PCH-6, este fue reemplazado por PCH-4.
**Actualmente seco. PCH-10 reemplazado por PCH-15

En base a estos compromisos, el PVA se compone a la fecha de una red de monitoreo 21 pozos, distribuidos en el Sector RT y Pampa Cere, junto al botadero de ripios actual, a las Pilas Lixiviación y al OBL. La distribución de la red monitoreo actual del PVA se muestra en la Figura 3. Del total de pozos, 3 se encuentran sellados (PCH-17B, PCH-22, PCH-3), 2 secos (PCH-10 y PCH-11), 1 tapado por el botadero de ripios (PCH-5), 1 obstruido (PCH-4) y 2 con nivel insuficiente para muestreo químico (PCH-15 y PCH-23), ello según el último reporte de monitoreo ingresado a la autoridad (periodo 2023[3]). De este modo, a la fecha se encuentran completamente operativos como puntos de monitoreo 12 sondajes. El detalle de coordenadas y estado actual de cada pozo se presenta en la Tabla 2.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3: Ubicación y estado actual (año 2023) de los pozos de monitoreo del Plan de Vigilancia Ambiental

[3] SGA (2024). Plan de Vigilancia Ambiental Sector Radomiro Tomic. Informe Anual Periodo Enero – Diciembre 2023

Tabla 2: Pozos de monitoreo del Plan de Vigilancia Ambiental, coordenadas y estado actual.

Pozo	UTM Este	UTM Norte	Cota terreno	Prof.	Habilitación (*)	Estado
	WGS84 – Huso 19S (m)		(msnm)	(m)		
PCH-10	512.492	7.544.939	-	-	-	Seco
PCH-11	510.471	7.546.949	3.045,8	200	-	Seco
PCH-12	511.435	7.547.189	3.001,2	200	-	Operativo
PCH-13	511.762	7.546.441	2.977,0	-	-	Operativo
PCH-14	518.180	7.546.692	2.830,0	269	107-266(*)	Operativo
PCH-15	512.416	7.545.237	2.931,0	200	41-195 (*)	Operativo (Nivel insuficiente para muestreo químico)
PCH-16B	519.386	7.545.860	2.775,5	235	141-231 (*)	Operativo
PCH-17B	516.491	7.547.100	2.856,5	254	121-250 (*)	Sellado
PCH-18	519.337	7.545.885	2.777,3	230	119-220 (*)	Operativo
PCH-19	517.168	7.543.688	2.871,5	240	133-234 (*)	Operativo
PCH-2	512.154	7.548.585	2.995,2	-	-	Operativo
PCH-20	512.914	7.549.070	3.016,0	180	71-178 (*)	Operativo
PCH-22	516.510	7.547.098	2.856,8	225	108-216 (*)	Sellado
PCH-23	522.316	7.551.087	3.038,3	192	124-184 (*)	Operativo (Nivel insuficiente para muestreo químico)
PCH-24	513.660	7.546.598	2.947,0	228	166-220	Operativo
PCH-25	517.006	7.546.115	2.856,4	237	178-232 (*)	Operativo
PCH-26	511.592	7.549.901	3.088,0	180	88-172	Operativo
PCH-27	511.271	7.551.673	3.170,1	180	46-172 (*)	Operativo
PCH-3	516.537	7.547.096	2.849,4	-	-	Sellado
PCH-4	513.271	7.546.612	2.917,6	-	-	Obstruido
PCH-5	514.928	7.547.036	-	-	-	Tapado

(*) Tramo habilitado no continuo, intercalaciones entre PVC ranurado y ciego
Fuente: Modificado de último reporte de PVA entregado a la autoridad, periodo enero a diciembre 2022

En la red de monitoreo actual de 21 pozos (12 operativos) se mide el nivel piezométrico y la calidad fisicoquímica de las aguas. Esta última considera los siguientes parámetros: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Al, As, B, Br, Ca, Cd, Cl, CO_3, Cr, Cu, F-, Fe, HCO_3, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, NH_4, NO_3, Pb, PO_4, S^{2-}, Si, SO_4^{2-}, Zn, Aceites y Grasas, Coliformes Totales, Detergentes, DBO5, DQO, HCT, SDT, SS, ST y Turbiedad. Cabe señalar que para los metales se reporta la fracción total. La frecuencia de medición de nivel y muestreo para química es mensual y, actualmente, es realizado por la ETFA Algoritmo y Mediciones Ambientales SpA. Los análisis químicos de las muestras se realizan en el laboratorio SGS Chile, con certificación ETFA.

Respecto al monitoreo isotópico (^{18}O, ^{2}H y S), este se realiza en 8 de los 21 pozos pertenecientes al PVA (PCH-11, PCH-12, PCH-13, PCH-14, PCH-16B, PCH-18, PCH-20 y PCH-25). Todas las mediciones se reportan anualmente ante la autoridad. En cada reporte, las series temporales del último año de las variables se comparan con las tendencias históricas, pozo por pozo.

