

Modelamiento de la heterogeneidad de roca fracturada en una mina a rajo abierto: calibración del modelo de agua subterránea usando puntos pilotos

Claudia Martínez, Tomás Opazo¹, Cristian Pereira², Rodrigo Cañete³

¹*SRK Consulting Chile, cmartinez@srk.cl, topazo@srk.cl, Santiago, Chile*

²*SRK Consulting (U.S.), cpereira@srk.com, Denver, CO, USA*

³*AngloAmerican Chile, rodrigo.canete@angloamerican.com, Santiago, Chile*

RESUMEN

El contenido de agua en unidades de roca presentes en minas a rajo abierto tiene efectos importantes en la presión de poros y en la estabilidad de taludes. Por esta razón, la distribución de presión de poros en todo el rajo representa uno de los factores más importantes en el análisis de estabilidad de taludes, pudiéndose obtener a través del modelamiento numérico de aguas subterráneas. Generalmente, las unidades hidrogeológicas se definen usando dominios geológicos-geotécnicos discretos relacionados con sus parámetros hidráulicos. Sin embargo, una vez implementados en el modelo numérico, este enfoque puede llevar a una zonificación excesivamente simplificada de uniformidad de parámetros por segmentos. Como resultado, el modelo tiene una capacidad limitada para expresar la complejidad de la propiedad hidráulica, lo que lleva a un menor potencial para usar los datos del sitio y evaluar incertidumbres predictivas. Este documento describe la aplicación de la metodología de “puntos pilotos” como un medio de caracterización de propiedad hidráulica espacial en una mina a rajo abierto. Utiliza MODFLOW-USG con Quadtree Refinement y PEST. Un modelo de capas múltiples se dividió en zonas basadas en un modelo geológico y se usaron puntos piloto para evaluar las variaciones de la propiedad hidráulica intrazonal. Los campos de transmisividad calibrados muestran sustancial heterogeneidad con regiones de alta conductividad hidráulica, lo que se correlaciona bien con la ubicación de las fallas principales. Un análisis de incertidumbre Monte Carlo de Espacio Nulo muestra un importante error predictivo para la afluencia de agua subterránea hacia el rajo así como para distribuciones de presión de poros. Estos resultados son valiosos para identificar las necesidades de datos y optimizar los futuros trabajos hidrogeológicos.

INTRODUCCIÓN

Entender el flujo de agua subterránea en roca fracturada es una tarea compleja. En la mayoría de los ambientes geológicos donde se ubican los rajos abiertos en Chile, hay rocas muy competentes y rocas impermeables donde ocurre el flujo de agua subterránea a través de zonas estrechas y zonas fracturadas discretas, a menudo duras para seguirlas espacialmente. En varios casos, los datos de

terreno son insuficientes para desarrollar un modelo conceptual integral que incluya características que son importantes para el flujo de agua subterránea, especialmente debido a la heterogeneidad de los parámetros hidráulicos. Sin embargo, a pesar de todas las incertidumbres y complejidades reconocidas durante el proceso de análisis de datos, los consultores se ven forzados a delinear al menos las unidades macro-hidrogeológicas para alimentar la geometría del modelo numérico que finalmente proporcionaría resultados predictivos. Como resultado, el modelo numérico construido usualmente no incluye complejidad derivada de zonas de flujo discretas identificadas. Esto puede ser muy insatisfactorio cuando se predicen presiones de poros como un dato de entrada para el análisis de estabilidad de taludes, donde su variabilidad espacial depende mucho de la heterogeneidad.

Cuando se modela el flujo de agua subterránea en roca fracturada usando el enfoque equivalente de medio poroso (EPM), la metodología de “puntos pilotos” se puede usar como medio para representar la variabilidad de propiedad espacial que no se puede imponer trabajando con zonas de uniformidad por segmentos (Doherty, 2003). Al honrar las mediciones de datos de propiedad hidráulica y mediciones de cabezal piezométrico, se puede encontrar una distribución espacial de la conductividad hidráulica y/o almacenamiento mediante el uso de modelamiento inverso. La distribución obtenida luego se puede comparar con las características identificadas tales como fallas principales a fin de mejorar el entendimiento del flujo de agua subterránea en roca fracturada.

