

CONTROL Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MINERIA

Fernández Aller, R.

ABSTRACT : Waste waters from mining activities are very pollutant, specially those which have a low pH, because most of the metals are solubilized. The problem of mining waste waters (generally drainage waters) is solved in two different ways : a) reducing the infiltration of the waste water flow by means of control systems called "Mining Technics" and b) by means of waste water treatment "Water Technics" like oxidation or evaporation ponds, neutralization, desalation and aireation processes.

RESUME : Les eaux résiduelles provenant de l'activité minière sont contaminantes, spécialement si elles sont de caractère acide, étant donné que à pH acide, la plus grande partie des métaux deviennent solubles. La solution du problème posé par les eaux résiduelles (généralement eaux de drainage) se trouve en deux aspects : a) diminuer l'infiltration ou le volume d'eau dans la mine, les méthodes appliquées sont de contrôle et ont été appelées : "Techniques Minières". b) Traitement des eaux résiduelles ou "Techniques de l'Eau". Parmi ces dernières techniques on étudie les bassins d'oxydation et d'évaporation, la neutralisation, la désalinisation et l'aération.

RESUMEN : Las aguas residuales procedentes de la actividad minera son contaminantes, especialmente si son de carácter ácido, dado que a pH ácido, la mayoría de los metales se solubilizan. La solución del problema planteado por las aguas residuales (generalmente aguas de drenaje) tienen dos enfoques : a) disminuir la infiltración o el volumen de agua en la mina, los métodos aplicados son de control y se han denominado "Técnicas Mineras", b) tratamiento de las aguas residuales o "Técnicas del Agua". Entre estas últimas técnicas se estudian los estanques de oxidación y evaporación, la neutralización, la desalinización y la aireación.

Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S. A. (ENADIMSA)
Serrano, 116- Madrid - 6 - España.

SIAMOS-78. Granada (Español)

I. INTRODUCCION

La evolución progresiva del desarrollo industrial, urbano y agrícola mejora de forma constante el nivel de vida de la sociedad, por lo que este desarrollo es evidentemente positivo e irreversible.

Ahora bien, el desarrollo lleva consigo la producción acelerada de residuos que afectan de forma más o menos importante a los medios receptores, deteriorándolos y ocasionando con ello, entre otros, dos efectos graves: perjuicios de índole sanitario y reducción de los recursos naturales. A esta relación causa-efecto se la denomina contaminación.

De los tres medios receptores naturales, aire, suelo y agua, es sin duda el tercero, el agua, el recurso natural más escaso y el que en términos de balance se puede decir más desequilibrado con relación a la demanda.

Entre las actividades industriales contaminadoras del agua, la minería juega un importante papel, teniendo por otra parte unas peculiaridades propias que la diferencian del resto de las industrias en terminología práctica.

Con respecto al agua, en la minería cabe establecer dos fases, la primera fase son las operaciones de explotación bien sea ésta subterránea o a cielo abierto y la segunda fase son las operaciones de preparación del mineral, pudiéndose considerar a esta fase como un proceso industrial clásico.

Las explotaciones mineras tienen un condicionante muy claro en relación con el agua y es que no pueden escoger su emplazamiento puesto que el yacimiento es un recurso natural que se encuentra ubicado en un área determinada bajo unas condiciones geológicas dadas. De otra parte, en contraposición a la industria, que es consumidora, la minería es productora de agua.

La producción de agua en las minas varía considerablemente según el tipo de terrenos perforados, tipo de explotación, método de explotación, etc., así en Canadá, por ejemplo, los volúmenes bombeados varían de 3 l/h/t a 160 l/h/t en minería subterránea y de 70 a 90 l/h/t en minería de superficie. En España, en minería subterránea del carbón el caudal de agua de drenaje puede estimarse en unos 10 m³/t (Cuenca Asturiana).

SIAMOS-78. Granada (Español)

Las principales fuentes de agua del drenaje de mina son la infiltración de las aguas subterráneas (acuíferos) y la percolación a través de los minados de aguas de lluvia. En menor grado; otras fuentes de agua son las derivadas del uso de la misma en las operaciones mineras (operaciones mecánicas, perforación, supresión de polvo, refrigeración y acondicionamiento de aire, aguas sanitarias y drenaje procedente del relleno hidráulico).

En las explotaciones a cielo abierto la mayor incidencia la acusan las aguas de lluvia.

Los procesos industriales de preparación de menas son consumidores de agua y su consumo viene definido por el carácter del mineral o minerales a obtener y los tipos de procesos empleados para ello.

2. LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE DRENAJE DE MINA

La calidad de las aguas de drenaje de mina (minería superficial o subterránea) se puede caracterizar por sus propiedades físicas o químicas.

Las propiedades físicas a considerar son:

- La temperatura (tiene una influencia muy escasa)
- Los sólidos en suspensión y disolución

Las propiedades químicas:

- pH
- Alcalinidad o acidez
- Dureza
- Iones metálicos en disolución
- Contenidos en sales
- Contenidos en sílice
- Contenidos en ión amonio
- Contenidos en aceites y grasas
- Radiactividad

Resulta evidente que no se puede generalizar sobre los parámetros o propiedades citadas y que cada yacimiento es un caso concreto que debe ser analizado y estudiado de forma particular, sin embargo, si se pueden establecer unas características comunes sobre los grandes grupos en que se pueden subdividir las explotaciones mineras.

A) Rocas industriales

Por las propias características geológicas, los yacimientos de rocas industriales, son, por lo general secos, y por tanto tienen poca influencia sobre los medios receptores acuosos, en todo caso, el único parámetro a tener en cuenta sería los sólidos en suspensión producidos por el arrastre del material al agua y el color aparente que estos sólidos ocasionasen.

B) Explotaciones de Sales

Como es fácil de suponer las características de las aguas provenientes de este tipo de explotaciones se caracterizan por su alto contenido en sales (cloruros, sulfatos, etc.).

El tratamiento de estas aguas es un problema espinoso, no tanto por las posibilidades técnicas del mismo, sino por sus aspectos económicos dados los grandes volúmenes de aguas a tratar y sus altos contenidos en sales. La solución técnico-económica más aceptable depende en gran manera de la localización del yacimiento, y de las características geológicas (hidrogeológicas) y geomorfológicas del entorno del yacimiento.

