

# TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS DE MINA CON RECUPERACION DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONOMICO

Oswaldo Aduvire

SRK Consulting (Peru) S.A. email: [oaduvire@srk.com.pe](mailto:oaduvire@srk.com.pe)

La actividad minería genera un gran volumen de materiales y residuos que deben almacenarse adecuadamente en depósitos de desmontes y relaves denominados botaderos o escombreras y relaveras o presas de relaves, por lo general, estos residuos mineros suelen contener sulfuros que en contacto con la atmósfera y agua inician unos complejos procesos de transformaciones físicas, químicas y biológicas, que dan origen a la generación de drenajes ácidos de mina.

Para hacer frente a esta problemática, en el Area de Geoquímica Ambiental hemos desarrollado varios estudios para diseños de plantas de tratamiento de aguas de mina, en general estas plantas, ya sea de tipo convencional o HDS (Hight Density Sludge), operan a un pH entre 9 a 11 y tienen como proceso principal la neutralización y precipitación, a las que se suelen añadir otros dispositivos de tratamiento secundario ozono, osmosis inversa, intercambio iónico, nano y ultrafiltración entre otros. En ambos casos se genera un volumen de lodos que requieren ser almacenado en un depósito como la relavera, lo que reduce su capacidad de almacenamiento de relaves.

En los últimos años en Perú la legislación ambiental es más exigente, principalmente en cuanto a valores de referencia como Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes generados en operaciones mineras y Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua. Además la población exige el desarrollo de proyectos mineros sostenibles o sustentables con menores consumos de agua, que incluyan metodologías que permitan considerar a los residuos mineros sólidos o líquidos como recursos de segunda generación con posibilidades de

aprovechamiento y recuperación para obtener subproductos con valor económico.

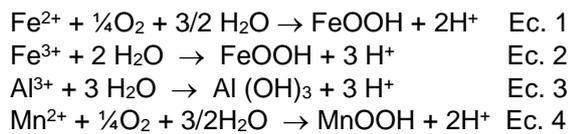


Foto 1. Drenaje ácido generado en una operación minera.

Para tener posibilidades de aprovechamiento de los residuos mineros y reducir las descargas al ambiente, hemos desarrollado sistemas de tratamiento de aguas ácidas que permitan recuperar subproductos que pueden dar un valor económico añadido que le hemos denominado "Tratamiento por Etapas". Esta metodología reduce los costos de tratamiento de las aguas de mina, prolonga la vida de los depósitos de residuos y reduce la descarga de residuos sólidos y líquidos al ambiente.

En el dimensionado de sistemas de tratamiento de agua ácida es fundamental tener una buena caracterización geoquímica del efluente, que va desde el monitoreo en campo empleado equipos portátiles para realizar medidas in situ de caudal, pH, Eh, oxígeno disuelto, conductividad, temperatura, caudal, turbidez, acidez, alcalinidad, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> y Fe total, hasta la toma de muestras de aguas para análisis químicos en concentraciones totales y disueltas.

La caracterización hidrogeoquímica para diseñar la planta de tratamiento debe incluir la acidez total de los efluentes de mina, que considera la acidez protónica debida a los hidrogeniones libres (H<sup>+</sup>) más la acidez metálica debido al contenido de carga metálica presente en el agua, principalmente los contenidos de Fe, Al y Mn, que son considerados elementos ácidos generadores porque mediante oxidación e hidrólisis pueden generar H<sup>+</sup>, según las siguientes reacciones:



Una variable importante en el diseño de la planta de tratamiento es el consumo de material reactivo necesario para alcanzar los rangos de pH en los cuales cada elemento a retirar del agua forma su fase sólida. Para ello se realizan ensayos experimentales de neutralización y precipitación en laboratorio, que luego se ajustan con ensayos a nivel piloto en campo. Esta tasa de consumo experimental junto con las características hidráulicas y geoquímicas ayuda a determinar el tamaño de los dispositivos de tratamiento.

La dosis de consumo de material reactivo obtenida, también determina la secuencia de la operación, los tiempos de tratamiento y el volumen de lodos a generar durante el tratamiento.

