

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODELO CONCEPTUAL DEL EFECTO DE PROPIEDADES DEL MEDIO POROSO  
EN LA VELOCIDAD DEL TRANSPORTE DE COMPUESTOS INERTES. APLICACIÓN  
A LA CUENCA DEL ESTERO YERBA LOCA**

**MA. IGNACIA MARTÍNEZ CUEVAS<sup>1</sup>**  
**ALDO IGNACIO MUÑOZ SEPÚLVEDA<sup>2</sup>**  
**SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI<sup>3</sup>**  
**YARKO NIÑO CAMPOS<sup>4</sup>**

**RESUMEN**

En el presente trabajo se presenta un modelo conceptual simplificado de la zona de generación de aguas ácidas del Estero Yerba Loca, que tiene como objetivo estimar velocidades de transporte de componentes en el subsuelo de la zona de estudio. Esto mediante la resolución de un modelo numérico capaz de resolver el transporte de especies en lechos porosos no saturados.

Los resultados obtenidos sugieren que tanto la textura del lecho poroso como las magnitudes de derretimiento pueden explicar cambios de velocidad de transporte de componentes en órdenes de magnitud. Además, la interacción de los fluidos con el fondo del lecho poroso, a su vez, incrementa las velocidades en ese rango. Las magnitudes obtenidas de estas velocidades son compatibles con que la variabilidad mensual de pH en el sector de estudio sea explicada por la variabilidad de caudales de derretimiento de nieves o glaciares, las que podrían mezclarse con aguas ácidas generadas en una interacción más prolongada con las rocas presentes en el suelo.

---

<sup>1</sup>Memorista, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: marimartinez@ug.uchile.cl

<sup>2</sup>Ingeniero de Investigación y desarrollo, Advanced Mining Technology Center AMTC, Universidad de Chile; Tesista Doctorado en Fluidodinámica, Universidad de Chile - email: aldo.munoz@amtc.uchile.cl

<sup>3</sup>Investigador Asociado Advanced Mining Technology Center AMTC, Universidad de Chile - email: santia-go.montserrat@amtc.cl

<sup>4</sup>Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile - ynino@uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Los minerales sulfurados representan una proporción relevante de las rocas constitutivas de depósitos minerales de interés económico (Lottermoser, 2010). Tanto la actividad minera como la meteorización pueden exponer tales rocas a ambientes con presencia de oxígeno, agua y/o microorganismos, generando efluentes que están caracterizadas por un bajo pH y altas concentraciones de metales (Parbhakar-Fox & Lottermoser, 2015). Estos efluentes se denominan como Drenaje Ácido de Roca (ARD por *Acid Rock Drainage*) o Drenaje Ácido de Mina (AMD por *Acid Mine Drainage*), si la exposición de la roca es natural o mediada por actividad antrópica. Los procesos físico-químicos presentes en la generación de aguas ácidas son motivo de estudio por causas medioambientales, ya que su presencia aumenta la movilidad de metales pesados (Dold, 2017), pudiendo deteriorar la calidad de agua de recursos hídricos.

Mediante el monitoreo de pH en el sector de la estación DGA Mapocho en los Almendros (Ver Figura 1) el grupo de Agua y Sustentabilidad Ambiental del Advanced Mining Technology Center (AMTC) ha evidenciado el efecto del ARD en esta fuente de agua. En particular, se ha observado una disminución estacional de pH en los periodos de deshielos explicado por el aumento de los caudales en el Estero Yerba Loca, cuenca que se caracteriza por presentar drenaje ácido de forma natural (Valenzuela-Díaz et al., 2020; Correa-Burrows et al., 2021; Zegers et al., 2021). En un contexto en que las proyecciones de cambio climático indican un progresivo aumento de temperaturas, años con menor precipitación promedio y aumento de la intensidad de los eventos extremos, cabe preguntarse cómo esta situación impacta en el proceso de generación de ARD en la cuenca del Estero Yerba Loca y, tentativamente, su impacto en la calidad de agua que llega a Santiago.