Uno de los sistemas hoy más utilizados en la minería de sales en relación con la evacuación de sus aguas de drenaje es la inyección profunda cuando existen condiciones favorables para la ejecución de esta técnica, salvaguardando en todo momento la calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos explotables.

C) Minería metálica

Gran parte de los minerales brutos (mena + ganga) están asociados con sulfuros metálicos (inorgánicos) los cuales pueden ser clasificados - en términos generales como piritas. Algunas de las menas más comunes explotadas para la recuperación de metales como plomo, cinc, plata y molibdeno son asimismo sulfuros.

En general, la exposición de piritas y otros sulfuros inorgánicos a la atmósfera produce la oxidación de éstos a sulfatos. La disolución de los sulfatos en las aguas subterráneas o superficiales produce una degradación (variable) de las mismas a la vez que aumentan su acidez. El aumento de la acidez incrementa la solubilidad de los elementos - asociados y compuestos en el agua.

Los iones más comunes que se encuentran en las aguas de drenaje son: hierro (ferroso y férrico), aluminio, calcio y magnesio (dureza), manganeso, cobre, cinc, plomo, cadmio, níquel, arsénico, plata, cloruros, fluoruros, sulfatos, fosfatos y materiales radiactivos. La presencia y concentración de cada ión varía según el tipo de mineral, localización geográfica, período hidrológico, etc. Esta variación puede llegar a ser incluso significativa entre las diferentes áreas, o, en su caso, galerías o pisos de una misma mina.

Por tanto, la minería metálica, produce unas aguas de drenaje que pueden reunir todas las propiedades contaminantes establecidas al comienzo del apartado.

D) Combustibles sólidos

La minería del carbón produce unas aguas de drenaje ácidas o básicas según que en el yacimiento existan piritas o no, en el primer caso, la acidez vendrá determinada como en el caso anterior por la oxidación

SIAMOS-78. Granada (España)

de los sulfuros (piritas) y en el segundo, al no existir condiciones que den lugar a la acidez, la posible existencia del ión bicarbonato facilitará el carácter alcalino de las aguas.

Además de lo dicho, en las aguas de drenaje de las minas de carbón - hay que considerar los sólidos en suspensión y el color aparente por ellas producido en las aguas.

En todos los casos citados la contaminación producida por las aguas de drenaje tiene carácter inorgánico, no obstante la presencia de ión amonio puede definir una contaminación de origen orgánico, al provenir este ión de la descomposición de la urea, si bien en ocasiones - puede ser ocasionada su presencia por la degradación anaerobia de los nitratos.

3. METODOS PARA REDUCIR LA CONTAMINACION PRODUCIDA POR LAS AGUAS DE DRENAJE

Los métodos para reducir la contaminación producida por las aguas de drenaje se basan en los principios:

A) TECNICAS MINERAS

- a) Eliminación de las condiciones favorables a los materiales potencialmente contaminantes (Métodos de Control)
- b) Control de las aguas de infiltración

B) TECNICAS DEL AGUA

- a) Control y reducción de vertidos
- b) Tratamiento del agua

4. TECNICAS MINERAS

4.1.- METODOS DE CONTROL

4.1.1.- Minería de superficie

La contaminación de las aguas ocasionada por la minería de superficie proviene como ya se ha dicho de la exposición de los materiales potencialmente contaminantes a la oxidación. Antes de la explotación estos materiales se encuentran frecuentemente por debajo del nivel freático, estando por lo tanto aislados del ambiente atmosférico, no teniendo - por ello oportunidad de producir una contaminación significativa. Se trata, pues, con los métodos de control de crear condiciones similares a las existentes previamente a la explotación, o si se prefiere, reducir la exposición de los materiales contaminantes al ambiente atmosférico.

Entre estos métodos cabe citar:

- Segregación de materiales de relleno y enterramiento: La cubierta vegetal, y los terrenos no mineralizados excavados se utilizan como relleno, formando unas pilas en las que "se entierran" los materiales (Fig. 1) contaminantes (método utilizado en explotaciones de carbón al Este de los EE.UU.).

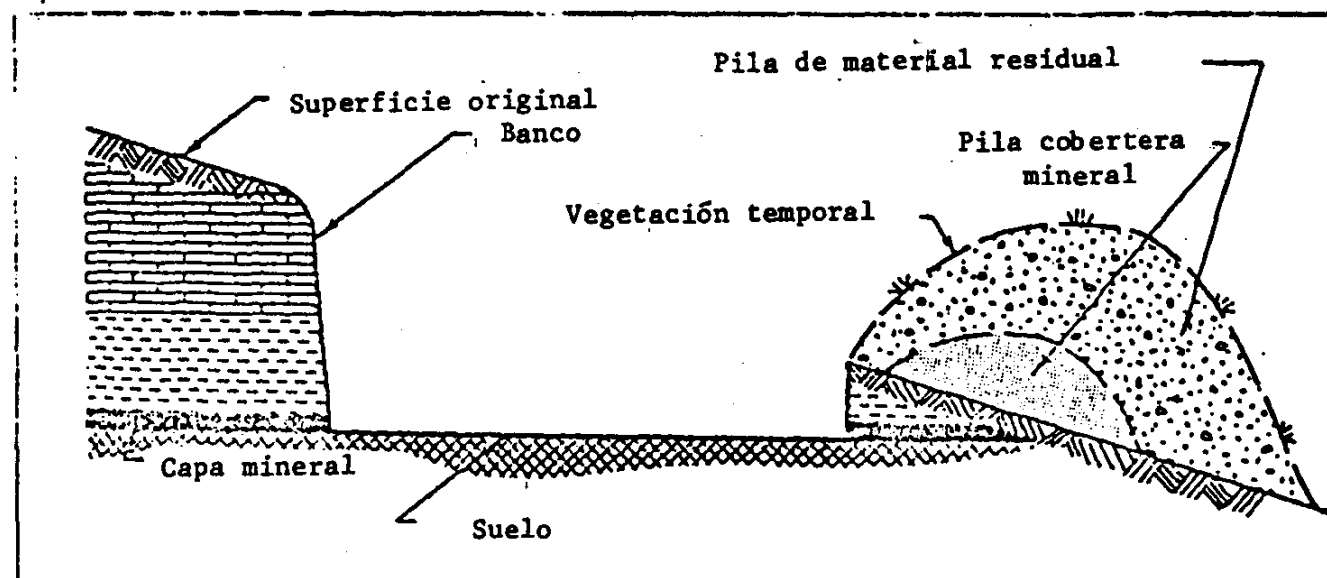


FIG. 1 - Segregación de materiales y enterramiento

SIAMOS-78. Granada (España)

- Barreras de mineral o explotación con frentes cortos (minería del carbón): Se deja sin explotar un frente de aproximadamente 9 metros de ancho a lo largo de la explotación, proveyendo así a ésta de un cierre natural reteniendo el agua de superficie o drenada durante las operaciones de laboreo.
- Explotación en frente largo (minería del carbón): Se trata de una aplicación de este mismo sistema de laboreo en minería subterránea o minería de superficie, mediante la maquinaria adecuada.
- Otros métodos: Se basan en la forma de apilar los materiales excavados aprovechando el sistema de explotación de la roca, la topografía de la zona o ambas circunstancias.

4.1.2.- Minería subterránea

En el caso de la minería subterránea, la contaminación de las aguas por disolución de iones metálicos subsiste y por tanto la solución solo tiene dos vías, o inundación o descarga nula de aguas de drenaje. Evidentemente estas soluciones son en gran medida teóricas y en todo caso complejas de llevar al terreno práctico.

Los métodos que hemos llamado de control serían:

- Inundación: Este sistema desde el punto de vista hidrogeológico requiere condiciones adecuadas y no siempre es posible, precisa socavones o galerías con pendiente hacia abajo en sentido de la explotación y dejar frentes de mineral a modo de cierre. El sistema es costoso por cuanto que durante la explotación exige el bombeo del agua infiltrada y dejar como se ha dicho unos frentes (barreras) de mineral no recuperable.
- Control de fracturas: la mayor parte del agua que penetra en las labores proviene del techo después de haber atravesado verticalmente los estratos suprayacentes. Durante las operaciones de laboreo se producen fracturaciones en el techo de las galerías que facilitan el paso del agua. Los sistemas de reducir este efecto son: a) dejar pilares de mineral como soporte, b) entibación como soporte adicional, c) galerías circulares para reducir los esfuerzos normales que actúan de forma más intensa en las zonas angulares de las galerías rectangulares y d) relleno de las fracturas.
- Otros métodos: son a) control de la extracción del mineral teniendo en cuenta que dentro de la explotación pueden existir materiales más contaminantes que otros, b) implantación de una atmósfera libre de oxígeno, utilizando la mina como almacén de hidrocarburos líquidos y gaseosos.

4.2.- CONTROL DE LAS AGUAS DE INFILTRACION

4.2.1.- Escombreras

SIAMOS-78. Granada (Español)

El control de la infiltración superficial requiere o bien aislar las escombreras de las zonas de alimentación de agua, o bien disminuir la permeabilidad del suelo. Generalmente no es viable eliminar las grandes cantidades de materiales excavados en las operaciones mineras que además por otra parte son necesarios en ocasiones para los sistemas de relleno. Bajo estas condiciones, si la infiltración del agua es causa de formación de contaminantes, no cabe otra solución que un control "in situ" de la infiltración.

El sistema de control requiere la utilización de alguno de estos sistemas: capas impermeables, implantación de una cobertura vegetal, constitución de una red de drenaje o por último la combinación de estos sistemas.

Las capas impermeables pueden ser constituidas a base de arcilla, asfalto, hormigón, latex, plástico o materiales especiales y deben ser compactadas suficientemente. Este sistema de impermeabilización resulta muy costoso.

Una densa cobertura vegetal pueden en algunos casos reducir la infiltración. La vegetación tiende a reducir la velocidad del agua y aumenta la retención de ésta en el suelo facilitando así una mayor evaporación.

El establecimiento de una red de drenaje en las escombreras o explotaciones de superficie, es quizás el sistema más ampliamente utilizado. Este sistema no es suficiente "per se", para eliminar el problema de la contaminación de las aguas, debiéndose complementar, en su caso, con el tratamiento adecuado de las aguas drenadas.

4.2.2.- Minería subterránea

Las presentes técnicas tienen por efecto reducir la cantidad de agua que se infiltra al interior de la mina y subsecuentemente reducir el bombeo de las aguas de drenaje y en su caso, su posterior tratamiento.

La infiltración proviene de la recarga por precipitación de los acuíferos. Las zonas de fracturación o fallas tienen una gran influencia sobre las líneas de flujo y frecuentemente sirven como canales interconexionados que conducen grandes cantidades de agua, estas zonas por tanto y en la medida de lo posible deben ser evitadas durante la explotación.

Algunos de los métodos para reducir la infiltración son los siguientes:

- Aumento de la escorrentía superficial: Esta técnica requiere eliminar las depresiones y explanar la superficie del suelo para incrementar la velocidad del agua, estableciendo asimismo una red de drenaje adecuada.

SIAMOS-78. Granada (Español)

- Cierre de pozos de agua existentes y relleno de fracturas o fallas.
- Extracción de agua mediante bombeo de los acuíferos interceptados. El estudio hidrogeológico establecerá el tipo de acuífero o acuíferos de la zona de explotación determinando:
 - Las características de los niveles piezométricos
 - Las características del bombeo (bombeo de extracción o inyección del agua de acuíferos más superficiales en acuíferos más profundos, etc.).
 - Colocación de las rejillas en los pozos.

5.- TECNICAS DEL AGUA

Si bien los métodos anteriormente descritos tienen por objeto reducir la contaminación de las aguas de mina, son métodos que requieren típicamente un planteamiento de ingeniería minera. Sin embargo con frecuencia no son suficientes para reducir el problema a sus justos límites o no son viables técnica o económicamente hablando, por ello es preciso acudir a métodos que entran de lleno en el ámbito de la ingeniería sanitaria, o suponen una combinación de ambas técnicas minera y sanitaria.

5.1.- CONTROL Y REDUCCION DE VERTIDOS

Los presentes métodos son aplicables cuando las técnicas de control en las labores mineras para reducir la contaminación son inefectivas o muy costosas o bien como alternativa de tratamiento de las aguas, en aquellos casos en que éste resulte prohibitivamente costoso.

5.1.1.- Reutilizaciones de los vertidos

Esta técnica es conocida también como minería en circuito cerrado, porque el agua generada durante los procesos de laboreo y preparación de minerales, no es vertida a los medios receptores.

