



MASTER EN INGENIERÍA Y GESTIÓN
MEDIOAMBIENTAL

RESIDUOS DE INDUSTRIAS
EXTRACTIVAS

DOCUMENTACIÓN ELABORADA POR:

IVÁN BOTAMINO GARCÍA

INDICE

1. NORMATIVA ESPECÍFICA: DIRECTIVA SOBRE LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS	3
1.1. SITUACIÓN JURÍDICA DE LOS RESIDUOS MINEROS	3
1.2. DIRECTIVA SOBRE LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS.....	4
2. GENERACIÓN, CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS.....	6
2.1. RESIDUOS DE EXTRACCIÓN DE MINERAL.....	7
2.2. RESIDUOS DE PROCESADO DE MINERAL	7
3. PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS MINEROS.....	10
4. DRENAJE ÁCIDO DE MINA.....	12
4.1. ORIGEN.....	12
4.2. PROCESO DE FORMACIÓN	13
4.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA FORMACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO ..	15
4.4. PREDICCIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO	18
4.5. TÉCNICAS DE CONTROL	19
4.6. RECOGIDA Y TRATAMIENTO.....	21
5. DOCUMENTACIÓN RECOMENDADA	26
5.1. BIBLIOGRAFÍA.....	26

1. **NORMATIVA ESPECÍFICA: DIRECTIVA SOBRE LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

1.1. SITUACIÓN JURÍDICA DE LOS RESIDUOS MINEROS

Durante la redacción de la **Directiva Marco de residuos (75/442/CE)** se excluyeron explícitamente los “residuos resultantes de la prospección, extracción, tratamiento y almacenamiento de recursos minerales”. Esta exclusión obedecía a la voluntad del legislador de desarrollar una norma específica para regular los residuos mineros. A pesar de ello, ante la ausencia legislación específica, se consideraba que esta Directiva era de aplicación para los residuos de las industrias extractivas, en tanto que son residuos procedentes de la actividad industrial.

La **Directiva relativa al vertido de residuos (1999/31/CE)**, transpuesta al derecho español a través del R.D. 1481/2001, es aplicable a los residuos peligrosos y no peligrosos generados por las industrias extractivas. Sin embargo, esta Directiva está orientada a la gestión de vertederos típicos (urbanos, residuos industriales, etc.) por lo que algunas de sus disposiciones no son adecuadas para los problemas específicos de gestión que presentan los residuos mineros. Algunas de las disposiciones que presentan problemas son:

- La prohibición de eliminar residuos líquidos es incompatible con la práctica minera habitual de explotación de balsas de estériles o relaves (*tailings dams*).
- La prohibición de eliminación conjunta de residuos peligrosos y no peligrosos. En la actividad minera, la formación de una escombrera se lleva a cabo con todos los residuos que se generan en la extracción (que pueden responder a diferentes categorías) en el mismo emplazamiento. La segregación de los diferentes flujos de residuos mineros sería económica y medioambientalmente inviable.
- La obligatoriedad de instalar una barrera impermeable debajo de los residuos, trasladada a la actividad minera puede, en ocasiones, ser completamente contraproducente. Por ejemplo, la presencia del revestimiento puede ocasionar efectos de deslizamiento en ciertos tipos de acopios de residuos.

Respecto a la **Directiva IPPC (96/61/CE)**, las operaciones de extracción minera no están contempladas dentro de la misma. Sin embargo, ciertas actividades

metalúrgicas, de tratamiento de minerales y de vertido de residuos no inertes entran en el ámbito de aplicación de la Directiva, en tanto que sean “actividad asociada directamente” a alguna de las recogidas en el Anexo I de dicha norma.

La **Directiva Seveso II (96/82/CE)**, relativa a la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, excluye de su ámbito de aplicación las industrias extractivas.

A nivel nacional, existe un marco normativo específico que regula la actividad minera (Ley de Minas 22/1973 y normativa posterior), pero en ella no se hace referencia específica a la regulación de los residuos mineros.

1.2. DIRECTIVA SOBRE LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

Con fecha 15 de marzo de 2006 se aprobó la **Directiva 2006/21/CE, sobre la gestión de los residuos de las industrias extractivas**, normativa específica para la gestión de los residuos mineros, con especial incidencia en aquellos aspectos que afectan a los riesgos para la salud y el medio ambiente. La propuesta abarca los residuos de todos los sectores de las industrias extractivas, si bien afecta principalmente a aquellos sectores que constituyan la causa más probable de riesgos para el medio ambiente o accidentes graves. Por ello, se excluyen los residuos con bajo riesgo, tales como las tierras y los inertes procedentes de la prospección.

Se define como “**instalación de residuos**” como cualquier zona asignada para la acumulación o depósito de residuos, tanto en estado sólido como líquido, durante un período superior a un año. Dentro de esta definición estarían incluidas las escombreras y las balsas de estériles.

En la propuesta se establecen las condiciones que debe cumplir una instalación para la obtención de una licencia de explotación, de forma que se garantice la existencia de las medidas medioambientales y de seguridad suficientes en las instalaciones de residuos. En este sentido, el explotador deberá definir las características de la instalación de residuos y el plan de gestión de residuos; asegurar el cumplimiento de una política de prevención de accidentes graves y adopción de un sistema de gestión de la seguridad, así como un sistema de garantías económico y medioambiental.

Un concepto importante es que se establece la obligatoriedad de caracterizar los residuos de forma previa a su eliminación, con lo que se asegura que los métodos de gestión aplicados son los adecuados, con vistas a asegurar la estabilidad a largo plazo de las escombreras y las balsas de estériles. Los criterios de caracterización se definen en la propia Directiva (Anexo II).

En el texto se definen las obligaciones generales para la gestión de residuos, con el fin de conocer, antes de iniciar la extracción minera, la cantidad y características de los residuos que se van a producir, así como cual va a ser su gestión futura. Para ello, la entidad explotadora elaborará un **Plan de Residuos** en el que se definirán las características de los residuos mineros y cantidades totales estimadas que se producirán; descripción de la actividad que genera dichos residuos y tratamientos posteriores; posibles afecciones al medio que puede provocar la eliminación de los residuos y medidas preventivas que se adoptarán; procedimientos de control y vigilancia propuestos; plan propuesto para el cierre y mantenimiento posterior; y las medidas de prevención de la contaminación del agua y el suelo. Este Plan de residuos se revisará periódicamente.

Así mismo, se definen las medidas para garantizar la seguridad en las instalaciones de residuos, de forma similar a la Directiva Seveso II, estableciendo una política de prevención de accidentes graves y el sistema de gestión de la seguridad. En este sentido, la entidad explotadora elaborará un **Plan de emergencia**, con el fin de controlar y contener los accidentes graves reduciendo al mínimo sus efectos, estableciendo las medidas necesarias para proteger la salud de las personas y el medio ambiente; comunicar la información necesaria al público y autoridades competentes; y restauración y limpieza del medio ambiente tras un accidente grave.

Otro aspecto importante de la propuesta es que establece la obligatoriedad de elaborar planes de cierre para las instalaciones de gestión de residuos, así como que la entidad explotadora presente las garantías financieras que aseguran la rehabilitación medioambiental adecuada de las instalaciones de eliminación tras su cierre.

2. GENERACIÓN, CLASIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

Las actividades de extracción y concentración del mineral generan residuos mineros. Las características de estos residuos dependen del tipo de yacimiento y de las tecnologías de explotación y preparación utilizadas. Los residuos generados pueden clasificarse en dos tipos fundamentales: roca estéril (*waste rock*) y estériles de procesado del mineral (*tailings*).



Figura 2.1.- Diferentes áreas de explotación, procesado y almacenamiento de residuos en una explotación minera

Según los datos recogidos en el informe "*Management of mining, quarrying, and ore-processing waste in the European Union*" existen en la Unión Europea un total de 4.700 millones de toneladas de roca estéril almacenadas en escombreras (de los cuales 2.500 millones de toneladas corresponden a España) y 1.200 millones de toneladas de estériles de procesado de mineral (323.000 toneladas en España).

Atendiendo a su origen la minería del carbón produce la mayor cantidad de residuo minero (2.400 millones de toneladas de roca estéril), seguida de las explotaciones de metales no ferrosos (1.550 millones de toneladas de roca estéril y 860.000 toneladas de estériles de procesado).

2.1. RESIDUOS DE EXTRACCIÓN DE MINERAL

Las rocas estériles de mina son aquellos materiales sin valor económico extraídos para permitir la explotación del mineral útil. Estos materiales son almacenados en escombreras en zonas próximas a la explotación, fundamentalmente debido a los costes de transporte asociados.

La cantidad de estéril generado depende del sistema de extracción minero empleado. Así, las explotaciones a cielo abierto generan un volumen mucho mayor de estériles que las explotaciones subterráneas. También tiene una influencia decisiva las características geológicas del yacimiento.



Figura 2.2.- Escombreras de estériles en las minas de Río Tinto

2.2. RESIDUOS DE PROCESADO DE MINERAL

El proceso de concentración de las menas sulfuradas (Cu, Pb y Zn), se basa en la separación densimétrica del material concentrado mediante flotación. En ella, tras la molienda fina del material, éste se introduce en unas celdas de flotación donde, mediante espumantes, la mena es concentrada y retirada como espumas por la parte superior. El resto de los sulfuros no aprovechables son retirados en forma de lodo acuoso (*tailings*) hasta la balsa de estériles (o relaves).

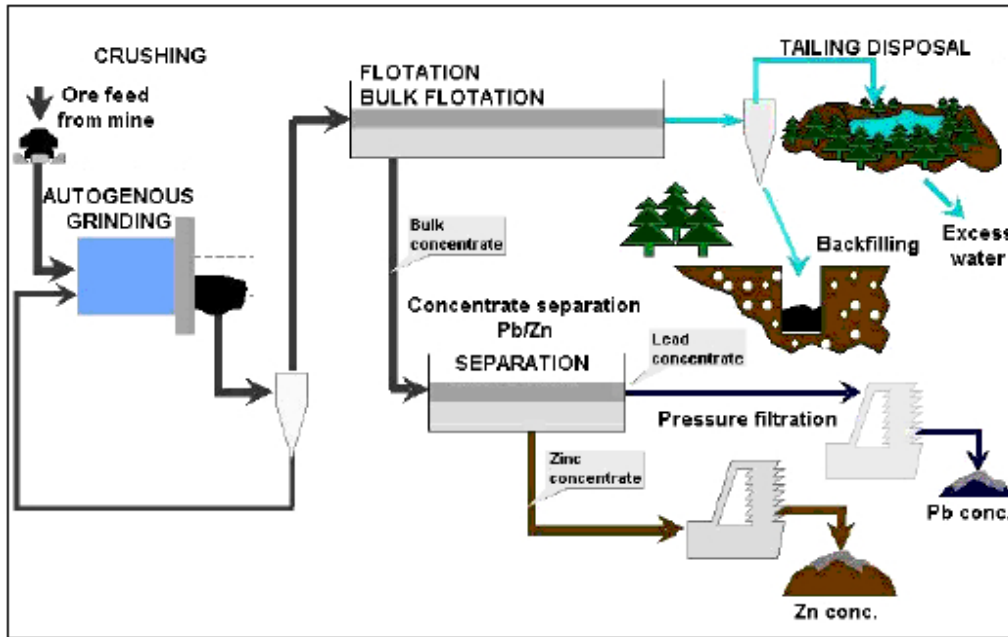


Figura 2.3.- Proceso de concentración por flotación de una mena mixta de Pb y Zn



Figura 2.4.- Imagen de una balsa de estériles (AURUM Dam, Baia Mare, Rumania)

La formación de la balsa de estériles requiere la construcción de un dique de contención. El desarrollo de las balsas de estériles es secuencial, construyéndose diques sucesivos a medida que se va llenando la balsa. Existen diversos sistemas de construcción, aunque el más utilizado es el de corriente arriba (upstream tailing dam).

Upstream tailings dam

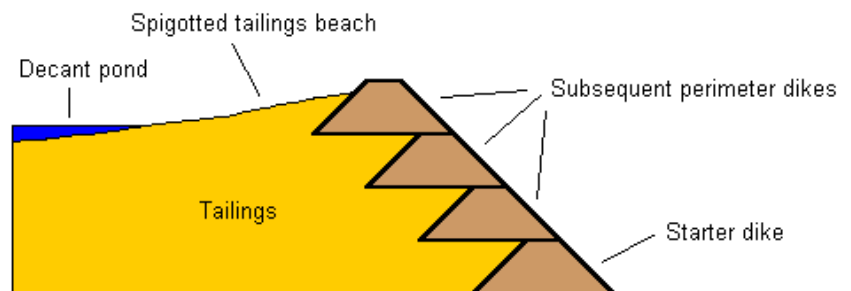


Figura 2.5.- Sección tipo constructivo de balsa de estériles corriente arriba

En ocasiones, y cuando las características del emplazamiento lo permiten, las rocas estériles procedentes de la explotación y los lodos de concentración son almacenados en antiguas zonas que ya no se encuentran en actividad ("**backfilling**"), tanto en el caso de explotaciones a cielo abierto como subterráneas.

Este método se puede realizar en vía seca ("*dry backfill*"), mediante el transporte directo de los estériles hasta la zona de vertido; cementado ("*cemented backfill*"), añadiendo cemento o cenizas volantes para mejorar la estabilidad de la mezcla; en vía húmeda ("*hydraulic backfill*"), desecando los estériles de concentración hasta una densidad de sólidos entorno hasta el 65-70%, procediendo al relleno mediante bombeo; y en vía pastosa ("*paste backfill*"), similar al anterior pero con una densidad de sólidos superior al 70 %, generando un relleno de alta densidad.

3. PROBLEMAS AMBIENTALES ASOCIADOS A LOS RESIDUOS MINEROS

Los residuos mineros pueden provocar alteraciones sobre el medio ambiente, fundamentalmente sobre el agua, que se relacionan seguidamente:

- Transporte de los materiales sólidos como polvo a otras áreas debido a procesos erosivos y el viento.
- Incorporación de las partículas sólidas al agua, por arrastre superficial de polvo en las escombreras.
- Modificación de la concentración de metales e iones en el agua, debida fundamentalmente a los efectos del drenaje ácido (ver capítulo siguiente).
- Cambio del pH del agua.
- Las escombreras producen un efecto importante de compactación del suelo, que modifican sus características geomecánicas y alteran el desarrollo natural del suelo.
- En las balsas de lodos, puede producirse una oxidación in situ del material sulfurado incluido en los lodos, que suele implicar la puesta en solución de metales pesados.
- Muerte de aves por contacto con la fase líquida superior de la balsa.
- Muerte de otros animales por atrapamiento en estos materiales.
- Fuerte Impacto visual de las escombreras y balsas de estériles, que habitualmente son de gran tamaño.

Un problema muy importante respecto a los depósitos mineros, y en especial en las balsas de estériles, es la estabilidad mecánica de los diques de contención. La rotura de los diques puede provocar el vertido y dispersión de los contaminantes contenidos en las aguas y en los lodos de estériles mineros.

Este es el caso de la rotura del dique de contención de la balsa de estériles de la mina de **Aznalcóllar** el 25 de Abril de 1998 (Sevilla). El resultado fue el vertido de unos 3,6 Hm³ de agua y 0,9 Hm³ de lodos, sobre las riberas del río Guadiamar a lo largo de 40 Km para los lodos y 50 Km para las aguas, con una anchura media de 400 metros. La superficie total abarcada fueron 4.400 Ha. Los lodos no llegaron al Parque Nacional de Doñana, pero las aguas invadieron la región externa de éste, desembocando en el Océano Atlántico.



Rotura de la presa de la balsa que contenía los residuos tóxicos en la mina de Aznalcóllar, el día del vertido.

En este vertido produjo una contaminación intensa debida al Sb, Pb, As, Bi y Cu, aunque por su toxicidad destacan el Cu, Cd, Pb, As y Zn. La concentración media en los suelos de todos los elementos considerados como contaminantes superaban claramente los valores de referencia de los suelos no contaminados. En el caso del As, Zn, Cd, Cu y Pb se superaban los niveles de intervención.



Lodos tóxicos recubriendo el suelo. Al fondo suelo no contaminado.
Río Guadiamar, proximidades de Aznalcázar

4/5/98

4. DRENAJE ÁCIDO DE MINA

4.1. ORIGEN

El drenaje ácido de roca (*Acid Rock Drainage ARD*) es el proceso de formación de soluciones sulfatadas, con frecuencia con un contenido importante de metales disueltos, resultado de la oxidación química y biológica (principalmente por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*) de los minerales sulfurados, concretamente la pirita (FeS_2) y la pirrotina (FeS), así como de la lixiviación de los metales pesados asociados.

El drenaje ácido se caracteriza por un pH bajo (con valores que oscilan entre 1,5 y 5,5), asociado a una acidez creciente en el tiempo y una alcalinidad decreciente, y concentraciones elevadas de sólidos totales disueltos, de sulfato de hierro y otros metales.

Es frecuente que estas aguas presenten un color rojizo debido a la presencia del ión férrico (Fe^{+3}); aunque a veces, puede aparecer un color azul verdoso en caso de que el hierro disuelto se encuentre en la forma de ión ferroso (Fe^{+2}), que tenderá a oscurecerse por oxidación a ión férrico. Debido a ello, se origina la habitual coloración rojiza en cauces y canales de escorrentía del drenaje ácido.

Este proceso se produce de forma natural, debido a la exposición de las menas sulfuradas, por efecto de la erosión y la actividad tectónica, a la acción de la oxidación atmosférica y de las bacterias. La neutralización de estas aguas ácidas, bien in situ, como a una cierta distancia de la fuente de generación, provoca la precipitación de los metales disueltos, generando un yacimiento de tipo "gossan", que han sido históricamente objeto de aprovechamiento minero.

Bajo condiciones naturales, el suelo que recubre los minerales sulfurados minimiza su contacto con el agua y el oxígeno, permitiendo que la generación de ácido prosiga a una velocidad tan baja cuyo efecto en la calidad general del agua sea insignificante o indetectable. Sin embargo, las operaciones de extracción y concentración asociadas a la actividad minera aceleran la producción de estas reacciones químicas, al exponer enormes volúmenes de roca sulfurada (con el correspondiente aumento de su superficie de contacto) a la acción del aire y del agua.

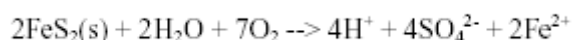
En este caso, se habla de un **drenaje ácido de mina** (Acid Mining Drainage AMD), de las mismas características que el anterior, pero en este caso de origen antropogénico. Debido a este efecto, las principales fuentes de contaminación por drenaje ácido son las escombreras y las balsas de lodos.

4.2. PROCESO DE FORMACIÓN

La generación del drenaje ácido se desarrolla en tres fases caracterizadas por el pH del agua. Estas etapas permiten determinar la evolución del drenaje en el tiempo empleándose para el diagnóstico de la situación de un emplazamiento concreto.

Fase I

Los minerales sulfurados, fundamentalmente la pirita (FeS_2), son oxidados químicamente por el oxígeno presente en la atmósfera, que es el oxidante principal.

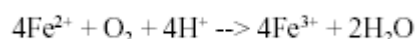


En esta fase, el disulfuro es oxidado para producir iones hidrógeno y sulfato, que son los productos de disociación del ácido sulfúrico en disolución. El ión ferroso, se oxida más lentamente, a valores más bajos de pH.

Dentro de un rango de pH entre 5 y 7, los metales liberados por el desgaste de los minerales generalmente precipitan y están relativamente inmóviles, debido a que los minerales alcalinos presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez, originando la precipitación del hierro como óxido o hidróxido. A medida que estos materiales se consumen, o se encapsulan por cubiertas de precipitado, el pH disminuye progresivamente, entrando en la siguiente fase del desarrollo.

Fase II

El pH del microambiente desciende hasta el valor de 4,5. En esta fase, las reacciones de oxidación son tanto de tipo químico como biológico. Así, para valores de pH entre 3,5 y 4,5 la oxidación del ión ferroso según la reacción:



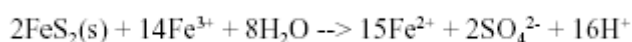
es catalizada por una variedad de la bacteria filamentosa *Metallogenium*. Cuando el pH se sitúa por debajo de 3,5 la reacción es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*.

En esta fase aún persisten concentraciones elevadas de ión ferroso y sulfato, y pese a la elevada acidez, las concentraciones de metales pueden ser bajas.

Fase III

Las reacciones catalizadas por bacterias son predominantes. Como se ha comentado, se produce la oxidación del ión ferroso a férrico (Fe^{+3}), el cual se convierte en el oxidante dominante, reemplazando al oxígeno.

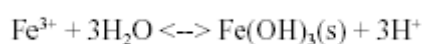
Si la formación del ión férrico tiene lugar en contacto con la pirita, se produce la disolución de la misma, de acuerdo con la siguiente reacción:



La disolución de la pirita por acción del ión férrico, junto a la oxidación del ión ferroso constituye el ciclo de disolución de la pirita.

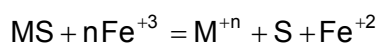
Debido a la oxidación de la pirita, el pH desciende rápidamente para estabilizarse en torno a valores de pH entre 2,5 y 3. Dicha estabilización está determinada por las condiciones óptimas requeridas para el desarrollo de las bacterias, que como se ha mencionado, controlan las reacciones que se producen en esta fase.

Para valores de pH superiores a 3, el ión férrico precipita como hidróxido férrico, que da el color rojizo característico asociado a la oxidación de los sulfuros, según la reacción:



Sin embargo, para valores de pH entre 2,5 y 3, y en presencia de ácido sulfúrico y sulfato férrico, se dan las condiciones adecuadas para que el ión férrico pueda actuar como oxidante. En ausencia de este ión, el ácido sulfúrico es capaz de disolver algunos carbonatos metálicos y óxidos minerales, pero tiene un efecto poco significativo sobre los sulfuros metálicos.

Sin embargo, el ión férrico es capaz de disolver muchos sulfúricos metálicos (plomo, cobre, zinc, cadmio, etc.) según la reacción:



donde MS corresponde a un sulfúrico metálico mineral, y el resto de las especies se encuentran en estado acuoso.

4.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA FORMACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO

El potencial de una mina para generar drenaje ácido depende de diversos factores y está directamente ligado al emplazamiento concreto. Algunos autores identifican factores primarios, secundarios y terciarios que controlan este fenómeno. Estos a su vez pueden subdividirse en hidrológicos, geológicos y mineros.

4.3.1. Factores hidrológicos

Se consideran como **factores hidrológicos primarios** la disponibilidad de agua, que actúa tanto como reactivo, como medio para las bacterias y de transporte de los productos de oxidación; el pH inicial del agua; equilibrio entre el ión ferroso/férrico; y la actividad microbiológica inicial presente en las aguas.

Los **factores hidrológicos secundarios** son la naturaleza y concentraciones de los elementos disueltos en el drenaje. Los sólidos disueltos pueden existir bajo varias especies químicas, cada una de las cuales posee una solubilidad y movilidad diferente. Además, cada especie tiene su propio intervalo de estabilidad regulado por la termodinámica del sistema (pH y potencial redox).

Los **factores hidrológicos terciarios** son los siguientes:

- Clima. A parte de la influencia evidente del balance hídrico del emplazamiento en la generación del drenaje ácido (ya que define la disponibilidad de agua), debe tenerse en cuenta la relación entre la precipitación y la evaporación, ya que se considera que si esta relación es mayor que 1, se produce disolución de las sales solubles, y cuando es menor que 1, acumulación.

La humedad no es un parámetro que limite la reacción de oxidación, aunque en climas húmedos puede producirse una dilución de los productos de reacción, minimizando los efectos sobre los ecosistemas acuáticos. En climas secos, la baja frecuencia de las lluvias minimiza el transporte resultando una acumulación de los subproductos de oxidación.

- Potencial de transporte de los contaminantes, relacionado con la capacidad de los contaminantes presentes en el drenaje ácido de migrar desde la fuente a otro medio receptor. Los medios principales de transporte de los productos de oxidación son la escorrentía superficial y la infiltración a través del subsuelo, y transporte a través de las aguas subterráneas. Este transporte se produce debido a mecanismos de advección, difusión y dispersión hidrodinámica.
- Hidrogeología del yacimiento, considerando la porosidad, permeabilidad y transmisividad de las rocas huéspedes, que controlan la velocidad del proceso.
- Química natural y caudal de dilución de los cuerpos de agua receptores. Las concentraciones de los metales producidos y que transporta el drenaje ácido pueden ser atenuadas debido a procesos de sorción, precipitación química (por contacto con aguas alcalinas), intercambio catiónico y biodegradación.

4.3.2. Factores geológicos

Los **factores primarios** son la tipología del yacimiento; cantidad y mineralogía de los sulfuros, que determina la cantidad de ácido que puede generar un ambiente determinado (como se ha comentado, los sulfuros de estequiometría MS, tales como el ZnS y el PbS, no generan drenaje ácido por oxidación, si no que aportan metales libres tras su disolución); resistencia de los sulfuros a la meteorización, que varía en función del sulfuro metálico considerado (la pirrotina tiene una resistencia baja, la pirita poseen una resistencia media, y la calcopirita una resistencia alta); y la disponibilidad de oxígeno, de gran importancia para mantener la oxidación catalizada por las bacterias en valores de pH inferiores a 3,5. La oxidación de sulfuros se reduce notablemente cuando la concentración de oxígeno los espacios intersticiales de los residuos mineros es inferior al 1-2%.

Los **factores secundarios** son la disponibilidad, mineralogía y resistencia de las especies químicas neutralizantes. Los carbonatos (calcita, dolomita) son los únicos minerales alcalinos existentes en la naturaleza en cantidades suficientes para ser efectivos en el control y prevención del drenaje ácido. Algunos minerales como la mica y la arcilla, también tiene capacidad de asumir una pequeña cantidad de ácido.

Se consideran **factores geológicos terciarios** los siguientes:

- Tipo de alteración. La actividad minera aumenta enormemente la superficie de contacto y con ello el potencial de generación de drenaje ácido.
- Mineralogía de los productos de alteración. Los minerales secundarios (óxidos, sulfatos, carbonatos) pueden encapsular los sulfuros primarios, aumentando o disminuyendo las tasas de migración de contaminantes, en función de la reactividad entre el mineral primario y el secundario.
- Comportamiento electroquímico de los sulfuros. En los yacimientos con varias especies de sulfuros, se forman celdas electroquímicas de protección/corrosión galvánica, aumentando la oxidación en la zona que actúa como ánodo, y disminuyendo la meteorización del cátodo.

4.3.3. Factores mineros

Los **factores primarios** son los que se describen seguidamente:

- La ubicación del yacimiento influye en la disponibilidad y concentración de oxígeno, en la temperatura atmosférica y del agua, y en la velocidad de oxidación bacteriana. En cuanto a la temperatura, la oxidación es un proceso exotérmico, con capacidad de originar una importante cantidad de calor, creando gradientes térmicos dentro de los acopios de residuos mineros, que promueven el flujo del aire. En las balsas de estériles la temperatura permanece relativamente constante, controlada por el contenido en humedad.
- La actividad microbiológica presente en los residuos, que acelera la velocidad de generación de ácido y de lixiviación de metales pesados.
- Cantidad de sulfuros en los residuos. Dependerá del tipo de residuo almacenado. El estéril procedente de la extracción minera puede poseer un porcentaje considerable de sulfuros, que quedan expuestos a la oxidación en la escombrera. Habitualmente, la formación de drenaje ácido se produce simultáneamente en varios puntos de la escombrera. Los lodos procedentes de la cianuración y la flotación pueden contener sulfuros, pero su alcalinidad inicial es muy elevada. Por ello, se considera que **las escombreras son la principal fuente potencial de producción de drenaje ácido**.

El **factor geológico secundario** es la química del agua de drenaje a lo largo de la ruta de flujo, que dependerá tanto de los minerales presentes en la fuente de generación de drenaje ácido como de las reacciones con las diferentes rocas a lo largo de la trayectoria de flujo en el interior del acopio de residuos mineros. La concentración de sulfuros de los minerales que componen un acopio o escombrera pueden variar según las zonas, dando lugar a aguas de diferentes calidades según la zona de procedencia.

Se consideran **factores terciarios** las características físicas y la hidrogeología del residuo minero. En el caso de las escombreras, el material procede normalmente de la explotación a cielo abierto (y en menor medida subterráneo) de las minas. Generalmente están formadas por rocas gruesas que provienen de diferentes áreas en explotación. El tamaño de las partículas es usualmente mayor que 20 cm.

En el caso de las balsas de lodos o relaves, estos se depositan en forma de pulpa con un elevado contenido en agua. Su permeabilidad es muy baja, lo que se traduce en una oxidación muy lenta. El tamaño de la partícula es habitualmente inferior a 0,2 mm.

4.4. PREDICCIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO

La predicción de las posibilidades de formación del drenaje ácido, basado en la identificación de los minerales potencialmente generadores del mismo, mediante el uso de métodos fiables y contrastados, puede reducir el riesgo de contaminación a medio/largo plazo, así como el coste de las medidas correctoras. Debido a la complejidad del fenómeno, no existe un conjunto de pruebas ni un número de muestras que garantice una predicción exacta del drenaje ácido.

Se emplean consideraciones teóricas basadas en el comportamiento asociado a las especies minerales existentes atendiendo a la tipología y porcentaje de los sulfuros presentes, la presencia de materiales con potencial neutralizador, la granulometría del material, la climatología del emplazamiento y presencia de actividad microbiana.

Las pruebas utilizadas pueden ser estáticas o cinéticas.

La mayoría de los ensayos estáticos establecen la relación entre los minerales potencialmente generadores de ácido y las especies con capacidad de neutralización.

Son ensayos rápidos y baratos. Existen tres tipos de pruebas estáticas: balance ácido base (*Acid Base Accounting ABA*), contenido en elementos traza y estudio petrográfico.

Las pruebas cinéticas intentan aproximarse a las condiciones naturales. Consisten en someter las muestras a la intemperie, bajo condiciones controladas de laboratorio y de campo. Permiten definir la velocidad de reacción para la oxidación, neutralización y la disolución de metales.

4.5. TÉCNICAS DE CONTROL

Se denomina control del drenaje ácido a las medidas empleadas para reducir la producción del drenaje ácido y minimizar su impacto sobre el medio ambiente. La técnica aplicada varía en función de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el proceso de formación del drenaje ácido.

4.5.1. Control primario

Se denomina control primario a los procedimientos para reducir o **minimizar la interacción entre el mineral y el oxígeno**, evitando que se produzcan las reacciones de oxidación de los minerales sulfurados que dan lugar al drenaje ácido. Seguidamente se describen las diferentes técnicas empleadas.

Cubiertas y sellos

Consiste en la utilización de elementos de cobertura de muy baja permeabilidad para limitar la entrada de oxígeno. El principal problema es conservar la integridad a largo plazo de la cubierta, que puede verse afectada por roturas, la acción de raíces y animales, etc.

Desulfuración y aislamiento selectivo de residuos sulfurosos

Este método se basa en la reducción del potencial de generación de ácido del conjunto mediante la separación de la fracción de sulfuros minerales contenidos en los residuos mineros. Se utiliza habitualmente con los lodos o relaves, separando la pirita por flotación. El concentrado obtenido debe recibir un tratamiento específico en su manejo y aislamiento.

Mezcla o aditivos básicos

El método se basa en mezclar varios tipos de roca con diferentes potenciales de generación de acidez y neutralización, con el fin de mantener el pH de la mezcla en un rango próximo al neutro, limitando la oxidación química. Es un sistema muy caro y con una ejecución compleja.

Inhibición de las bacterias

Esta técnica persigue la eliminación de las bacterias que actúan en el proceso de oxidación mediante el empleo de agentes bactericidas, como el lauril sulfato de sodio. Se aplican mediante pulverización sobre el acopio, y para conseguir la acción en el tiempo del biocida se emplean en forma de productos de liberación lenta.

Microencapsulación de la pirita

Consiste en recubrir ciertos residuos mineros para evitar la oxidación de la pirita. Para ello, se emplean disoluciones fosfatadas y de acetato de sodio, que reaccionan con la superficie de la pirita formando un precipitado de fosfato férrico que la encapsula.

Cubiertas de agua y descarga subacuática

Mediante este procedimiento se reduce el flujo de oxígeno mediante la inmersión completa en agua de los residuos mineros. Para ello, pueden utilizarse cuerpos de agua existente (como un lago), minas subterráneas o inundación de una explotación a cielo abierto, y mediante la construcción de un depósito artificial (balsa de lodos)

4.5.2. Control secundario

El control secundario actúa sobre la **relación entre el agua y el residuo**, minimizando la movilización de los contaminantes mediante escorrentía e infiltración.

Reducción de la infiltración

La infiltración del agua de lluvia a través de los residuos mineros favorece la oxidación y el transporte de los contaminantes. Para evitar el contacto de las aguas con la masa de residuos se emplean cubiertas: de suelo, formadas por una capa de material de naturaleza arcillosa; sintéticas, tales como membranas de PEAD o PVC; y cubiertas complejas, construidas con varias capas minerales y geosintéticas.

Vertido conjunto de escombros y lodos

Mediante la codisposición de los residuos procedentes de la explotación (residuos de roca o escombros) y los resultantes de los procesos de concentración (lodos o relaves) se consigue que los lodos rellenen los espacios vacíos que quedan entre los escombros, reduciendo la infiltración (porque su permeabilidad es más baja) y la disponibilidad de oxígeno.

Recogida y desvío de las aguas superficiales

Debe evitarse que la escorrentía superficial entre en contacto con la masa de residuos, para lo cual se construye una red de bermas y cunetas perimetrales de recogida.

4.5.3. Control terciario

El control terciario consiste en la **recogida y tratamiento del drenaje ácido** una vez éste se ha producido. El sistema empleado puede ser activo, mediante tratamiento químico en planta, o pasivo, mediante tratamientos basados en la neutralización que se produce de forma natural. Las características del control terciario se describen en el siguiente apartado.

4.6. RECOGIDA Y TRATAMIENTO

La recogida de las aguas procedentes de un depósito de residuos mineros se lleva a cabo, en el caso de las aguas de escorrentía superficial, mediante la construcción de una red de cunetas y zanjas de recogida que las conducen hasta el punto de tratamiento. Para el control de las aguas subterráneas se emplean zanjas profundas de intercepción, muros pantalla para el desvío y conducción, y pozos de bombeo y extracción. Su dimensionamiento estará condicionado, en un caso, por la escorrentía superficial del emplazamiento y por el modelo hidrogeológico del terreno.

Como se ha mencionado, la intercepción aguas arriba de la escorrentía superficial y del flujo subterráneo minimizan el volumen de drenaje ácido producido y la contaminación de las aguas.

4.6.1. Tratamientos activos

Consisten en la neutralización del drenaje ácido mediante la adicción de compuestos alcalinos como el hidróxido sódico, bicarbonato sódico o el carbonato cálcico. Como

resultado se produce una elevación del pH, lo que provoca la precipitación de los metales presentes en el agua, en forma de lodos.

Red. Acidez: $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ (yeso)

Precip. Metales: $\text{CuSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2 + \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

Habitualmente, se realizan en plantas de tratamiento situadas en la propia instalación minera. Su coste es elevado, y el volumen nominal de tratamiento suele ser reducido.

Los lodos generados deben ser depositados en una zona especialmente acondicionada, con el fin de mantener las condiciones de pH, evitando la redisolución de los metales. Una práctica actual consiste en mezclar estos lodos con los procedentes de la concentración por flotación, de naturaleza alcalina, para su disposición conjunta.

4.6.2. Tratamientos pasivos

Estos sistemas se basan en la neutralización del drenaje ácido mediante el contacto con reactivos naturales, o creando un entorno cuyas condiciones limiten la producción de este fenómeno. Algunas de las técnicas empleadas se describen seguidamente.

Canal de caliza abierto

Este es el sistema más simple de tratamiento pasivo. Consiste en poner hacer circular el drenaje ácido a través de un canal recubierto de caliza. El principal problema es que debido al contacto con el oxígeno atmosférico, el ión férrico presente en las aguas precipita como hidróxido sobre la caliza, reduciendo en el tiempo la generación de alcalinidad. En ocasiones se instala una lámina sintética en el fondo del canal para evitar la infiltración.

Open Limestone Channel

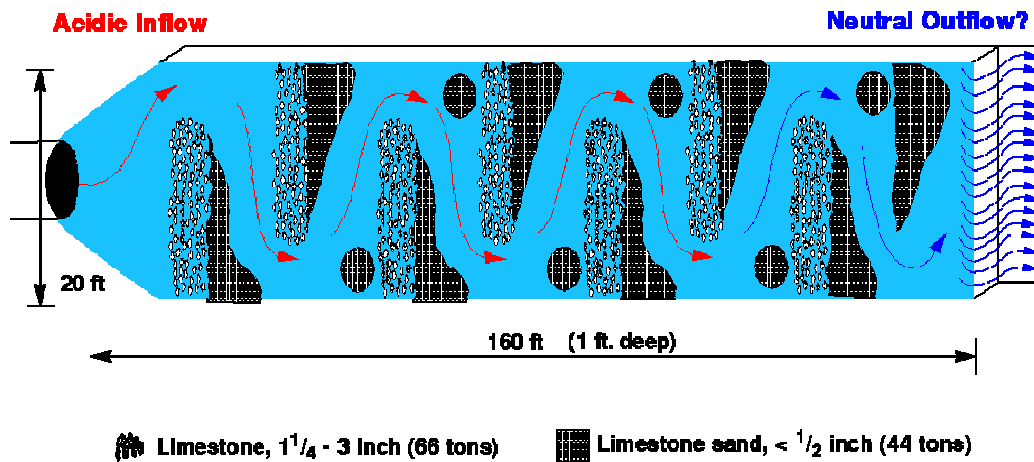
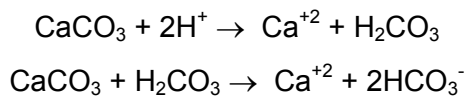


Fig. 4.1.- Circulación del agua en un canal de caliza abierto

Canal de caliza anóxico

Se construye un canal de grava caliza gruesa por el que se hace pasar el drenaje ácido, que disuelve la caliza generando alcalinidad como bicarbonato:



El canal se recubre con arcilla para evitar la entrada del oxígeno y la precipitación de los metales en forma de hidróxido sobre la caliza.

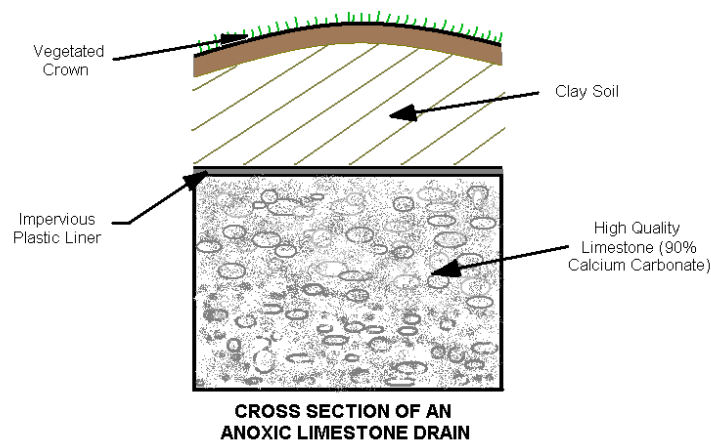


Fig. 4.2.-Sección transversal de un canal de caliza anóxico

Pantanos

Los pantanos poseen una base con el substrato adecuado para sostener la vegetación emergente. El drenaje ácido es conducido mediante flujo continuo hacia el pantano, manteniendo una lámina de agua de 10-50 cm sobre la base del mismo. La vegetación habitual es la *Typha Latifolia*.

Los pantanos aeróbicos se utilizan únicamente para aguas que contienen hierro, aluminio y manganeso en forma reducida, o pretratadas mediante un canal de caliza anóxico. Los metales precipitan en forma de hidróxidos, en una secuencia controlada de concentraciones y pH. Su funcionamiento es similar al de los pantanos naturales. Presentan una elevada relación superficie/volumen que maximiza la disponibilidad de oxígeno.

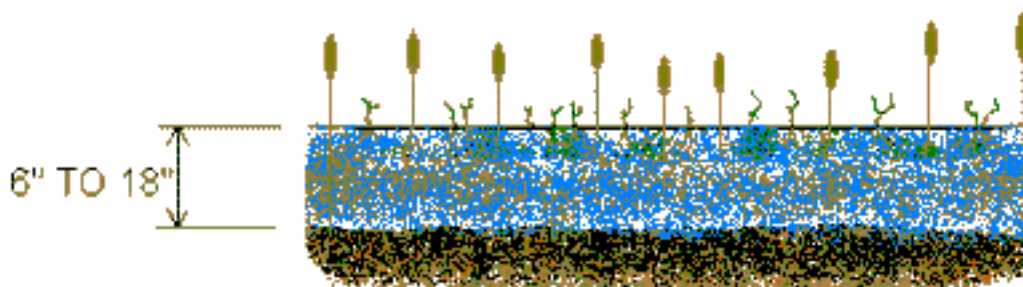


Fig. 4.3.- Sección transversal de un pantano aeróbico

Los pantanos anaeróbicos se caracterizan por un flujo subsuperficial, adecuado para el tratamiento de aguas con altos niveles de oxígeno disuelto, ión férrico y metales. Su forma es similar a la de los pantanos aeróbicos pero contienen una capa delgada de substrato, que genera alcalidad y produce la reducción de la acidez.

Los metales precipitan como sulfuros o formando complejos. Esto es debido a la reducción directa del sulfato a sulfuro de hidrógeno, en una reacción catalizada por las bacterias especializadas (*Desulfovibrium* y *Desulfotomaculum*). El precipitado de sulfuro de hierro es más denso y menos voluminoso que el del hidróxido férrico, y se mantiene estable dentro del lodo siempre que no varíen las condiciones anóxicas.

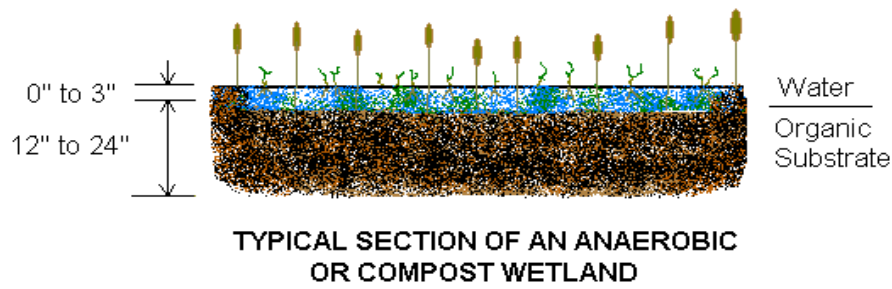


Fig. 4.4.- Sección transversal de un pantano anaeróbico

Sistemas de flujo vertical

Estos sistemas combinan los mecanismos de tratamiento de los canales de caliza abiertos y de los pantanos anaeróbicos. Para ello, se forma celdas de tratamiento con una capa de grava caliza y drenaje de fondo sobre la que se dispone una capa de sustrato orgánico, y una lámina de agua estática. El agua circula a través del sustrato y posteriormente del nivel calizo, siendo descargado a través del drenaje de fondo. El oxígeno disuelto es eliminado por las bacterias aeróbicas y la bacteria reductora de la zona anaeróbica genera alcalinidad. En la capa caliza, el carbonato es disuelto por las aguas anóxicas, produciendo alcalinidad adicional.

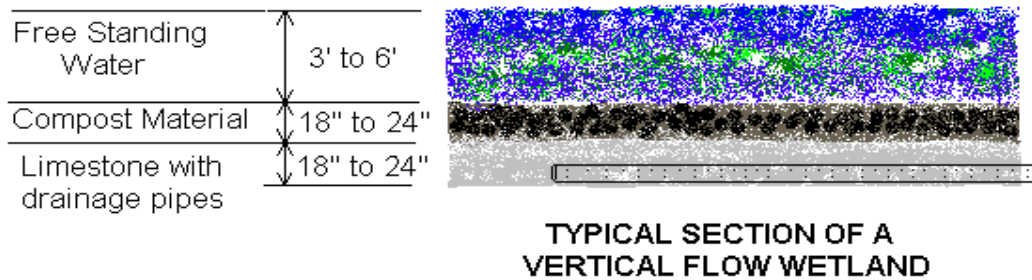


Fig.4.5.- Sección transversal de un sistema de flujo vertical

5. DOCUMENTACIÓN RECOMENDADA

5.1. BIBLIOGRAFÍA

- “Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería”, IGME (1999).
- “Residuos tóxicos y peligrosos: tratamiento y eliminación” (1989) MOPT.
- “Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the european union”, DG Environment, European Comisión (2001).
- “Acid Mine Drainage;Innovative Treatment Technologies”, C.Costello, U.S. Environmental Protection Agency (2003).
- “Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities”, Comisión Europea (Julio 2004).