Este documento presenta un estudio de caso donde la metodología de los “puntos pilotos” se usó en una mina de rajo abierto. La mina Los Bronces se ubica en Chile Central, donde el agua subterránea se volvió un problema operacional y geotécnico al menos desde 2005. La geología es dominada por breccias mineralizadas y rocas intrusivas, con mineralización primaria y secundaria, perteneciente al depósito mineral Río Blanco-Los Bronces (Warnaars *et al.*, 1985). Se han identificado varias fallas subverticales (Carrizo *et al.*, 2013), pero su contribución al sistema de flujo de agua subterránea actualmente se desconoce. Se construyó un modelo numérico para obtener una perspectiva respecto a la dinámica entre agua subterránea y fallas principales, para predecir y evaluar las distribuciones de presión de poros como información de entrada para el análisis de estabilidad de taludes y para predecir la afluencia de agua subterránea hacia el rajo. Adicionalmente, el modelo sirvió como una herramienta para explorar parámetros e incertidumbre predictiva.

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se construyó un modelo de agua subterránea en 3D usando Leapfrog Hydro® para generar geometría 3D, Groundwater Vistas v6 (Rumbaugh and Rumbaugh, 2007) para configuración del modelo numérico y se simuló usando el código MODFLOW-USG (Panday *et al.*, 2013). El dominio del modelo (Figura 1) es una extensión de la línea divisoria de aguas donde se ubica el rajo y cubre un área de 24 km². Las condiciones de límite laterales se simularon usando Límites Generales de Presión Hidrostática (GHB – 3^{er} tipo BC) y Límites Constantes de Presión Hidrostática (CHB – 1^{er} tipo BC). La cuadrícula del modelo presenta un refinamiento Quadtree, con espaciamiento variable en un rango de 30 m en el área del rajo final hasta 240 m fuera del rajo y se divide verticalmente en 19 capas (las 8 capas superiores representan rocas con mineralización secundaria y las capas inferiores 9-19 representan rocas primarias), lo que da un total de 206644 celdas activas. La recarga

se distribuyó tramo por tramo de acuerdo a la ubicación de zonas de recarga reconocidas tales como glaciares y depósitos aluviales y se simuló con una señal estacional de acuerdo a la variabilidad temporal de la presión hidráulica observada, con una tasa de recarga promedio de 102 mm/año equivalente al 20% de la precipitación promedio medida en el sitio.

El modelo geológico simplificado representado en el modelo numérico consiste en andesitas, rocas ígneas, breccias, riolitas y un cráter de subsidencia (Figura 1). Los valores de conductividad hidráulica obtenidos de 200 packer tests y ensayos de acuíferos, van desde 1.54E-09 m/s hasta 1.30E-05 m/s, proporcionando evidencia de rocas altamente heterogéneas. Las fallas principales no fueron representadas en forma explícita en el modelo, pero el uso de puntos pilotos tenía como propósito explorar la heterogeneidad de la conductividad hidráulica intrazonal que podría reflejar la presencia de fallamiento. La zonificación de parámetros de almacenamiento se simplificó en roca secundaria y primaria con puntos pilotos para variabilidad intrazonal.

