



II CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA AMBIENTAL EN SISTEMAS ACUÁTICOS, CChIASA

TRANSPORTE DE METALES Y MINERALES EN UN RÍO CON DRENAJE ÁCIDO (ARD) NATURAL. APLICACIÓN DE UN MODELO INTEGRADO AL ESTERO YERBA LOCA.

GERARDO ZEGERS¹
SANTIAGO MONTSERRAT²
LEONARDO NAVARRO³
MIGUEL LAGOS⁴
YARKO NIÑO⁵

RESUMEN EXTENDIDO

El agua proveniente desde las montañas es de gran importancia para la conservación del medio ambiente, consumo humano y actividades productivas. En particular, en la zona centro de Chile, donde se concentra gran parte de la población del país, el agua de deshielo proveniente de la cordillera de los Andes es fundamental para las actividades agrícolas y mineras. En la Cordillera de los Andes se pueden encontrar varios yacimientos minerales y zonas de alteración hidrotermal, que conducen a la aparición de drenaje de rocas ácidas (ARD) natural, como la cuenca del estero Yerba Loca, Región Metropolitana, o antropogénico, asociado a la actividad minera. El ARD tiene un alto contenido de metales pesados y un pH bajo, lo que causa contaminación hacia aguas abajo.

La movilidad de los minerales y metales es un fenómeno bastante complejo debido a que existen diversos procesos, tanto físicos como químicos, que afectan la distribución y concentración de los metales en estos cuerpos de agua. La movilidad está afectada por: la hidrología (distribución de caudales, variaciones estacionales), hidrodinámica-transporte (velocidad del flujo, esfuerzo de corte, dispersión, almacenamiento transitorio, erosión-sedimentación) e hidroquímica (pH, especiación, reacciones, sorción-desorción). En este trabajo se presenta un estudio multidisciplinario para estimar y entender el transporte de metales y minerales en la cuenca del estero Yerba Loca. Esto se logra mediante la elaboración de un modelo numérico que incorpora los procesos antes mencionados a través de la integración de submodelos.

¹ Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile. gerardo.zegers@amtc.cl

² Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile. santiago.montserrat@amtc.cl

³ Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile. leonardo.navarro@amtc.cl

⁴ Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile. miguel.lagos@amtc.cl

⁵ Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile. ynino@ing.uchile.cl



Para la hidrología se utiliza WEAP. Este modelo utiliza un enfoque de subcuenca para la distribución espacial de las unidades hidrológicas, de manera de tener una buena representación de los caudales. Las propiedades del escurrimiento se resuelven con HEC-RAS, utilizando un método iterativo para considerar un régimen de resistencia macro-rugoso. Para el módulo de transporte, se utilizan las ecuaciones de advección-dispersión (ADE), incorporando el concepto de almacenamiento transitorio, de manera de considerar la heterogeneidad del río. Por último, la hidroquímica se resuelve utilizando PHREEQC, considerando 4 minerales principales en el sistema del Estero Yerba Loca: Hidrobasaluminita, Schwertmannita, Ferrihidrita y Brochantita. Estos minerales fueron definidos en base a estudios mineralógicos del sector y a la literatura.

Se analizaron las muestras de aguas obtenidas en Yerba Loca desde el año 2017, utilizando PHREEQC con los minerales propuestos y suponiendo equilibrio químico para todos los procesos, excepto para la disolución mineral para $\text{pH} > 4$ debido a las lentas tasas de disolución. En la Figura 1 se ve que el modelo químico propuesto representa de buena manera la partición de estos minerales y metales según la acidez del agua. Para el hierro (Ferrihidrita y Schwertmannita) existe un rango de precipitación más amplio, debido a las mayores variaciones en la concentración de este elemento y la precipitación de dos minerales.

El modelo se utilizó para distintos días en los que se realizaron campañas de terreno. En la Figura 2, se muestran los resultados para el día 11-12-2013. El modelo elaborado muestra poder resolver el destino y transporte de metales y minerales en ríos con aguas ácidas. El modelo sería una potencial herramienta de evaluación del impacto de drenaje ácido de minas o natural en sistemas acuáticos continentales.

