

# Caracterización Geoquímica de Unidades Geoambientales y Simulación de Procesos de DAR

/ ÀNGELS PIQUÉ VERICAT (1,\*), DAVID ARCOS BOSCH (1)

(1) Amphos 21, Passeig de Garcia i Fària 49-51, 08019, Barcelona (España)

## INTRODUCCIÓN.

La industria minera genera millones de toneladas de material estéril cada año que se depositan en escombreras al aire libre. En especial, la explotación de yacimientos tipo pórfido cuprífero genera material estéril con potencial de producir drenaje ácido debido a la oxidación de pirita en un medio subaéreo no saturado. Las medidas de prevención o remediación deben tomarse en base a su posible impacto ambiental, el cual puede determinarse a partir de modelos hidrogeoquímicos de drenaje ácido de roca (conocido por las siglas: DAR). Estos modelos requieren caracterizar geoquímicamente las unidades geoambientales con destino a escombrera.

En los pórfidos cupríferos, las unidades geoambientales pueden ser definidas en base al contenido de pirita, la zona mineral, la litología y la alteración. El siguiente paso es determinar el volumen de cada una de estas unidades que será almacenado en las escombreras y su ubicación dentro de las mismas.

La caracterización de estas unidades geoambientales incluye un estudio mineralógico, geoquímica de roca total, extracción secuencial, test ABA y test de celda húmeda (TCH). Esta información se utiliza para determinar un modelo conceptual y su implementación en modelos numéricos.

A continuación se presenta un ejemplo de simulación numérica de TCH de una unidad geoambiental con alto potencial de generar acidez (alto contenido en pirita).

## TEST DE CELDA HÚMEDA.

El TCH modificado consiste en provocar la oxidación acelerada de 1kg de muestra triturada, mediante un flujo de

aire al 90% de humedad y 40°C. Cada TCH consta de un mínimo de 20 ciclos de 14 días. Al final de cada ciclo se inunda la celda con 1L de agua destilada, se drena y se analiza el lixiviado. Un esquema de su funcionamiento se presenta En la Fig. 1.

El TCH es útil para predecir si una determinada muestra generará acidez y liberará metales pesados al medio, pero no permite conocer cuándo el material generará acidez en condiciones naturales.

Los lixiviados del TCH corresponden a diluciones del agua que interacciona con el material de las celdas durante cada ciclo. Las concentraciones en el agua de poro de las celdas es más elevada que la medida en el lixiviado y el pH también puede variar. Por este motivo se han recalculado las concentraciones del agua de poro dentro de las celdas.

## MODELO NUMÉRICO.

Las simulaciones tipo "batch" se han realizado con el código geoquímico PHREEQC y la base de datos SIT (suministrada con el código). Las simulaciones empiezan en el ciclo 1, siguiendo el esquema de la Fig. 1.

Como ejemplo se presenta la simulación del TCH en una muestra de dacita con alteración clorítica-sericitica, un 9% en peso de pirita, un 0,7% de calcopirita y un 1% de hidróxidos de Fe.

El análisis del lixiviado de cada ciclo del TCH muestra una bajada del pH de 6 a 4 en los primeros 7 ciclos, seguido de una estabilización. A lo largo de los 20 ciclos se libera sulfato, Ca, Na, Mg, K y metales como el Cu, Zn y Fe a la solución.

En base a las concentraciones del agua de poro y los datos de mineralogía y

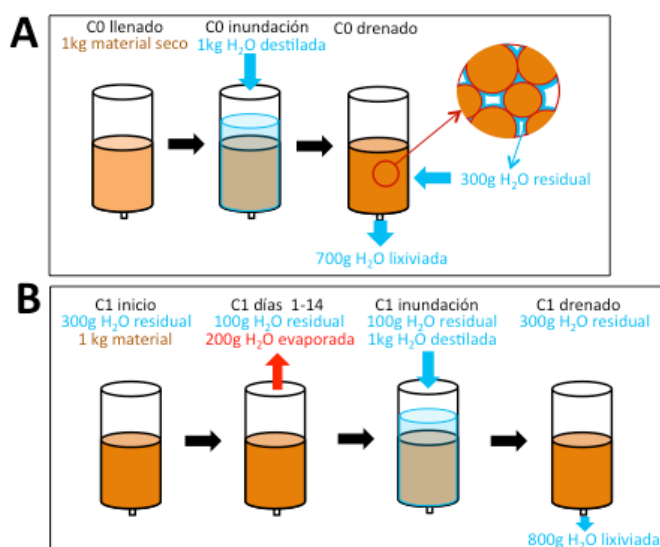


fig 1. Esquema conceptual del funcionamiento de las celdas húmedas. A) Ciclo 0: llenado de la celda con material seco, inundación y drenado. Parte del agua de inundación se queda dentro de la celda como agua residual. B) Ciclo 1 (válido también para el resto de ciclos, excepto el ciclo 0): durante 14 días el agua residual interacciona con el material de las celdas, y parte de esta agua se evapora. Al final del ciclo se realiza una inundación con agua destilada y un drenado. La diferencia entre el agua añadida (1kg) y el agua lixiviada corresponde al peso de agua evaporada.

extracción secuencial (antes y después del experimento) se ha construido un modelo conceptual que se ha implementado en las simulaciones numéricas.