Los elementos básicos del circuito son:

- a) Un sistema de recogida y transporte de las aguas drenadas de la mina hasta los estanques de almacenamiento.
- b) Un sistema de bombeo y transporte del agua, de los estanques de almacenamiento hasta la planta de preparación.
- c) Un sistema de transporte de estériles a presa de estériles.
- d) Un sistema bombeo y transporte de agua de presa de estériles a estanques de almacenamiento.
- e) En el caso de que una parte del agua almacenada en los estanques deba ser vertida a los medios receptores, habrá que estudiar su tratamiento adecuado.

Este método de control de las aguas, es aconsejable en regiones secas con escasez de agua. En regiones húmedas y especialmente en el

SIAMOS-78. Granada (España)

caso de minería a cielo abierto para el dimensionamiento de los es tanques se deberá considerar las condiciones climatológicas y expresamente los períodos punta (Fig. 2).

El coste del sistema varía para cada caso particular.

5.1.2.- Estanques de evaporación

Grandes presas de retención pueden ser utilizadas con el fin de con seguir una alta evaporación y una mínima descarga a los medios recep tores. En suelos permeables se requiere un revestimiento de materia les impermeables como arcilla. Los materiales arcillosos tiene a sú vez la ventaja de adsorber elementos químicos contaminantes tales co mo los compuestos de arsénico.

El sistema debe ser diseñado para el máximo de flujo con la mínima evaporación. Resulta evidente que este sistema solo es viable en zo nas áridas o semiáridas en las que la pluviometría sea menor que la evaporación. El requerimiento de un mantenimiento periódico es una limitación para el uso del presente método.

5.1.3.- Otros métodos

Además de los métodos ya citados cabe citar otros de aplicación muy particular debido a que su utilización es función directa no solo de la calidad de las aguas a verter, sino también de las característi cas específicas de los medios receptores.

Entre estos métodos se pueden indicar los siguientes:

- a) Irrigación por aspersión
- b) Inyección profunda
- c) Regulación de vertido

La irrigación por aspersión requiere que el agua no contenga elemen tos tóxicos para la vegetación y que no contenga asimismo altas con centraciones de sodio o sales solubles que puedan afectar la calidad de los suelos, especialmente a largo plazo. Es indudable que este sistema presenta graves problemas y por tanto su aplicación requiere detallados estudios.

La inyección profunda es un método muy conocido, que viene condicio nado principalmente por las características hidrogeológicas del te rreno y por la necesaria protección de la calidad de las aguas subte rráneas.

Por último la regulación de los vertidos viene definida por las ca racterísticas de regulación de los cursos fluviales, lo que implica asimismo un detallado análisis para utilizar los puntos de vertido en los ríos o tramos del río más favorables.

5.2.- TRATAMIENTO DE AGUAS

5.2.1.- Tratamiento de neutralización

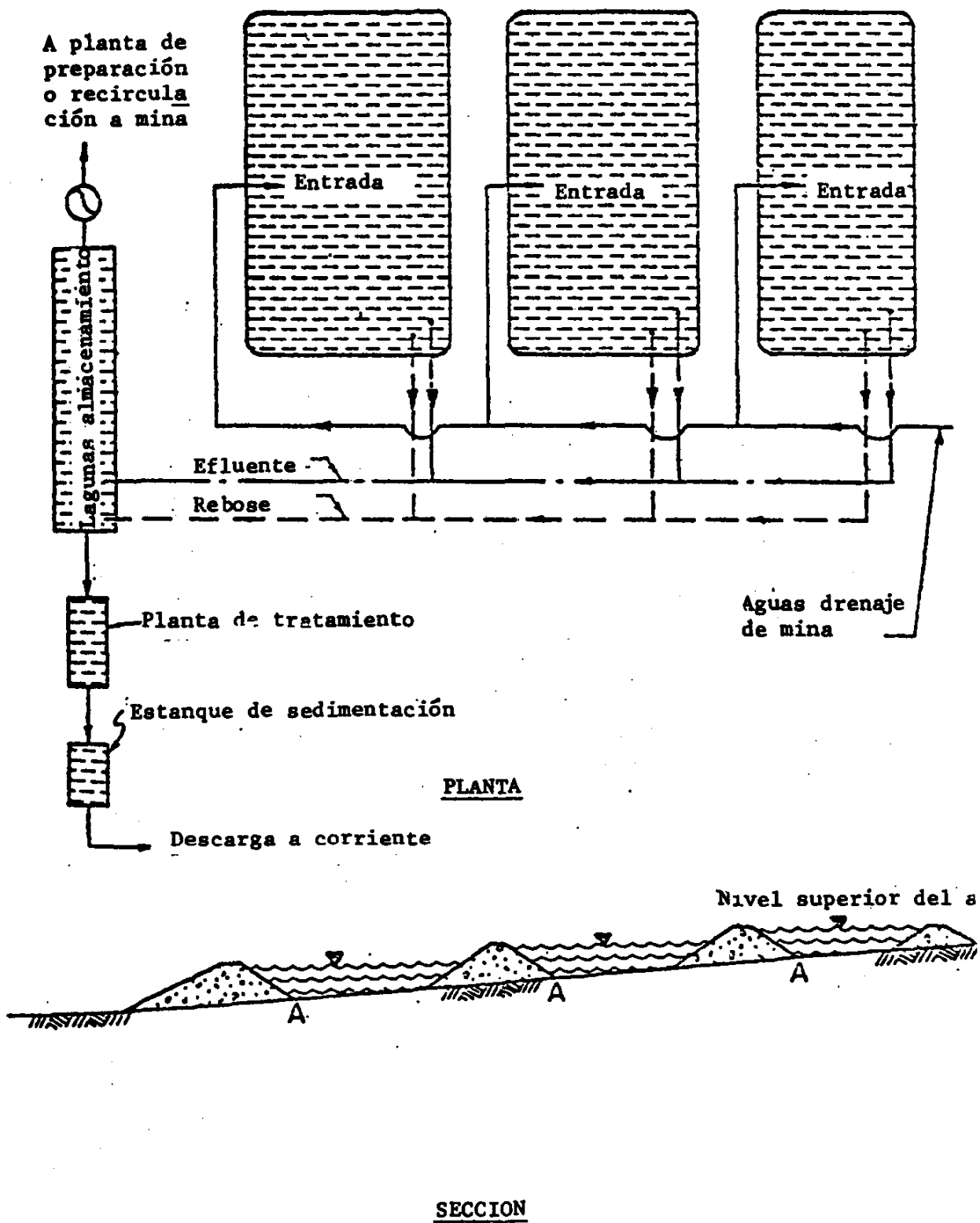


FIG. 2 - Reutilización de vertidos

SIAMOS-78. Granada (España)

Cuando las aguas de drenaje de mina son ácidas, la acidez puede ser neutralizada por la adición de agentes alcalinos. Con una adecuada elección del agente alcalino, muchos metales (cationes) pueden ser eliminados como hidróxidos insolubles. Los aniones como fosfatos, fluoruros y sulfatos pueden ser también precipitados mediante los citados agentes teniendo en cuenta el principio de insolubilidad.

De los estudios realizados en laboratorio (ver tabla 1) se puede ver la evolución de los agentes alcalinos más comunes, de acuerdo con su factor de basicidad, es decir la disponibilidad alcalina de cada material medida en gramos de carbonato cálcico por gramo de agente alcalino.

Los agentes alcalinos más usados son: cal rápida, cal hidratada, roca caliza, caliza en polvo, dolomía, magnesita, sosa caústica, cenizas de sosa e hidróxido de amonio; sin embargo, teniendo en consideración los grandes volúmenes de agua a tratar el factor coste es definitivo, por ello en la práctica los agentes más utilizados son cal, cal hidratada y caliza (ver tabla 1).

Las concentraciones de metales pesados en soluciones acuosas pueden por lo general ser reducidos por precipitación a hidróxidos insolubles, llegando así a concentraciones del metal en disolución de 1 mg/l o menos.

El pH al que se produce la precipitación es diferente para cada metal (ver valores típicos en tabla 2). En el caso de los metales anfóteros como cinc y aluminio, el metal se resolubilizará en la solución si ésta se hace demasiado alcalina.

TABLA 2

VALOR MINIMO DEL pH PARA LA PRECIPITACION DE IONES METALICOS COMO HIDROXIDOS

ION	pH	ION	pH	ION	pH	ION	pH	ION	pH
Sn^{+2}	4,2	Al^{+3}	5,2	Ca^{+2}	7,2	Ni^{+2}	9,3	Ca^{+2}	9,7
Fe^{+3}	4,3	Pb^{+2}	6,3	Zn^{+2}	8,4	Fe^{+2}	9,5	Mn^{+2}	10,6

Un caso especial y por otra parte frecuente, lo constituye la presencia de ion ferroso. El ion ferroso no alcanza el mínimo de insolubilidad a menos que la solución alcance un pH de 9,5, por el contrario el ion férrico es eliminado fácilmente por precipitación como hidróxido a pH próximo a 5. El sistema de eliminar el ion ferroso puede ser por tanto en base a condiciones alcalinas previa oxidación (aireación) a ion férrico o combinando ambos métodos. En presencia de ion ferroso, el tratamiento con caliza es difícil por cuanto que en el proceso se forma CO_2 que tiende a bajar el pH de la solución.

T A B L A 1

COMPARACION DE COSTE DE ALGUNOS AGENTES ALCALINOS UTILIZADOS PARA LA NEUTRALIZACION DE LAS AGUAS
DE DRENAJE DE MINA

A G E N T E	Composición	Factor de basicidad (1)	Relación de coste	A G E N T E	Composición	Factor de basicidad (1)	Relación de coste
Cal rápida	CaO	1,786	1,60	Magnesita	CO ₃ Mg	1,186	2,65
Cal hidratada	CaO(CH) ₂	1,351	2,30	Sosa caústica	50% NaOH	1,250	7,60
Caliza, roca	CO ₃ Ca	1,000	1	Ceniza de sosa	50% CO ₃ Na ₂	0,943	4,75
Caliza polvo	CO ₃ Ca	1,000	1,25	Hidróxido amonio	NH ₄ (OH)	1,429	5,65
Dolomía	CO ₃ CaMg	0,543	5,40				

(1) Gramos de CO₃Ca equivalente por gramo de agente alcalino

SIAMOS-78. Granada (España)

En los casos en que las aguas de drenaje sean alcalinas, prácticamente no subsistirán los problemas arriba expuestos.

En la tabla 3, se comentan algunas de las características más importantes de los procesos de neutralización más comunes. Asimismo en las Figs. 3, 4 y 5 pueden verse algunos de los esquemas clásicos del sistema de neutralización utilizados en minería.

5.2.2.- Tratamiento de lodos

Los procesos de neutralización produce una gran cantidad de lodos que es preciso tratar (reducir su volumen por secado) y depositar en un lugar idóneo.

Sobre los métodos de secado no existen evaluaciones de casos concretos en la literatura, sin embargo, a modo de orientación y según diversos autores los costes pueden estimarse de acuerdo con la tabla 5.

Los métodos de secado y deposición son:

- Implantación de grandes depósitos (presas) de sedimentación.
- Almacenamiento de los lodos en minas profundas abandonadas.
- Utilización de lechos de secado porosos (0,3-0,6 m de espesor del lecho con un espesor de lodos de hasta 0,45 m).
- Filtración a vacío (se consiguen lodos secos con concentraciones de sólidos de hasta el 30%).
- Deposición de lodos en el terreno mediante el sistema de vertido controlado.

5.2.3.- Tratamientos de desalinización, desmineralización o ablandamiento

5.2.3.1.- Procesos de evaporación

Los procesos de evaporación son métodos convencionales de desalación de aguas salinas o salobres, produciendo aguas de alta calidad para usos potables o industriales.

En la actualidad hay tres diferentes procesos: 1) evaporación súbita en múltiples etapas (E.S.) o (MFE), 2) evaporación en tubos largos con multi-efecto (E.T.L.) o (ME-L.T.V.), 3) compresión de vapor (C.V.) o (V.C.).