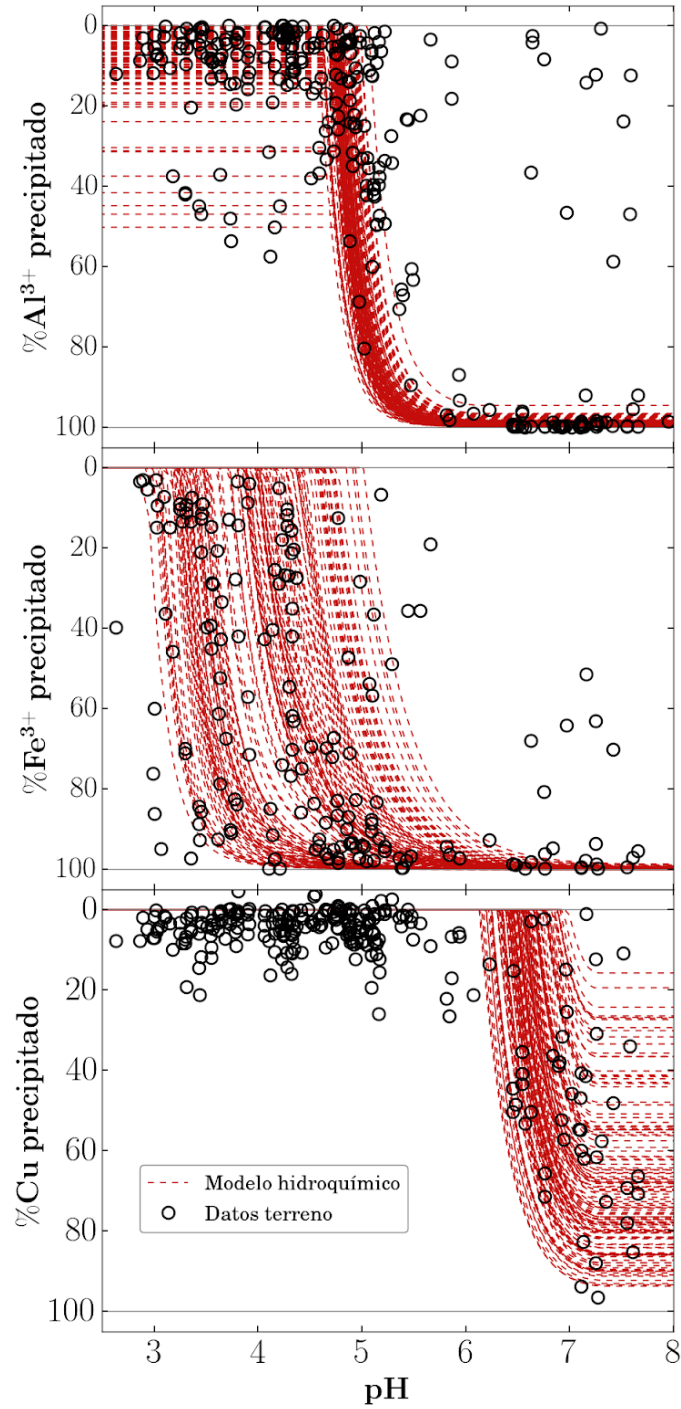


Figura 1: Precipitación mineral modelada con PHREEQC comparada con datos de terreno.