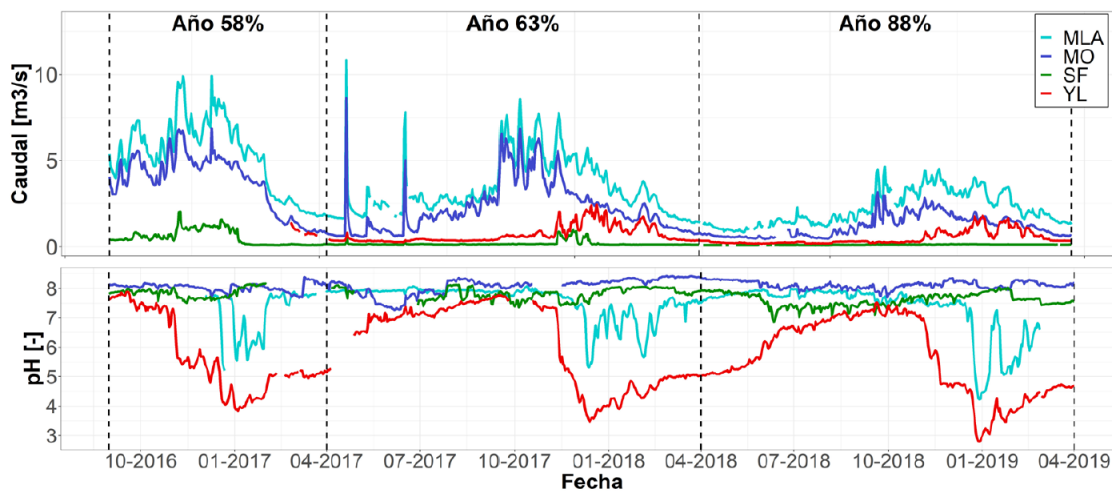


Figura 1: Panel superior indica caudales medios diarios medidos en estaciones DGA en el periodo 2016-2019 a la salida de las subcuencas: Mapocho en los Almendros (MLA), Río Molina (MO), Río San Francisco (SF) y Estero Yerba Loca (YL). Panel inferior indica valores de pH medios diarios, obtenidos de los registros continuos de las sondas instaladas por AMTC, en el mismo lugar de ubicación de las estaciones DGA y durante el mismo periodo. En la parte superior de la figura, se indica la probabilidad de excedencia asociada a cada año hidrológico. Fuente: Montserrat et al. (2021).

Para proyectar la generación y el transporte de aguas ácidas en un entorno natural, las principales herramientas son los modelos numéricos con base fenomenológica (Charte et al., 2015). Una modelación adecuada del fenómeno debería incorporar información hidrológica, hidrogeológica, geotécnica, metalúrgica, geoquímica, entre otras, integrándolas y resolviendo la dinámica del sistema, con tal de estudiar los efectos de los posibles ciclos de retroalimentación de los procesos (Maest et al., 2005). La construcción de estos modelos requieren un proceso inicial de estimación de escalas temporales y el análisis del efecto que tienen diversos componentes del sistema natural, con el objetivo de priorizar aspectos de recolección de información y/o evaluar la pertinencia de adoptar supuestos para simplificar el análisis.

De esta manera, en el presente trabajo se presenta un modelo conceptual simplificado de la zona de generación del Estero Yerba Loca y se resuelve un modelo numérico con el objetivo de analizar como parámetros del medio poroso afectan las estimaciones de los tiempos de tránsito de las especies disueltas en la subsuperficie considerándolas inertes.

Este trabajo se subdivide de la siguiente manera: en la Sección 2 se presentan las características físicas principales que se pueden encontrar en la zona de estudio, en la Sección 3 se presenta la conceptualización del sistema en estudio para su modelación, se describen las ecuaciones gobernantes consideradas y los escenarios simulados, en la Sección 4 se presentan los principales resultados de las simulaciones, en la Sección 5 se discuten los valores obtenidos y, finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones del estudio.

## **2. ZONA DE ESTUDIO**

La zona de estudio considerada es el sector alto del Estero Yerba Loca. Ésta se ubica al noreste de la ciudad de Santiago de Chile, dentro de la comuna de Lo Barnechea. Las elevaciones del lugar varían entre 3000 msnm - 5300 msnm aproximadamente, mientras que la pendiente media es de alrededor de 31,4 %.

Esta zona posee glaciares de montaña, de valle, rocosos y glaciaretos. Los glaciares que se encuentran cercanos al estero son: Glaciar del Rincón, Glaciar Paloma Oeste, Glaciar Paloma Este, Glaciar Altar Sur, Glaciar 58 y Glaciar Littoria. Según Casassa et al. (2015), los glaciares tienen una influencia significativa en el aporte hídrico del Estero Yerba Loca. En el caso del glaciar Paloma Este, la estimación de aporte hídrico anual medio entre los años 2014 y 2015 es de 0,263 L/s/ha (Casassa et al., 2015), por lo que se caracteriza como el glaciar con mayor relevancia de aportación hídrica en la zona. En la Figura 2 se muestra los glaciares ubicados en la zona alta del Estero Yerba Loca junto con la red hidrográfica.

Las unidades geológicas del sector son principalmente rocas estratigráficas (Formación Farellones), depósitos no consolidados y rocas intrusivas (Jaime Illanes & Asociados, 2019a). El contacto Primario-Secundario, superficie donde deja de tener efecto los procesos secundarios - lixiviación y oxidación de los sulfuros - y solo se producen los efectos primarios de mineralización, se ubica en promedio a profundidades menores a los 100 metros (Hídrica Consultores, 2019).

Con respecto al suelo de la zona de estudio, en el informe técnico de Jaime Illanes & Asociados

(2019b) se menciona una alta pedregosidad y texturas que varían entre franco-limosas a franco-arenosas. Además, existe una baja presencia de partículas de arcillas.

La zona de estudio presenta un sistema de rocas hidrotermales alteradas en la superficie que causa un ARD. Esto ocurre debido al contacto de fluidos ácidos a través de las rocas que contienen minerales sulfurosos (Zegers et al., 2021). En la Figura 2 con color amarillo se muestran las zonas con alteración hidrotermal.

