

## **Mejores Técnicas Disponibles en la Caracterización y Tratamiento de Efluentes Ácidos de Mina**

**Oswaldo Aduvire** <sup>1,2</sup>

1. *Doctor Ing. de Minas. Consultor Principal del Area de Geoambiente. SRK Consulting Peru S.A*
2. *Profesor de la Sección Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).*

### **RESUMEN**

Considerando que una adecuada caracterización de los drenajes generados en las operaciones mineras permite realizar una correcta selección de su sistema de tratamiento. Es muy importante emplear las mejores técnicas disponibles (MTD) para desarrollar metodologías de caracterización y tratamiento de las aguas ácidas de mina, como la acidez total, que incluye además de la acidez protónica la acidez mineral, a los que se acompañan ensayos de neutralización y precipitación que promueven la formación de procesos físicos y químicos que modifican las condiciones de Eh y pH de las descargas, favoreciendo la formación de especies insolubles y la remoción de la carga metálica disuelta en las aguas.

En estos ensayos de caracterización de aguas ácidas sobresalen la determinación de las zonas de hidrólisis y la formación de fases sólidas iniciales de hierro y aluminio que precipitan como hidróxidos, oxihidroxidos o hidrosulfatos a valores de pH entre 2.7 y 6, que inducen la adsorción y coprecipitación de metales aun disueltos como zinc, cadmio, manganeso y otros. Si se continua con los ensayos a valores de pH entre 6 a 11 se continúan identificando el resto de zonas de hidrólisis de los demás constituyentes disueltos en el agua, aspecto que va unido a los rangos de pH-Eh en los que puede retirar la carga metálica presente en los efluentes.

Esta metodología de caracterización hidrogeoquímica basado en la estimación de la acidez total y la determinación de las zonas de hidrólisis permite dimensionar sistemas de tratamiento de aguas de mina más eficientes denominados directos y por etapas, que inducen a un menor consumo de reactivos y mejor control ambiental. En el caso de procesos de neutralización por etapas se va retirando secuencialmente los lodos o sólidos generados en cada etapa, a fin evitar la redisolución de las fases sólidas, potenciar la eficiencia del sistema de tratamiento y reducir los costos y el consumo de reactivos.

En este trabajo se hace un recuento de las técnicas de caracterización geoquímica de efluentes que han ayudado a desarrollar sistemas de tratamiento más eficientes y que hacen posible que las descargas a cuerpo receptor cumplan con los requerimientos legales vigentes exigibles por la legislación minero-ambiental en el caso de Perú.

\*Autor corresponsal: Unidad de Geoambiente, SRK Consulting (Peru) S.A.,

Cargo: Practice Leader.

Email: [oaduvire@srk.com.pe](mailto:oaduvire@srk.com.pe)

## INTRODUCCION

El desarrollo de proyectos mineros sostenibles implica poner en marcha procesos más limpios aplicando las mejores técnicas disponibles (MTD), con mayor control ambiental y descargas de efluentes que no alteren los ecosistemas acuáticos y terrestres del entorno.

Para ello, se requiere implementar sistemas de tratamiento cuyo dimensionado se ajuste a la caracterización hidrogeoquímica de los efluentes generados en la operación minera.

En las operaciones mineras el problema de las aguas ácidas se soluciona mediante el tratamiento en plantas de neutralización-precipitación al que se le añaden una serie de dispositivos adicionales como ultrafiltración, intercambio iónico, osmosis inversa y otras, lo que hace una solución costosa y que genera grandes volúmenes de lodos que requieren almacenarse en depósitos diseñados para tal fin.

## METODOLOGIA PARA LA CARACTERIZACION DE EFLUENTES

La caracterización geoquímica del efluente se realiza mediante mediciones directas de parámetros fisicoquímicos y la determinación del contenido de metales totales y disueltos. Seguido de una serie de ensayos de neutralización y precipitación para determinar las zonas de hidrólisis o tamponamiento inducidas por las concentraciones presentes en los efluentes de mina.

Para el levantamiento de data en campo se emplean equipos portátiles para realizar medidas in situ de pH, Eh, oxígeno disuelto, conductividad, temperatura, caudal, turbidez, acidez, alcalinidad,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  y Fe total, con equipos como: pHmetro, conductivímetro, oxímetro, equipo portátil de filtrado (Millipore), sonda multiparamétrica, además de realizar la toma de muestras de agua con miras a la etapa de experimentación. Para análisis de concentraciones totales y disueltas, se toman muestras de agua sin filtrar y filtradas a 0,45 micras, se preservan con  $HNO_3$  hasta  $pH < 2$  y refrigeran hasta  $4\text{ }^{\circ}C$  para su transporte a laboratorios registrados, siguiendo estándares de muestreo.

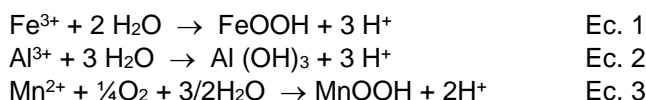


## CARACTERIZACION DE EFLUENTES MINEROS

La formación de efluentes ácidos tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana. Los principales elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y como elemento catalizador las bacterias.