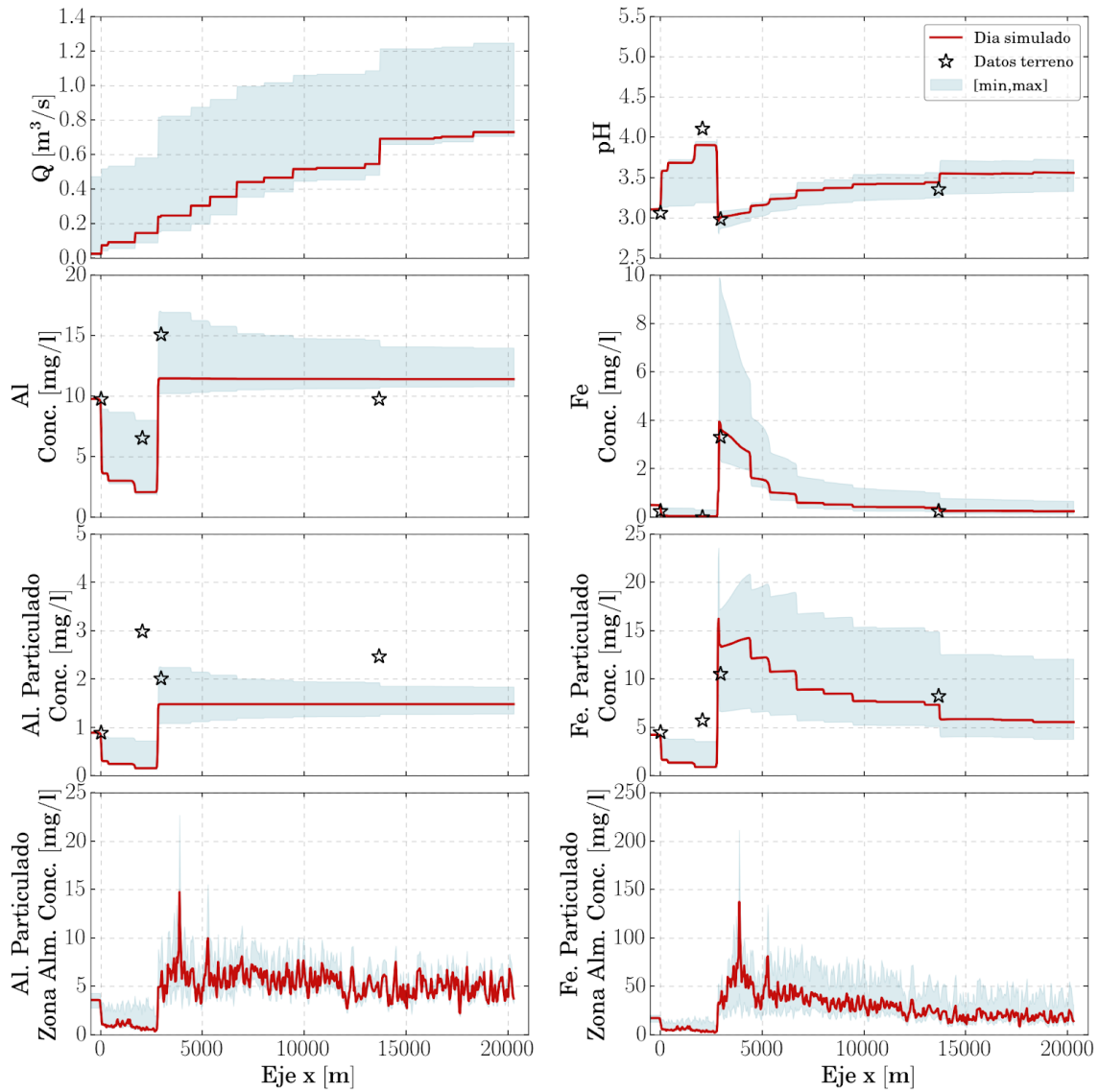


Figura 2: Resultados del modelo para el día 11-12-2013. El área sombreada corresponde a los mínimos y máximos modelados para el mes de diciembre del mismo año.

Agradecimientos



Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento de Advanced Mining Technology Center (AMTC) y Anglo American.

Referencias

- Bencala, K. E., & Walters, R. A. (1983). Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream: A transient storage model. *Water Resources Research*, 19(3), 718–724. <https://doi.org/10.1029/WR019i003p00718>
- Bigham, J. M., & Nordstrom, D. K. (2000). Iron and Aluminum Hydroxysulfates from Acid Sulfate Waters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40(1), 351–403. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.7>
- Bigham, J. M., Schwertmann, U., Traina, S. J., Winland, R. L., & Wolf, M. (1996). Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(12), 2111–2121. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00091-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00091-9)
- Garneau, C., Sauvage, S., Probst, A., And Sanchez-Pérez, J.-M., Sauvage, S., Probst, A., & Sánchez-Pérez, J. M. (2015). Modelling of trace metal transfer in a large river under different hydrological conditions (the Garonne River in southwest France). *Ecological Modelling*, 306, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.011>
- Garneau, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.-M., Lofts, S., Brito, D., Neves, R., & Probst, A. (2017). Modelling trace metal transfer in large rivers under dynamic hydrology: A coupled hydrodynamic and chemical equilibrium model. *Environmental Modelling & Software*, 89, 77–96. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.018>
- Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (n.d.). *USER'S GUIDE TO PHREEQC (VERSION 2)— A COMPUTER PROGRAM FOR SPECIATION, BATCH-REACTION, ONE-DIMENSIONAL TRANSPORT, AND INVERSE GEOCHEMICAL CALCULATIONS M A R C H 3 1 8 4 9*. Retrieved from <http://www.xs4all.nl/~appt/index.html>
- Richardson, J. F., & Zaki, W. N. (1954). The sedimentation of a suspension of uniform spheres under conditions of viscous flow. *Chemical Engineering Science*, 3(2), 65–73. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(54\)85015-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(54)85015-9)
- Runkel, R. L. (1998). One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers. *US Department of the Interior, US Geological Survey*.
- Runkel, R. L., Kimball, B. A., Walton-Day, K., Verplanck, P. L., & Broshears, R. E. (2012). Evaluating remedial alternatives for an acid mine drainage stream: A model post audit. *Environmental Science and Technology*, 46(1), 340–347. <https://doi.org/10.1021/es2038504>
- Sánchez-España, J., Yusta, I., & Diez-Ercilla, M. (2011). Schwertmannite and hydrobasaluminite: A re-evaluation of their solubility and control on the iron and aluminium concentration in acidic pit lakes. *Applied Geochemistry*, 26(9–10), 1752–1774. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.06.020>