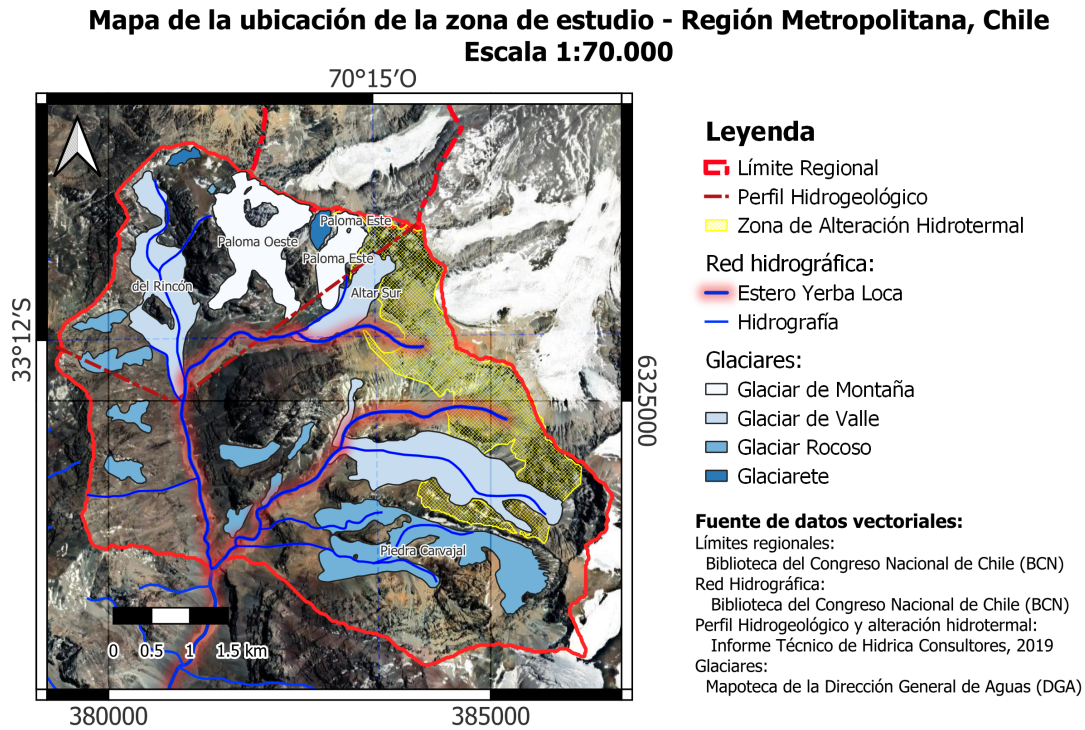


Figura 2: Mapa de la ubicación de la zona de estudio junto a los glaciares cercanos al Estero Yerba Loca y las zonas con alteración hidrotermal. El Estero Yerba Loca se representa mediante la línea azul resaltada en rojo.

### 3. MODELACIÓN

A partir de los antecedentes de la zona de estudio, el dominio de simulación se simplifica considerando como se esquematiza en la Figura 3. En ella se considera la subsuperficie como un medio poroso que puede estar saturado o no-saturado. Para su simulación, se adoptaron las ecuaciones gobernantes discutidas en la Sección 3.1.

Las dimensiones presentadas en la geometría fueron determinadas a partir de los antecedentes del perfil hidrogeológico obtenido del informe técnico de Hidrica Consultores (2019), que cruza el Glaciar Paloma Este y el Estero Yerba Loca (ver Figura 2). Vale destacar que la pendiente del lugar se consideró nula para la resolución del modelo.

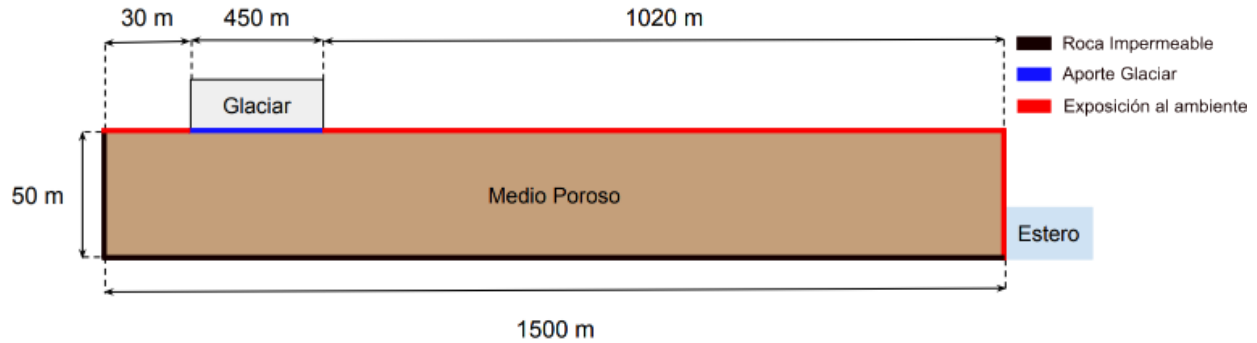


Figura 3: Esquema del dominio de simulación y condiciones de borde.

