

MEMORANDO TÉCNICO

FECHA 23 de diciembre de 2020

Proyecto N° 1892153220_Rev.1

PARA Hernán Muñoz
SCM Minera Lumina Copper Chile

CC Carlos Descourvieres

DE Felipe Vásquez

E-MAIL fvasquez@golder.com

ANÁLISIS DE FRECUENCIA PARA MEDICIONES EN LÍNEA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

A solicitud de SCM Minera Lumina Copper Chile (MLCC), Golder hace llegar este Memorando Técnico (MT) que presenta de manera preliminar, un análisis de la suficiencia en la frecuencia de medición continua de parámetros de calidad de agua, para los pozos y puntos de muestreo indicados en el Anexo 1.13 “Minuta sistema de reporte en línea de los monitoreos del sistema de control de infiltraciones, aguas subterráneas y superficiales” del Programa de Cumplimiento presentado a la SMA en el marco del proceso sancionatorio Rol D-018-2019.

1.0 ANTECEDENTES

La Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) ha solicitado a MLCC implementar y operar un sistema de reporte en línea con la SMA asociado a las aguas, que considere, entre otros requerimientos, una medición en línea continua de aguas subterráneas y superficiales y que la frecuencia de transmisión se realice en estampas de tiempo de un minuto para todos los parámetros de medición continua.

Como parte del proyecto de monitoreo y reportabilidad en línea, MLCC ha propuesto la medición en forma continua de parámetros representativos de la calidad de agua presente en el lugar, específicamente temperatura (T°), pH y conductividad eléctrica (CE), de forma continua en diferentes pozos y puntos de muestreo ubicados en el área de estudio indicada. La medición se realizará cada una hora y la información será inmediatamente transmitida, con la excepción de los pozos ubicados aguas abajo del depósito de lastre, cuya transmisión se realizará cada 12 horas por requerir optimizar su consumo energético, ya que utiliza paneles solares.

El presente Memorando Técnico analiza los factores que justifican la frecuencia sugerida por MLCC para las mediciones de T°, pH y CE en los pozos propuestos. Para ello se utiliza la metodología que indica la EPA¹ de Estados Unidos para la determinación del intervalo mínimo de muestreo.

¹ US EPA (1988). Statistical analysis of groundwater at RCRA Facilities – Draft Guidance.

2.0 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ANÁLISIS DE FRECUENCIA

La determinación tradicional de las frecuencias óptimas para el muestreo de aguas subterráneas se ha realizado mediante el seguimiento de normativas o a partir de argumentos estadísticos. Las frecuencias de muestreo determinadas por estos métodos enfatizan la necesidad de contar con datos y la eficiente recolección y análisis de muestras.

Un enfoque más razonable es evaluar primero el tipo de fuente que se está monitoreando: un derrame, una fuente intermitente o una fuente continua. Luego, se debe considerar el pulso probable o la continuidad de la pluma de contaminantes que se va a monitorear, determinar la frecuencia mínima de muestreo deseada en términos de longitud a lo largo de la trayectoria del flujo del agua subterránea y usar datos hidrológicos para calcular la frecuencia requerida para satisfacer estos objetivos (Barcelona et al., 1985²).

Así, la frecuencia de muestreo de la calidad del agua depende de los objetivos del programa de muestreo y del cuerpo de agua de interés (PNUMA y OMS, 1996³). Los acuíferos responden lentamente a los cambios de calidad del agua; por lo tanto, recolectar muestras discretas mensualmente o con una frecuencia de muestreo estacional es adecuado.

Específicamente, respecto de la calidad de agua subterránea en la quebrada La Brea, es importante identificar lo siguiente:

- Los materiales presentes en el depósito de relaves están caracterizados desde el punto de vista geoquímico. Esto permite entender y predecir el potencial efecto que podrían tener a futuro, específicamente en términos de cambios en la calidad de agua. Esto ha permitido identificar a los relaves como la potencial fuente de cambio en la calidad de agua subterránea en la quebrada La Brea.
- La calidad de agua de infiltración proveniente del depósito de relaves está caracterizada, basado en los resultados históricos obtenidos para los puntos de muestreo LM-56 y LM-49. Por lo tanto, la fuente potencial de afectación del agua subterránea y sus características está identificada y es de carácter continuo y presenta variaciones lentas en el tiempo, tanto en cantidad como en calidad.
- La calidad de agua subterránea está bien caracterizada, tanto para el período pre-operacional (antes de la puesta en marcha del depósito de relaves), como para el operacional. Esto permite identificar cuáles han sido los efectos medibles desde la entrada en operación del depósito, así como su influencia en la calidad de agua subterránea. Cualquier variación en las fuentes de afectación pueden ser rápidamente identificables en las mediciones de calidad de agua, partiendo por los parámetros medidos en línea (específicamente pH y CE).
- La hidrogeología del sector está también caracterizada, lo que permite identificar las distintas unidades hidrogeológicas presentes en el sector, así como también los parámetros hidráulicos que las caracterizan. Esta información permitiría establecer tiempos de viaje estimado para el agua subterránea del sector.

² Barcelona, M., Gibb, J., Helfrich, J., Garske, E. (1985). Practical guide for ground-water sampling. 104 p.

³ Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Organización Mundial de la Salud (OMS). (1996). Water quality monitoring: A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes. J. Bartram & R. Balance (Eds.). London: CRC Press.

3.0 CALCULO DEL INTERVALO DE TIEMPO MINIMO DE MUESTREO

Independiente de lo indicado anteriormente, esto es, que la determinación de la frecuencia de monitoreo más eficiente depende de los objetivos del muestreo, de las características del acuífero y de la fuente de alteración de la calidad del agua, existe un método establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, para calcular el intervalo de tiempo mínimo entre muestreos que permite asegurar la medición de porciones distintas de agua en el tiempo. Esta se basa en el análisis estimativo de las velocidades lineales promedio del agua subterránea y en el diámetro de habilitación del pozo de monitoreo en la dirección del flujo. Así, para establecer la velocidad lineal del agua se utiliza la siguiente fórmula (EPA 1988)⁴:

$$V_s = (K \cdot i) / n_e$$

Donde,

- V_s = Velocidad del flujo (m/s)
- K = Permeabilidad del medio poroso (m/s)
- i = Gradiente hidráulico representativo (-)
- n_e = Porosidad efectiva (-)

Dependiendo de la data disponible, la porosidad efectiva, puede ser reemplazada por el valor de porosidad drenable (S_y).

Para las quebradas que componen el Proyecto se han ejecutado diversos ensayos que han permitido estimar las diferentes variables hidráulicas que definen la velocidad de infiltración. A modo de resumen⁵, se han establecido tres diferentes unidades hidrogeológicas por donde podría movilizarse el agua subterránea. Los valores estimados que definen el movimiento del agua subterránea y las velocidades calculadas para cada quebrada incluyen:

⁴ US EPA (1988). Statistical analysis of groundwater at RCRA Facilities – Draft Guidance.

⁵ Golder 2019, Anexo 4-B Modelo Hidrogeológico Conceptual Quebrada La Brea

Tabla 1: Propiedades hidráulicas para las quebradas del proyecto Caserones

Quebrada Caserones					
Unidad hidrogeológica	Nombre	Permeabilidad promedio (m/s)	Gradiente hidráulico representativo (%)	Porosidad drenable estimada máxima (%)	Velocidad del flujo (m/s)
Sedimentos no consolidados	UH 1	$4,5 \times 10^{-5}$	10	35	$1,3 \times 10^{-5}$
Roca meteorizada	UH 2	$5,5 \times 10^{-6}$	10	11	$5,0 \times 10^{-6}$
Roca competente	UH 3	$1,0 \times 10^{-6}$	10	1	$1,0 \times 10^{-5}$
Quebrada Ramadillas					
Unidad hidrogeológica	Nombre	Permeabilidad promedio (m/s)	Gradiente hidráulico representativo (%)	Porosidad drenable estimada máxima (%)	Velocidad del flujo (m/s)
Sedimentos no consolidados	UH 1	$8,5 \times 10^{-5}$	4	35	$9,7 \times 10^{-6}$
Roca meteorizada	UH 2	$5,0 \times 10^{-6}$	4	10	$2,0 \times 10^{-6}$
Roca competente	UH 3	$5,1 \times 10^{-8}$	4	1	$2,0 \times 10^{-7}$
Quebrada La Brea					
Unidad hidrogeológica	Nombre	Rango permeabilidad (m/s)	Gradiente hidráulico representativo (%)	Porosidad drenable estimada máxima (%)	Velocidad del flujo (m/s)
Sedimentos no consolidados	UH 1	$8,5 \times 10^{-5}$	3	30	$8,5 \times 10^{-6}$
Roca meteorizada	UH 2	$1,5 \times 10^{-5}$	3	10	$4,6 \times 10^{-6}$
Roca competente	UH 3	$2,0 \times 10^{-6}$	3	1	$6,0 \times 10^{-6}$

Una vez obtenida la velocidad de flujo para cada caso, el análisis del intervalo de tiempo mínimo que demora en pasar el flujo por cada pozo puede ser estimado en base al diámetro del pozo específico, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Intervalo de muestreo mínimo} = d_{\text{pozo}} / V_s$$

Donde,

- V_s = Velocidad del flujo (m/s)
- d_{pozo} = Diámetro del pozo (m)

En base a los datos presentados en la Tabla 1 se calculó la velocidad de flujo promedio para cada unidad en metros por segundo, por minuto, por hora y por día, y en base a distintos diámetros de habitación de pozos según procedimiento EPA el rango del intervalo de muestreo mínimo, expresado en minutos.

Tabla 2: Intervalo de tiempo mínimo de muestreo (en minutos) por unidad hidrogeológica

Quebrada Caserones								
Unidad hidrogeológica	Nombre	Velocidad de infiltración				Intervalo de tiempo mínimo en minutos		
		m/s	m/min	m/hr	m/d	Diámetro de habilitación del pozo: 0,05 m	Diámetro de habilitación del pozo: 0,1 m	Diámetro de habilitación del pozo: 0,15 m
Sedimentos no consolidados	UH 1	$1,3 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-4}$	0,05	1,1	66	131	197
Roca meteorizada	UH 2	$5,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-4}$	0,02	0,4	167	333	500
Roca competente	UH 3	$1,0 \times 10^{-5}$	$6,0 \times 10^{-4}$	0,04	0,9	83	166	249
Quebrada Ramadillas								
Unidad hidrogeológica	Nombre	Velocidad de infiltración				Diámetro de habilitación del pozo: 0,05 m	Diámetro de habilitación del pozo: 0,1 m	Diámetro de habilitación del pozo: 0,15 m
		m/s	m/min	m/hr	m/d			
Sedimentos no consolidados	UH 1	$9,7 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-4}$	0,03	0,8	86	173	259
Roca meteorizada	UH 2	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-4}$	0,01	0,2	413	825	1238
Roca competente	UH 3	$2,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-5}$	0,001	0,02	4.085	8.170	12.255
Quebrada La Brea								
Unidad hidrogeológica	Nombre	Velocidad de infiltración				Diámetro de habilitación del pozo: 0,05 m	Diámetro de habilitación del pozo: 0,1 m	Diámetro de habilitación del pozo: 0,15 m
		m/s	m/min	m/hr	m/d			
Sedimentos no consolidados	UH 1	$8,5 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-4}$	0,03	0,7	98	196	294
Roca meteorizada	UH 2	$4,6 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-4}$	0,02	0,4	182	363	545
Roca competente	UH 3	$6,0 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-4}$	0,02	0,5	138	276	415

4.0 DISCUSIÓN

La literatura sugiere que el intervalo de tiempo mínimo de muestreo está asociado específicamente al tipo de unidad hidrogeológica en la cual se mueva el agua subterránea. La Agencia de Protección Ambiental establece que en general aquellas unidades con conductividades hidráulicas entre $3,5 \times 10^{-2}$ a $3,5 \times 10^{-4}$ m/s debieran ser muestreados de manera diaria, mientras que aquellas unidades con baja conductividad hidráulica (hasta $3,5 \times 10^{-9}$) pueden ser muestreadas a nivel mensual.

En Chile no existe un instructivo específico con respecto a la frecuencia de monitoreos en línea de parámetros fisicoquímicos, más bien se rige por lo que establece cada RCA y sus compromisos. La siguiente tabla presenta ejemplos de compromisos de frecuencia de monitoreo en línea para diversas variables hídricas.

Tabla 3: Compromisos de frecuencia de monitoreo en línea de variables hídricas en Chile

Titular	Proyecto	Documento	Variable monitorizada	Frecuencia de monitoreo
Codelco (Div. Andina)	Adecuación Obras Mineras de Andina para Continuidad Operacional	RCA N°1066/2020	Monitoreo <u>en línea</u> de variables pH, conductividad eléctrica (CE) y caudal del río Blanco en puntos específicos y en la devolución de aguas acondicionadas desde las Plantas HDS al río. Los resultados de dichas mediciones serán visualizados remotamente (Compromiso Monitoreo de calidad de aguas superficiales (CAV-02))	1 medición por hora
Minera Salar Blanco Sociedad Anónima	Salar Blanco	RCA N°94/2020, Plan de Operación Sustentable (Adenda 3)	Programa de monitoreo operacional, considera el <u>control continuo</u> (mediante sensores) de niveles de agua subterránea, caudales extraídos de salmuera y caudales de extracción de agua industrial.	1 medición por hora
Codelco (Div. Andina)	Sistema de Disposición de Relaves a Largo Plazo: Proyecto Embalse Ovejería	Res. Ex N°204/2015 Resuelve proceso 25quinquies	Control de extracciones de pozos de bombeo, con <u>medidores instantáneos</u> y totalizadores de flujo: volumen, caudal medio diario y caudal máximo instantáneo.	1 dato por día

En el caso particular del proyecto Caserones, se debe considerar que, el cálculo teórico presentado en este Memorando se realiza para la velocidad del agua subterránea, por lo que, no necesariamente los compuestos disueltos en ella se moverán a la misma velocidad. En este sentido, se debe considerar efectos químicos como la

adsorción y la precipitación de minerales, además de efectos físicos como la dispersión, por lo cual, es esperable que cualquier tipo de elemento tarde tiempos mayores.

El intervalo de monitoreo se ve específicamente influenciado por la velocidad de infiltración del agua subterránea. Esto implica que, a mayor conductividad hidráulica, mayor es la velocidad de infiltración, y mayor será la frecuencia de muestreo requerida. La Tabla 2 presenta el intervalo promedio mínimo de monitoreo calculado en base a las propiedades hidráulicas de cada una de las unidades hidrogeológicas presentes en el proyecto. Como se indicó anteriormente, estos son los valores mínimos que se pueden dar, dados los datos de velocidad de flujo calculados. Estos valores de infiltración aplican al movimiento del agua y como se mencionó en el párrafo anterior, los efectos fisicoquímicos del acuífero podrían afectar la velocidad de transporte de solutos.

El caso más extremo corresponde a la UH 1, la cual reporta los mayores valores de conductividad hidráulica, traduciéndose en una mayor velocidad de infiltración, que involucra un intervalo de monitoreo menor. El promedio de monitoreo calculado para los pozos de menor diámetro habilitados en esta unidad va desde los 66 minutos. El intervalo de muestreo sugerido por MLCC corresponde a una hora, el cual es superior a la frecuencia sugerida por el cálculo teórico, que en la práctica corresponde al monitoreo del total de agua pasante por cada pozo.

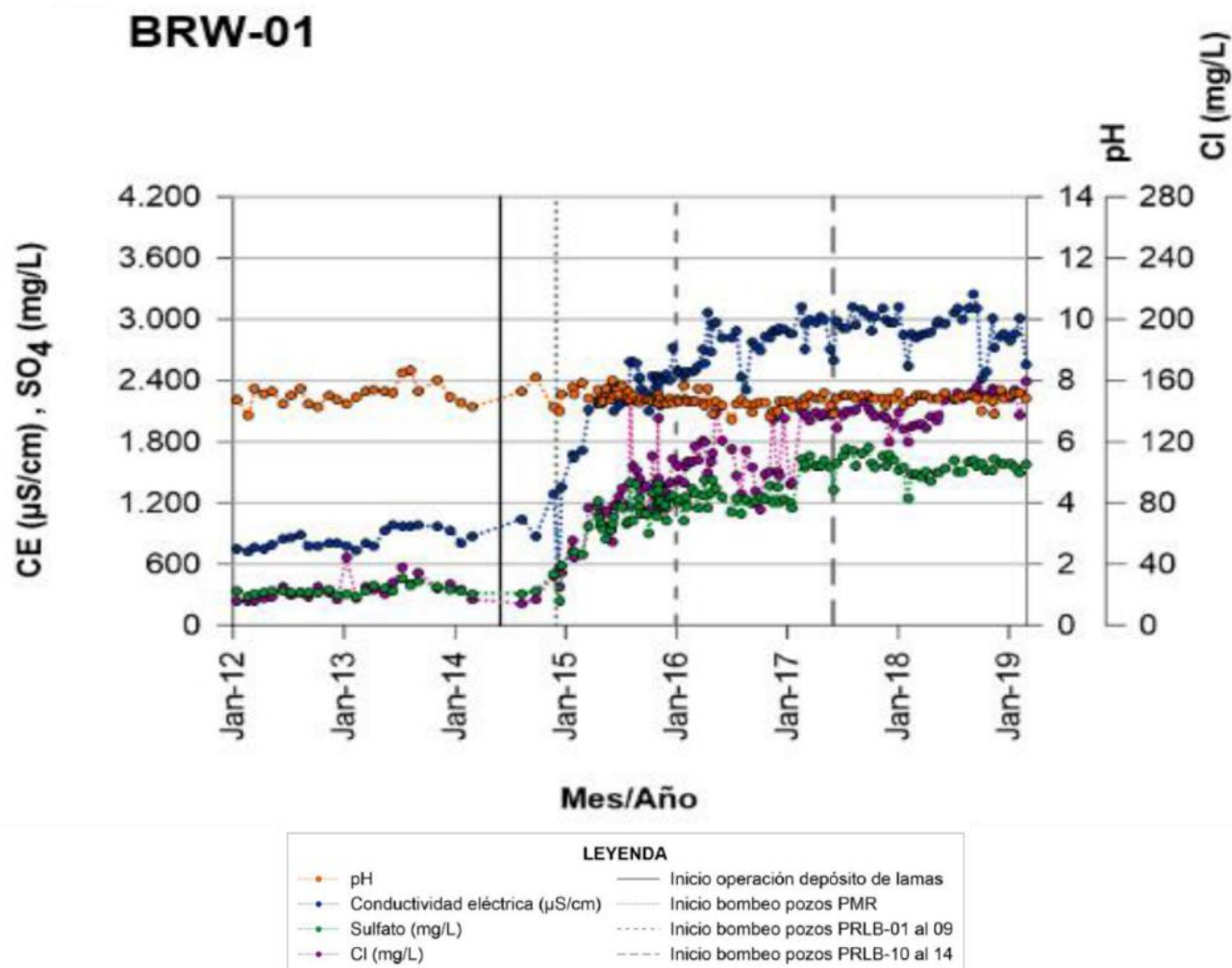
En particular, la velocidad máxima en el agua subterránea corresponde a la UH 1 de la quebrada Caserones, donde el promedio de velocidad indica que el agua se desplaza 5 centímetros por hora. Esto indica que con una frecuencia de muestreo cada una hora, el resultado será representativo del frente que se encuentre a máximo 5 centímetros del pozo monitoreado.

A esta velocidad, una desviación observada en un pozo a una distancia de 1.200 metros de la confluencia con la quebrada Ramadillas, tardaría 2,7 años en llegar a la confluencia.

A modo de ejemplo, la calidad de agua proveniente del depósito de relaves domina la calidad de agua en los pozos aguas abajo de quebrada La Brea. La calidad de agua proveniente del depósito se caracteriza por los valores reportados para el pozo PRLB-10, el cual a inicios del año 2019 exhibía valores de CE promedio de 3.210 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH en torno a 7,4 y concentración de sulfato promedio de 1.723 mg/L.

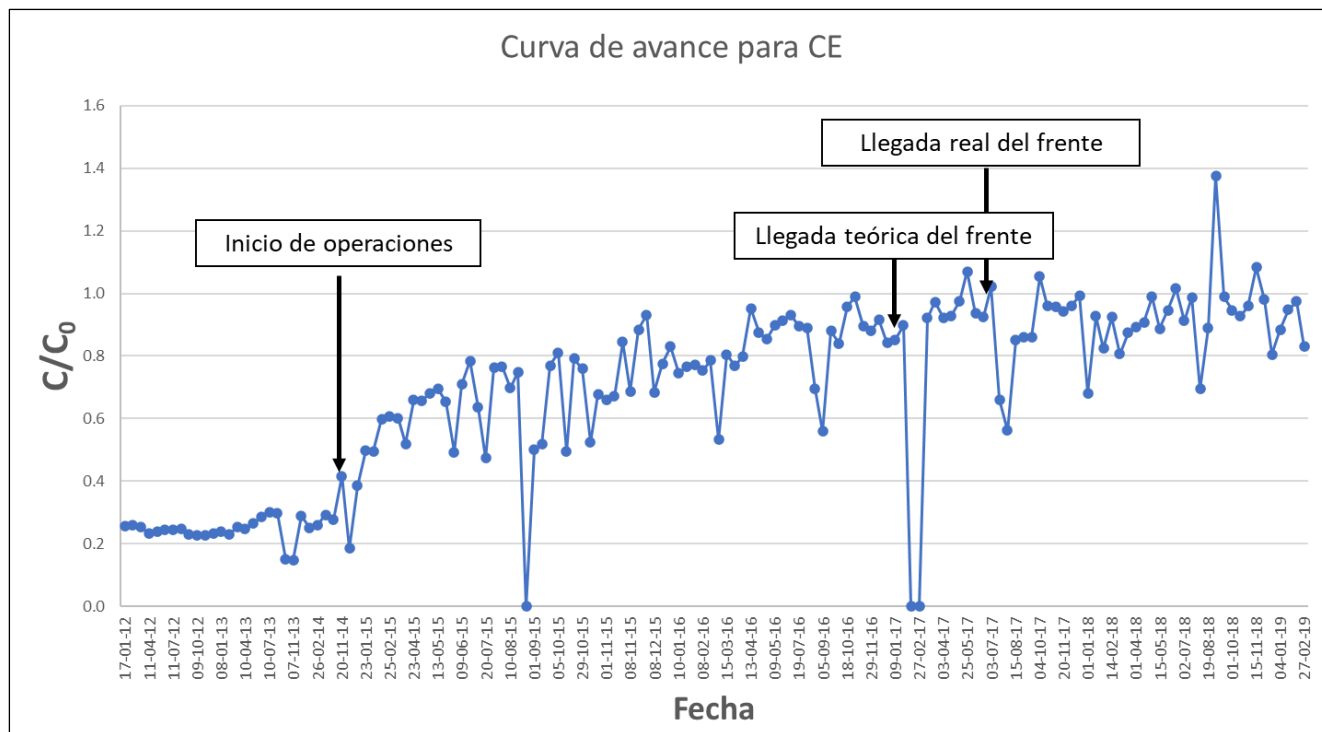
Por su parte, el pozo BRW-01 se encuentra a aproximadamente 1.000 m aguas abajo de la base del depósito de relaves y cuya calidad de agua histórica pre-operacional indicaba valores de CE cercanos a los 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH neutro y concentraciones de sulfato cercano a los 350 mg/L.

La figura a continuación presenta la evolución histórica de la calidad de agua en este punto.



En base a esta figura se puede determinar que, si bien con el inicio de la operación del depósito de lamas en Junio de 2014 comienza a llegar la influencia de este al pozo BRW-01, recién entre los años 2017 y 2018 se puede observar la llegada completa del frente proveniente del depósito. Esto queda confirmado mediante el análisis de la curva de avance de la CE, la que está dada por la razón entre la concentración medida en el BRW-01 (C), y la concentración en el origen (C_0), representada por la CE en el pozo PRLB-10. Cuando esta razón alcanza el valor de 1, se asume que el frente proveniente desde el punto de origen ha alcanzado por completo el punto de medición.

De acuerdo con el cálculo de velocidad de infiltración teórico promedio más veloz, la llegada del frente total al pozo BRW-01 debió haber sido 2,3 años después del inicio de las operaciones, es decir aproximadamente Noviembre de 2016, sin embargo es esperable que procesos químicos o físicos retarden dicho avance, lo cual queda demostrado en la figura a continuación.



5.0 CONCLUSIÓN

A nivel de literatura, la Agencia de Protección Ambiental sugiere un método que se basa en las características hidráulicas del sistema en estudio, sugiriendo intervalos de monitoreo de acuerdo con la unidad hidrogeológica que aloja el acuífero. A nivel nacional, no existe una regulación específica que determine el intervalo óptimo de monitoreo de variables fisicoquímicas en agua subterránea. Es por ello que, este Memorando presenta casos similares en Chile para la medición de variables que incluyen pH y CE, el cual incluye un intervalo de medición horaria.

En base a las características hidráulicas presente en las unidades hidrogeológicas del proyecto, se procedió a calcular el intervalo promedio mínimo de tiempo de muestreo para cada unidad hidrogeológica, el cual está claramente influenciado por la velocidad de flujo y finalmente por la conductividad hidráulica del medio. El rango con los valores de frecuencia medición más alta aplica a la UH 1, para la cual se estima un intervalo que va entre los 66 y 98 minutos (dependiendo de la quebrada), por lo que la medición cada una hora se considera adecuada y sobre la frecuencia máxima, teniendo en cuenta que este cálculo se realiza considerando la velocidad de agua subterránea y no necesariamente los compuestos disueltos en ella se movilizarán a la misma velocidad dados los efectos fisicoquímicos que presentan. El análisis teórico realizado, basado en datos promedios y estimados para las condiciones del proyecto Caserones, establecen que la velocidad de infiltración teórica calculada se ajusta de buena manera a los resultados reales obtenidos a partir de los análisis de calidad de agua en la quebrada. Incluso el análisis teórico es conservador, es decir sugiere tiempos más rápidos de avance con respecto a los tiempos reales de avance del frente por la quebrada.

Es por ello que, basado en información sugerida internacionalmente por la Agencia de Protección Ambiental, los ejemplos presentados para la realidad nacional, el análisis realizado para las condiciones del proyecto y el ejemplo teórico-práctico bajo condiciones reales en la quebrada La Brea, **el intervalo sugerido de muestreo de cada una hora parece más que razonable para el correcto monitoreo de las aguas subterráneas del proyecto y permitirá capturar cualquier cambio que pueda observarse en la calidad de agua.**

6.0 CIERRE

Esperamos esta información sea de utilidad a MLCC. Por favor no duden en comunicarse con Golder si se requiere información adicional.

Felipe Vásquez
Geoquímico Senior

Carlos Descourvieres
Revisor Senior, Asociado

FV/CD/rg

c:\users\fvvasquez\documents\respaldo\projects\proyectos chile\caserones\la brea\mt_frecuencia de transmisión_rev1.docx