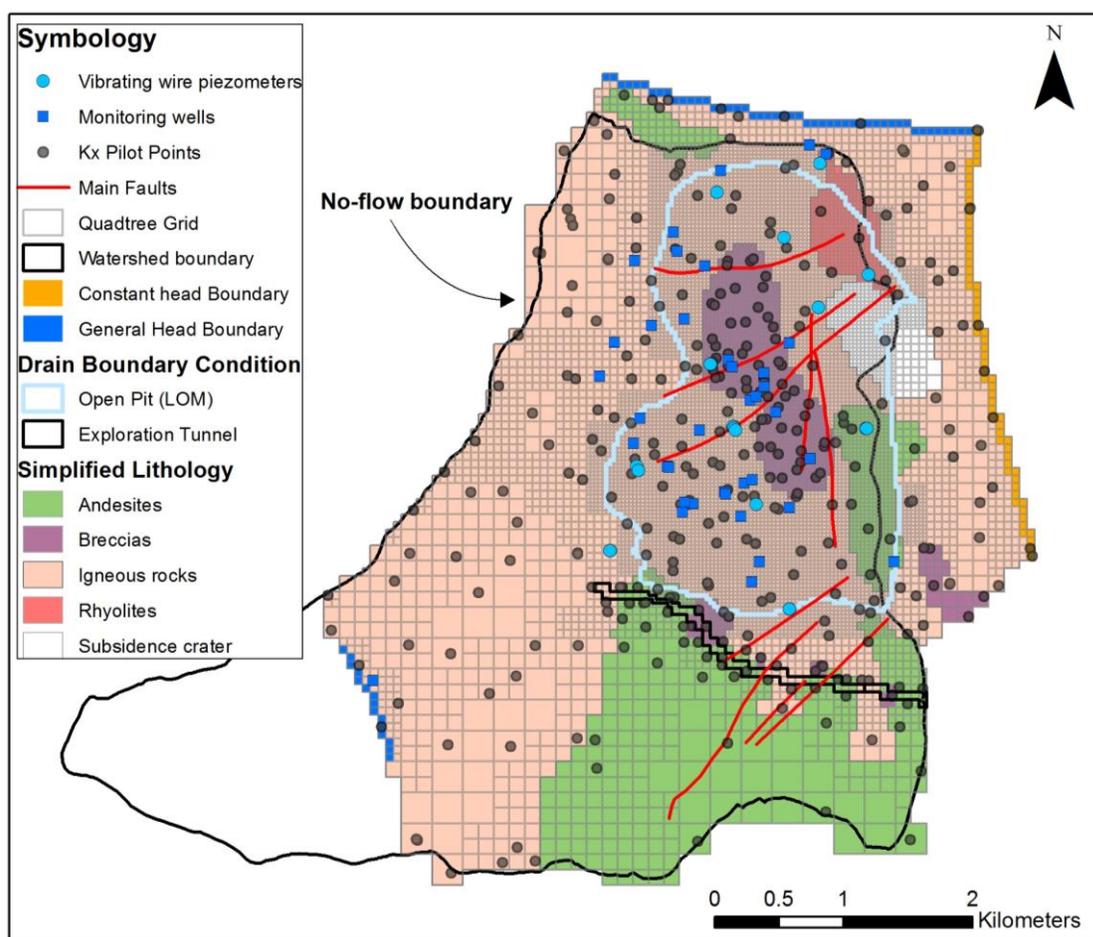


Figura 1 Componentes principales del modelo numérico de agua subterránea en capa 3 (las condiciones de límite de drenaje delineadas representan los bordes del límite real)

A fin de simular el avance del rajo se usó el paquete de Drenaje. De acuerdo al avance histórico de la mina y al plan de mina LOM, se asignó una cota de referencia que varía con el tiempo que representa la pared del rajo a cada celda de drenaje, respetando la geometría del rajo en todo momento. El avance de un túnel de exploración que registró afluencia de agua subterránea durante su construcción también fue representado por el paquete de drenaje (FIGURA 1).