4 EVALUACIÓN CRÍTICA DE LA OPERATIVIDAD Y EFECTIVIDAD DEL PVA

Los 21 pozos de monitoreo (12 operativos) que constituyen el actual PVA se encuentran distribuidos adecuadamente para la detección de cambios en el nivel y de la calidad de las aguas subterráneas, aquellos cambios que hayan sido inducidos por las obras e instalaciones ya aprobadas en RT. Esta distribución es, en general, adecuada ya que la red de monitoreo cubre desde el norte al sur del Sector RT hasta la Pampa Cere, siguiendo la dirección del flujo subterráneo observado históricamente (al SE). De este modo, permite generar una línea de base aguas arriba para cada variable monitoreada, y detectar aguas abajo eventuales anomalías. En términos de variables monitoreadas, se considera que el análisis de niveles freáticos y parámetros fisicoquímicos junto a su frecuencia de monitoreo (mensual), abarcan los elementos necesarios para un adecuado seguimiento ambiental; no obstante, se menciona que el monitoreo hidroquímico no incorpora o bien no reporta anualmente la medición de los parámetros de pH, CE y alcalinidad medidos *in situ*. Asimismo, en cuanto al monitoreo isotópico, es de sólo en 7 de los 12 pozos operativos se realiza monitoreo, ya que el PCH-11 se encuentra seco.

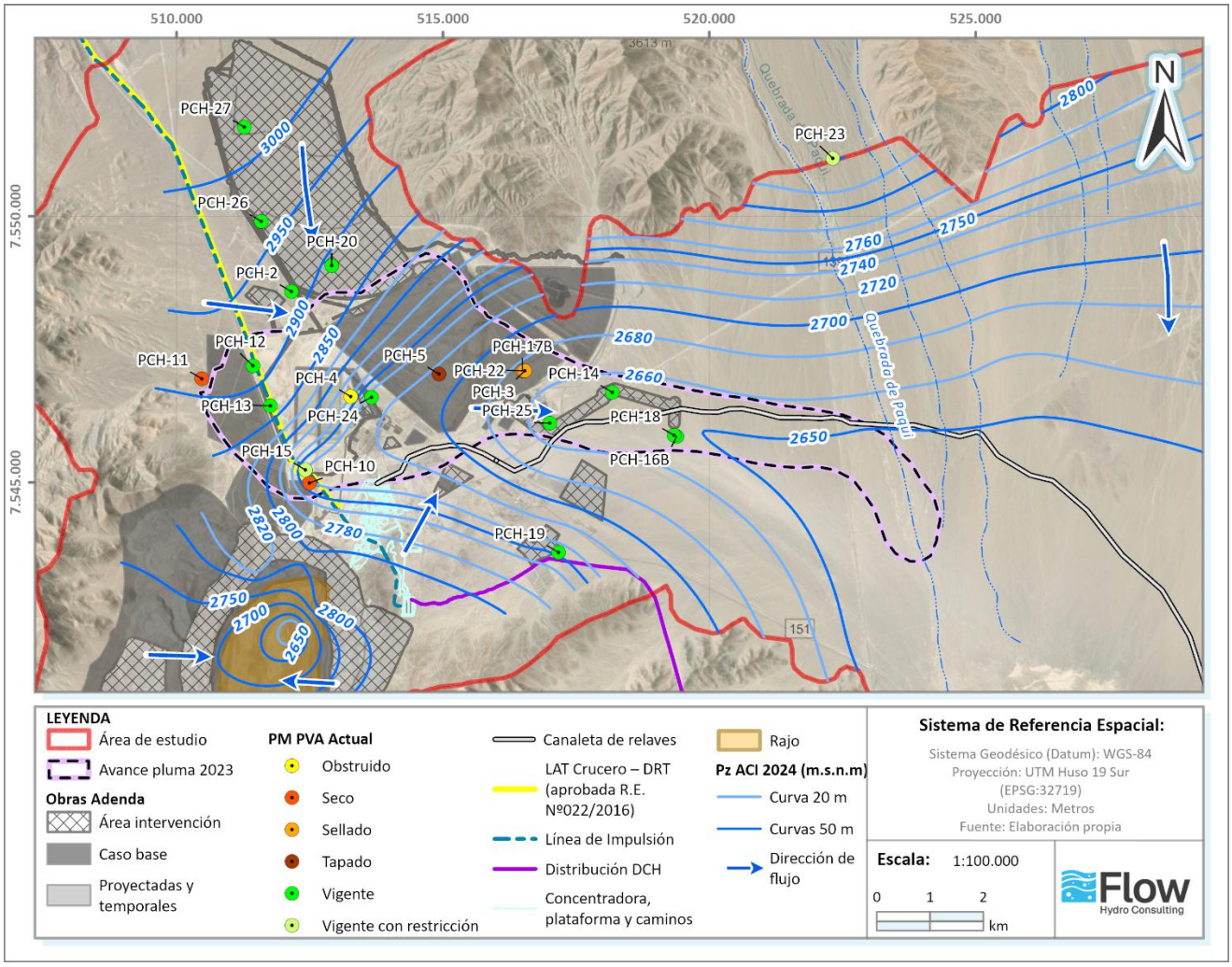
En relación con la caracterización del avance de la pluma, cabe mencionar que actualmente no hay pozos que permitan monitorear el frente de pluma. Si bien los pozos PCH-25, PCH-14, PCH-16B y PCH-18 fueron originalmente concebidos para dar seguimiento a la pluma en el sector de Pampa Cere, estos ya no permiten monitorear el frente, cuya ubicación estimada al final de 2023 corresponde al sector de la quebrada de Paqui en Pampa Cere (Figura 4). Además, estos pozos fueron habilitados en tramos extensos (entre 50 y 160 m de tubería ranurada, Tabla 2) lo que impide caracterizar de forma óptima la pluma en su extensión vertical.