El modelo supone que el sistema tiene un flujo de entrada debido al aporte hídrico del glaciar Paloma Este. En sus límites inferior e izquierdo se impone la existencia de roca impermeable, mientras que en el resto de los bordes se considera un suelo expuesto al ambiente. Inicialmente, el medio poroso se considera cercano a una condición seca.

Se evaluaron 8 escenarios, donde se varía la magnitud del aporte glaciar de agua, imponiendo una concentración de  $0,1 \mu\text{g/L}$  de un trazador inerte, y dos texturas para el lecho poroso: arenoso y franco-limoso. Los flujos de entrada al medio poroso se adoptan tomando como referencia la contribución hídrica del glaciar Paloma Este, estimada en el trabajo Casassa et al. (2015) de  $2,27 \text{ L/m}^2/\text{mes}$ . El detalle de las magnitudes evaluadas se presenta en la Tabla 1, mientras que los parámetros adoptados para representar las texturas de los suelos en la Tabla 2. El agua se considera como un fluido de densidad  $1000 \text{ kg/m}^3$  y viscosidad  $1 \text{ cP}$ .

Tabla 1: Matriz con valores evaluados en los escenarios de simulación.

Parámetro	Unidad	Valores
Caudal	$\text{L/m}^2/\text{d}$	0,06 ; 2,27 ; 3,10 ; 6,14
Concentración de trazador	$\mu\text{g/L}$	0,01
Textura de suelo		Arenoso ; Franco-Limoso

Tabla 2: Características de los lechos porosos utilizados. Fuente: Dingman (2015).

Característica	Unidad	Tipo de lecho	
		Arenoso	Franco-Limoso
$\phi$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	0,395	0,485
$\lambda_{BC}$	-	0,25	0,19
$S_{rw}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	0,139	0,115
$S_{nw}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	0,053	0,148
$k$	$\text{m}^2$	$1,79 \times 10^{-11}$	$7,34 \times 10^{-13}$

### 3.1. Ecuaciones gobernantes

El subsuelo de la zona en estudio se interpreta como un medio poroso equivalente totalmente ocupado por 3 fases: sólida  $s$ , que moja  $w$  (usualmente líquida) y que no moja  $n$  (usualmente gaseosa). Al modelar los flujos en su interior como un sistema fluido multifase y multicomponente dentro de un lecho poroso, las ecuaciones que rigen el fenómeno corresponden a <sup>1</sup> (Flemisch, 2013; Flemisch et al., 2011; Diersch, 2014):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_f \rho_f^m \chi_f^k \phi S_f \right) + \sum_f \operatorname{div} (\rho_f^m \chi_f^k \mathbf{q}_f) + \sum_f \operatorname{div} (\phi S_f \mathbf{j}_f^k) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_f = -\frac{k_{rf}k}{\mu_f} (\mathbf{grad} p_f - \rho_f \mathbf{g}) \quad (2)$$

$$\mathbf{j}_f^k = -\underline{\mathbf{D}}_f^k \cdot (\rho_f^m \mathbf{grad} \chi_f^k) \quad (3)$$

donde el subíndice  $(\ )_f$  hace referencia a una fase fluida, ya sea gaseosa o líquida ( $f = n, w$ ),  $\phi$  es la porosidad del medio,  $S_f$  es la saturación de la fase fluida,  $\rho_f^m$  corresponde a la densidad molar de la fase fluida,  $\chi_f^k$  corresponde a la fracción molar en una fase fluida,  $\mathbf{q}_f$  es el vector de velocidad de Darcy,  $k$  es la permeabilidad intrínseca del medio,  $k_{rf}$  es la permeabilidad relativa,  $\mu_f$  es la viscosidad del fluido,  $\mathbf{g}$  es el vector de gravedad,  $p_f$  es la presión en el fluido,  $\mathbf{j}_f^{m,k}$  es el flujo dispersivo de la especie  $k$  en la fase  $f$  y  $\underline{\mathbf{D}}_f^k$  es el tensor de dispersión hidrodinámica.

El sistema de ecuaciones anterior requiere las siguientes condiciones de cierre:

$$S_w + S_n = 1 \quad p_n - p_w = p_c \quad \sum_k \chi_w^k = 1 \quad f_n^k = f_w^k \quad (4)$$

donde  $p_c$  es la presión capilar y  $f_f^k$  es la fugacidad de una especie  $k$  en una fase fluida. La primera expresión considera que el volumen de vacíos  $dV_v$  está totalmente ocupado por los fluidos. La segunda expresión rescata que existe una presión capilar  $p_c$  que liga las presiones de los fluidos en un medio no saturado (Diersch, 2014; Flemisch, 2013; Chen et al., 2006; Horgue et al., 2015). La tercera expresión indica que las fases están completamente definidas por los componentes considerados y la última ecuación considera un equilibrio local líquido-vapor.