MÉTODO DE CALIBRACIÓN TRANSIENTE Y RESULTADOS

Dado que la recarga era desconocida antes del proceso de calibración y debido a la falta de datos de presión hidráulica antes de la minería, el proceso de calibración solamente incluyó una calibración transiente que simula el avance histórico del rajo desde el 2006 al 2014, con periodos mensuales de esfuerzo. Para este propósito, los niveles transientes de agua subterránea de 42 pozos de monitoreo y de 12 piezómetros de cuerda vibrante (con mediciones de presión profundas-discretas) se usaron como metas de calibración que van en un rango desde la capa 2 a la capa 10, para un total de 1942 observaciones. Adicionalmente, se usaron 299 observaciones de afluencia de agua subterránea hacia el túnel de exploración como metas de calibración, a fin de restringir mejor los parámetros hidráulicos y la recarga en esa área. El proceso de calibración se llevó a cabo usando la metodología de "puntos piloto", descomposición de valor singular (SVD-assist) y regularización (Tonkin and Doherty, 2005), con PEST como la técnica de estimación de parámetro (Doherty, 2013). En palabras simples, el punto piloto es una ubicación xyz dentro del dominio donde PEST tiene que estimar un parámetro específico (k_h , k_v , S_y , S_s , o recarga) cuyo valor tiene que estar en un rango específico de acuerdo al modelo conceptual. El punto piloto no corresponde necesariamente con un pozo real o pozo de pruebas u observación, pero se puede localizar entre o alrededor de los pozos de observación porque PEST necesita observaciones para estimar el valor para cada parámetro o punto piloto. La descomposición del valor singular es una técnica para encontrar la correlación numérica entre parámetros (puntos piloto) en diferentes zonas del modelo y en base a ello, estima súper parámetros. Por medio de la regularización es que el modelador impone su modelo conceptual a PEST, asignando a cada una de esas observaciones una ponderación o importancia en el proceso de calibración y relación entre parámetros en base al modelo conceptual. Se usó un total de 401 puntos pilotos de conductividad hidráulica horizontales y verticales para dar cuenta de la heterogeneidad intrazonal hidráulica, mientras que se usó un enfoque más simple para almacenamiento específico, rendimiento específico y recarga, con un total de 27, 17 y 7 puntos piloto, respectivamente. Los campos con kriging fueron generados interpolando los valores de puntos piloto usando el paquete PLPROC (Doherty, 2015), respetando los límites geológicos, produciendo un campo K con variación continua dentro de cada zona de modelo. La conductividad hidráulica (K_x y K_z) y valores de almacenamiento (S_y y S_s) (TABLA 1) se estimaron mediante PEST, respetando los valores medidos en terreno y valores aplicados de la literatura, a fin de obtener un ajuste aceptable entre las presiones observadas y simuladas y la afluencia de agua subterránea hacia el túnel. El rendimiento específico para la roca con mineralización primaria (capas 9-19) se fijó en 0,1%. Dado el alto nivel de parametrización del modelo, se paralelizaron corridas del modelo mediante el uso de BEOPEST (Schreuder, 2009).

Tabla 1 Rangos aceptables para conductividad hidráulica, almacenamiento específico y valores de rendimiento específicos. Los números en negritas corresponden a valores asignados a roca con mineralización primaria (capas 9-19).

Litología	Conductividad Hidráulica (m/s)			Ss (1/m)			Sy (-)		
	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max
Andesita	2.8E-07	1.8E-08	6.2E-06						
Breccia	1.3E-07	1.8E-11	6.5E-06	1.0E-05	1.0E-07	1.0E-03			
Roca ígnea	1.0E-07	1.5E-09	1.3E-05	5.0E-07	5.0E-08	5.0E-06	1.0E-03	5.0E-04	5.0E-02
Riolita	3.6E-08	5.3E-09	3.5E-07						