Por otra parte, resulta importante mencionar que 6 de los 21 pozos del PVA actual, PCH-10, PCH-11, PCH-17B, PCH-22, PCH-3 y PCH-5, se encuentran actualmente inhabilitados (secos, sellados o tapados por el crecimiento del botadero de ripios, como se indica en la Tabla 2); por tanto, constituyen puntos de monitoreo cuyo objetivo de vigilancia ambiental no se estaría actualmente cumpliendo. Adicionalmente, el pozo PCH-4 se encuentra obstruido desde el año 2019, imposibilitando su muestreo y respectiva reportabilidad.

Asimismo, al evaluar los actuales puntos de monitoreo ubicados al norte de las instalaciones, respecto a las nuevas obras contempladas en la EIA (Figura 4), se observa que cuatro de ellos, los pozos PCH-2, PCH-20, PCH-26 y PCH-27, quedarán soterrados por la ampliación de los depósitos de ripios. Adicionalmente, el Stock de minerales lixiviables y la ampliación del Patio de Neumáticos se adaptarán para mantener la operatividad de los pozos PCH-15 y PCH-19, respectivamente.

En el sector de instalaciones RT, los pozos PCH-12, PCH-13, PCH-15 y PCH-24 se observan especialmente cercanos al trazado de obras ya aprobadas de los proyectos RT Sulfuros (RCA N° 22/2016) y Adecuación Planta Desaladora RT sulfuros (RCA N°45 del 9 de marzo de 2018), específicamente las obras relacionadas a líneas de impulsión. El pozo PCH-12 se ubica igualmente cercano a la extensión contemplada del OBL de la EIA.

En base a lo anterior, en el siguiente acápite se describe la propuesta de mejoramiento del presente PVA.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Comparativa del PVA actual versus la piezometría (2024), avance de pluma (2023) y obras proyectadas/aprobadas

5 AMPLIACIÓN Y ROBUSTECIMIENTO DEL PVA

En primer lugar, con la finalidad de fortalecer el monitoreo vigente, sustituyendo los pozos de monitoreo actuales (aprobados según RCA 132/2012) que no se encuentran operativos (PCH-10, PCH-11, PCH-17B, PCH-22, PCH-3, PCH-4 y PCH-5), como se mencionó anteriormente (Tabla 2), se incorporará al PVA algunos de los pozos ya construidos con propósitos de exploración hidrogeológica en el sector Pampa Cere. Al respecto, se descarta la incorporación de nuevos pozos en las cercanías de la infraestructura actual (OBL, Pilas, Botaderos, Piscinas) y/o aprobada (proyectos RT Sulfuros y posterior Adecuación), dado que son sectores ya monitoreados (por pozos PCH-12, PCH-13, PCH-15 y PCH-24) y no aportarían como complemento o mejora. Se considera como medida efectiva de mejora el sustituir estos 7 pozos inoperativos por sondajes ubicados aguas abajo de las obras (pertenecientes a la red de monitoreo de la división), con la finalidad de complementar la caracterización y avance de filtraciones históricas hacia el sector Pampa Cere. Así entonces, se incorporarán tres piezómetros

existentes (PIEZO-M-01, PIEZO-M-02 y PIEZO-M-03, Figura 5), habilitados a distinta profundidad, de manera que permitan monitorear las concentraciones de la pluma a escala vertical. Además, se incorporarán los pozos de observación ORT-03 y ORT-4 para complementar el análisis a lo largo y ancho de las unidades hidrogeológicas en que se reconoce la ocurrencia de flujo de agua subterránea y, localmente, concentraciones más altas a la que tiene el medio natural.

En segundo lugar, considerando que los pozos de monitoreo actuales PCH-2, PCH-20, PCH-26 y PCH-27 quedarán soterrados por la ampliación de los depósitos de ripios, como se expuso en la sección anterior, se contempla la construcción de cinco nuevos pozos de monitoreo (OPVA-1, OPVA-2, OPVA-3, OPVA-4 y OPVA-5) al norte de las instalaciones RT (Figura 5). Sus respectivas ubicaciones, profundidades y habilitaciones (Tabla 5) se han definido en base a la distribución de cada obra proyectada (distintas etapas de crecimiento de botaderos y ubicación de líneas de impulsión y/o tensión de proyectos ya aprobados), considerando para ello una distancia de seguridad – que garantice respectivos accesos – de 50 m. Asimismo, se utilizó como antecedente la información litológica de sondajes cercanos y desde levantamientos geofísicos realizados en la zona. Además, se han considerado las direcciones de flujo locales a partir del análisis piezométrico actualizado (2024, Figura 4), en conjunto con la delimitación superficial del contacto roca-relleno. Mayor detalle de estos antecedentes ha sido presentado en el reporte “Actualización Modelo Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2024” (FLOW-COD006-REP-HDG-004B) y en sus respectivos anexos.