En el caso de la presión capilar  $p_c$ , se ha demostrado en la literatura (Dingman, 2015; Flemisch et al., 2011; Flemisch, 2013) que depende de la saturación efectiva  $S_e = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rn}}$  donde  $S_{rw}$  y  $S_{rn}$  corresponden a las saturaciones residuales del líquido y el gas, respectivamente. Para obtener la magnitud de la presión capilar  $p_c$  y la permeabilidad relativa  $k_r$  se han adoptado el uso de las expresiones de Brooks & Corey (1964):

$$p_c(S_e) = p_e S_e^{-1/\lambda_{BC}} \quad k_{rw} = S_e^{\frac{2+3\lambda_{BC}}{\lambda_{BC}}} \quad k_{rn} = (1 - S_e)^2 \left( 1 - S_e^{\frac{2+\lambda_{BC}}{\lambda_{BC}}} \right), \quad (5)$$

<sup>1</sup>En su derivación, las ecuaciones de transporte de microescala han sido promediadas volumétricamente en un volumen representativo de volumen (REV por sus siglas en inglés). Las implicancias de este tratamiento matemático es discutido en profundidad en el trabajo Diersch (2014).

donde  $\lambda_{BC}$  y  $p_e$  son parámetros característicos del medio, que provienen de experimentación.

El núcleo de cálculo para resolver el sistema de ecuaciones descritas corresponde al disponible en el código de investigación DuMu<sup>x2</sup> (Flemisch et al., 2011; Koch et al., 2020).

#### 4. RESULTADOS

En la Figura 4, se muestra, a modo de ejemplo, el transporte del componente inerte en el dominio de simulación que se obtiene para un escenario simulado. Para evaluar los tiempos de tránsito de este componente, se definieron 3 zonas de muestreo,  $z_0$ ,  $z_1$  y  $z_2$ , donde se registraron los cambios que experimentaba la concentración del componente en el tiempo, como se muestra en la Figura 5. Conocidas las distancias entre la zona de aporte glaciario y  $z_0$ , además de aquella entre las zonas  $z_1$  y  $z_2$ , las velocidades de transporte fueron estimadas para cada escenario identificando el tiempo de arribo entre cada zona. Éstas son resumidas en la Figura 6. A modo de referencia, estas velocidades se comparan con la solución analítica que se obtiene de considerar la infiltración de agua en un suelo seco semi-infinito de un caudal constante (Witelski, 2005; Philip, 1969; Vanderborght et al., 2005).

#### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 4 se observa el caso de simulación para un medio poroso con textura franco-limosa que ejemplifica el comportamiento observado en todas las simulaciones. Este comportamiento presenta dos fases bien delimitadas: un transporte inherentemente vertical sin una influencia de las condiciones de borde de fondo, seguido de un transporte con una componente paralela al fondo con un comportamiento altamente influenciado por esta condición de borde.

Debido a que se considera una concentración en la zona de aporte glaciario, inicialmente el compuesto inerte se desplaza verticalmente arrastrado por el frente de humedad. Este frente se transporta a diferentes velocidades dependiendo de la textura que presente el lecho poroso y la magnitud del aporte que se considere, siendo notablemente más rápido su avance en los escenarios con una textura más gruesa y con aportes glaciares mayores (Figura 6, Panel Izquierdo). Este comportamiento es consistente con aproximaciones analíticas de la velocidad de frentes de humedad en dominios medios semi-infinitos inicialmente secos. Esto indica que los modelos numéricos utilizados resuelven el fenómeno de manera correcta, ya que las condiciones iniciales consideradas en el dominio se ajustan con los supuestos de tales expresiones.

---

<sup>2</sup>DUNE for multi-phase, component, scale, physics, domain, ... flow and transport in porous media.

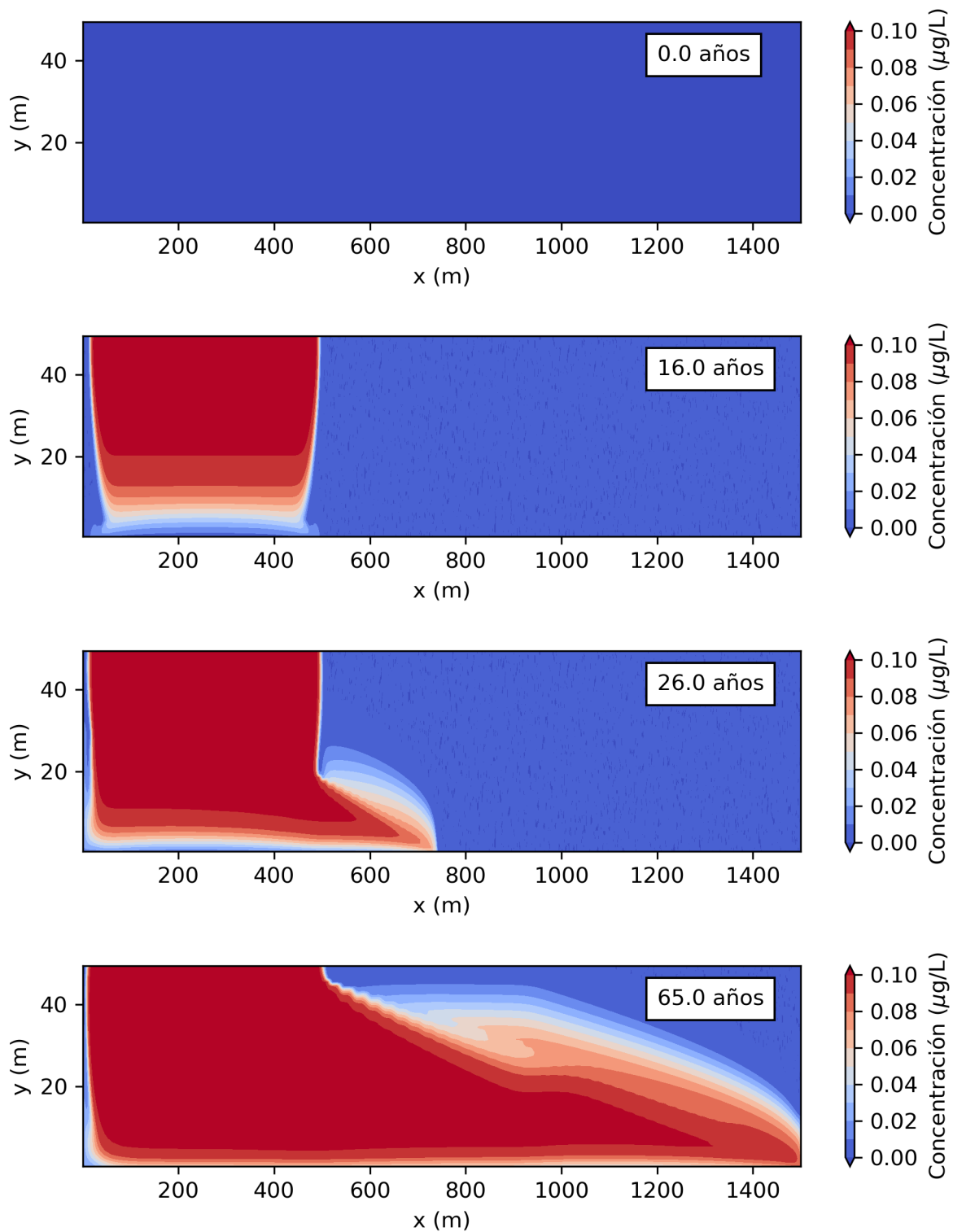


Figura 4: Concentraciones del componente inerte en el modelo del medio poroso con textura franco-limosa, con un aporte glacial de  $2,3 \text{ L}/(\text{m}^2\text{d})$ , en distintos instantes de tiempo.



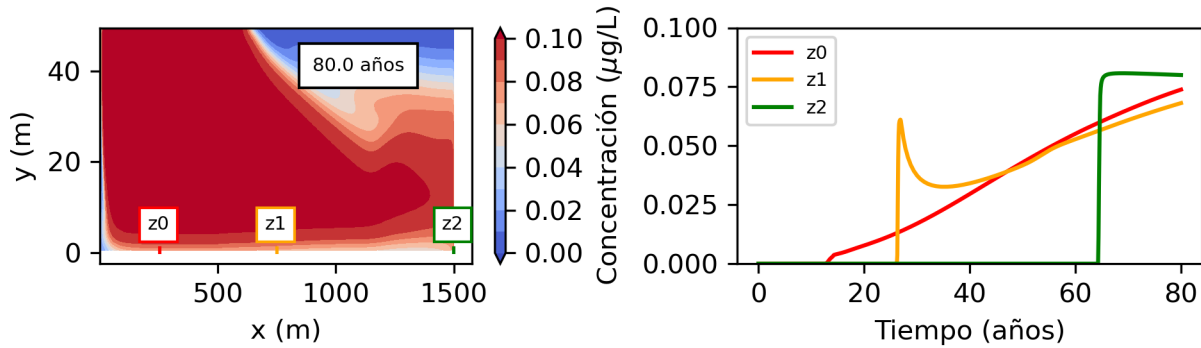


Figura 5: Zonas de muestreo y evolución de la concentración en el tiempo para una textura del tipo franco-limosa con un aporte glaciar de  $2,3 \text{ L}/(\text{m}^2 \text{d})$ . Panel izquierdo: concentraciones del componente inerte en la geometría del medio poroso simulado y posición de las zonas consideradas para el post-procesamiento de datos. Panel derecho: Evolución de la concentración en función del tiempo para cada zona considerada.