El ajuste del modelo obtenido tiene una media residual absoluta de 11,6 m (< 5% de diferencias entre los datos de presión máxima y mínima), error de raíz cuadrada media (RMS) de 16,3 m y error de raíz cuadrada media normalizado (NRMS) de 2,1%, aceptable de acuerdo con SEA (2012). La Figura 2 muestra el campo calibrado K_x para capas 1-4 (representando la parte superior del modelo en roca secundaria) y para capas 5-8 (representando la parte inferior del modelo también en roca secundaria). Los valores de K_x obtenidos van en un rango de 10^{-9} a 10^{-5} m/s, de acuerdo con las mediciones en terreno. Uno de los hallazgos más importantes del proceso de calibración es que también las áreas de alta conductividad hidráulica se pueden correlacionar con la ubicación de las fallas principales. Esto es particularmente evidente en el centro del rajo, donde las dos fallas principales NE-SW se relacionan con altos valores de K que separan la unidad geológica breccia (zona con línea segmentada en la FIGURA 2) en dos dominios hidrogeológicos distintos, lo que sugiere que estas fallas podrían estar actuando como rutas de flujo preferenciales para agua subterránea. Esta configuración se puede observar para las capas 1-4 y capas 5-8, donde se usaron datos de presión independientes de la profundidad, lo que sugiere que las fallas influyen en la distribución de conductividad hidráulica para toda la secuencia de roca con mineralización secundaria. En el área del túnel de exploración, se obtuvo otra zona de alto K partir del proceso de calibración que también está bien correlacionado con la ubicación de las fallas NE-SW que intersectan la traza del túnel. Estas fallas serían responsables de la mayoría de las afluencias de agua subterránea identificadas en el túnel durante la construcción.

La distribución calibrada de roca primaria (capas 9-19) muestra sustancialmente menos variabilidad espacial, así que esta parte del modelo no es parte de la discusión presentada en este trabajo.

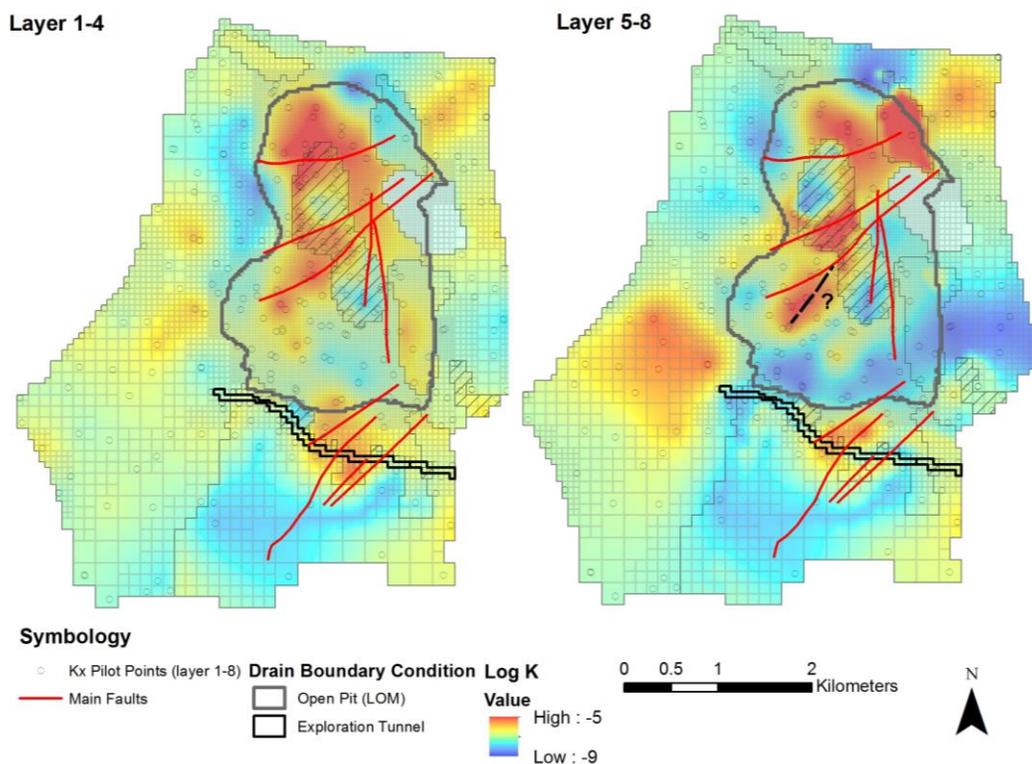


Figura 2 Comparación entre campos Kx calibrados a partir de las capas 1-4 y capas 5-9 y fallas principales subverticales.