### Ensayos de neutralización con recuperación de subproductos.

A continuación se presentan los resultados experimentales para un diseño de planta de tratamiento de aguas ácidas en tres etapas con el fin de obtener subproductos aprovechables que aporten valor económico. En el Cuadro adjunto se muestra la carga metálica mayoritaria y el pH de un drenaje de mina, al que se le ha realizado ensayos de

neutralización por etapas a fin de obtener tres subproductos con altos contenidos de Fe, Al y Zn.

| pH                      | Fe   | Al   | Mn   | Mg   | Pb   | Zn   |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                         | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l |
| Concentraciones Totales |      |      |      |      |      |      |
| 2,9                     | 180  | 90   | 95   | 70   | 5    | 1200 |

En las Figuras 1 y 2 se pueden observar las curvas de consumo de cal y de la evolución del redox durante el proceso de neutralización (curva pH-Eh). Notándose claramente las zonas de hidrólisis o tamponamiento en la curva de consumo de cal (acidez equivalente), indicada por el pH y los cambios de la pendiente de la curva, de donde se deduce la cantidad de cal que se necesita para retirar del agua los contenidos de Fe, Al y Zn en forma de fases sólidas.

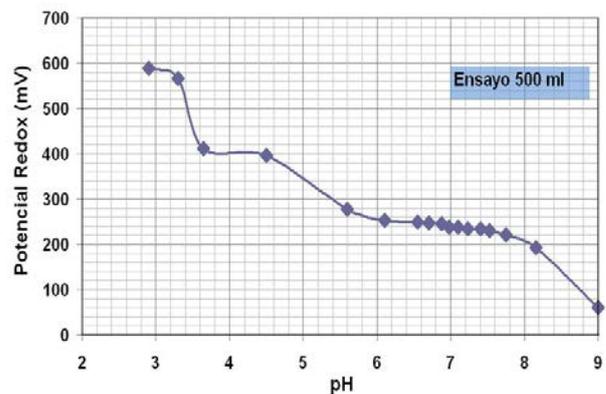


Figura 1. Evolución del Eh en un ensayo por etapas.

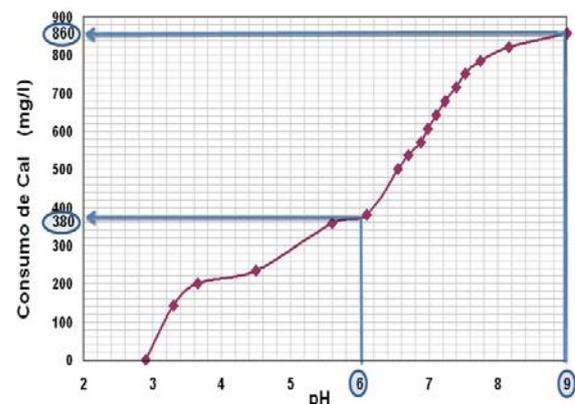


Figura 2. Consumo de cal y rangos de pH de las zonas de hidrólisis.

En la Foto 2 se muestra los lodos obtenidos en un ensayo de neutralización de tres etapas: en la primera etapa se ha alcanzado el pH 4 y se

retiraron lodos de color ocre naranja (M-1) que corresponderían a hidróxidos de Fe principalmente, en la segunda etapa se continúa con el proceso de neutralización hasta alcanzar el pH 5,5 en donde se obtuvieron lodos de color blanquecino (M-2) correspondiente a los hidróxidos de Al mayoritariamente, y finalmente en la tercera etapa de tratamiento el pH alcanza valores superiores a 8,5 en donde se ha recuperado un lodo marrón oscuro a negro (M-3) que correspondería a las fases sólidas de Zn como compuesto mayoritario y en menor proporción al resto de elementos como Mn, Mg, Pb presentes en el agua de mina.

Si no se retiran los lodos de Fe y Al del proceso de tratamiento, a pH superiores al rango de movilización de estos elementos 4 y 5,5 respectivamente, estas fases sólidas formadas se redissuelven y pasan nuevamente al agua, por lo que se requeriría añadir mayor cantidad de material alcalino (cal) para hacer que formen nuevamente fases sólidas (pH 9) y poder retirarlas del agua, lo que hace que en el proceso incrementa el consumo de cal, además de requerir añadir otros reactivos denominados floculantes, coagulantes y otros que ayudan a formar fases sólidas, esto incrementa el número de dispositivos de tratamiento en la planta haciendo que el tratamiento de las aguas ácidas de mina sea más alto.