En general, las aguas ácidas de mina (AMD) tienen pH entre 2 a 6, contienen cationes y aniones en disolución, predominando SO<sub>4</sub>, Fe, Mn, Al, Cu, Pb, Zn, además de Cd, Ca, Na, K, Mg y otros. Por lo general, las aguas ácidas de mina pueden degradar hábitats acuáticos y cambiar la calidad de las aguas debido a su toxicidad, corrosión y otros efectos producidos por la disolución de sus constituyentes.

Por ello, la caracterización de los efluentes de mina en función a la acidez incluye la acidez protónica debida a los hidrogeniones libres (H<sup>+</sup>) y la acidez mineral debido principalmente a las concentraciones presentes (Fe, Al, Mn, otros). Estos metales son considerados ácidos generadores porque mediante oxidación e hidrólisis pueden generar H<sup>+</sup>, según las siguientes reacciones:



La hidrólisis del Fe<sup>3+</sup> se produce fundamentalmente a pH 2,7 - 4,8 y precipita en forma de hidróxido férrico, generando 3 moles de acidez (Ec.1). A pH bajo el ratio de oxidación de la pirita es controlado por la concentración de Fe<sup>3+</sup> porque interactúa con las superficies reactivas de los sulfuros con mayor eficacia que el oxígeno.

La Ec.2 representa la hidrólisis del Al<sup>3+</sup>, que al pasar a fase sólida aporta acidez al sistema, de forma similar al ion férrico, que mediante procesos de oxidación e hidrólisis, puede precipitar en forma de óxidos, hidróxidos, oxihidróxidos o hidroxisulfatos.

Estos metales de valencia III (Al<sup>3+</sup> o Fe<sup>3+</sup>) son muy poco solubles bajo condiciones de pH neutro, sin embargo la movilidad de estos metales precipita en fases sólidas, tanto oxidantes (óxidos e hidróxidos) como reductoras (carbonatos y sulfatos). Por tanto, la solubilidad cumple un rol importante en la movilización de elementos presentes en el agua, induciendo a su movilidad en forma de catión, anión o complejo disuelto.

Por ello, para ajustar la eficiencia del sistema de tratamiento, es recomendable determinar las zonas de hidrólisis, como las que se observan en la Figura 1.

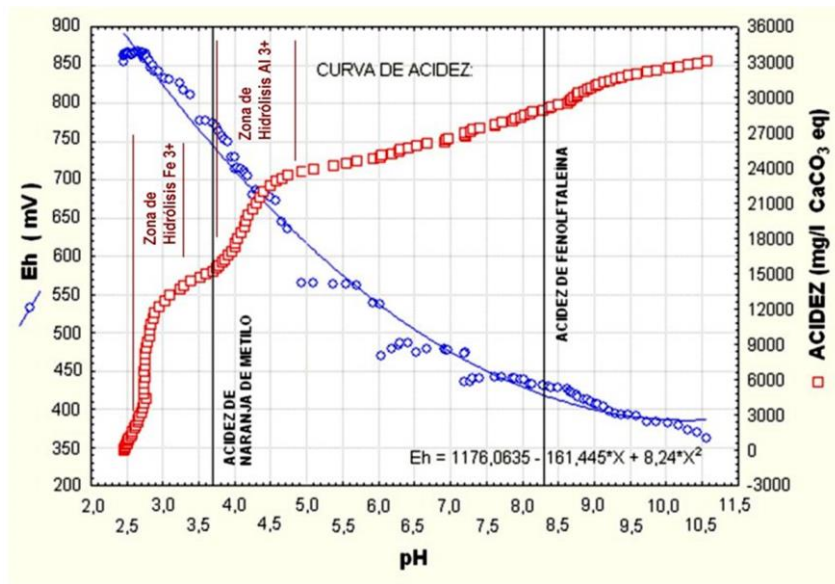


Figura 1. Zonas de hidrólisis en una curva de acidez en función al pH de un efluente de mina.

Por lo general, en medios ácidos el  $\text{Fe}^{3+}$  forma fases sólidas que si no se les retira del proceso de tratamiento a pH mayor a 5 se redisuelven y pasan nuevamente a la fase líquida. De igual forma la movilización y redisolución de las fases sólidas del Aluminio (hidróxidos de aluminio) formadas en los procesos de neutralización se produce generalmente en rangos de pH de 3,7 y 5,8 y si no se les retira del tratamiento a pH mayor a 6 se redisuelven y pasan nuevamente a la fase líquida, en ambos casos esto incrementa los costos de tratamiento y el volumen de lodos, además de reducir la efectividad del tratamiento.

## DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Con los resultados obtenidos en las curvas experimentales de los ensayos de neutralización y precipitación en donde se han identificado las zonas de hidrólisis y estimado los consumos de reactivos, floculantes y otros, se eligen las secuencias o etapas del sistema de tratamiento. Para el diseño, por lo general se suelen realizar varios ensayos, considerando muestras independientes y mezclas representativas en las mismas las proporciones presentes en los drenajes de mina, por tanto, se obtienen numerosas curvas de acidez o dosificación en donde se detectan las zonas de hidrólisis o tamponamiento principalmente de los elementos Fe, Al, Mn y otros con presencia significativa, identificando de esta forma los tramos de las curvas en donde se formarían las fases sólidas (hidróxidos, hidroxisulfatos y otros), condición básica en donde se puede realizar el retiro de la carga metálica mediante separación sólido-líquida.

La realización de los ensayos de neutralización y precipitación deben cumplir estándares de calidad para asegurar la originalidad y representatividad de las muestras de agua de mina recolectadas en campo, finalizada la etapa de laboratorio se pasa a realizar pilotajes en campo.

Finalmente el sistema de tratamiento se dimensiona considerando los resultados de los ensayos y el pilotaje con los que se logra cumplir con los Límites Máximos Permisibles (LMP) contemplados en la legislación vigente, entendiendo LMP como la concentración o contenido de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente, que al ser excedido causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

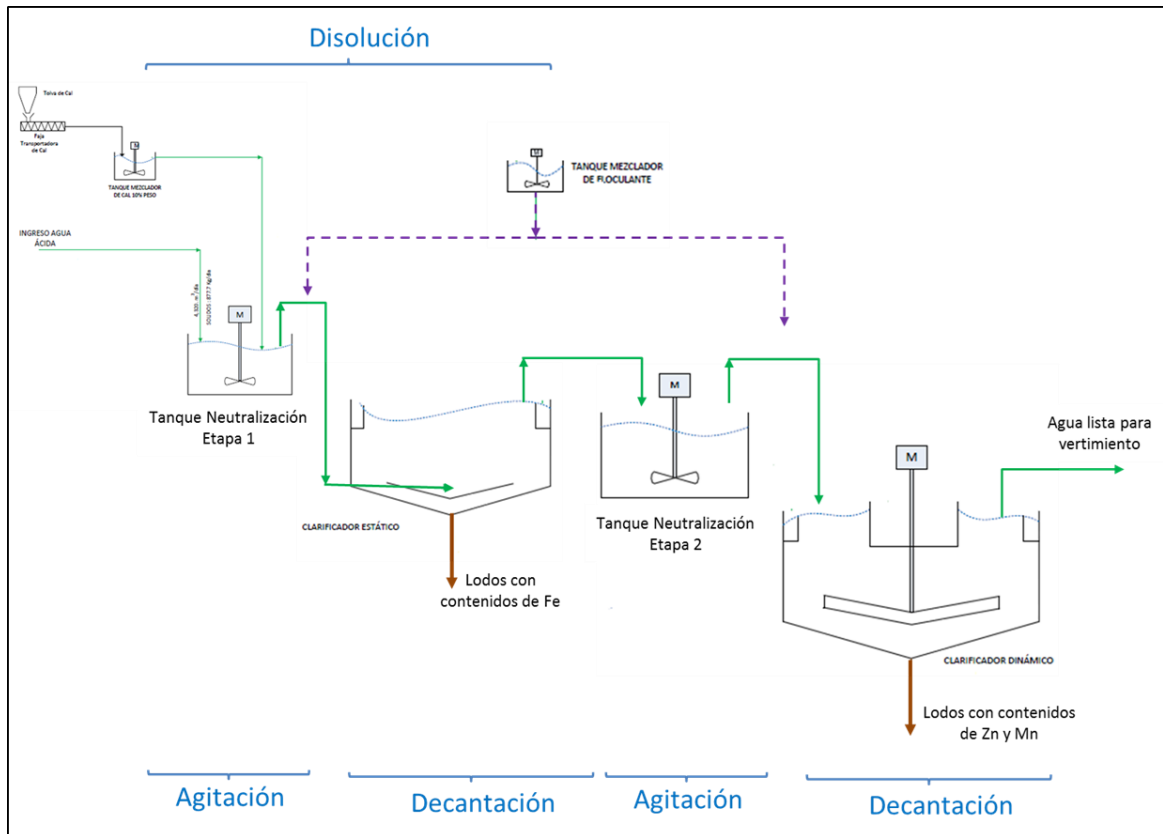


Figura 2. Diseño de una planta de tratamiento de aguas ácidas por etapas.

En el caso de Perú, los LMP para efluentes tratados que proceden de instalaciones minero-metalúrgicas nuevas o en operación están contemplados en el D.S. 010-2010-MINAM y su cumplimiento es exigible legalmente por las respectivas autoridades competentes. Para ello se fijan puntos de control antes de la descarga a cuerpo receptor en donde se mide concentraciones totales y disueltas de los parámetros regulados, el volumen de descarga y la frecuencia del monitoreo.