ANÁLISIS PREDICTIVO DE INCERTIDUMBRE

El enfoque de Espacio Nulo Monte-Carlo (Tonkin and Doherty, 2009) se aplicó para explorar la variación del error predictivo de futuras afluencias de agua subterránea al rajo y de la superficie piezométrica pronosticada. Se generó un total de 100 realizaciones aleatorias con la utilidad RANDPAR y se proyectaron en el espacio nulo usando la utilidad PNULPAR (Doherty, 2011), para obtener conjuntos de parámetros aleatorios restringidos por calibración. Cada una de las realizaciones de parámetros fue calibrada con PEST y SVD-assist, rechazando las que resultaron en un RMS superior a 20 m, o NRMS superior a 2,6%. Debido a restricciones de tiempo, solamente 40 realizaciones de parámetro fueron aceptadas. Los campos de parámetros aceptados se usaron en el modelo predictivo donde el desarrollo del rajo se simuló para 5 años, obteniendo un rango de distribuciones de presión predictivas y afluencias de agua subterránea al rajo.

La FIGURA 3 muestra un histograma de frecuencia de afluencias promedio de agua subterránea al rajo para los 5 años de la simulación, donde la distribución tiene un sesgo positivo con una afluencia media de 69 ± 25 l/s, lo que sugiere que las futuras afluencias de agua subterránea al rajo podrían alcanzar valores máximos de 100 l/s.

La FIGURA 4 muestra la variación de error pronosticada para la superficie piezométrica al final de la simulación de 5 años. Aunque el error es en general menor a 20 m para la mayoría del área del rajo, las paredes del este del rajo exhiben errores que exceden los 100 m. Esta área se puede definir como una zona de prioridad para posteriores investigaciones hidrogeológicas.

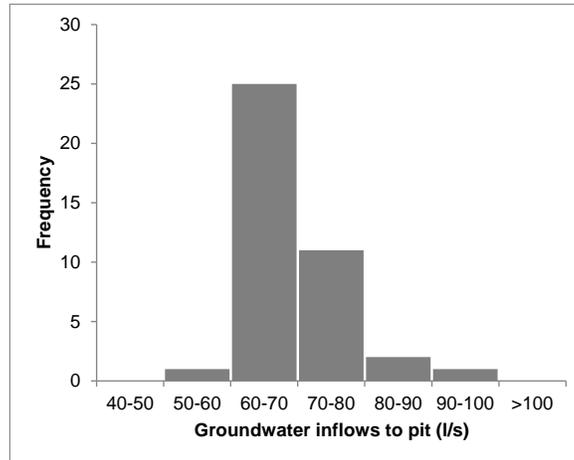


Figura 3 Histograma de frecuencia de las afluencias promedio de 5 años hacia el rajo