El proceso de (E.S.) se basa en el hecho de que el agua hierve a temperatura más baja cuando es sometida progresivamente a presiones más bajas. El agua de alimentación es calentada a 93°C y se introduce en una cámara a presión reducida que causa una evaporación súbita (flash) de las partículas de agua. El vapor asciende en la cámara, se condensa en los tubos y el agua destilada es recolectada en un separador. Los sólidos disueltos permanecen con el agua de alimentación (salmuera). La salmuera fluye a una segunda cámara a presión más baja que la primera y una cantidad adicional de agua es destilada, continuando así el proceso repetidas veces. Cuando la salmuera sale de la cá

AGENTE ALCALINO	PROCESO Y VELOCIDAD DE REACCION	EFICIENCIA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Caliza	Aumenta cuando se reduce el contenido en dolomía. Aumenta - cuando el tamaño del grano es menor	Depende del contenido de lón ferroso, en altas concent. de éste, es impracticable - ($\text{Fe} > 100 \text{ mg/l}$). Sistema relativamente poco utilizado	Lodos densos y generalmente sedimentables. Fácil manejo del material. Alimentación no requiere un control muy sensitivo	Reacciona lentamente requiriendo largos tiempos de retención. Usando grandes cantidades es más costosa que la cal
Cal	Neutralización con agitación durante 1 ó 2 minutos. Aireación posterior durante 15 a 30 min para oxidar Fe^{++} Sedimentación. Tratamiento de lodos	Muy alta $\text{pH} = 3 \rightarrow \text{pH} = 7$ $F \text{ total} = 360 \text{ mg/l} \rightarrow 7 \text{ mg/l}$	Facilidad de operación	Requiere un depósito o presa de almacenamiento de aguas a tratar para trabajar en continuo.
Caliza y Cal	La caliza se utiliza para neutralizar hasta pH 4. Tiempos de reacción: 20 - 30 min. para la caliza y 10 - 15 min para la cal.	A pH mayores de 6 la caliza es poco eficaz, por lo que se utiliza la cal	Lodos más densos - que utilizando la cal	Producción de más - cantidad de lodos que utilizando sólo caliza

DESCRIPCION GENERAL DE LOS PROCESOS DE NEUTRALIZACION. TABLA 3

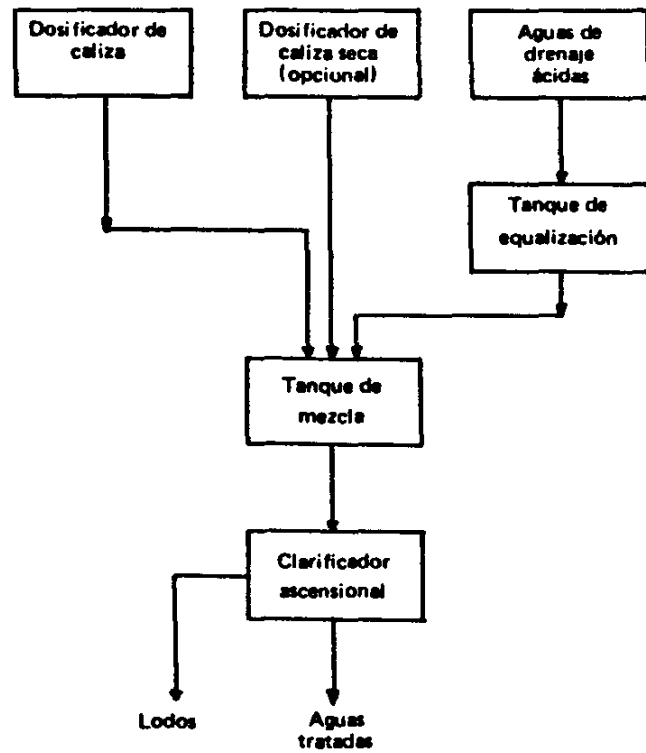


Fig. 3.— Neutralización con caliza pulverizada. Sistema F.W.Q.Q. "Norton Field Site" West Virginia (U.S.A.)

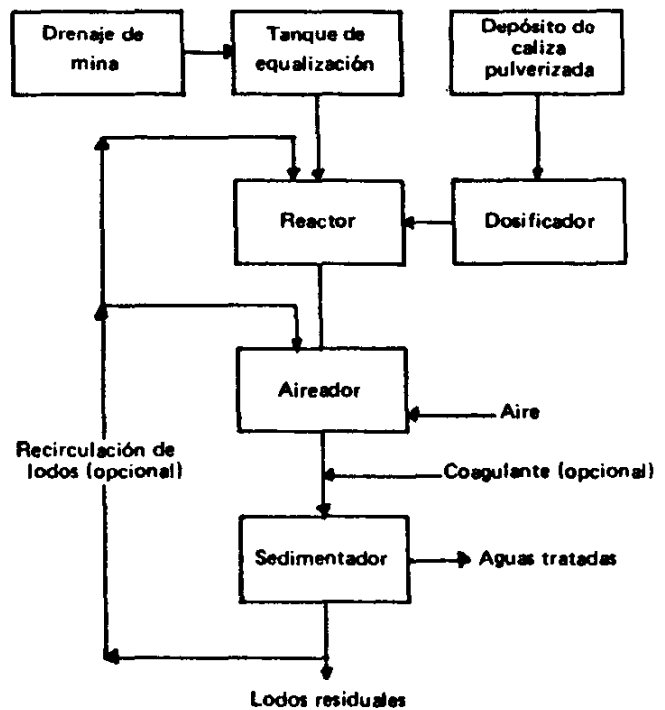
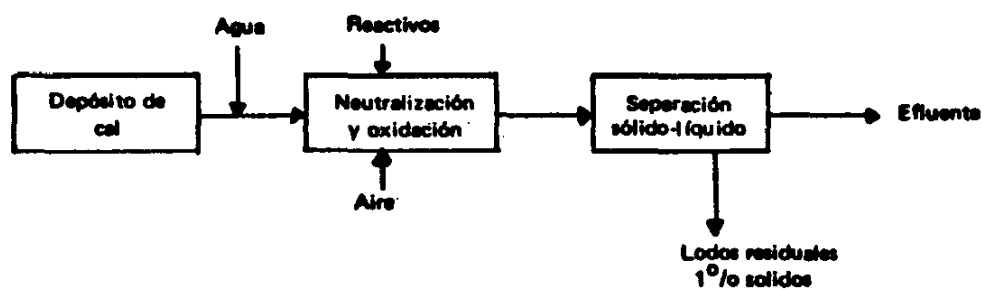


Fig. 4.— Neutralización con caliza pulverizada. Sistema B.C.R.

PROCESO CONVENCIONAL



PROCESO DE ALTA DENSIDAD DE LODOS

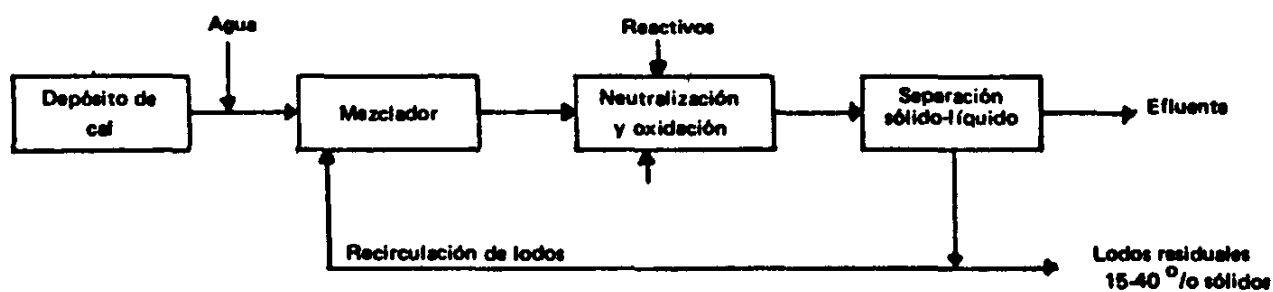


FIG. 5 - Comparación de los sistemas de neutralización con cal convencional y de lodos de alta densidad.

Para final, se utiliza para calentar el agua de alimentación. El equipamiento del proceso requiere la utilización de costosas aleaciones para evitar la corrosión. De otra parte el aumentar la concentración de sulfato de calcio aparecen frecuentemente problemas de depósitos de las tuberías. La salmuera requiere cuando se extrae del proceso un método adecuado de deposición en el terreno para evitar la contaminación de las aguas.

Un proyecto realizado por Westinghouse Electric Corporation concluyó que el proceso de (E.S.) puede ser aplicado a las aguas de drenaje para producir aguas potables en casos muy específicos. De acuerdo con los datos del citado estudio, los costes de operación y los costes de amortización (suponiendo una amortización del 6% en 20 años) supondría para el proceso con producción a vapor (energía) "in situ" un coste de 130,3 pts/m³ (153,3 cents/m³, coste a todas luces prohibitivo.

Las aguas producidas en este proceso tienen un contenido en sólidos disueltos menor de 50 mg/l. Esta calidad es mucho mayor que la usualmente requerida para fines domésticos o industriales.

5.2.3.2.- Otros procesos

Tanto el proceso anteriormente descrito como el resto de los procesos de desalinización hoy utilizados (osmosis inversa, electrodialisis e intercambio iónico) resultan en la práctica económicamente inaceptables, para tratar grandes caudales de agua, a la vez que técnicamente ocasionan problemas graves.

Así, según los estudios piloto, en el proceso de osmosis inversa la formación de sulfato de calcio y la presencia de los iones ferroso y férrico reducen considerablemente la eficacia de la membrana (acetato de celulosa). La calidad de las aguas obtenidas por osmosis inversa no es aceptable para aguas potables debido a su pH, acidez y a los contenidos en hierro y manganeso, su potabilización requeriría un tratamiento posterior de neutralización química, coagulación, filtración y esterilización.

El proceso de electrodialisis sólo ha sido estudiado a escala de laboratorio, observando que las membranas se obturan con facilidad y que una mejora de la eficacia del proceso requiere una coagulación y filtración previas.

Los procesos de intercambio iónico por medio de resinas intercambiadoras es un método muy conocido en la técnica del tratamiento de aguas para reducir la dureza, desmineralizar o eliminar un ión específico.

Las diferentes resinas intercambiadoras son utilizadas generalmente como sigue:

SIAMOS-78. Granada (España)

- Resinas catiónicas de ácidos fuertes:
De sodio: para eliminar dureza (Ca^{++} y Mg^{++})
de hidrógeno: para eliminar todos los cationes
- Resinas catiónicas de ácidos débiles:
De hidrógeno: para eliminar cationes asociados con aniones alcali
nos
para eliminar dureza bicarbonatada
- Resinas aniónicas de base fuerte:
Eliminación de todos los aniones
- Resinas aniónicas de base débil:
Eliminar eficientemente ácidos como clorhídrico y sulfúrico.

En la tabla 4 figura el orden de selectividad de iones de los dife
rentes tipos de resinas citadas. La combinación de las resinas hoy
disponibles en el mercado pueden ser empleadas en el diseño de un
tratamiento para cada caso específico.

Los procesos actualmente más utilizados de intercambio iónico son:

- a) El proceso Sul-bisul (Dow Chemical): Combinación de resina catió
nica de ácido fuerte (de hidrógeno) o resina de ácido fuerte - áci
do débil con resina aniónica de base fuerte. El proceso requiere
además: decarbonatación, filtración, ajuste de pH, neutralización
y clarificación.
- b) El proceso Desal. Combinación de tres lechos, resina aniónica de
ácido débil (de hidrógeno) -resina aniónica de base débil. Requiere
además: decarbonatación, aireación, sedimentación, ablandamien
to y filtración.
- c) El proceso de Dos Resinas (Culligan International Company): resi
na catiónica de ácido fuerte (de hidrógeno)-resina aniónica de ba
se débil (de hidróxido).

Los procesos arriba descritos tienen por objeto producir agua pot
ables a partir de aguas de drenaje o de río contaminados por estas
aguas. Entre los proyectos de este tipo conocidos figuran: la planta
Smith Township que trata agua de río contaminadas por el proceso Sul
-bisul y la planta de Hawk Run para tratar aguas ácidas de mina por
el proceso Desal. Ambas plantas se encuentran en Pennsylvania y pro
ducen aguas potables.

5.2.4.- Oxidación del hierro

Como ya se ha indicado, las aguas ácidas de mina contienen frecuente
mente hierro ferroso, que es muy soluble. Para su precipitación como
hidróxido indisoluble requiere pH muy básicos, es decir, entre 9, 3

y 12. La oxidación del hierro ferroso a férrico, es rápida a partir de pH 8, moderada entre pH 6-8, lenta entre pH 4-6 y muy lenta para pH menor de 4. El ion férrico es mucho menos soluble que el ferroso y comienza a precipitar a pH con una solubilidad mínima a pH 9,5.

La necesidad de alcanzar pH muy básicos para la precipitación del hierro ferroso, impone serias desventajas el proceso de neutralización, por ello se recurre a otros sistemas, clásicos también en el tratamiento del agua.

Tales sistemas son:

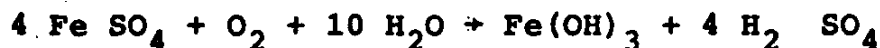
- Aireación
- Precipitación electroquímica
- Ozonización

TABLA 4 - SELECTIVIDAD DE ANIONES CON RESINAS INTERCAMBIABLES

TIPO DE RESINA	ORDEN DE SELECTIVIDAD
Cationes de ácidos fuertes (Tipo ácido sulfúrico)	$Ba^{++} > Ag^+ > Pb^{++} > Hg^{++} > Sr^{++} > Ca^{++} > Cu^+ > Ni^{++} > Cd^{++} > Zn^{++} > Fe^{++} > Mg^{++} > Mn^{++} > K^+ > Na^{++} > H^+$
Catiónicas de ácidos débiles (tipo ácido carboxílico)	$H^+ > Cu^{++} > Ca^{++} > Mg^{++} > K^+ > Na^+$
Amónicas de base fuerte (Tipo I amonio cuaternario)	$I^+ > HSO_4^- > NO_3^- > Br^- > Cn^- > HSO_3^- > NO_2^- > Cl^- > HCO_3^- > CH^- > F^-$
Aniónicas de base débil	$CH^- > SO_4^{--} > CrO_4^{--} > NO_3^- > PO_4^{3-} > I^- > Br^- > Cl^- > F^-$

La aireación se efectúa en tanques con una profundidad de 3 a 4,5 m y la transferencia de aire se realiza bien mediante difusores, o bien mediante agitadores mecánicos.

La acción del aire (oxígeno) puede ser resumida de forma teórica por la siguiente reacción:



El período de retención del agua en el tanque oscila entre 15 y 30 minutos. La eficiencia de la transferencia de oxígeno depende de diversos factores, valores frecuentes en los diseños son una eficiencia del 10% para aireación con difusores y un consumo de 1,5 km de O_2 para Kwh. Por este sistema 1 kg de Fe^{++} , requiere 5,5 m³ de aire para su oxidación. En aireación mecánica un caudal de 1 kg Fe^{++}/h - requiere 0,11 kw para su oxidación.

SIAMOS-78. Granada (Español)

El método de precipitación electroquímica ha sido puesto en funcionamiento por Tico Laboratories Inc. Los estudios realizados en células con ánodo de caolón y cátodo de acero inoxidable con aguas de drenaje ácidas (sintéticas) a pH 2,7 han demostrado que las concentraciones de ion ferroso pasan de $2 \cdot 10^{-2}$ M a $5 \cdot 10^{-4}$ M en una solución 0,2 M de ácido sulfúrico.

La utilización de ozono en combinación con el tratamiento posterior de neutralización ha sido estudiado por el Brookhaven National Laboratory de la Comisión de Energía Atómica de USA. La producción de ozono por descarga eléctrica tiene un grave inconveniente, su alto coste.

BIBLIOGRAFIA

- BURD, R.S. "A Study of Sludge Handling and Disposal".- Federal Water Pollution Control Administration Publication WP-20-4. Washington: U.S. Department of the Interior, 1968.
- GAINES, LEWIS, and others. "Electrochemical oxidation of Acid Mine Waters".- Fourth Symposium on Coal Mine Drainage Research. Coal Industry Advisory Committee to ORSANCO, April, 1970.
- GODDARD, R.R. "Mine Water Treatment".- Frick District, Mining Congress Journal, vol. 56, n° 3.
- HILL, RONALD D. "Control and Prevention of Mine Drainage".- Battelle Conference, 1972.
- HILL, RONALD D. and WILMOTH, ROGER. "Limestone Treatment of Acid Mine Drainage".- U.S. Environmental Protection Publication 14010, 1970.
- HILL, RONALD D. and WILMOTH, ROGER. "Neutralization of High Ferric Iron Acid Mine Drainage".- Federal Water Quality Administration Research Series 14010 ETV, 1970.
- HILL, RONALD D., WILMOTH, ROGER and SCOTT, R.B. "Neutrololosis Treatment of Acid Mine Drainage".- Paper presented at 26 th Annual Purdue Industrial Waste Conference, Lafayette, Indiana, May 1971.
- HOLLAND, C.T., CORSARO, J.L. and LADISH, D.J. "Factors in the Desing of an Acid Drainage Treatment Plant".- 2nd Symposium on Coal Mine Drainage Research. Pittsburgh, Pennsylvania: Coal Industry Advisory Committee to ORSANCO, 1968.

SIAMOS-78. Granada (España)

- HOLMES, J. and KREUSCH, E. "Acid Mine Drainage Treatment by Ion Exchange".- Technology Series EPA-R2-72-056. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, November, 1972.
- LYNCH, MAURICE, A. Jr. and MINTZ, MILTON, S. "Membrane and Ion - Exchange Processes. A Review".- Journal American Water Works Association. Vol. 64, n° 11, (1972), pp. 711-19.
- MANEVAL, D.R. and LEMEZIS, SYLVESTER. "Multi-Stage Flash Evaporation System for the Purification of Acid Mine Drainage" .- Society of Mining Engineers, AIME, Transactions 252, (March 1972), pp. 42-45.
- MCDONALD, DAVID, G. and others. "Studies of Lime-Limestone Treatment of Acid Mine Drainage".- Fifth Symposium on Coal Mine Drainage Research. Washington: National Coal Association, 1974.
- KEYSTONE COAL MANUAL (1974). New York, New York: Mining Information Services, McGraw-Hill, 1974.
- ROBINS, JOHN, D. and ZAVAL, FRANK J. "Water Infiltration Control to Achieve Mine Water Pollution Control".- Office of Research and Monitoring Research Series R2-73-142 (14010 HHG), U.S. Environmental Protection Agency, 1973.
- SINGER, P.C. and STUMM, W. "Oxygenation of Ferrous Iron".- Federal - Water Pollution Control Administration Research, Series 14010, 1969.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. "Surface Mining and Our Environment" Washington: U.S. Government Printing Office, 1967.
- WILMOTH, ROGER, C. "Limestone and Limestone-Lime Neutralization of Acid Mine drainage".- EPA 670/2-74/051. Washington: U. S. Government Printing Office, 1974.
- WILMOTH, ROGER, C. and others. "Combination Limestone-Lime Treatment of Acid Mine Drainage".- Fourth Symposium on Coal Mine Drainage Research, Pittsburgh, Pennsylvania: Coal Industry Advisory Committee to OPSANCO, 1972.
- YEH, S. and JENKINS, C.R. "Disposal of Sludge from Acid Mine Water Neutralization".- Journal Water Pollution Control Federation. Vol. 53, n° 4 (1971), pp. 679-688