

VULNERABILIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA AFRENTE A LA ACTIVIDAD MINERA Y PREVENCIÓN DE LA GENERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA

GROUNDWATER VULNERABILITY IN MINING ACTIVITY AND PREVENTION OF ACID WATER GENERATION

Jorge A. Tovar PACHECO ¹

SUMMARY

The water is the main element in the mine acid water generation, in the presence of air and bacterium acts as reactive in the pyrite oxidation, which is found as well in the mineral as in the confined rock. Is frequently that the waste rock material, careless of economical mineral, compounded by important percentages of iron sulfides like pyrite. This waste rock is usually accumulated in adits and waste dams, and is the main component of the tailings. In many cases, the cavities left by the underground mining or at open pits are filled up with waste rock or tailings, material that due to its pyrite content facilitates the acid water generation. In order to control the acid water generation in the mines, it is almost impossible to eradicate the pyrite, for this reason is preferable to manage the air and water to the mining workings, and the problem can be reduced drastically. Preventive techniques in water manage exist, which are referred as follows:

- Surface and groundwater derivation.
- Sealed with clay, landfill compaction and waterproofing of the tailings and dump surface.
- Cover handling and limestone beds placement.
- Bacterial inhibition through bacterial, anionics detergents, preservative organic substances and alkaline injection.

The environmental impact caused by the acid water discharge to the hydrographic ecosystem is diverse. They can cause aesthetic and recreational impacts to the fluvial system, the potable and industrial water degradation, or the slow poisoning of lakes.

RESUMEN

El agua es el elemento fundamental en la formación de aguas ácidas de mina, en presencia de aire y bacterias, actúa como reactivo en la oxidación de la pirita, la cual se encuentra tanto en el mineral, como en la roca encajonante. Es muy frecuente que el material de desmonte, carente de mineral económico, esté compuesto por importantes porcentajes de sulfuros de hierro como la pirita. Este desmonte generalmente es acumulado en las bocaminas y botaderos, y es además el principal constituyente de los relaves.

En muchos casos, las cavidades dejadas por el minado subterráneo o a tajo abierto son rellenadas con desmonte o con relave, material que debido a su contenido piritoso facilita la generación de aguas ácidas.

Para controlar la generación de aguas ácidas en las minas, es casi imposible erradicar la pirita, por lo que es preferible manejar el ingreso de agua y aire a las labores mineras, con lo cual puede reducirse drásticamente el problema. Existen técnicas preventivas basadas principalmente en el manejo del agua, las cuales están referidas a lo siguiente:

- Desvío de aguas superficiales y subterráneas.
- Sellado con arcilla, compactación del relleno e impermeabilización de la superficie de escombreras y relaveras.
- Manipulación de la cobertura y colocación de lechos de caliza.
- Inhibición bacteriana mediante bacterias, detergentes aniónicos, sustancias orgánicas conservantes, e inyección alcalina.

¹ Hydro-Geo Ingeniería S.A.C. Av. Central 671 Of. 702. Lima 27, Perú. Telefax: + 51 1 222-1970; e.mail: jtovar@trc.com.pe

El impacto ambiental ocasionado por la descarga de aguas ácidas al ecosistema hidrográfico es diverso. Pueden causar impactos estéticos y recreacionales al sistema fluvial, la degradación de aguas potables e industriales, o el envenenamiento lento de lagos.

Este artículo es un compendio bibliográfico de distintos documentos y que ha sido parcialmente adaptado por el autor a la minería peruana.

ORIGEN Y GENERALIDADES

Aunque se sabe, que los elementos esenciales para la formación del agua ácida de mina son el agua, el aire, las bacterias y la piritita, no existe todavía ningún método estandarizado para reducir la producción de estos efluentes ácidos de mina.

El agua es el elemento fundamental en la formación de aguas ácidas de mina. Actúa como reactivo en la oxidación de la piritita, como medio en el cual se desarrollan las reacciones, y como elemento de transporte de los productos formados. La piritita puede encontrarse tanto en el mineral como, en la roca encajonante.

El problema de contaminación queda planteado cuando las aguas de mina tienen acceso directo a sistemas hidrológicos superficiales o a sistemas acuíferos subterráneos susceptibles de utilización.

Antes de desarrollarse las actividades mineras en un determinado lugar, es muy reducida la cantidad de piritita expuesta a las condiciones bajo las cuales se producen aguas ácidas. Las operaciones de minería implican la exposición de la piritita a la acción de aguas superficiales o subterráneas, y permiten su oxidación.

Los sulfuros se oxidan a sulfatos de hierro solubles, en la superficie de las rocas meteorizadas, los cuales forman costras salinas, ocre-amarillentas, que serán disueltas e hidrolizadas por aguas de lluvia, generando aguas ácidas.

El primer paso de la reacción libera ión ferroso, que se oxida a férrico y forma oxihidróxidos, los cuales dan el color ocre-amarillento característico de esta agua de mina. Estos precipitados de hidróxido de hierro, constituyen los llamados "yellow boy", frecuentes en los arroyos de muchas minas de carbón. Una tonelada de carbón, que contenga un 1% de azufre pirítico, puede producir, potencialmente, 15 kg de "yellow boy" y 25 kg de ácido sulfúrico. El ritmo de producción ácida es muy variable, y se ha comprobado que algunas minas y escombreras, abandonadas, pueden producir aguas ácidas durante más de cincuenta años.

Con algo más de detalle, el mecanismo de degradación de la calidad del agua, es el siguiente:

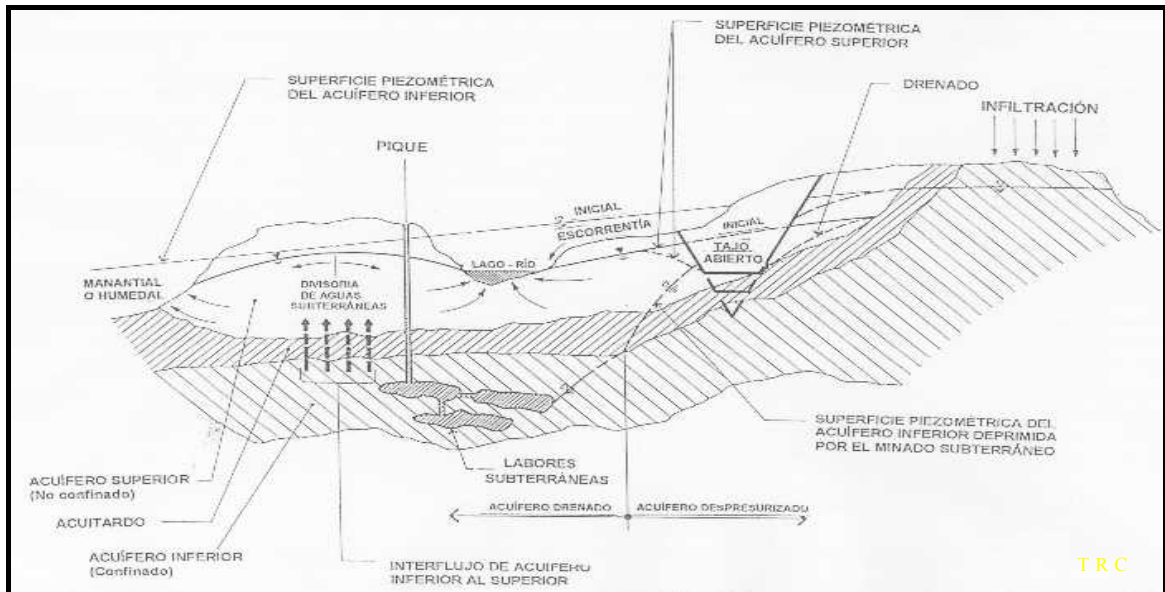
- Oxidación de la piritita, al existir condiciones aerobias, y una vez que las labores mineras han alcanzado la mineralización.
- Oxidación de los otros sulfuros, menos oxidables, por la acción de las aguas ácidas que ha producido la piritita.
- Lixiviación de arcillas, carbonatos y feldespatos, por las aguas ácidas formadas.
- Deposición de los iones disueltos, formando costras y masas de sulfato. Se ha comprobado la presencia de sulfatos de magnesio (epsomita), calcio (yeso), hierro (melanterita), y otros.
- Disolución de los sulfatos, una vez que el drenaje ha dejado de actuar y el agua subterránea circula de nuevo por la roca. En este momento el agua se contamina.

El resultado es que las aguas adquieren bajo pH y altas concentraciones de sulfatos, cationes alcalinos, y metales pesados y de transición.

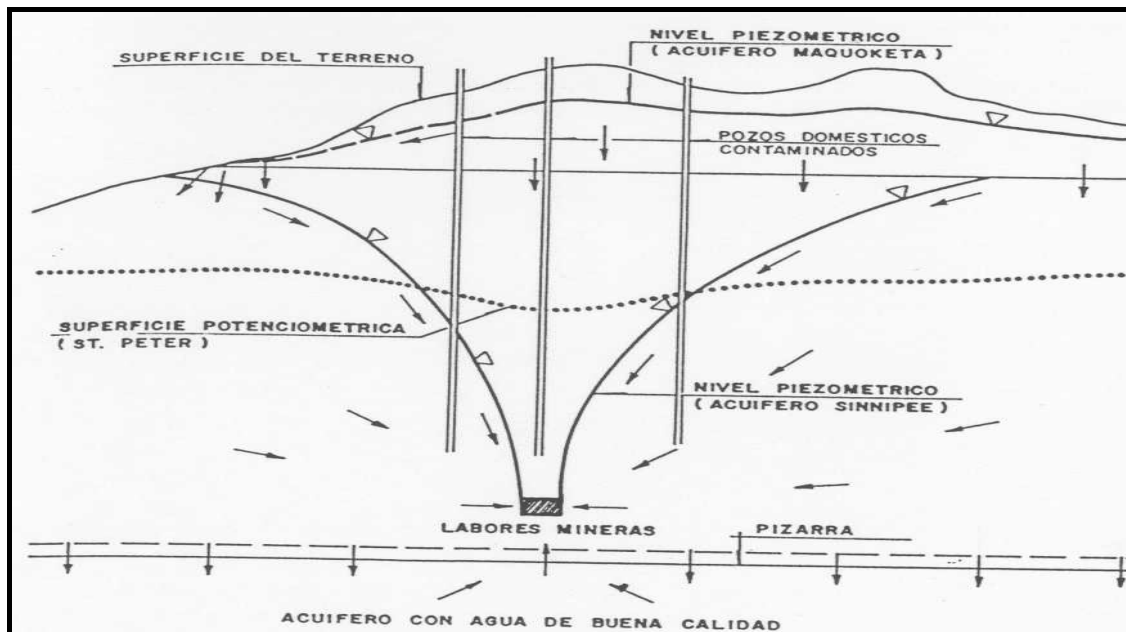
Sin embargo, existen aguas contaminadas que no son ácidas. Esto se explica por la acción neutralizadora de dolomías o de rocas carbonatadas, en general, en las que se desarrolle la mineralización o que el agua ácida encuentre en su fluir subterráneo (este es el caso de algunas minas, de sulfuros complejos, en rocas carbonatadas). El elevado contenido del agua en calcio y magnesio demuestra que, efectivamente, la dolomía se disuelve para neutralizar el pH. Además de la dureza, el agua presenta contenidos altos en sulfatos, así como en algunos metales pesados, que con este pH no han precipitado aún.

La calidad y cantidad de agua ácida que se produce, en los desechos piríticos, depende de diversos factores:

- La cantidad de piritita presente y el tamaño de los granos en los que se presenta.
- La profundidad de penetración del oxígeno.
- La humedad.
- La temperatura.
- Las características hidrogeológicas del lugar.
- La presencia de bacterias que oxidan a la piritita.



Agua subterránea afectada por la minería



Tras el abandono de una mina subterránea, el cono de depresión desaparece y el agua invade las áreas con sulfuros

MINERIA PRODUCTORA DE AGUAS ACIDAS

Minería de la Pirita

En una primera apreciación, simplista, podría pensarse que las aguas ácidas de mina vienen asociadas a las exploraciones de pirita, sólo y exclusivamente, pero la realidad es otra. En efecto, la extensión de este problema radica en que, si bien es cierta esta producción en la minería de piritas, son muchas otras las explotaciones mineras que presentan este grave problema.

En cuanto a la piritita se refiere se debe resaltar que son innumerables las minas abandonadas, las cuales son fuentes productoras de aguas ácidas, que afectan tanto a los sistemas acuíferos subterráneos, como a la escorrentía superficial y, por supuesto, mucho más por la cantidad de pilas de estériles acumulados, sujetos a la lixiviación por las aguas meteóricas, que por la propia explotación minera.

Estas acumulaciones son comunes en minas en que se han incrementado los volúmenes de estériles, tanto por la necesidad

de explotar sectores más profundos (con mayor ratio estéril/mineral), como por la necesidad de conseguir mayor movimiento de rocas (para hacer rentables explotaciones de yacimientos de baja ley).

Este panorama real hace que sea inviable el llegar a pensar que, por ejemplo, una corriente de agua superficial como el Río Tinto, deje de ser un curso de agua ácida, con toda la secuela contaminante que ello supone. No obstante, el esfuerzo que ya están realizando, por las empresas mineras, si se aplican a él los más recientes avances tecnológicos en este campo, se debiera lograr que el problema no se acreciente, sino que permanezca circunscrito al estado actual y que, incluso, se pueda reducir sin dejar una triste herencia a las generaciones futuras.

La piritita en general, no es el único sulfuro que da lugar a este proceso. También lo es la marcasita, presente en muchos yacimientos que contribuye de manera decisiva, a la generación de aguas ácidas.

Minería de Sulfuros Complejos

Llegado a este punto, los minerales productores de aguas ácidas están prácticamente omnipresentes en muchos otros yacimientos muy diversos, tanto por su contenido mineral como por su génesis.

En gran parte de la minería de sulfuros complejos, en los que la asociación BPG (blenda-piritita-galena) es la más frecuente, los yacimientos tienen extensión más generalizada. Igualmente, en minas abandonadas y en yacimientos en explotación, donde el importante movimiento de rocas supone un gran desarrollo de huecos mineros y de pilas, con lo que se dan condiciones favorables para la afección a las aguas subterráneas y a las superficiales.

En este dominio se ha hecho poco, en general, aunque con honrosas excepciones, e incluso, a veces, se han aplicado "soluciones" totalmente inadecuadas, como es la ubicación de estériles en depresiones kársticas, o el relleno de minas con introducción de rechazos de lavadero en proceso de oxidación. Por otra parte, en este grupo de yacimientos, si bien puede no ser la piritita el mineral mayoritario, es verdad el que, en muchas ocasiones, ha tenido y tiene condición de rechazo, por lo que ha ido a apilarse con los desechos de mina.

Si bien una serie de estos yacimientos están en contacto con formaciones carbonatadas, las cuales pueden neutralizar la acidez de las aguas, esto no tiene lugar sin un incremento de su contenido iónico en sulfatos, bicarbonatos, calcio y magnesio.

Minería del Carbón

La propia génesis de formación de los yacimientos de antracita, hulla, lignito y turba está relacionada con ambientes sedimentarios y con procesos de reducción, muy favorables para el desarrollo de sulfuros de hierro. Esto ocurre tanto en los propios niveles carbonosos como en la roca de caja.

TECNICAS DE CONTROL DE LAS AGUAS ACIDAS DE MINA

Técnicas Preventivas

Técnicas preventivas son aquellas cuyo objetivo es evitar que la mina abandonada produzca un efluente ácido. Técnicas correctoras, por el contrario, son las diseñadas para tratar las aguas ácidas que produce una mina, de modo que dejen de ser una amenaza para el medio ambiente.

Se comprende fácilmente que, en la planificación del abandono de una mina, debe darse prioridad a las técnicas preventivas, cuya aplicación sea posible. La utilización de técnicas correctoras, a minas abandonadas, está justificada sólo en los casos más graves e imprevistos de contaminación por aguas ácidas.

Las técnicas preventivas, actúan sobre alguno de los tres factores que deben concurrir para que se formen aguas ácidas: oxígeno, agua y la presencia de Thiobacillus ferrooxidans. Se da por hecho que no se puede actuar sobre la cantidad o tamaño de grano, del sulfuro presente en la roca. Las técnicas que actúan sobre el Thiobacillus ferrooxidans son muy recientes y, aplicables sólo a minas a cielo abierto.

Por otra parte, existe gran diferencia entre las medidas preventivas que pueden aplicarse a minas subterráneas y las específicas para minas a cielo abierto, por lo que abordamos su estudio separadamente.

Técnicas Preventivas Aplicables a Minería Subterránea

Las técnicas preventivas, aplicables a minas subterráneas, son de dos tipos:

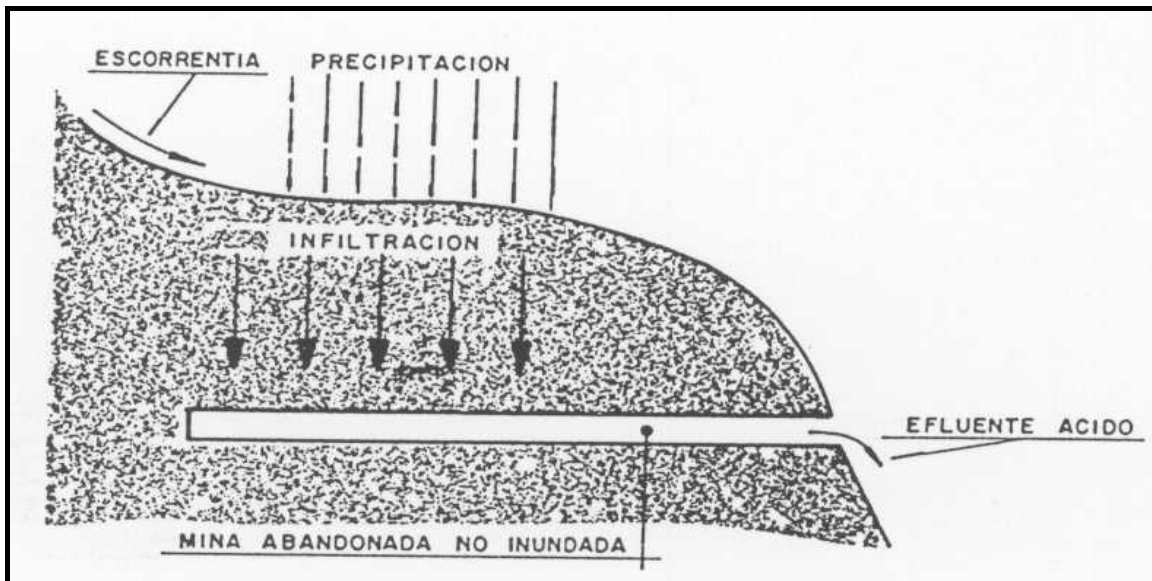
- Las que pretenden reducir el nivel de oxígeno en la mina a niveles tan bajos que impidan la oxidación de los sulfuros (son las técnicas de inundación).
- Las que limitan la cantidad de agua existente en la mina, de tal manera, que si bien se produce oxidación de los sulfuros, el caudal de aguas ácidas llega a ser tan pequeño que no plantea problemas ambientales (son las técnicas de impermeabilización y de aislamiento hidrológico de minas).

Se han producido, en el pasado, algunos casos de minas subterráneas abandonadas, que han contaminado acuíferos abastecedores de aguas potables. La solución más elemental al problema, que no es propiamente preventiva ni correctora, consiste en realizar nuevas captaciones, en un acuífero más profundo no contaminado.

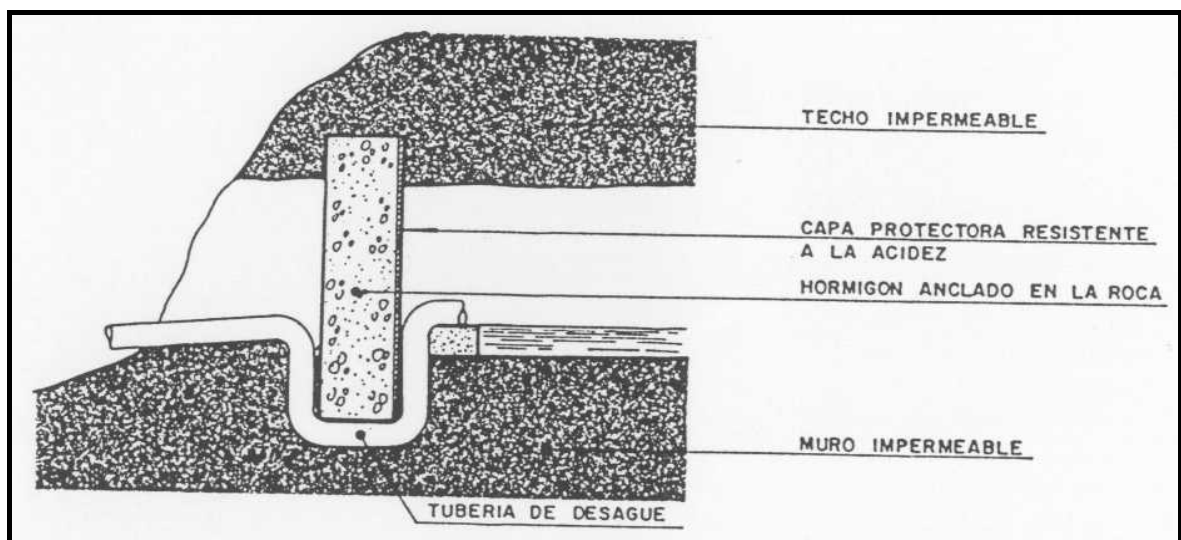
Con independencia de la tecnología escogida, para evitar la formación de aguas ácidas en minas abandonadas, es imprescindible, en un proyecto de este tipo,

realizar previamente un estudio hidrogeológico minero de detalle, que incluya los siguientes aspectos:

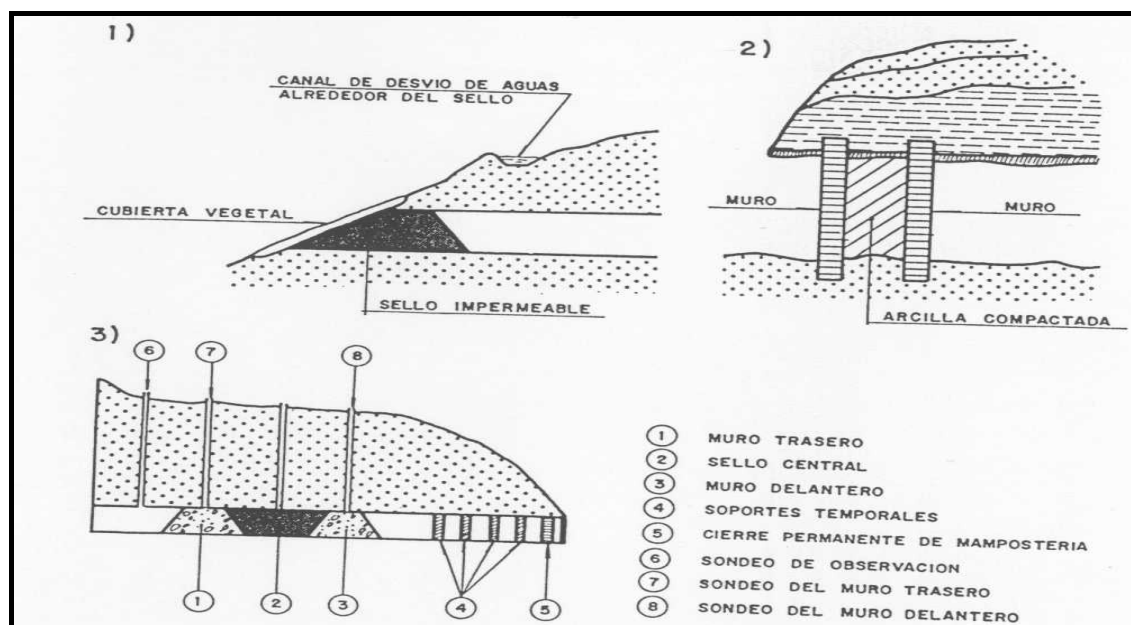
- Localización de las áreas de recarga y de las vías de flujo hacia la mina.
- Identificación de los sectores de la mina en los que se producen aguas ácidas.
- Estimación de los caudales de agua que circularán por la mina.
- Determinación de las variaciones laterales de la calidad del agua.



El rediseño de la superficie puede contribuir eficazmente a reducir la infiltración de aguas superficiales en una mina abandonada



Modelo de cierre de mina que impide la entrada de aire y permite el desagüe de la mina



Tres tipos de cierre de mina impermeables tanto para el aire como para el agua

Técnicas Preventivas Aplicables a Minas a Cielo Abierto

Se denomina "restitución" ("reclamation"), al conjunto de labores que se realizan en terrenos gravemente afectados por las explotaciones mineras, con objeto de que sus características agronómicas, hidrogeológicas, paisajísticas y de todo tipo vuelvan a ser, como mínimo, igual a las originales.

Las técnicas convencionales de restitución están orientadas, fundamentalmente, a regenerar agronómicamente los terrenos. Para conseguirlo se suele añadir, superficialmente, cierta cantidad de caliza. Este aditivo, unido a la presencia de una capa vegetal, que consume oxígeno y tiende a generar un ambiente reductor en superficie, explica el que, en algunos casos, se consiga evitar la formación de aguas ácidas, sin aplicar técnicas de restitución específicamente orientadas hacia este fin.

En el caso de una mina de transferencia, en la cual se va realizando la restitución convencional de los terrenos a medida que la explotación concluye en ellos, en el estéril apilado no se efectúa ningún tipo de diferenciación entre materiales piríticos y alcalinos. Sin embargo, existe gran cantidad de minas en las cuales, debido a sus características geológicas, hidrológicas o topográficas, es necesario realizar labores específicas de restitución, diseñadas para evitar que se formen aguas ácidas, que representen una amenaza para la calidad de las aguas superficiales o subterráneas.

Existe una amplia bibliografía referente a minas abandonadas cuyas escombreras,

productoras de aguas ácidas, han sido restituidas según el método convencional, que comprende las siguientes operaciones:

- Explanación y compactación.
- Distribución de una capa de caliza triturada.
- Distribución de una capa de suelo vegetal.
- Abonado.
- Siembra de especies resistentes a la acidez.

En los casos de algunas minas abandonadas, en las que se produjo el empeoramiento de la calidad del agua tras la restitución, seguido de un período de lenta y progresiva mejoría, el efecto de las técnicas tradicionales de restitución fue el contrario. Tras un breve período de mejora, la calidad del agua empeoró luego progresivamente y, en la actualidad, las escombreras restituidas siguen produciendo aguas ácidas de muy mala calidad. De lo anterior se desprenden dos conclusiones:

- Los métodos de restitución, empleados actualmente y en el pasado, no siempre han demostrado ser eficaces para controlar la producción de aguas ácidas.
- Todavía no se comprenden por completo, los procesos implicados en la producción de aguas ácidas, lo que explica que, frecuentemente se obtengan resultados contrarios a los esperados.

Ocasionalmente, se han obtenido buenos resultados, a largo plazo (más de siete años), completando la restitución con grandes cantidades de aguas residuales urbanas, sin que se haya producido ningún tipo de contaminación orgánica.

Una característica común, a casi todas las técnicas preventivas que se están desarrollando actualmente, es la referente a las elevadas inversiones iniciales que se requieren, ya que deben ser planificadas y realizadas durante el desarrollo de la explotación minera (en una escombrera, durante el apilamiento de los desechos). Por el contrario, la restitución puramente agronómica se realiza una vez concluido el apilamiento de materiales en la escombrera.

La necesidad de diseñar y realizar la restitución, sin poder estudiar directamente las acumulaciones de desechos mineros, en los cuales se van a formar las aguas ácidas, ha obligado a desarrollar técnicas de predicción de la producción de aguas ácidas en cada mina. Estas técnicas constituyen, un aspecto fundamental de la restitución de terrenos.

Las técnicas destinadas a evitar la formación de efluentes ácidos, a partir de residuos mineros al aire libre, están en pleno desarrollo. Algunas de ellas son todavía experimentales. Otras han sido insuficientemente contrastadas y se encuentran mal documentadas en la literatura. Las técnicas, actualmente empleadas o en desarrollo, son las siguientes:

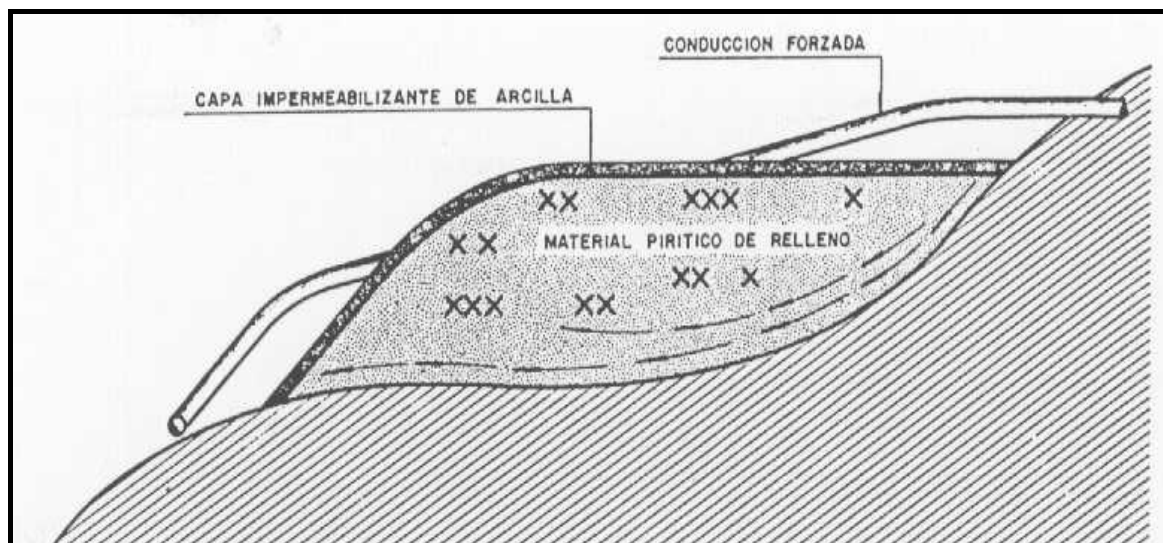
- Desvío de aguas superficiales y separación de aguas subterráneas.
- Sellado con arcilla.
- Compactación del relleno.
- Impermeabilización de la superficie de las escombreras.
- Manipulación de la cobertura.
- Colocación de lechos de caliza en los materiales piríticos.
- Inhibición bacteriana:
 - mediante bacterias,
 - mediante detergentes aniónicos,
 - mediante sustancias orgánicas conservantes.
- Inyección alcalina.

Las cuatro primeras técnicas tienen por objeto modificar los flujos de agua subterránea, de modo que las aguas ácidas no lleguen a formarse. Las cuatro últimas tienen un doble objetivo: por una parte, pretenden crear un ambiente alcalino (o menos ácido), que impida que la acidificación del agua continúe, y por otra parte neutralizar "in situ" el agua ácida que se forme.

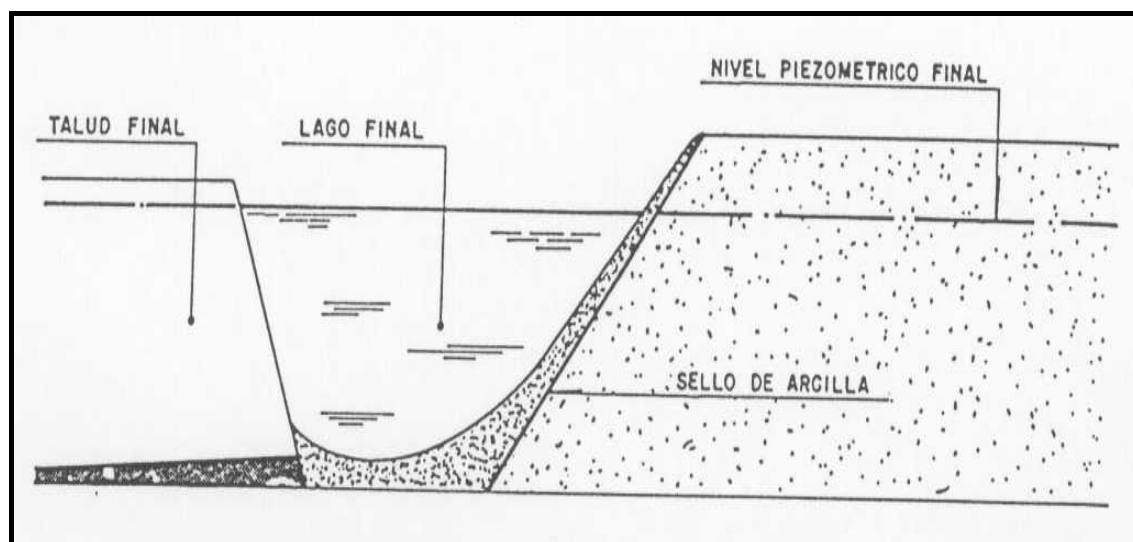
Varios de estos métodos (segundo, tercero y quinto) no pueden llevarse a la práctica en escombreras completadas (o abandonadas), y con algunos de los restantes sólo podrán obtenerse mediocres resultados. Tan sólo el primero, cuarto y octavo son específicos para escombreras abandonadas.

Existen discrepancias entre los diversos autores, acerca del efecto beneficioso que una capa de suelo, situada sobre una escombrera pirítica, puede ejercer para evitar la formación de ácido. Existe tendencia a pensar que la capa del suelo, sobre todo si es arcilloso, sellará eficazmente el material pirítico. La investigación sobre este tema, llega a las siguientes conclusiones:

- El sellado que se consigue no es eficaz. Un suelo arcilloso tiene una permeabilidad vertical muy superior a la horizontal, que permite la filtración del agua y la formación de ácido. Esto se evitaría compactando suficientemente, pero en este caso las plantas no podrían asentarse sobre la superficie compactada.
- Los suelos con mejores propiedades impermeabilizantes son los constituidos por mezclas de bentonita con tierra vegetal.
- Un suelo situado sobre una escombrera pirítica ejerce un efecto secundario muy interesante para evitar la formación de aguas ácidas: ante una precipitación, retiene una fracción importante del agua y la devuelve luego a la atmósfera, por evapotranspiración, evitando que se filtre y acidifique.



El desvío de un curso de agua combinado con la impermeabilización superficial, asegurará la no formación de aguas ácidas en la escombrera



Si el nivel piezométrico está situado por encima de la capa explotada, se formará un lago tras el abandono de la mina

Técnicas Correctoras

Son aquellas técnicas que pueden aplicarse para purificar las aguas ácidas producidas por una mina. Se oponen, conceptualmente, a las técnicas preventivas, que tienen por objeto evitar que esas aguas se lleguen a formar. Las técnicas correctoras se aplican, indistintamente, a minas subterráneas o a cielo abierto.

La reciente promulgación, en muchos países desarrollados, de legislaciones de tipo ambientalista, ha llevado a las explotaciones mineras a instalar plantas de tratamiento de sus efluentes. Los problemas que esto crea, a las empresas, son graves durante la explotación,

pero muchas veces se hacen críticas al planificar el abandono de la mina. En los países en los cuales están en vigor las legislaciones más restrictivas, los operadores mineros afrontan el dilema de poner en práctica medidas preventivas eficaces, durante el desarrollo de la mina, o verse obligados a costear el tratamiento de los efluentes durante años, después de ser abandonada la mina.

La industria minera mundial gasta, anualmente, millones de dólares en el tratamiento de las aguas ácidas que produce. En Estados Unidos son frecuentes las minas que se ven obligadas a tratar más de 3.500 m³ diarios de agua ácida. Las plantas de neutralización química, las únicas que tienen

Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.3, p.99-109

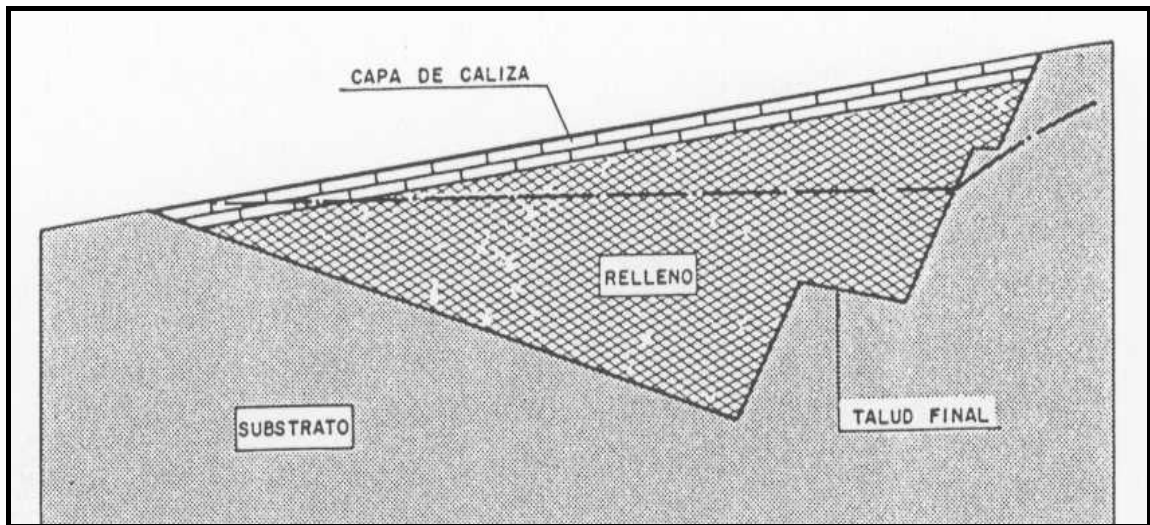
importancia industrial en la actualidad, suelen emplear como agente neutralizante la cal. Esta técnica tiene numerosos inconvenientes:

- Es realmente cara.
- Exige manipular una sustancia cáustica.
- Produce un lodo difícil de almacenar.

Las plantas de tratamiento por intercambio iónico no tienen aplicación directa, en relación a las aguas ácidas, si bien se usan en la minería del uranio, para resolver problemas de contaminación radioactiva, específicos de las aguas residuales de esta industria. El intercambio iónico puede tener aplicación en

alguna mina concreta, en la cual la toxicidad del agua sea causada por un ión, no precipitable aumentando el pH, que pueda ser extraído de modo selectivo.

Las plantas de ósmosis inversa y tratamiento con Desulphovibrio desulphicans, se encuentran en fase experimental, si bien no se trabaja intensamente en su desarrollo. Las plantas de tratamiento con musgo de Spagnum están todavía en fase experimental. Parecen idóneas para ser aplicadas en un futuro próximo a minas abandonadas, con pequeños volúmenes de efluentes, situadas en lugares de difícil acceso.



Colocación de lechos de caliza en el relleno



Vertedero de residuos sólidos no regulado: medidas de remediación propuestas

IMPACTO AMBIENTAL DE LAS AGUAS ACIDAS DE MINA

Impacto Estético y Recreacional sobre el Ecosistema Fluvial

Las aguas ácidas, de minas abandonadas, se pueden formar tanto en el interior como en la superficie, por oxidación de la pirita contenida en los taludes de corte, en las escombreras y en las pilas de estéril. En ambos casos esta agua puede acceder al sistema hidráulico subterráneo, contaminando acuíferos, o surgir como efluentes que descargan en cursos de agua superficial. Por el contrario, es poco frecuente que aguas ácidas formadas en escombreras lleguen a contaminar seriamente a un acuífero adyacente.

En el caso de las escombreras, las aguas ácidas se forman en la franja más superficial de las mismas que, en pocos años queda lixiviada por completo. Si la escombrera es suficientemente permeable, las aguas ácidas se infiltran y surgen en su pie, en forma de manantiales ácidos. Por su acidez y toxicidad, impiden el desarrollo de una cubierta vegetal en la escombrera y, en muchos casos, son capaces de destruir una cobertura bien establecida por trabajos de restitución anteriores. El resultado es que, en poco tiempo, las escombreras quedan desnudas y expuestas por completo a la erosión. Se forman en ellas profundas cárcavas, en las que progresa la oxidación hasta alcanzar un estado de difícil solución.

Los cursos de agua superficiales se contaminan por los efluentes procedentes de minas subterráneas o de escombreras. Si la roca es pirítica, la calidad de esta agua será, en general, muy mala. No obstante, si la calidad de las aguas vertidas a los arroyos mejora, en general rápidamente, es debido a varios procesos:

- Dilución de las aguas ácidas por parte de otras aguas, subterráneas y superficiales, menos mineralizadas, que vierten al cauce.
- Precipitación de los cationes metálicos, en forma de hidróxidos y sulfatos, a medida que desciende el pH.
- Adsorción de los cationes metálicos, por parte de sedimentos orgánicos e inorgánicos, y también de algunas plantas acuáticas.

Tras los grandes aguaceros, se producen los momentos más críticos, ya que se lixivian las sales solubles, formadas en la escombrera desde la última precipitación, y la calidad de los efluentes se deteriora mucho. Con frecuencia, la dilución natural de la cuenca no es suficiente, en estos períodos, para mantener calidades adecuadas aguas abajo. Por otra parte, durante las crecidas, las aguas transportan gran cantidad de sólidos en suspensión, procedentes de la

erosión de las escombreras e, incluso, se puede producir la avalancha de sus materiales. Esto puede dar lugar al taponamiento de algunos cauces, y a la alteración del esquema de drenaje de la cuenca.

Cuando la dilución de las aguas ácidas no es suficiente, el arroyo queda significativamente contaminado. Se produce la oxidación del hierro ferroso disuelto, a férrico, precipitándose una capa de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en el fondo del cauce. La deposición de este hidróxido se ve favorecida por la presencia, en las aguas, de bacterias oxidantes del hierro ferroso, pertenecientes a los géneros *Crenothrix*, *Heptothrix*, *Gallionella* y otros. La presencia de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ en el lecho del arroyo, tiene diversas consecuencias negativas:

- Los lechos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ son de vivos colores, entre amarillo y rojo, predominando los tonos ocres, que producen un efecto estético desagradable. La presencia de hidróxido férrico, en el agua, es detectable a simple vista, incluso cuando su concentración no supera las 5 ppm. Habitualmente, la presencia de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ es el primer indicador de que el agua está contaminada.
- Los cationes ferrosos consumen oxígeno, lo cual reduce la cantidad disponible para el consumo de los organismos acuáticos.
- Gran parte de los organismos bentónicos no puede adaptarse a la vida en estas condiciones. Con su desaparición se altera gravemente la cadena alimenticia, lo cual afecta a los organismos superiores que actúan como depredadores.
- Se ve impedido el desove de numerosas especies de peces, alterando su ciclo reproductivo. Esto, unido a la disminución del alimento disponible, suele conducir a la destrucción de poblaciones de peces tan cotizados como las truchas. Los salmónidos no pueden desovar en aguas de pH inferior a 5.
- Unas pocas especies de algas e invertebrados se adaptan a las nuevas condiciones del cauce y, ante la falta de competencia, pueden llegar a constituir una plaga.
- Las aguas transportan cationes metálicos que se acumulan en los tejidos de los organismos, concentrándose finalmente en los depredadores superiores, con riesgos para el consumo humano. Por otra parte, se producen mortandades de peces cuando, tras las avenidas, las concentraciones de cationes aumentan. En este sentido, el cobre parece ser especialmente tóxico.

Degradación de Aguas Potables e Industriales

De manera casi general, las aguas de los arroyos contaminados por efluentes ácidos de minas, no son potables, y en este sentido hay que tener en cuenta que la depuración de las aguas, para consumo humano, se encarece con la degradación de su calidad original. Por ello, el empeoramiento de la calidad del agua puede causar graves perjuicios económicos a las industrias que las utilizan, e incluso puede forzar la búsqueda de un abastecimiento alternativo.

Casos muy graves, de contaminación de aguas potables, se producen cuando las aguas ácidas, almacenadas en minas subterráneas abandonadas, deterioran acuíferos empleados en abastecimientos rurales o urbanos. Los contenidos de sulfatos comprendidos entre 700 y 3.500 mg/l y elevadas concentraciones de Fe, Zn y Mg, pueden causar:

- Serios problemas digestivos entre los consumidores humanos (diarreas).
- Fuerte disminución de la producción lechera.

Envenenamiento Lento de Lagos

Cuando las aguas ácidas de mina, cargadas de cationes metálicos, vierten en un lago, se produce su neutralización y la precipitación de los metales que, en parte, pasan a integrarse en los limos y sedimentos del fondo y, en parte, son absorbidos por organismos bentónicos, que los transmiten a los depredadores que actúan sobre ellos.

Los metales pesados acaban concentrándose en los tejidos de los seres vivos, que pueblan el lago, el cual, por su carácter de ecosistema cerrado, acaba envenenado. El consumo humano de estos peces presenta un problema adicional.

Bibliografía

- FERNÁNDEZ-RUBIO, 1986: Abandono de minas. Impacto hidrológico. Instituto geológico y minero de España, E.T.S. de Ingenieros de minas.
- MEND Asóciate Project, 1995: Hydrogeology of waste rock dumps. Canada centre for mineral and energy technology, British Columbia mineral development agreement.
- LLOPIS LLADÓ, 1970: Hidrogeología cársica. Editorial Blume.
- WATSON, Burnet, 1995: Hydrology, an environmental approach.
- SHARMA, Lewis, 1984: Waste containment systems, waste stabilization and landfills. Design and evaluation.