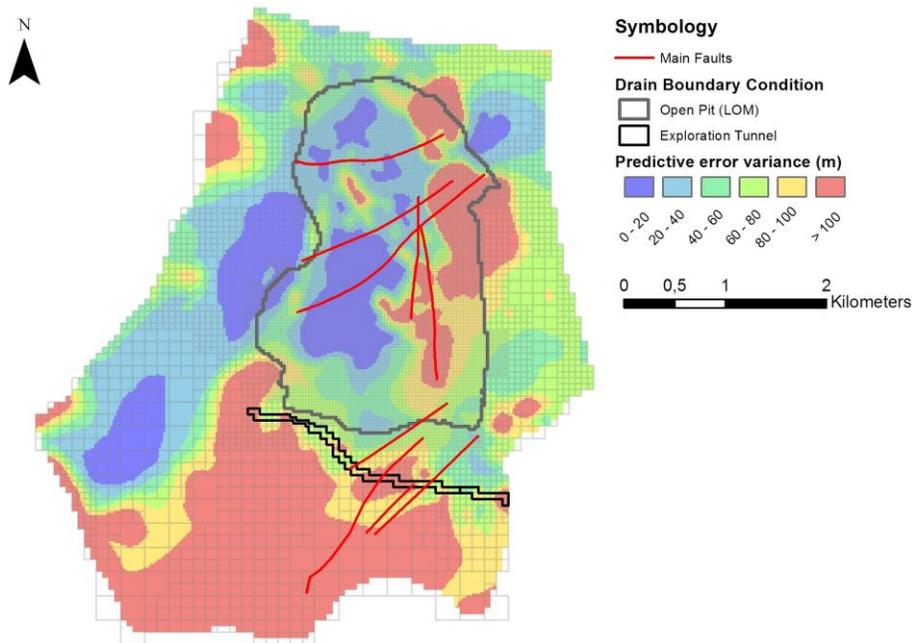


Figura 4 Varianza de error predictivo de superficie piezométrica (2σ) al final de la simulación de 5 años

RESUMEN

Se presentó la aplicación de la calibración del modelo de agua subterránea y el análisis de incertidumbre usando la metodología de puntos pilotos en una mina de rajo abierto. Los campos de conductividad hidráulica calibrada sugieren que las fallas principales son una característica de primer orden para el flujo preferencial de agua subterránea, que no se ha identificado durante las campañas previas de caracterización del sitio. Este hallazgo proporciona una perspectiva valiosa respecto al rol de las fallas en la dinámica del agua subterránea y orienta futuros trabajos.

El análisis predictivo de incertidumbre usando el enfoque NSMC mostró un grado notorio de variabilidad de la afluencia de agua subterránea pronosticada hacia el rajo, pro especialmente de la superficie de agua piezométrica, con una máxima variación de error de 100 m en la pared este del rajo. Este hallazgo proporciona orientación sobre la planificación de futuras campañas hidrogeológicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a Anglo American Chile por autorizar la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS

- Carrizo, D., Barros, C., Gallardo, S., 2013. Modelo estructural 3D de la Mina Los Bronces, Anglo American Sur S.A., Unpublished Report, Anglo American Chile.
- Doherty, J., 2003. Groundwater model calibration using pilot points and regularization, *Groundwater*, 41(2), 170-177.
- Doherty, J., 2011. PEST Groundwater Data Utilities. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.
- Doherty, J., 2013. PEST: Model-Independent Parameter Estimation, Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.
- Doherty, J., 2015. PLPROC: A parameter List Processor. Watermark Numerical Computing, Queensland, Australia.
- Panday, Sorab, Langevin, C.D., Niswonger, R.G., Ibaraki, Motomu, and Hughes, J.D., 2013, MODFLOW-USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A45, 66 p.
- Rumbaugh, J., Rumbaugh, D., 2007. Groundwater Vistas 6.0, 1996-2011. Environmental Simulation, Inc.
- Shreuder, W., 2009. Running BeoPEST, In Proceedings of the 1st PEST Conference, Potomac, Maryland, 1-3 November.
- Tonkin, M., and Doherty, J., 2005. A hydrib regularized inversion methodology for highly parameterized model, *Water Resour. Res.*, 41, W10412, doi:10.29/2006WR005348.
- Tonkin, M., and Doherty, J., 2009. Calibration-constrained Monte-Carlo analysis of highly parameterized models using subspace techniques, *Water Resources Research*, v. 45, no. 12, W00B10, doi: 10.1029/2007WR006678.

Warnaars, F., Holmgren, C., Barassi, S., 1985. Porphyry copper and tourmaline breccias at Los Bronces-Rio Blanco, Chile, *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 80(6), 1544-1565.

SEA, Servicio de Evaluación Ambiental (2012). Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA.