

# Control del drenaje ácido de minas

- Los métodos para el control del drenaje ácido de minas se pueden clasificar en tres categorías:
- Métodos Primarios o Preventivos
- Métodos Secundarios o de contención
- Métodos Terciarios o de remediación

# Métodos preventivos

El objeto de los métodos preventivos es detener o reducir drásticamente la velocidad de la generación de ácido.

Dentro de esta categoría se encuentran los siguientes métodos:

- Remoción de sulfuros/aislamiento
- Exclusión del oxígeno por recubrimiento con agua
- Cubiertas de agua en estructuras de contención
- Disposición en lagos naturales
- Disposición de relaves en el mar
- Cubiertas de agua soportadas biológicamente
- Exclusión del oxígeno por cubiertas secas y sellado
- Cubiertas orgánicas
- Aditivos Alcalinos
- Bactericidas

# Métodos preventivos

El objeto de los métodos preventivos es detener o reducir drásticamente la velocidad de la generación de ácido. Esto se puede realizar, impidiendo el contacto de los sulfuros con el agua o el aire, o ambos, eliminando las bacterias responsables de la catálisis de las reacciones o controlando otros factores que influyan sobre las reacciones, tal como el pH, por adición de álcali al sistema.

- **Remoción de sulfuros/aislamiento.**

Método aplicable a relaves de flotación, y se trata de remover los sulfuros por flotación, generando un concentrado de bajo volumen y alta concentración de azufre el que puede ser dispuesto bajo condiciones controladas o reciclado.

# Métodos preventivos

- **Exclusión del oxígeno por recubrimiento con agua**

Aplicable a relaves y desechos mineros, esto se puede obtener cubriendo el desecho con un suelo de baja permeabilidad, incorporando una capa saturada de agua o cubriendo con agua.

El recubrimiento con agua es muy efectivo debido a que disminuye el oxígeno disponible (8.7 mg/l a 25°C) y su difusividad ( $2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) en el agua en comparación con los valores en el aire 21% v/v ( $285 \text{ g/m}^3$ ) con una difusividad de  $1.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . De este modo el oxígeno es suficientemente bajo para causar oxidación. Además la cubierta de agua también controlará la erosión por el viento y el transporte de partículas finas

# Métodos preventivos

Los factores que contribuyen a la estabilidad de relaves bajo cubiertas de agua son:

Disponibilidad de oxígeno.

Cubierta de sedimentos.

Adsorción sobre óxidos de hierro o manganeso.

- **Cubiertas de agua en estructuras de contención.**

Cubiertas de agua poco profundas en estructuras construídas se ven como una solución potencial permanente para los desechos generadores de ácido, especialmente relaves. Este es un sistema complejo y dinámico, todos los procesos que se presentan son interdependientes e interactivos, cualquier factor, como por ejemplo el viento puede influir en varios procesos.

# Métodos preventivos

Estos factores son:

- Movimiento del agua
- Procesos de transporte de oxígeno
- Procesos de transporte del relave
- Disolución de metales disueltos.
- **Disposición en lagos naturales**

Esta es una solución estable y segura para relaves reactivos. Tiene bajo riesgo de falla, sin embargo afectará a la comunidad biológica, la que puede ser restablecida una vez que se cierre la mina.

# Métodos preventivos

- **Disposición de relaves en el mar.**

Ampliamente utilizada en diferentes lugares del mundo. Consiste en colocar los relaves en compartimentos profundos (50m) en el mar, el objeto es aislar el relave del oxígeno, reduciendo la posibilidad de oxidación y por lo tanto la liberación de iones metálicos. Otro objeto de este sistema es prevenir que el relave afecte a la biología del sistema.

- **Cubiertas de agua soportadas biológicamente.**

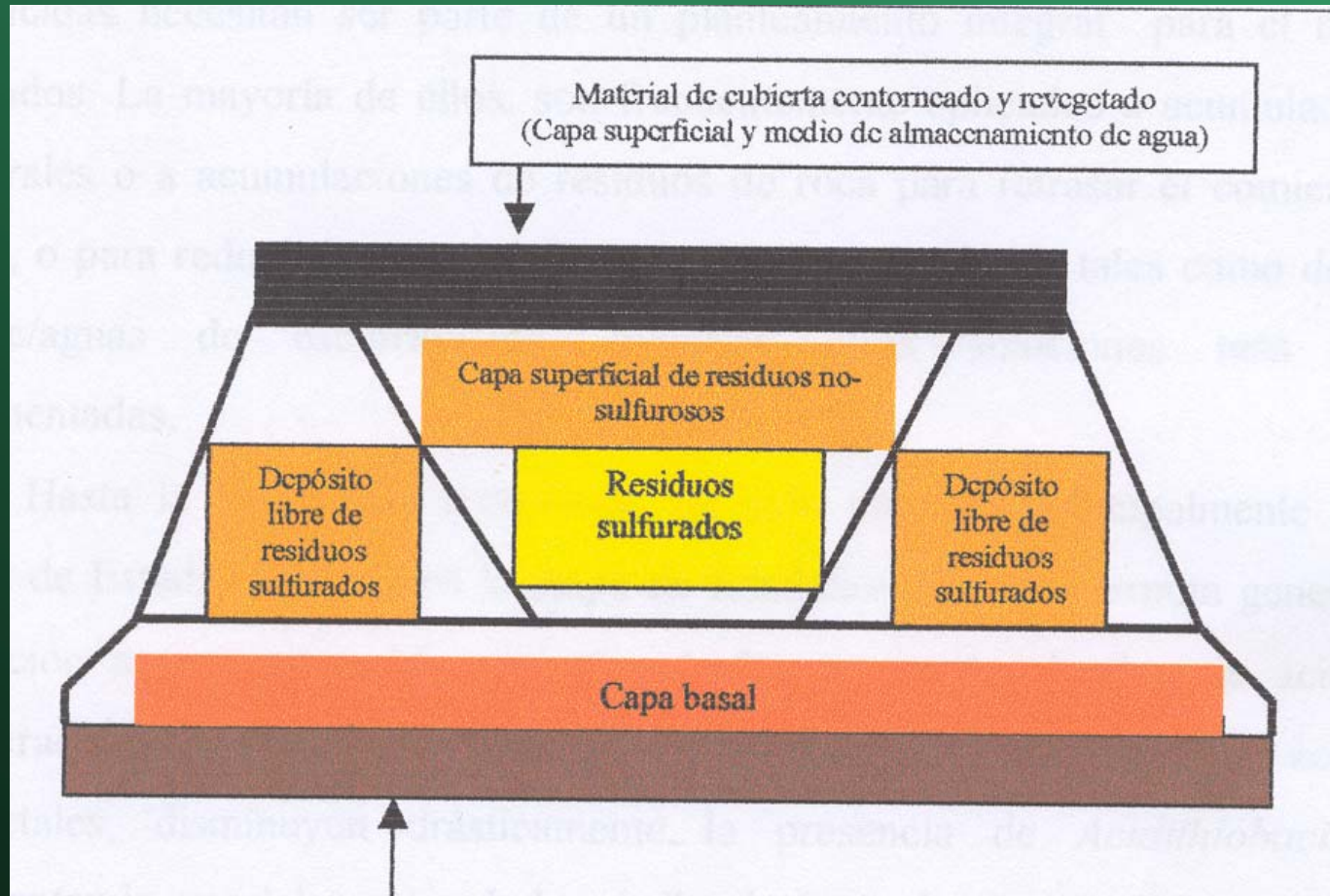
Las cubiertas de agua son muy eficientes pero no pueden ser mantenidas a perpetuidad especialmente en minas redundantes y/o en climas semiárido con exceso de evaporación, baja precipitación, etc.

# Métodos preventivos

- **Exclusión del oxígeno por cubiertas secas y sellado.**

Son aplicables a relaves y desechos de minas, cubriendo y sellando el acceso de oxígeno y agua a los desechos reactivos. Para limitar la entrada de oxígeno y agua la cubierta debe tener una baja permeabilidad al aire o al agua y no debe tener hoyos o imperfecciones o desarrollar cortes por desecación a través de la cual se produzca la entrada de aire o agua. (Tabla)

# Métodos preventivos



# Métodos preventivos

- **Cubiertas orgánicas**

Se utilizan desechos orgánicos tanto de fuentes urbanas como industriales, industrias de papel, de alimento, etc. Estos materiales pueden ser utilizados para el control de la generación de aguas ácidas mediante:

- Una barrera física al oxígeno
- Una barrera química al oxígeno
- Inhibición de la actividad bacteriana
- Precipitación de sulfuros
- Reducción de la infiltración de aguas

# Métodos preventivos

- **Aditivos Alcalinos**

Este es un método efectivo para el control de la generación de aguas ácidas. El objeto es controlar el pH mediante la adición de carbonato de calcio, óxido de calcio, e hidróxido de calcio. Otros aditivos son ceniza, fosfatos, desechos de minas consumidores de ácido, etc.

- **Bactericidas**

Se trata de agregar compuestos tóxicos para el desarrollo de las bacterias como *Acidithiobacillus* y otras especies de bacterias catalizadoras de la generación de ácidos. Se utilizan antibióticos, surfactantes, (SDS), benzoatos, lauril sulfato, etc.

# Métodos de contención

- Ayudan a prevenir o reducir la migración de Drenajes Acidos de Mina al ambiente.
- Se utilizan fundamentalmente para remover los iones metálicos que migran al ambiente.
- Se pueden señalar los siguientes métodos:
  - Desviación del agua superficial.
  - Interceptación de aguas subterráneas.
  - Reducción de infiltración.

# Métodos de Remediación

- Constituyen el tercer nivel de control y su objeto es recolectar y tratar el drenaje contaminado.
- Los métodos pueden ser:
  - Sistemas activos, los cuales requieren operaciones continuas como una planta de tratamiento químico.
  - Sistemas pasivos, los cuales funcionan sin un ajustado control.

Los tratamientos químicos ofrecen un método seguro de corto término, pero no sirven para minas redundantes. En estos casos, los sistemas de tratamiento pasivo son considerados como una alternativa.

# Métodos de Tratamiento Activo

El objetivo es entregar un líquido con una composición de acuerdo a las normas existentes para descarga de efluentes líquidos.

Los contaminantes son precipitados formando un lodo que se puede disponer en una forma ambientalmente aceptada.

# Métodos de Tratamiento Activo

- **Precipitación con hidróxidos**

El método mas común es la precipitación con una base o hidróxido, de modo de neutralizar el agua ácida y precipitar los iones como hidróxidos, por ejemplo As y Sb forman precipitados estables con Fe(III) o Ca. CaO o Ca(OH)<sub>2</sub> son los mas comunes agentes neutralizantes.

- **Procesos de Neutralización**

También se puede precipitar los hidróxidos de los iones metálicos subiendo el pH a valores entre 8.5-9.5. Esta tecnología la cual es ampliamente utilizada genera lodos con baja densidad conteniendo 2-5% de sólidos.

# Métodos de Tratamiento Activo

- **Estabilidad de los lodos**

Los lodos resultantes de la neutralización conteniendo sulfato de calcio, hidróxidos, arseniatos y antimoniatos deben ser dispuestos por largo tiempo.

Dos factores son de gran importancia: la estabilidad y la densidad.

La estabilidad es una medida del potencial de redisolución de algunos de sus componentes luego de interactuar con el ambiente y la densidad es un factor crucial para el almacenamiento.

# Métodos de Tratamiento Activo

Los componentes de los lodos son insolubles bajo las condiciones producidas, sin embargo, estos se pueden solubilizar cuando estos se exponen a aguas con bajo pH.

La presencia de iones complejantes, como cloruro, cianuro o iones orgánicos, puede aumentar la solubilidad de iones metálicos. Estudios realizados en Canadá indican que los lodos se van secando con el tiempo, por lo que su lixiviabilidad (iones) disminuiría.

# Métodos de Tratamiento Activo

- **Precipitación de sulfuros**

La remoción de iones metálicos desde soluciones contaminadas por precipitación como sulfuros es una alternativa a la precipitación con hidróxido.

Las solubilidades de los sulfuros son varios ordenes de magnitud mas bajas que los correspondientes hidróxidos, por lo que esta metodología tiene el potencial de reducir la concentración de metales disueltos a niveles muy bajos.

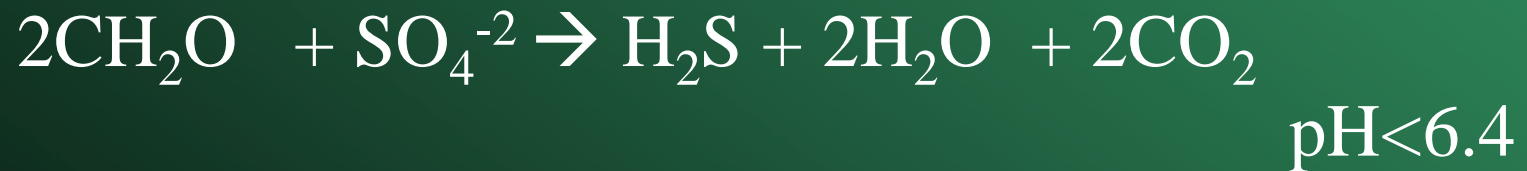


La concentración del ión metálico en solución se puede calcular a partir de la constante de solubilidad del sulfuro. La precipitación se puede realizar agregando  $\text{Na}_2\text{S}$  y  $\text{CaS}$ .

# Métodos de Tratamiento Activo

En soluciones conteniendo ión sulfato se puede generar sulfuro bioquímicamente mediante la participación de bacterias sulfato reductoras y en presencia de compuestos orgánicos, utilizados como nutrientes.

Esta reacción es dependiente del pH:



# Métodos de Tratamiento Activo

Como sustrato orgánico se puede utilizar una gran variedad de compuestos orgánicos. Los microorganismos utilizados son especies de *Desulfovibrio* y como parámetros fundamentales para el proceso se requiere pH cercano a la neutralidad y bajo potencial redox.

# Métodos de Tratamiento Activo

Otras bacterias utilizan un sistema de reducción de sulfatos en ausencia de material orgánico, son las bacterias autotróficas, las que utilizan hidrógeno ( $H_2$ ) como fuente de energía y  $CO_2$  como fuente de carbono (Hansford 2001). Las reacciones que dan cuenta de su comportamiento son las siguientes:



# Métodos de Tratamiento Activo

- En la actualidad hay tres procesos que han sido testeados a escala piloto y uno de estos opera exitosamente a escala industrial:
- Proceso que produce ácido sulfhídrico a partir de la reducción de sulfatos en DAM usando hidrógeno como donador electrónico y dióxido de carbono como fuente de carbono para las bacterias reductoras de sulfato.

# Métodos de Tratamiento Activo

El ácido sulfhídrico es usado para remover selectivamente sulfuros de cobre y de cinc y las aguas tratadas, conteniendo aún sulfuro, son recicladas. **El objetivo mayor de este proceso fue remover metales desde aguas de minas.** El proceso fue demostrado en una mina de cobre en desuso en British Columbia.

# Métodos de Tratamiento Activo

En un segundo proceso químico/biológico, sulfato y sulfuro son removidos simultáneamente durante el tratamiento biológico. El proceso usa sacarosa o etanol como fuente de carbono y donador de electrones. El proceso integrado incluye neutralización usando carbonato de calcio o caliza. Este proceso se desarrolló luego de 15 años de investigación sobre remoción bacteriana de sulfatos usando una gran variedad de fuentes de carbono y donadores de electrones. Una planta tratando DAM desde la operación de una mina de carbón ha sido recientemente completada en Sudáfrica.

# Métodos de Tratamiento Activo

El proceso THIOPAQ, desarrollado por Paques Biosystem en Holanda (Boonstra et al., 1999), trata drenaje ácido de minas y produce azufre y sulfuros metálicos usando dos bioreactores. El primer bioreactor es un reactor anaeróbico alimentado ya sea con etanol o con dióxido de carbono e hidrógeno como fuente de carbono y donador de electrones. **En el segundo bioreactor aeróbico, bajo oxígeno disuelto y potencial redox controlado, el sulfuro es oxidado a azufre elemental.**

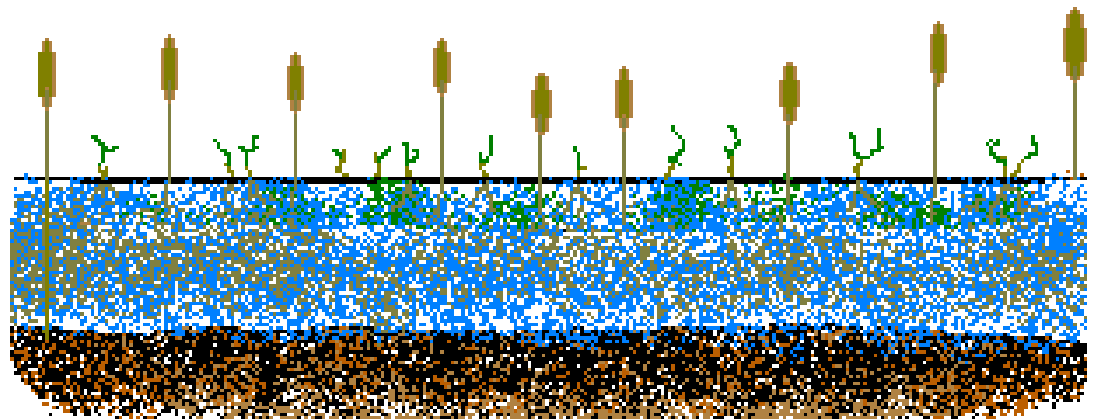
# Métodos de Tratamiento Activo

Este azufre es removido en un tubo. La solución conteniendo sulfuro del primer reactor es reciclada y mezclada con al DAM fresco para precipitar los metales como sulfuros. Basado en resultados de plantas piloto, una planta a gran escala se instaló en una refinería de cinc de Holanda y ha operado exitosamente desde 1992. La planta maneja un flujo en exceso de 300 m<sup>3</sup>/h y reduce el sulfato desde 1000 a menos de 200 mg/l. La planta trata aguas subterráneas contaminadas y usa etanol como fuente de carbono y donador de electrones.

# Métodos de tratamientos pasivos (Wetland)

- Requieren una gran área comparada con los sistemas activos, sin embargo, consumen menos energía y menos reactivos.
- Requieren menos atención operacional y mantención.
- Tienen su origen en la observación de lagunas naturales que recibían AMD, las cuales transformaban el agua contaminada en agua limpia.
- Se basan en la degradación natural que se produce en los suelos pantanosos se tiene condiciones aeróbicas en la superficie y lentamente se van dando las condiciones anaeróbicas que permiten el desarrollo de las bacterias sulfato reductoras.

6" TO 18"



**TYPICAL SECTION  
OF AN AEROBIC  
WETLAND**

# Pantanos aeróbicos y anaeróbicos

- Como sustrato en estos pantanos se pueden utilizar productos orgánicos naturales de bajo costo y residuos tale como compost, estiércol de caballo y vaca, heno, turba, viruta de madera y polvo de aserraderos.

# Predicción de la Capacidad de Generación de Aguas Acidas

- Un programa de predicción debería contemplar los siguientes pasos:
  - Identificar todos los materiales potencialmente afectados por la mina.
  - Predecir el potencial de lixiviación de metales y de drenaje ácido de cada material en la forma y condiciones ambientales en las cuales se hallará expuesto.
  - Crear una estrategia de manejo, y monitoreo con el objeto de proteger el ambiente.
- El procedimiento recomendado es estudiar el sitio, identificar y muestrear las fuentes potenciales de AMD

# Test para las Muestras Recogidas

- Las muestras deben ser sometidas a:
  - Test estáticos: para determinar el balance entre producción y consumo de ácido de los componentes minerales en las muestras individuales. Rápidos y sencillos.
  - Test cinéticos: para muestras potencialmente generadoras de ácido. Definirán el potencial actual para generación de ácido en el tiempo y la calidad del drenaje esperado. Requieren largo tiempo.

# Test Estáticos

- Generalmente Involucran:
  - Contenido de elementos traza (concentración total y concentración soluble).
  - Balance Acido-Base (ABA).
  - Potencial de neutralización de la masa, expresado como carbonato.
  - pH.
  - Mineralogía y otras propiedades geológicas

# Test ABA

- Conjunto de test para la determinación del balance entre la producción de ácido y el consumo (neutralización) por los componentes del mineral en una muestra dada. Ellos involucran:
  - Calculo del potencial de acidez (AP) de la muestra a partir de las concentraciones de azufre total, sulfato y azufre sulfuro.
  - Medidas del potencial de neutralización de la masa. (NP).
  - Medidas del pH de la pasta.

# MEDICIÓN DEL PH EN PASTA

- Inicialmente, se mide el pH en pasta de la muestra para determinar si antes del análisis ha ocurrido generación de ácido.
- Si el valor del pH es mayor que 8, la muestra probablemente contenga carbonatos reactivos; si es menor que 5, posiblemente haya habido generación de ácido en la muestra, o en el material circulante

# Cálculo de NP

- Si consumo de ácido:
  - Excede potencial de generación de ácido, la muestra no será una fuente generadora de ácido y no se requiere mas análisis.
  - Es menor o la diferencia es marginal, la posibilidad de generación de ácido existe. Se requiere un test de confirmación.

# Test de confirmación o shake flask test

- Los objetivos son:
  - Confirmar los resultados de predicción estáticos.
  - Determinar si las bacterias hierro y azufre oxidantes pueden generar más ácido desde una muestra que lo que puede ser consumido.

# Test de confirmación o shake flask test

- El principio del test es determinar en qué grado el contenido de azufre de la muestra podría ser oxidado y si esta cantidad de ácido es suficiente para superar la capacidad de neutralización. Se realiza mediante un test de oxidación biológica.

# Principios del Test de confirmación

- Si el pH está alrededor de 3.5 en esas determinaciones, la muestra se clasifica como un no productor de ácido, puesto que el pH está fuera del rango de crecimiento de esta bacteria.

# Principios del Test de confirmación

- Si el pH permanece por debajo de 3.5, indica que el material es generador potencial de ácido.
- Así la muestra puede producir ácido o no producirlo a partir de los sulfuros presentes y por la actividad bacteriana

# Test de confirmación o shake flask test

- Este es un test cualitativo y se informa:
  - Descripción de la muestra
  - Duración del test (días de duración luego de la inoculación)
  - pH inicial
  - pH después de oxidación biológica
  - pH después del primer agregado
  - Confirmación de producción potencial de ácido (Si/No)

# Test Cinéticos

- Proveen una medida del comportamiento dinámico o reactividad de una muestra en el tiempo. Pueden proveer la siguiente información:
  - Velocidad relativa de generación del ácido y neutralización, lo cual determina cuando una muestra producirá acidez.
  - Tiempo para que comience el AMD, lo que determinará cuanto puede retrasarse una acción preventiva.
  - Drenaje químico y cual será la carga resultante de la corriente de agua.

# Calidad de Drenajes: Acidos y Neutros

EFLUENTE	PARAMETROS en mg/l excepto para el pH)							CLASIFICACION
	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Zn	Cu	Fe	As	Mn	
1. Filtración de un botadero de desmonte piritico en una mina operativa sulfurosa de metales bases	1,7	38 400	3 220	375	13,390	100	819	Acido con elevadas concentraciones de metales
2. Drenaje de una mina operativa sulfurada de metales bases con contenido de piritita	1,35	24 800	1 255	79	8 362	70	145	pH bajo, sulfato y ácido alto
3. Drenaje de una mina sulfurosa de metales bases con niveles significativos de cobre	2,0	2 980	390	97	600	<1	128	Acido con elevadas concentraciones de metales
4. Drenaje de una mina sulfurosa de metales bases con niveles de cobre significativo	1,9	n.a.	520	360	1 800	n.a.	n.a.	Acido con elevadas concentraciones de metales
5. Drenaje de una mina de metales bases con bajo contenido de piritita	4,4	>1000	99	65	92	<1	29	Acido con elevadas concentraciones de metales
6. Drenaje de una mina sulfurosa de metales bases con bajo contenido de piritita y roca carbonácea	8,9	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Alcalinos con concentraciones indeterminadas de metales.
7. Drenaje de una mina sulfurosa de metales bases	3,5	916	n.a.	10,9	n.a.	n.a.	40	Acido con elevadas concentraciones de metal
8. Agua residual de una poza de relaves de una mina sulfurosa de metales bases	7,0	598	1	<0,1	<1,0	n.a.	16	pH neutro con sulfato
9. Agua residual de una poza de relaves de una mina sulfurosa de metales bases	9,0	502	0,2	<0,1	2,6	n.a.	2,35	pH neutro con sulfato
10. Filtración de una poza de contención de concentrados complejos	10,0	470	47	22	93	0,5	11	pH neutro con sulfato y zinc
11. Filtración de una poza de contención de concentrados complejos	12,0	283	208	6,3	33	0,01	0,9	pH neutro con zinc

## **METODOS DE LIXIVIACION PARA APLICAR A RELAVES DE FLOTACION Y ESCORIAS DE FUNDICION**

- Estos métodos se usan como parte de los programas de predicción del drenaje ácido de minas, para determinar la naturaleza y cantidades de constituyentes solubles que pueden ser lavados desde materiales bajo condiciones naturales de precipitación (lluvias o aguas meteóricas)

## **METODOS DE LIXIVIACION PARA APLICAR A RELAVES DE FLOTACION Y ESCORIAS DE FUNDICION**

- La peligrosidad de algunos residuos sólidos se determina en función de su lixiviabilidad y de la cantidad de metales u otros contaminantes que eventualmente se pueden disolver a partir de ellos.
- Las pruebas de lixiviación implican el contacto del material (residuo) con una solución para determinar que constituyentes serán lixiviados por la solución y liberados al medio ambiente.

# Principales características de las pruebas de lixiviación.

	Rango De pH	Relación sólido/líquido	Granulometría	Duración (horas)	Fluido de extracción	Temperatura
<b>TCLP EPA 1311</b>	< 5.0	1/20	< 9.5 mm	18 ± 2	HAc/N aOH	23 ± 2 °C
<b>SPLP EPA 1312</b>	< 4.2	1/20	< 9.5 mm	18 ± 2	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /HNO <sub>3</sub>	23 ± 2 °C
<b>SWEP BC</b>	< 5.0 ± 0.2	1/20	< 9.5 mm	24	Hac	20 – 25 °C
<b>ASTM 3987</b>	5.0 – 5.5	1/4	—	18	H <sub>2</sub> O	—