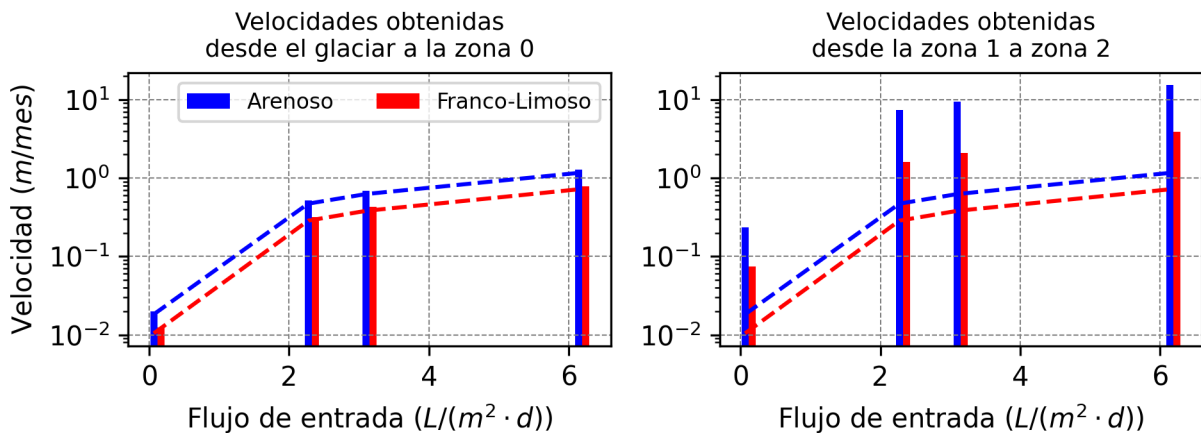


Figura 6: Velocidades obtenidas desde las diferentes zonas consideradas a partir de los casos simulados, en función de la textura del medio poroso y magnitud de flujo de entrada. Líneas segmentadas: Solución analítica que se obtiene de considerar la infiltración de agua en un suelo seco semi-infinito, de un caudal constante.

Una vez los frentes de humedad alcanzan el fondo, la interacción con esta condición de borde impermeable favorece la saturación de estas zonas, cambiando la dirección del transporte de la especie disuelta siguiendo paralelamente la geometría del fondo. Esto debido a que comienzan a generarse gradientes de presión de relevancia en esa dirección. Esto ocurre hasta que el frente de humedad alcanza el estero. Cabe mencionar que los tiempos totales de viajes para las simulaciones en un suelo con textura arenosa estuvieron entre los  $8,9 - 574,7$  años, mientras que en los de textura franco-limosa entre los  $27,3 - 1550,8$  años, para los caudales de infiltración mostrados en la Tabla 1, mostrando el impacto que tiene esta variación en los tiempos de tránsito.

Los gradientes en dirección del fondo toman una relevancia apreciable en la velocidad del transporte que se evidencia al comparar las velocidades de la Figura 6. La velocidad de transporte paralela al fondo suele ser en torno a un orden de magnitud mayor que el vertical, que ocurre principalmente por las zonas parcialmente saturadas. Por otra parte, este efecto incrementa las velocidades hasta en 3 órdenes de magnitud si se comparan velocidades verticales de los escenarios con bajo aporte glaciar respecto a velocidades paralelas al fondo en escenarios con alto aporte glaciar.

Las velocidades de transporte obtenidas, que rondan las decenas de metros por mes para los caudales altos de aporte glaciar, son compatibles con que el derretimiento de nieve o hielos en zonas cercanas al estero, con texturas presumiblemente cercanas a franco limosas o arenosas, puedan arrastrar aguas ácidas generadas por procesos que tienen escalas de tiempo características más largas, pudiendo acidificar las aguas superficiales cuando éstas afloran. Además, los tiempos totales de viaje obtenidos indican que las escalas de tiempo del transporte es compatible con que exista lixiviación de las especies.

Ahora bien, debido a que los escenarios analizados sugieren que el efecto de la interacción del fluido con las zonas impermeables genera una aceleración del flujo, es requerido considerar mayor cantidad de fenómenos para estimar velocidades más realistas y poder verificar esta hipótesis.

## **6. CONCLUSIONES**

Las principales conclusiones del trabajo se listan a continuación:

- Las velocidades de transporte rondan las decenas de metros por mes para los caudales altos de aporte glaciar, mientras que rondan los centímetros por mes para los bajos aportes. Esto sugiere que la variabilidad interanual del aporte por derretimiento podría afectar en órdenes de magnitud la velocidad del transporte.
- Las velocidades de transporte se ven fuertemente influenciadas por la textura del lecho poroso, pudiendo variar en órdenes de magnitud los tiempos de viajes.
- Los tiempos totales de viajes para el dominio analizado ronda las decenas de años, tiempo compatible con que reacciones de lixiviación puedan acidificar las aguas.
- Las velocidades de transporte se ven fuertemente influenciadas por la geometría y, particularmente, por la interacción de los fluidos con la roca sana e impermeable.
- Las velocidades obtenidas son compatibles con que el derretimiento de nieve o hielos en zonas cercanas al estero, con texturas presumiblemente cercanas a franco limosas o arenosas, puedan arrastrar aguas ácidas generadas por procesos que tienen escalas de tiempo características más largas, pudiendo acidificar las aguas superficiales cuando éstas afloran.

En términos generales, el modelo sencillo ejecutado ha contribuido a identificar que la interacción de los fluidos con las zonas impermeables que limitan el medio poroso y la textura del mismo son componentes claves en las velocidades de transporte. Estas consideraciones están siendo incorporadas en el desarrollo de modelos más complejos de la misma zona de estudio en el contexto de una tesis doctoral.

## AGRADECIMIENTOS

Aldo Muñoz, Santiago Montserrat y Yarko Niño agradecen sinceramente el apoyo financiero de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID): CONICYT-PIA Project AFB180004, ANID Project AFB220002. Aldo Muñoz desea agradecer a ANID por la beca de doctorado: ANID-Subdirección de Capital Humano/Doctorado Nacional/2021-21212042.