En la Tabla 3 se indica la profundidad de la roca (observada e interpretada) en sectores cercanos a los pozos a construir (OPVA-1, OPVA-2, OPVA-3, OPVA-4 y OPVA-5), a partir de lo cual se definió una profundidad de perforación conservadora (200 m), para estos nuevos pozos, de manera que permitan monitorear las distintas unidades hidrogeológicas involucradas (UH-1a y UH-5 como depósitos sedimentarios, y UH-6a asociada a roca fracturada posiblemente saturada).

Tabla 3: Revisión de la profundidad del contacto-relleno en el sector aguas arriba RT

Pozo propuesto	Antecedentes cercanos	Prof. Roca (m)
OPVA-1 y OPVA-2	AR-2889	128
	AR-2890	132
	AR-2891	89
	Perfil geológico D-D´ (Geohidrología, 2011)	100
OPVA-3, OPVA-4 y OPVA-5	AR-2970	70,5
	AR-9216	100
	PCH-20	107
	PCH-2	90
	Perfil TEM1, TEM2 y TEM3 (WS, 2023)[4]	180-200
	Perfil geológico A-A´ (Geohidrología, 2011)[5]	100

Fuente: Elaboración propia en base a modelación hidrogeológica (Flow, 2024)[6]

[4] Wellfield Services Ltda. (2023). Estudio Geofísico de Resistividad TEM y NanoTEM. Modelo Infiltración para Hidrogeología. Codelco Chile División Radomiro Tomic.
[5] Geohidrología. (2011). Modelo de Simulación Hidrogeológica Mina Radomiro Tomic.
[6] Flow (2024). Actualización Modelo Hidrogeológico División Radomiro Tomic 2024.

Por otra parte, con el objetivo de caracterizar tanto el límite sur como el avance de la pluma hacia áreas de interés ambiental (salar de Cere), se incorporarán dos nuevos pozos de monitoreo (OPVA-6 y OPVA-7 a construir, también en el sector Pampa Cere, Figura 5) y 7 pozos ya existentes en el sector, asociados a la red de monitoreo de la división RT. Al respecto, similar al análisis realizado en el sector aguas arriba RT, las características constructivas de los nuevos pozos (OPVA-6 y OPVA-7) se definieron en base a los antecedentes hidrogeológicos disponibles (desde el modelo Flow, 2024) observándose como característica principal un importante espesor sedimentario (> 200 m) y la presencia de roca sana (basamento) bajo los 400 m. Por lo anterior, se sugiere que las nuevas perforaciones alcancen una profundidad estimada en 450 m. En la Tabla 4 se indica la profundidad de la roca (observada e interpretada) en sectores cercanos a los pozos propuestos.

Tabla 4: Revisión profundidad contacto-relleno sector Pampa Cere

Pozo propuesto	Antecedentes cercanos	Prof. Roca (m)
OPVA-6	AR-235	195
	AR-232	208,5
	Perfil Sísmico MASW LS2	350 (*)
OPVA-7	AR-240	296
	AR-239	249
	Perfil Sísmico MASW LS4A	350 (*)
	Perfil geológico A-A´ (Geohidrología, 2011)	250

Fuente: Elaboración propia
(*) Profundidad de basamento impermeable
Fuente: Elaboración propia en base a modelación hidrogeológica (Flow, 2024)

Respecto a la incorporación de pozos existentes en Pampa Cere, se suman al monitoreo los pozos profundos PCAR-1, PCAR-3, PCAR-4, PC-2B y POBS-01P (habilitados todos en la UH-5 o ACI, donde se moviliza la pluma) ubicados inmediatamente cercanos al frente de la pluma, y aguas arriba del Salar de Cere. Así también se incorporan los pozos PCAR-7 y PCAR-7C (profundo y corto, respectivamente) con la finalidad de complementar el monitoreo en el entorno cercano al objeto de protección ambiental, tanto en el acuífero inferior (principal) como el somero sobre el cual se desarrolla el salar.

Finalmente, en cuanto al monitoreo hidroquímico, si bien se ha considerado adecuada la batería de parámetros fisicoquímicos que actualmente se analizan en el PVA, se ve necesario incorporar y reportar las variables de pH, CE y alcalinidad medidas en terreno, puesto que estos son indicativos de las condiciones locales del punto de muestreo y sirven como complemento y/o corrección a los valores obtenidos en laboratorio. De igual manera, se incorporará la medición de metales en su fracción disuelta. En términos isotópicos, en vista del sellado del pozo PCH-20 en la situación futura con proyecto, en conjunto a que el pozo PCH-11 se encuentra actualmente seco, se incorporaran al monitoreo los futuros pozos OPVA-1 y OPVA-4 en el sector RT; y los pozos PC-2B, PCAR-7 y PCAR-7C aguas debajo del frente de la pluma, de manera que permitan complementar y fortalecer la caracterización isotópica de la zona. Dicho monitoreo contempla los isotopos ^{2}H, ^{18}O y ^{34}S con una frecuencia de muestreo semestral.