**Procesos geoquímicos.**

El potencial redox se ha considerado en equilibrio con el O<sub>2</sub> atmosférico, tanto en el agua destilada como en el agua de poro de las celdas. Esto es así debido a que estos sistemas se encuentran expuestos al aire en condiciones de no saturación de agua.

En cada ciclo se han simulado una serie de procesos geoquímicos; especiación; precipitación o disolución en equilibrio de ferrihidrita, jarosita y schwertmannita; disolución en cinética de yeso, sericita, plagioclasa, feldespato potásico, biotita y clorita; e intercambio catiónico de K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup> en arcillas y micas. Como condición inicial se considera

que el intercambiador está en equilibrio con el agua del lavado inicial (ciclo 0).

También los hidróxidos de Fe pueden retener metales como el Cu y Zn, sin embargo, se ha simplificado el modelo y sólo se ha implementado la sorción en arcillas y micas, dada la mayor cantidad de estas fases en la muestra, la alta densidad de sitios de intercambio asociados y la efectividad de este proceso en condiciones ácidas.

La base de datos ha sido ampliada con los complejos acuosos y minerales de Cu reportados en Puigdomenech y Taxén (2000) y con las fases esfalerita, calcopirita, feldespato K, clorita, biotita y jarosita (de la base de datos wateq4f) y schwertmannita (Bigham et al., 1996).

**Resultados de la simulación.**

La simulación predice que al final de cada ciclo el pH del agua de poro es más bajo que el medido en el lixiviado

(Fig. 2). El pH está controlado por la oxidación de pirita y la precipitación de fases oxidadas de Fe (ferrihidrita, jarosita y schwertmannita). Estas fases también controlan la concentración de hierro en solución (Fig. 3).

La concentración de azufre calculada en el modelo numérico consigue ajustarse a los resultados analíticos (Fig. 3). El azufre procede en gran parte de la disolución de yeso, pero también hay una contribución de la oxidación de pirita. Una parte vuelve a precipitar en forma de jarosita y/o schwertmannita.

La concentración de K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup> en el agua de poro está controlada por el equilibrio con el intercambiador de las arcillas y micas, a excepción del K, que también es función de la precipitación de jarosita. La fuente de suministro principal de estos cationes es la disolución de yeso, aluminosilicatos y sulfuros. La simulación reproduce bastante bien la concentración recalculada para el agua de poro de la celda (Fig. 3).

**CONCLUSIONES.**

El TCH permite reproducir a pequeña escala y de manera acelerada el comportamiento que pueden tener a largo plazo los materiales depositados en las escombreras.

El TCH es útil para validar el modelo conceptual de los procesos geoquímicos involucrados en la generación de DAR. Una vez validado, los procesos pueden ser implementados en la construcción de modelos de DAR a escala de escombrera.

**REFERENCIAS.**

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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 2111-2121.

Puigdomenech, I., Taxén, C. (2000): Thermodynamic data for copper. Implications for the corrosion of copper under repository conditions. SKB report TR-00-13.

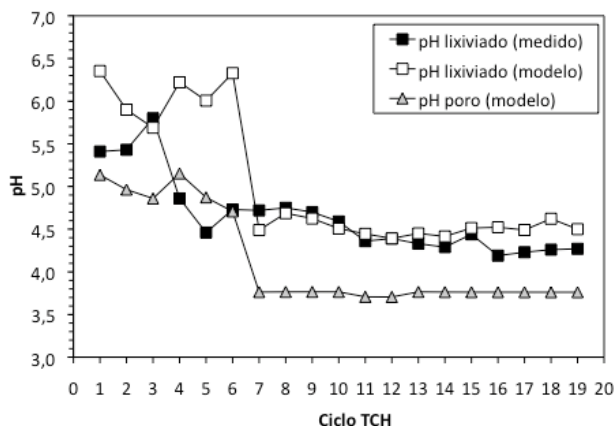


fig 2. Evolución del pH medido en el lixiviado del TCH y el simulado para el lixiviado y el agua de poro al final de cada ciclo.

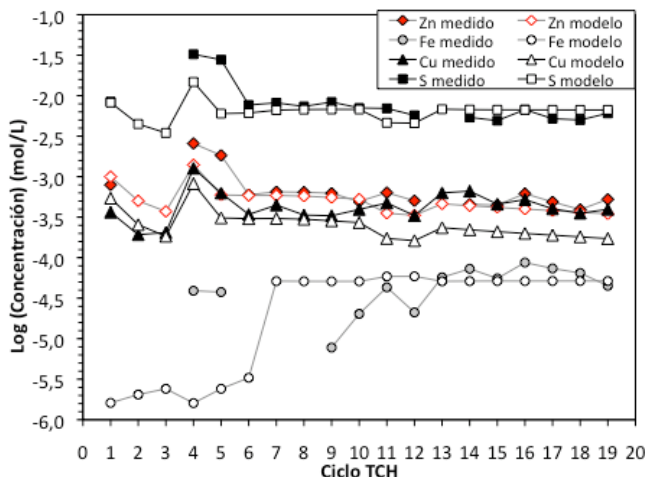


fig 3. Log de la concentración de Zn, Fe, Cu y S recalculada para el agua de poro (medido) y resultados del modelo numérico del TCH (modelo).