Análisis del desempeño de la obturación

Túnel Marcelo, Proyecto Pascua-Lama

Alejandro Verri Kozlowski

Fermín Garate

Camilo De Los Hoyos

# Calidad de Aguas

## Alcance y objetivos

Esta sección se enfoca en el análisis de los datos disponibles de calidad del agua obtenidos en estaciones de monitoreo de agua superficial y subterránea aguas arriba y aguas abajo de la obturación. El objetivo de esta etapa consiste en evaluar el desempeño en términos de su impacto en los parámetros de calidad de agua aguas arriba y aguas abajo de la obturación, y poder correlacionar los desvíos respecto de la línea base con eventos climáticos, operacionales o de mantenimiento de la obturación.

Para la evaluación de la calidad del agua, el presente documento incorpora el concepto de carga de soluto, expresada en Kg/h en este documento, la cual resulta de la multiplicación del caudal por la concentración del soluto, con la muestra de agua tomada el mismo día en que se midió el caudal. En comparación con la evaluación de solo las concentraciones, la carga de soluto permite evaluar con mayor claridad la contribución de determinado soluto por parte de cada curso de agua.

## Sistema de conducción de agua en Lama

Al momento de observar y evaluar los registros de monitoreo de algunas estaciones de aforo en Lama, es importante tener en cuenta que algunos cursos de agua en los sistemas Canito y Turbio fueron afectados por desvíos relacionados a obras de manejo de agua, lo cual se vio reflejado en su registro de monitoreo. Las modificaciones de los cursos de agua en las cuencas de Canito y Turbio comenzaron en enero de 2014 y estuvieron vigentes hasta noviembre de 2020. Un resumen de la configuración de los sistemas de conducción de agua en las cuencas de Canito y Turbio, antes y después de noviembre/diciembre de 2020, puede encontrarse en el informe del IDIH (2024)[[1]](#footnote-2), el cual sintetiza los resultados del monitoreo de calidad de agua en el proyecto Lama desde enero de 2012 hasta diciembre de 2023. Los siguientes son extractos del informe del IDIH (2024) que resumen las configuraciones de los sistemas de conducción de agua.

El siguiente texto son extractos del informe de monitoreo IDIH XXX, para las configuraciones previas y posteriores a noviembre de 2020. El esquema citado como “Figura 1” y “Figura 2” por IDIH (2024) se muestra aquí como XXXX.

### Texto extraído del informe del IDIH (2024)

*Las aguas del arroyo Canito Sur se monitorean en la estación CA-1 que es un punto crítico de control establecido para monitorear la calidad de las aguas en el ingreso al área de la mina LAMA, y que está ubicada en la parte alta de la cuenca aguas arriba de la estación LA-3. En el arroyo Canito Norte se desvía parte de las aguas por el Canal de Descarga 2 (CD2) y continúa como Tubería de Desvío 1 (TD1), hacia el arroyo Turbio. El agua superficial del arroyo Canito se monitorea en la estación LA-3, y continua por el Canal de Desvío 4 (CD4), acorde al proyecto de Obras de Desvío presentado y aprobado por las autoridades competentes. Este canal se encuentra con las aguas subterráneas del Dique de Colas (estación de monitoreo UD) y ambos desembocan en el antiguo cauce del Río Turbio, donde son monitoreados en el punto LA-8, antes de la confluencia con el Río Las Taguas. Ver Figura 1.*

*La cuenca del río Turbio se monitorea en la parte alta en la estación LA-1a, las aguas superficiales son entubadas en la Tubería de Desvío 2 (TD2) que recibe en su recorrido las aguas tratadas del túnel, las aguas del sub dren de la planta de proceso y parte de las aguas del arroyo Canito transportadas por el TD1, y a partir de allí comienza la Tubería de Desvío 3 (TD3) cuyas aguas se monitorean en la estación LA-8a, antes de la confluencia con el río de Las Taguas. Ver Figura 1.*

*A partir de diciembre de 2020, el sistema de manejo de aguas de la cuenca del río Turbio se modificó nuevamente, como muestra la Figura 2, donde las aguas del arroyo Turbio y Canito se unen nuevamente y las aguas superficiales de la cuenca del río Turbio se monitorean en la estación LA-8, y se deja de monitorear la estación LA-8a.*

Diagrama

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑1: Figura 1 y Figura 2 en el informe del IDIH (2024)

### Suspensión del agregado de cal y by-pass

Cabe destacar que, siguiendo con la Cédula correspondiente al Expediente 1100 5074-B-12 que La Autoridad emitió a BEASA,

## Fechas relevantes para el registro del monitoreo de calidad de agua

## Estaciones de monitoreo seleccionadas

### Sector del túnel

### Sector de la desembocadura al río de Las Taguas

### Sector del río de Las Taguas

## Análisis de Caudales

### Sector del túnel

Las series temporales de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑2.

Una captura de pantalla de una computadora

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑2: series temporales de caudales en las estaciones del sector del túnel. El campo verde indica túnel abierto y el campo celeste túnel cerrado.

### Sector de la desembocadura al río de Las Taguas

La serie temporal de la estación LA-8 se muestra en la Figura 4‑3.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑3: serie temporal de caudal en el sector de la desembocadura al río de Las Taguas. El campo verde indica túnel abierto y el campo celeste túnel cerrado.

### Sector del río de Las Taguas

Las series temporales de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑4.

Captura de pantalla de computadora

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑4: series temporales de caudales en las estaciones del sector del río de Las Taguas. El campo verde indica túnel abierto y el campo celeste túnel cerrado.

## Sulfato

### Sector del túnel

Las series temporales para concentración de sulfato de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑5, mientras que las correspondientes a la carga de sulfato se muestran en la Figura 4‑6.

La concentración de sulfato en LA-1A decreció desde aproximadamente marzo de 2013, posiblemente debido a la mayor influencia de los deshielos hacia este curso durante caudal bajo (túnel abierto), aunque con menor frecuencia de medición. En general, las concentraciones bajas coinciden con caudales altos. **La concentración en este punto aumentó a tasa relativamente alta desde el cierre de las válvulas en enero de 2018 y luego la tendencia se hizo más suave, con valores fluctuantes mayormente entre 2400 y 4000 mg/L.**

Las concentraciones de sulfato en TUN-1 fueron más bajas que en MAR-1 debido a la siguiente reacción de neutralización simplificada durante el tratamiento del agua naturalmente sulfatada con cal apagada (el sulfato precipitando en la especie yeso):

H2SO4 (ac) + Ca(OH)2 (ac) → CaSO4 (s) + 2H2O(l)

**Luego del cierre de las válvulas del tapón del túnel, la tendencia fue similar a la de LA-1A, estabilizándose en valores de ~1800-2800 mg/L.**

Al observar las cargas de sulfato registradas en las tres estaciones, las diferencias son más claras marcadas. En LA-1A, la carga de sulfato fue disminuyendo durante la etapa de túnel abierto debido a una disminución del caudal por efecto drenante del túnel. **Luego del cierre de las válvulas, hubo un aumento marcado por recuperación del caudal y posiblemente por redisolución del yeso que había precipitado en los bancos durante caudal bajo**^[Al ser el agua de signatura hidroquímica fuertemente sulfatada-cálcica, se observó precipitación de yeso en los bancos del arroyo durante el periodo de caudal bajo (2011-2013). El agua del arroyo Turbio y del acuífero del macizo rocoso es naturalmente ácida (pH ~3) y carga alta de sulfato y metales tales como aluminio, hierro, manganeso, cobre, níquel y zinc, entre otros.] **, para luego mostrar una tendencia decreciente hasta valores de ~380-550 kg/h. En MAR-1, actualmente la única estación donde se monitorea la calidad del agua en la zona del portal del túnel, la carga de sulfato se estabilizó en valores mínimos entre 20 y 54 kg/h**.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑5: series temporales de concentración de sulfato en el sector del túnel. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente con confianza media

Figura 4‑6: series temporales de carga de sulfato en el sector del túnel. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

### Sector de la desembocadura al río de Las Taguas

La serie temporal para concentración de sulfato en LA-8 se muestra en la Figura 4‑7, mientras que la correspondiente a la carga de sulfato se muestra en la Figura 4‑8.

El periodo en que las cuencas de Canito y Turbio estuvieron desconectadas está marcado por una fuerte baja en la concentración de sulfato (fuerte influencia del arroyo Canito, más diluido en sulfato). La influencia del cierre de las válvulas del tapón del túnel no se nota en esta serie temporal, como sí ocurre desde que ambas cuencas volvieron a conectarse y la concentración de sulfato aumentó nuevamente a valores más comparables al periodo previo a las obras de desvío.

La serie temporal de carga de sulfato muestra una tendencia decreciente previo a los desvíos, una estabilización a valores en torno a ~300 kg/h durante el periodo de ambas cuencas desconectadas y una tendencia creciente con el aporte del agua del arroyo Turbio desde la reconexión de ambas cuencas, hasta valores generalmente entre 700 y 1300 kg/h.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑7: serie temporal de concentración de sulfato en LA-8, previo a la desembocadura en el río de Las Taguas.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑8: serie temporal de la carga de sulfato en LA-8, previo a la desembocadura en el río de Las Taguas.

### Sector del río de Las Taguas

Las series temporales para concentración de sulfato de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑9, mientras que las correspondientes a la carga de sulfato se muestran en la Figura 4‑10.

Las estaciones SW-9 y LA-16 muestran series temporales de sulfato similares, con una mayor frecuencia de medición en LA-16, ya que es el punto de cumplimiento. Las concentraciones de sulfato fueron muy variables durante el periodo de túnel abierto, con periodos de concentración baja coincidentes con eventos de caudal alto. Luego del cierre de las válvulas del tapón del túnel, disminuyó la frecuencia de medición aunque las concentraciones continuaron con alta variabilidad relacionadas en general a variabilidad de caudales. No se observa claramente una tendencia creciente o decreciente luego del cierre del túnel.

En cuanto a la carga de solutos, las series temporales de ambas estaciones muestran un aumento durante el periodo de túnel abierto, con una tendencia decreciente luego del cierre de las válvulas y levemente más marcada luego del cese de agregado de cal apagada. Desde aproximadamente enero de 2021, los valores de carga de sulfato son variables aunque en torno a los previos a la apertura del túnel.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑9: serie temporal de concentración de sulfato en el sector del río de Las Taguas.

Interfaz de usuario gráfica, Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑10: serie temporal de la carga de sulfato en el sector del río de Las Taguas.

## pH

### Sector del túnel

Las series temporales para el monitoreo de pH de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑11.

Durante la etapa de túnel abierto, el pH registrado en la estación TUN-1 fue muy variable de acuerdo con el ritmo de adición de cal apagada, aunque en general por encima de un valor de 5. En el caso del arroyo Turbio (**LA-1A**), el valor más frecuente estuvo entre 3 y 3,5, **estabilizándose a un valor más cercano a 3 luego del cierre de las válvulas del tapón, posiblemente debido a un aumento del caudal y menor impacto de los deshielos en este parámetro**. En general, el pH en el portal del túnel (MAR-1) estuvo y se mantiene ligeramente por encima del pH del arroyo Turbio, posiblemente debido a una cierta neutralización por el cemento utilizado en el revestimiento del túnel o un mayor impacto de dilución debida a deshielos.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑11: series temporales de pH en el sector del túnel. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

### Sector de la desembocadura al río de Las Taguas

La serie temporal de pH en la estación de monitoreo LA-8 se muestra en la Figura 4‑12.

El pH fue variable, pero en valores relativamente altos (en torno a ~4) durante parte del periodo de túnel abierto y todo el periodo de ambas cuencas desconectadas. **Se observa una disminución muy leve del pH luego del cierre del túnel y en especial de abril de 2019 (cese de agregado de cal en el portal del túnel) y una disminución marcada luego de la reconexión de ambas cuencas, hacia valores en torno a 3,4, más cercanos a los valores del arroyo Turbio**.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑12: serie temporal de pH en el sector de la desembocadura al río de Las Taguas. Se indica el periodo en que ambas cuencas estuvieron desconectadas por obras de desvío.

### Sector del río de Las Taguas

La serie temporal de pH en las estaciones que representan el sector del río de Las Taguas para el proyecto Lama se muestran en la Figura 4‑13.

El pH en SW-9 y LA-16 se presentó ampliamente variable a lo largo de todo el registro (mayormente ~4,5-8,5), con una mayor frecuencia de medición durante el periodo de túnel abierto. **La tendencia de los valores de pH fue levemente decreciente luego del cierre de las válvulas y luego del cese de adición de cal apagada, aunque aún dentro del rango de valores registrados previamente a la excavación del túnel y aún durante el periodo de túnel abierto**.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑13: serie temporal de pH en el sector del río de Las Taguas. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

## Aluminio

### Sector del túnel

Las series temporales para concentración de aluminio de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑15, mientras que las correspondientes a la carga de aluminio se muestran en la Figura 4‑14.

La serie temporal de concentración de LA-1A muestra concentraciones muy variables (~100-450 mg/L) previamente a la apertura del túnel, con un rango similar aunque con menor frecuencia de medición durante el periodo de túnel abierto, posiblemente debido al congelamiento de su cauce reducido por efecto drenante del túnel. **Luego del cierre de las válvulas, se observa una tendencia creciente fuerte, la cual permanece en aumento pero con pendiente más suave desde aproximadamente abril de 2019**. Las tendencias de la concentración de aluminio en MAR-1 y TUN-1 muestran una mejor definición de dicha variabilidad (mayor frecuencia de medición). **La tendencia en MAR-1 es también creciente luego del cierre del túnel aunque con contenidos menores, sugiriendo que la mayor fuente de aluminio en el sector es el arroyo Turbio más que el macizo rocoso (lo mismo para el sulfato)**.

**Las series temporales de la carga de aluminio muestran una tendencia estable luego del cierre del túnel tanto para LA-1A, a pesar de que su caudal se mostró con tendencia decreciente en este periodo, como para MAR-1, con caudales residuales bajos (hoy en el orden de 5 L/s)**.

Interfaz de usuario gráfica, Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑14: series temporales de la concentración de aluminio en las estaciones de monitoreo del sector del túnel. Se indica el periodo de adición de cal en el portal del túnel.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑15: series temporales de la carga de aluminio en las estaciones de monitoreo del sector del túnel. Se indica el periodo de adición de cal en el portal del túnel.

### Sector de la desembocadura al río de Las Taguas

La serie temporal para concentración de aluminio en LA-8 se muestra en la Figura 4‑16, mientras que la correspondiente a la carga de aluminio se muestra en la Figura 4‑17.

De forma similar a la del sulfato (Figura 4‑7 y Figura 4‑8), las series temporales de concentración y carga de aluminio decrecen, se estabilizan en valores bajos en el periodo en que LA-8 registraba calidad de agua principalmente de la cuenca de Canito, **y muestran una tendencia de aumento luego de la reconexión entre ambas cuencas. La influencia del cierre del túnel y del cese de adición de cal es de mucha menor relevancia para este parámetro.**

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑16: serie temporal de la concentración de aluminio en el sector de la desembocadura al río de Las Taguas (LA-8). Se indica el periodo en que las cuencas de Canito y Turbio estuvieron desconectadas.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑17: serie temporal de la carga de aluminio en el sector de la desembocadura al río de Las Taguas (LA-8). Se indica el periodo en que las cuencas de Canito y Turbio estuvieron desconectadas.

### Sector del río de Las Taguas

Las series temporales para concentración de aluminio de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑18, mientras que las correspondientes a la carga de aluminio se muestran en la Figura 4‑19.

Las series temporales muestran una evolución similar en las estaciones SW-9 y LA-16, tanto en concentración como en carga de soluto. La concentración de aluminio es ampliamente variable y presenta una tendencia generalmente ascendente a lo largo del registro en ambas estaciones, con valores relativamente altos durante la etapa de túnel abierto. **La tendencia se observa ascendente, desde valores bajos, luego del cierre de las válvulas, con concentraciones aún dentro del rango de la etapa de túnel abierto aunque con amplia variabilidad**.

Los picos en carga de aluminio coinciden aproximadamente con picos en el caudal registrado en la boca del túnel cuando se encontraba abierto. **La tendencia de la carga de aluminio se estabiliza luego del cierre de las válvulas, aunque con mediciones puntuales por encima de la tendencia general**.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑18: serie temporal de la concentración de aluminio en el sector del río de Las Taguas. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

Interfaz de usuario gráfica, Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑19: serie temporal de la carga de aluminio en el sector del río de Las Taguas. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

## Hierro

### Sector del túnel

Las series temporales para concentración de hierro de las estaciones de este sector se muestran en la Figura 4‑20, mientras que las correspondientes a la carga de hierro se muestran en la Figura 4‑21.

La concentración de hierro fue variable en LA-1A (~200-500 mg/L), con mediciones más espaciadas aproximadamente entre febrero de 2014 y diciembre de 2017. **A partir del cierre de las válvulas del tapón del túnel, se observa una tendencia creciente fuerte aproximadamente hasta septiembre de 2018 y luego una tendencia más suave aunque aún creciente**. **Las concentraciones de hierro registradas en MAR-1 y TUN-1 fueron variables aunque relativamente altas en la etapa de túnel abierto, disminuyeron con el cierre del túnel (~30-60 mg/L) y luego mostraron un aumento al principio empinado que evolucionó a una tendencia levemente ascendente en torno a concentraciones entre ~200 y 380 mg/L**.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑20: serie temporal de concentración de hierro en el sector de influencia del túnel.

Interfaz de usuario gráfica, Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑21: serie temporal de carga de hierro en el sector de influencia del túnel.

### Sector de la desembocadura al río de Las Taguas

La serie temporal para concentración de hierro en LA-8 se muestra en la Figura 4‑22, mientras que la correspondiente a la carga de hierro se muestra en la Figura 4‑23.

La concentración de hierro se observa en un rango amplio (~20-100 mg/L) pero de tendencia estable previamente a la desconexión de las cuencas de Canito y Turbio y desciende a valores muy bajos (en torno a 5mg/L) en el periodo en que ambas cuencas estuvieron desconectadas. **Luego de la reconexión entre ambas cuencas, los valores de concentración se recuperaron aunque la tendencia que se mantiene hasta la actualidad es ascendente**. **La serie temporal de carga de hierro muestra también una tendencia ascendente luego de la reconexión entre ambas cuencas**.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑22: serie temporal de la concentración de hierro en el sector de la desembocadura al río de Las Taguas (LA-8). Se indica el periodo en que las cuencas de Canito y Turbio estuvieron desconectadas.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑23: serie temporal de la carga de hierro en el sector de la desembocadura al río de Las Taguas (LA-8). Se indica el periodo en que las cuencas de Canito y Turbio estuvieron desconectadas.

### Sector del río de Las Taguas

Las series temporales para concentración de hierro de las estaciones del sector del río de Las Taguas se muestran en la Figura 4‑24, mientras que las correspondientes a la carga de aluminio se muestran en la Figura 4‑25.

Las concentraciones de hierro medidas en ambas estaciones durante el periodo de túnel abierto se presentan en un rango amplio, aunque con una mayor frecuencia de valores relativamente altos en comparación con la etapa previa al túnel. Luego del cierre de las válvulas, se observa una disminución general de las concentraciones de hierro y la tendencia parece ser estable, aunque el rango de valores medidos aún es amplio.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑24: serie temporal de la concentración de hierro en el sector del río de Las Taguas. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Figura 4‑25: serie temporal de la carga de hierro en el sector del río de Las Taguas. Se indica el periodo de agregado de cal apagada en el portal del túnel.

## Comentarios finales

VER TEXTO SEPARADO

1. Instituto de Investigaciones Hidráulicas (IDIH), 2024. Informe Resumen de Cantidad y Calidad de Aguas Correspondiente al Periodo Años 2012 al 2023, Proyecto Pascua-Lama. Agosto de 2024. [↑](#footnote-ref-2)