En la Tabla 5 se presenta el diseño propuesto de los nuevos pozos a perforar. Estos tramos cribados han sido estimados en base a la profundidad del nivel freático observado en pozos cercanos, así como también considerando la información disponible de habilitación de pozos ya existentes y que serán trasladados por motivo de las obras, partes y acciones del proyecto a evaluar. Mayor detalle se presenta como parte de la modelación hidrogeológica conceptual (Flow, 2024). Considerar que, tanto la profundidad como el diseño final de habilitación de cada pozo dependerá del proceso de perforación y actividades a desarrollar en terreno.

En la Tabla 6 se resumen la propuesta final de actualización y robustecimiento del PVA, comparando además el estado de cada pozo para el Caso Base y Caso con Proyecto, mientras que su distribución espacial se detalla en la Figura 5. La construcción de los nuevos pozos (OPVA-1 a OPVA-7) se realizará en una campaña única, previa a la puesta en operación de los nuevos depósitos de ripios (año 2030), ello con la finalidad de que el respectivo monitoreo cuente con al menos un año de registro continuo que sirva para caracterizar la situación base previa a la puesta en operación del proyecto.

Tabla 5: Diseño de pozos nuevos a construir para ampliación de PVA

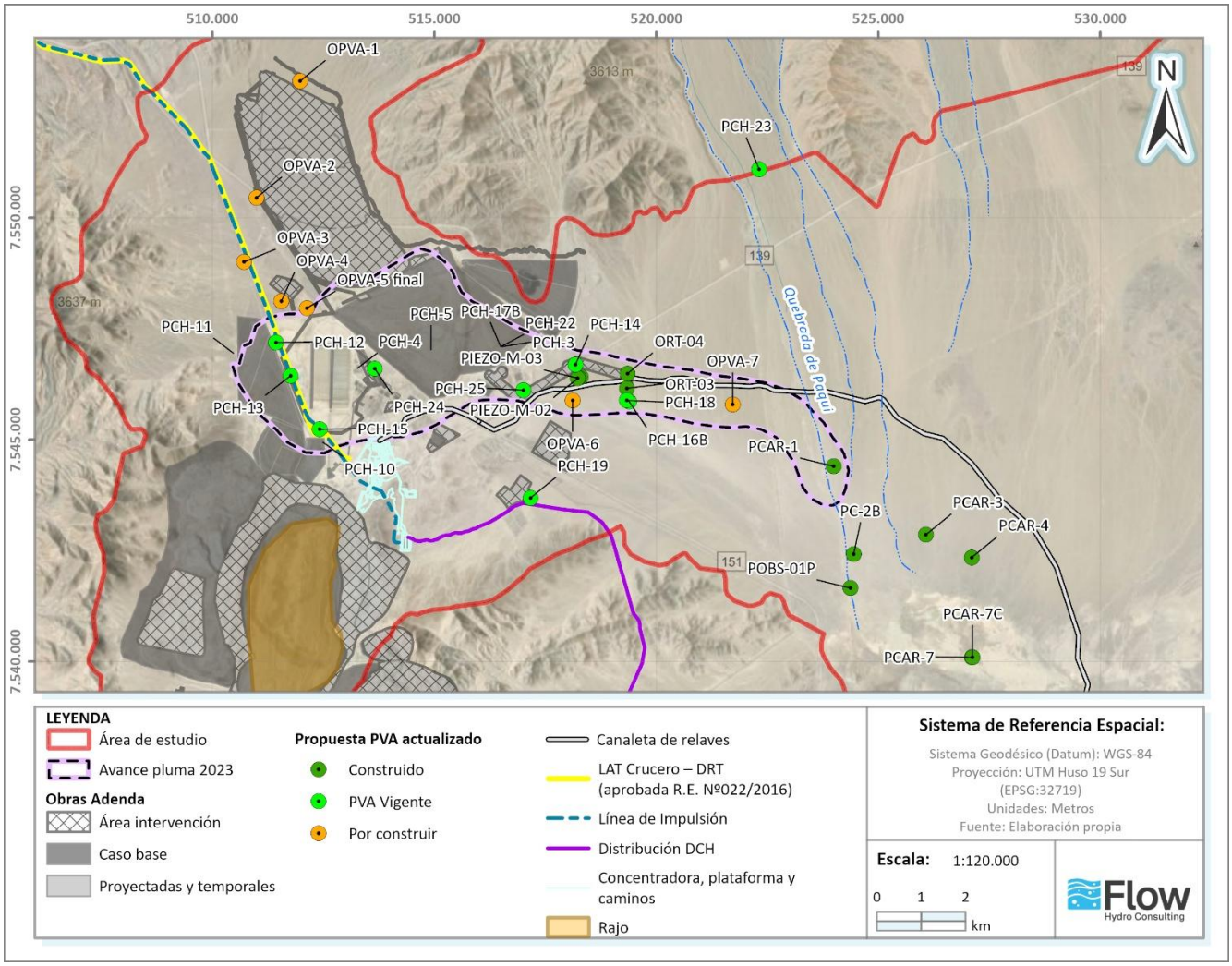
Pozo propuesto	UTM Este (m) propuesta	UTM Norte (m) propuesta	Prof. (m)	Tramo cribado (m)	Justificación de cribado (*)
OPVA-1	511.976	7.553.078	200	120-200	Prof. nivel en PCH-27 120m
OPVA-2	510.993	7.550.451	200	90-200	Misma habilitación que pozo PCH-26
OPVA-3	510.714	7.549.004	200	120-200	Prof. Nivel en PCH-20 128m
OPVA-4	511.553	7.548.120	200	80-200	Prof. Nivel en PCH-2 81m
OPVA-5	512.127	7.547.963	200	80-200	Prof. Nivel en PCH-2 81m
OPVA-6	518.115	7.545.882	450	170-Por definir	Prof. Nivel en PCH-25 173m
OPVA-7	521.720	7.545.792	450	85-Por definir	Prof. Nivel en P-7 87m

(*) niveles de referencia medidos al año 2024
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6: Pozos actuales y nuevos para el reforzamiento del PVA. En verde se indica los pozos que constituyen la red de monitorea actualizada

Pozo		Estado actual	Estado con proyecto	Ubicación	Este (WGS84)	Norte (WGS84)	Prof. (m)	Habilitación	UH	Justificación
Actual	PCH-10	Seco	Seco	Sector RT	512.492	7.544.939	-	-	-	No aplica
	PCH-11	Seco	Seco	Sector RT	510.471	7.546.949	200	-	-	
	PCH-12	Operativo	Operativo	Sector RT	511.435	7.547.189	200	-	-	
	PCH-13	Operativo	Operativo	Sector RT	511.762	7.546.441	-	-	-	
	PCH-14	Operativo	Operativo	Pampa Cere	518.180	7.546.692	269	107-266(*)	UH-5	
	PCH-15	Operativo	Operativo	Sector RT	512.416	7.545.237	200	41-195 (*)	UH-5	
	PCH-16B	Operativo	Operativo	Pampa Cere	519.386	7.545.860	235	141-231 (*)	UH-5	
	PCH-17B	Sellado	Sellado	Sector RT	516.491	7.547.100	254	121-250 (*)	UH-5	
	PCH-18	Operativo	Operativo	Pampa Cere	519.337	7.545.885	230	119-220 (*)	UH-5	
	PCH-19	Operativo	Operativo	Pampa Cere	517.168	7.543.688	240	133-234 (*)	UH-6a	
	PCH-2	Operativo	Tapado	Aguas Arriba RT	512.154	7.548.585	-	-	-	
	PCH-20	Operativo	Tapado	Aguas Arriba RT	512.914	7.549.070	180	71-178 (*)	UH-5	
	PCH-22	Sellado	Sellado	Sector RT	516.510	7.547.098	225	108-216 (*)	UH-5	
	PCH-23	Operativo	Operativo	Aguas Arriba RT	522.316	7.551.087	192	124-184 (*)	UH-5	
	PCH-24	Operativo	Operativo	Sector RT	513.660	7.546.598	228	166-220	UH-5	
	PCH-25	Operativo	Operativo	Pampa Cere	517.006	7.546.115	237	178-232 (*)	UH-5	
	PCH-26	Operativo	Tapado	Aguas Arriba RT	511.592	7.549.901	180	88-172	UH-5	
	PCH-27	Operativo	Tapado	Aguas Arriba RT	511.271	7.551.673	180	46-172 (*)	UH-5	
	PCH-3	Sellado	Sellado	Sector RT	516.537	7.547.096	-	-	-	
	PCH-4	Obstruido	Obstruido	Sector RT	513.271	7.546.612	-	-	-	
	PCH-5	Tapado	Tapado	Sector RT	514.928	7.547.036	-	-	-	
Nuevos	OPVA-1	Por construir	Operativo	Aguas Arriba RT	511.976	7.553.078	200	120-200	UH-5	Reemplaza pozo PCH-27, por construcción de depósito Botadero Fase 2 y 3
	OPVA-2	Por construir	Operativo	Aguas Arriba RT	510.993	7.550.451	200	90-200	UH-5	Reemplaza pozo PCH-26, por construcción de depósito Botadero Fase 1 y 2
	OPVA-3	Por construir	Operativo	Aguas Arriba RT	510.714	7.549.004	200	120-200	UH-5	Reemplaza pozo PCH-20 por construcción de depósito Botadero Fase 1 y 2
	OPVA-4	Por construir	Operativo	Aguas Arriba RT	511.553	7.548.120	200	80-200	UH-5	Reemplaza pozo PCH-2 por construcción de depósito Botadero Fase 1 y 2
	OPVA-5	Por construir	Operativo	Aguas Arriba RT	512.127	7.547.963	200	80-200	UH-5	Reemplaza PCH-2 por construcción de depósito Botadero Fase 1 y 2
	OPVA-6	Por construir	Operativo	Pampa Cere	518.115	7.545.882	450	170-Por definir	UH-5	Complemento monitoreo pluma límite sur, entre PCH-25 y PCH-18
	OPVA-7	Por construir	Operativo	Pampa Cere	521.720	7.545.792	450	85-Por definir	UH-5	Complemento monitoreo pluma, entre PCAR-8 y P-7
	PIEZO-M-01	Construido	Operativo	Pampa Cere	518.300	7.546.413	230	182-230	UH-5	Complemento monitoreo pluma criba profunda
	PIEZO-M-02	Construido	Operativo	Pampa Cere	518.251	7.546.393	182	172-182	UH-5	Complemento monitoreo pluma criba intermedia
	PIEZO-M-03	Construido	Operativo	Pampa Cere	518.227	7.546.385	172	158-170	UH-5	Complemento monitoreo pluma criba somera
	ORT-03	Construido	Operativo	Pampa Cere	519.339	7.546.156	250	134-248	UH-5	Complemento monitoreo pluma
	ORT-04	Construido	Operativo	Pampa Cere	519.351	7.546.488	200	140-200	UH-5	Complemento monitoreo pluma
	PCAR-1	Construido	Operativo	Pampa Cere	523.995	7.544.399	333	45-303 (*)	UH-5	Complemento monitoreo pluma
	PC-2B	Construido	Operativo	Pampa Cere	524.445	7.542.418	207	48,5-201 (*)	UH-5	Complemento monitoreo pluma
	PCAR-4	Construido	Operativo	Pampa Cere	527.103	7.542.343	138	42-132 (*)	UH-5	Complemento monitoreo pluma
	PCAR-7	Construido	Operativo	Pampa Cere	527.110	7.540.094	100,5	35-98	UH-5	Complemento monitoreo pluma
	PCAR-7C	Construido	Operativo	Pampa Cere	527.121	7.540.098	7,5	1,5-7,5	UH-2	Complemento monitoreo pluma
	PCAR-3	Construido	Operativo	Pampa Cere	526.074	7.542.858	228	50-215 (*)	UH-5	Complemento monitoreo pluma
	POBS-01P	Construido	Operativo	Pampa Cere	524.370	7.541.656	155	48,5-201 (*)	UH-5	Complemento monitoreo pluma

(*) Tramo habilitado no continuo, intercalaciones entre PVC ranurado y ciego
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 5: Robustecimiento y actualización red de monitoreo de PVA

A continuación, en la Tabla 7, se presenta la ficha resumen referente al Plan de Seguimiento Ambiental actualizado.

Tabla 7: Ficha resumen PVA

<table>
<tr><td colspan="2">Plan de Seguimiento Hidrogeológico</td></tr>
<tr><td>Fase del Proyecto</td><td>Operación y Cierre</td></tr>
<tr><td>Sector</td><td>División Radomiro Tomic (DRT)</td></tr>
<tr><td>Componente ambiental</td><td>Hidrogeología</td></tr>
<tr><td>Impacto ambiental y medidas asociada</td><td>No aplica</td></tr>
<tr><td>Ubicación de los puntos de control</td><td>A continuación, se presenta la ubicación de los puntos de monitoreo
<table>
<tr><th>Punto de monitoreo</th><th>WGS 84 Huso 19S UTM Este (m)</th><th>WGS 84 Huso 19S UTM Norte (m)</th></tr>
<tr><td>PCH-23</td><td>522.316</td><td>7.551.087</td></tr>
<tr><td>PCH-14</td><td>518.180</td><td>7.546.692</td></tr>
<tr><td>PCH-16B</td><td>519.386</td><td>7.545.860</td></tr>
<tr><td>PCH-18</td><td>519.337</td><td>7.545.885</td></tr>
<tr><td>PCH-12</td><td>511.435</td><td>7.547.189</td></tr>
<tr><td>PCH-13</td><td>511.762</td><td>7.546.440</td></tr>
<tr><td>PCH-15</td><td>512.416</td><td>7.545.237</td></tr>
<tr><td>PCH-19</td><td>517.168</td><td>7.543.687</td></tr>
<tr><td>PCH-24</td><td>513.660</td><td>7.546.598</td></tr>
<tr><td>PCH-25</td><td>517.006</td><td>7.546.115</td></tr>
<tr><td>OPVA-1</td><td>511.976</td><td>7.553.078</td></tr>
<tr><td>OPVA-2</td><td>510.993</td><td>7.550.451</td></tr>
<tr><td>OPVA-3</td><td>510.714</td><td>7.549.004</td></tr>
<tr><td>OPVA-4</td><td>511.553</td><td>7.548.120</td></tr>
<tr><td>OPVA-5</td><td>512.127</td><td>7.547.963</td></tr>
<tr><td>OPVA-6</td><td>518.115</td><td>7.545.882</td></tr>
<tr><td>OPVA-7</td><td>521.720</td><td>7.545.792</td></tr>
<tr><td>PIEZO-M-01</td><td>518.300</td><td>7.546.413</td></tr>
<tr><td>PIEZO-M-02</td><td>518.251</td><td>7.546.393</td></tr>
<tr><td>PIEZO-M-03</td><td>518.227</td><td>7.546.385</td></tr>
<tr><td>ORT-03</td><td>519.339</td><td>7.546.156</td></tr>
<tr><td>ORT-04</td><td>519.351</td><td>7.546.488</td></tr>
<tr><td>PCAR-7</td><td>527.110</td><td>7.540.094</td></tr>
<tr><td>PCAR-7C</td><td>527.121</td><td>7.540.098</td></tr>
<tr><td>PCAR-1</td><td>523.995</td><td>7.544.399</td></tr>
<tr><td>PC-2B</td><td>524.445</td><td>7.542.418</td></tr>
<tr><td>PCAR-4</td><td>527.103</td><td>7.542.343</td></tr>
<tr><td>PCAR-3</td><td>526.074</td><td>7.542.858</td></tr>
<tr><td>POBS-01P</td><td>524.370</td><td>7.541.656</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

Plan de Seguimiento Hidrogeológico	
Parámetros de control	• Niveles freáticos • Calidad Físico Química de las aguas: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Al, As, B, Br, Ca, Cd, Cl, CO3, Cr, Cu, F-, Fe, HCO3, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, NH4, NO3, Pb, PO4, S2-, Si, SO42-, Zn, Aceites y Grasas, Coliformes Totales, Detergentes, DBO5, DQO, HCT, SDT, SS, ST y Turbiedad. Cabe señalar que para los metales se reporta la fracción total y disuelta. • Calidad Físico Química de las aguas *in situ*: pH, Conductividad Eléctrica (CE) y Alcalinidad • Incorporación de pozos OPVA-1, OPVA-4, PC-2B, PCAR-7 y PCAR-7C al monitoreo isotópico: ^{2}H, ^{18}O y ^{34}S
Límites permitidos o comprometidos	No aplica
Duración y frecuencia del plan de seguimiento	• Duración: Fases de operación y cierre del proyecto (mantendrá sus mediciones hasta el fin del período de cierre) • Frecuencia de monitoreo mensual (niveles y parámetros fisicoquímicos) • Frecuencia de monitoreo isotópico semestral
Método o procedimiento de medición de cada parámetro	Procedimiento estándar ETFA
Plazo y frecuencia de entrega de informes	Se reportará anualmente a la autoridad respectiva
Organismo destinatario de informes	Superintendencia del Medio Ambiente (SMA)
Otros aspectos relevantes	No aplica

Fuente: Elaboración propia

6 RESUMEN DE ACTUALIZACIONES Y REFORZAMIENTO

- Fortalecer el monitoreo vigente, sustituyendo los pozos de monitoreo actuales no operativos (PCH-10, PCH-11, PCH-17B, PCH-22, PCH-3, PCH-4 y PCH-5) por los tres piezómetros ya existentes PIEZO-M-01, PIEZO-M-02 y PIEZO-M-03, ubicados aguas abajo de las obras. Esto con la finalidad de complementar la caracterización y avance de la pluma hacia el sector Pampa Cere.
- Incorporación de los pozos de observación existentes ORT-03 y ORT-4 para complementar el análisis a lo largo del ancho de la pluma sulfatada.
- Construcción de cinco nuevos pozos de monitoreo OPVA-1, OPVA-2, OPVA-3, OPVA-4 y OPVA-5, al norte de las instalaciones RT para reemplazar los pozos de monitoreo actuales PCH-2, PCH-20, PCH-26 y PCH-27, que quedarán soterrados por la ampliación de los depósitos.
- Construcción de dos nuevos pozos de monitoreo OPVA-6 y OPVA-7 también en el sector Pampa Cere, para monitorear el avance de la pluma sulfatada.
- Incorporación de siete pozos ya existentes de la red de monitoreo de la DRT en el sector Pampa Cere, para el complemento del monitoreo aguas arriba, frente de pluma y hacía en el Salar de Cere (PCAR-1, PCAR-3, PCAR-4, PC-2B, POBS-01P, PCAR-7 y PCAR-7C)
- Incorporación de monitoreo y reportabilidad de parámetros *in situ* (en terreno) de pH, CE y Alcalinidad.
- Incorporación de los pozos OPVA-1, OPVA-4 (que sustituyen al PCH-20 y PCH-11), PC-2B, PCAR-7 y PCAR-7C al monitoreo isotópico (^{2}H, ^{18}O y ^{34}S) como complemento.
- En total la actualización y reforzamiento del PVA aumenta el número de pozos de monitoreo operativos de 12 a 29.

Este Memorándum Técnico ha sido preparado para los objetivos acordados con Gerencia de Desarrollo Distrito Norte, Codelco. Es confidencial y se enmarca en las actividades de asesoría del contrato firmado entre las partes.

Flow Hydro Consulting Group
12 de noviembre de 2026