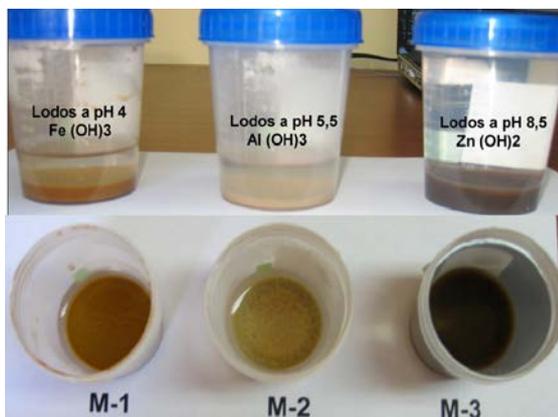


Foto 2. Fases sólidas obtenidas en un ensayo secuencial por etapas.

Los lodos obtenidos en el tratamiento del agua de mina mediante un sistema de 3 etapas, podrían tener las siguientes aplicaciones: el lodo con contenido de Fe (M-1) se podría aprovechar como pigmento de cerámicas, el lodo con aluminio (M-2) se emplearía en los trabajos de voladura en la misma mina mejorando los explosivos, y el lodo al alto

contenido de Zn (M-3) serviría para obtener un concentrado de zinc.

Al aplicar sistemas de tratamiento de aguas ácidas por etapas, permite obtener lodos con características similares y bien definidas con posibilidades de recuperar metales de los lodos generados en los procesos de tratamiento.

El agua del proceso de tratamiento se puede descargar a un curso receptor, previo control de su calidad a fin de no causar un impacto ambiental o su alteración. Los lodos que no tengan interés de recuperación se almacenarán en depósitos adecuados para ello o enviados al depósito de relaves.

## CONCLUSIONES

Caracterizar las aguas ácidas de mina en función a la acidez ayuda a estudiar las posibilidades de recuperación de subproductos con valor económico y a elegir el sistema de tratamiento más idóneo y eficiente, porque además de la acidez protónica se incluye la acidez mineral, aspecto que por lo general no se considera en los métodos clásicos de caracterización.

El dimensionado del sistema de tratamiento para aguas ácidas basado en el contenido de acidez y por etapas, por un lado, permite aprovechar mejor los recursos gastando menos cal en el proceso de neutralización, y por otro, permite recuperar metales de los lodos del proceso. Esto hace que los tratamientos de aguas ácidas sean más eficientes, de menor costo y de mayor control ambiental.

## REFERENCIAS.

1. Aduvire, O. y Aduvire, H. 2005. Aguas ácidas de mina: caracterización, mineralogía y microbiología. *Ingeopres* 141, pp. 52-62.
2. Bigham, J.M., Schwertmann, U., Carlson, L. and Murad, E. 1990. A poorly crystalized oxyhydroxysulfate of iron formed by bacterial oxidation of Fe(II) in AMD. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 54, 2743-2754.
3. Bigham, J.M. and Nordstrom, D.K. 2000. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. En: Alpers, C.N., Jambor, J.L. y Nordstrom, D.K. (eds),

*Sulfate minerals: crystallography, geochemistry and environmental significance. Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, MSA, Virginia, USA. (40), 350-403.

4. Hammarstrom, J.M., Seal II, R., Meier, A. and Kornfeld, J. 2005. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the Eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology* 215, pp. 407-431.
5. Jönsson, J., Jönsson, J. and Lövgren, L. 2006. Precipitation of secondary Fe(III) minerals from acid mine drainage. *Applied Geochemistry* 21, pp. 437-445.
6. Stumm, W. and Morgan, J. 1981. *Aquatic chemistry*. Wiley Interscience. 470pp.
7. Walton, K. 1992. Microbiological and chemical characteristics of a stream draining a disused copper mine. *Environmental Pollution*, 76, 169-175.