## REFERENCIAS

- Brooks, R. H. & Corey, A. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hydrology papers colorado state university*, 3.
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C., & Soza, D. (2015). Contribución hídrica de glaciares en el estero yerba loca y su extrapolación a la cuenca del río maipo. In *XIV Congreso Geológico Chileno, Área Temática 3: Geología del Cuaternario y Cambio Climático, Sesión Temática 10: Efectos Directos e Indirectos del Cambio Climático* La Serena, Chile.
- Charte, R., Soto, M., Oblasser, A., Calderón R., C., Hoppe, J., Farfán S., N., Girardi L., C., Vidal C., C., Candia J., J. R., et al. (2015). Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.
- Chen, Z., Huan, G., & Ma, Y. (2006). *Computational methods for multiphase flows in porous media*. SIAM.
- Correa-Burrows, J. P., Navarrete-Calvo, Á., Valenzuela-Díaz, M. J., Zapata-Aguiló, V. A., Montserrat, S., Navarro-Valdivia, L., McPhee, J., & Caraballo, M. A. (2021). The role of local geochemical and mineralogical backgrounds as essential information to build efficient sediment quality guidelines at high-mountainous hydrothermally-altered basins (mapocho basin, Chile). *Science of The Total Environment*, 785, 147266.
- Diersch, H. J. G. (2014). *FEFLOW: Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology*. Waveland press.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120–132.
- Flemisch, B. (2013). *Tackling Coupled Problems in Porous Media: Development of Numerical Models and an Open Source Simulator*. PhD thesis, University of Stuttgart.
- Flemisch, B., Darcis, M., Erbertseder, K., Faigle, B., Lauser, A., Mosthaf, K., Müthing, S., Nuske, P., Tatomir, A., Wolff, M., et al. (2011). Dumux: Dune for multi-{phase, component, scale, physics,...} flow and transport in porous media. *Advances in Water Resources*, 34(9), 1102–1112.
- Hidrica Consultores (2019). *Modelación Hidrogeológica Conceptual del Proyecto Los Bronces Integrado*. Informe técnico hi-18-27, AngloAmerican Sur. REV. V2.

- Horgue, P., Soullaine, C., Franc, J., Guibert, R., & Debenest, G. (2015). An open-source toolbox for multiphase flow in porous media. *Computer Physics Communications*, 187, 217–226.
- Jaime Illanes & Asociados (2019a). *Estudio de Impacto Ambiental: Proyecto Los Bronces Integrado*. Technical report, AngloAmerican. Capítulo 3.5: Geología.
- Jaime Illanes & Asociados (2019b). *Estudio de Impacto Ambiental: Proyecto Los Bronces Integrado*. Technical report, AngloAmerican. Capítulo 3.14: Suelo.
- Koch, T., Gläser, D., Weishaupt, K., Ackermann, S., Beck, M., Becker, B., Burbulla, S., Class, H., Coltman, E., Emmert, S., et al. (2020). Dumux 3—an open-source simulator for solving flow and transport problems in porous media with a focus on model coupling. *Computers & Mathematics with Applications*.
- Lottermoser, B. G. (2010). Sulfidic mine wastes. In *Mine wastes* (pp. 43–117). Springer.
- Maest, A. S., Kuipers, J. R., Travers, C. L., & Atkins, D. A. (2005). Predicting water quality at hardrock mines. *Methods and models, uncertainties and state-of-the-art. Earthworks, Washington, DC, USA*.
- Montserrat, S., Quezada, S., Dionizis, D., Ojeda, P., & Lagos-Zuñiga, M. (2021). *Hidrología y química de aguas en la cuenca alta del río Mapocho*.
- Parbhakar-Fox, A. & Lottermoser, B. G. (2015). A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*, 82, 107–124.
- Philip, J. R. (1969). Theory of infiltration. In *Advances in hydroscience*, volume 5 (pp. 215–296). Elsevier.
- Valenzuela-Diaz, M. J., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M. A., McPhee, J., Garcia, A., Correa-Burrows, J. P., & Navarro-Valdivia, L. (2020). Hydrogeochemical and environmental water quality standards in the overlap between high mountainous natural protected areas and copper mining activities (mapocho river upper basin, santiago, chile). *Journal of Hydrology*, 588, 125063.
- Vanderborght, J., Kasteel, R., Herbst, M., Javaux, M., Thiéry, D., Vanclooster, M., Mouvet, C., & Vereecken, H. (2005). A set of analytical benchmarks to test numerical models of flow and transport in soils. *Vadose Zone Journal*, 4(1), 206–221.
- Witelski, T. P. (2005). Motion of wetting fronts moving into partially pre-wet soil. *Advances in Water Resources*, 28(10), 1133–1141.
- Zegers, G., Navarro-Valdivia, L., Lagos-Zuñiga, M., Navarrete-Calvo, A., Caraballo, M. A., Niño, Y., McPhee, J., & Montserrat, S. (2021). An integrated modeling approach for mineral and metal transport in acidic rivers at high mountainous porphyry cu systems. *Journal of Hydrology*, 602, 126718.