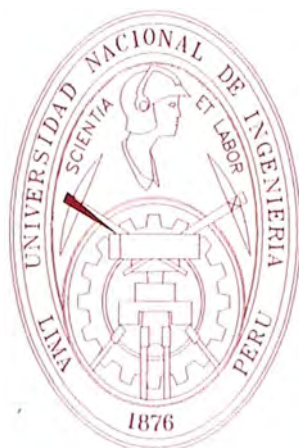


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y TEXTIL



**PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCION PRELIMINAR DE
TECNOLOGIAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES ACIDAS DE MINERIA**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUIMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

GLORIA VIVIANA RATTO VERGARAY

LIMA-PERU

2007

Dedicatoria:

A Dios, a mi familia que en todo momento me apoyaron para la culminación de mi carrera profesional, a mi amor por creer siempre en mí y especialmente a mi madre por su ejemplo y dedicación para salir adelante.

RESUMEN

En el presente informe se propone una lista de chequeo, la cual será usada como herramienta básica sugiriendo un diagnóstico preliminar y seleccionar los posibles tratamientos activos para efluentes ácidos de mina.

En el primer capítulo se plantea en la introducción, de manera general, el problema de los centros mineros en nuestro país por la generación de efluentes ácidos, así también se definen los objetivos generales y específicos de este informe.

El segundo capítulo trata del desarrollo de los conceptos y técnicas de los centros mineros, se mencionan la descripción de la actividad minera, la caracterización de sus efluentes así como el marco normativo aplicable a este sector.

El capítulo tres contiene las descripciones los centros mineros, la exploración de opciones para conocer las tecnologías existentes, se citan otros tratamientos que se pueden llegar a emplear pero aún no son usados en nuestro país, se muestran sus ventajas y desventajas de las tecnologías. En dicho capítulo se propone la lista de chequeo y se da un ejemplo de cómo debe de ser usada, así como el análisis de los resultados obtenidos, se menciona también de manera general el tratamiento de los lodos que se generan de los tratamientos activos de efluentes ácidos de mina.

En el capítulo cuatro se describen las conclusiones en base a los objetivos planteados en el capítulo uno.

El capítulo cinco se presentan las citas bibliográficas utilizadas para la elaboración del presente informe.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN	Pg. 6
1.1 Objetivos Generales	7
1.2 Objetivos Específicos	7
II. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS	8
2.1 Descripción de la actividad minera	8
2.2 Descripción / caracterización de los efluentes de las actividades del sector.	11
2.3 Marco Normativo aplicable al sector	12
III. DESARROLLO DEL PROCESO	18
3.1 Descripción del proceso productivo para un centro minero particular.	18
3.1.1 Proceso productivo	18
3.1.2 Caracterización del efluente	23
3.2 Exploración de opciones.	25
3.2.1 Tecnología convencional en el Perú.	26
3.2.2 Tecnologías alternativas para el tratamiento de efluentes ácidos.	29

3.2.3 Comparación de tratamiento activo de las tecnologías nombradas de efluentes ácidos	39
3.3 Herramienta para selección del tratamiento a emplear para efluentes ácidos	43
3.4 Tratamiento de lodos	57
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
V. BIBLIOGRAFÍA	63

I. INTRODUCCIÓN

La minería es uno de los sectores económicos más importantes en nuestro país y representa normalmente más del 50% de las exportaciones peruanas con cifras alrededor de los 4 mil millones de dólares al año. Actualmente sus insumos son fuertemente demandados para procesos industriales de alto nivel tecnológico.

Desafortunadamente es una de las actividades con gran potencial contaminador de las aguas, como consecuencia produce el deterioro del medio ambiente y de la salud en la comunidad.

Las minas ocupan grandes áreas expuestas a los cambios climáticos como las lluvias, en donde hay un contacto de las aguas con el mineral y el suelo expuesto, pudiendo ocurrir una serie de procesos del medio físico, como la erosión, o procesos químicos como la oxidación de los sulfuros, causantes de drenaje ácido de mina. Además, una buena parte de los procesos de beneficio de minerales son de vía húmeda, de modo que los desechos contienen una fracción acuosa potencialmente contaminante como los efluentes de la flotación de minerales; por ello en el presente trabajo se va a tratar el tratamiento de efluente minero de alta acidez pues es un problema que requiere mayor atención en nuestros yacimientos ya que perjudica severamente la vida acuática de los ríos que reciben la descarga y la ecología alrededor, el tratamiento de efluentes ácidos puede ser de dos formas básicas: sistemas de tratamiento pasivo y los sistemas de tratamiento activo.

La diferencia principal entre estos es que el sistema de tratamiento activo requiere de un mantenimiento constante, por ejemplo el abastecimiento de cal para la neutralización y transporte de los lodos fuera del sitio. Mencionaremos las alternativas que se tiene para el tratamiento activo actualmente en el Perú. Se mostrarán las tecnologías existentes para el tratamiento, sus ventajas y desventajas, datos que se tienen en cuenta en un monitoreo para la caracterización de efluentes. Se planteará un ejemplo práctico en donde se hará uso de una lista de chequeo creada con el fin de ayudar a la selección de la tecnología a emplear en base a los beneficios y características particulares de los efluentes, esto servirá a los consultores e ingenieros para emitir un primer diagnóstico para saber que

tecnología les convendría utilizar de acuerdo a las características que presenta el efluente ácido.

1.1 Objetivos Generales

- Dar a conocer las diversas tecnologías existentes para el tratamiento de efluentes ácidos.
- A partir de los criterios fundamentales de las tecnologías para tratar efluentes ácidos, crear una lista de chequeo práctica para un primer diagnóstico de la tecnología a utilizar.

1.2 Objetivos Específicos

- Dar a conocer los métodos de extracción de la actividad minera.
- Conocer y entender la normativa peruana sobre el control de efluentes ácidos.
- Dar a conocer los diferentes tratamientos activos que se emplean para el control de efluentes ácidos en la minería peruana.
- Establecer las ventajas y desventajas de cada uno de las tecnologías para el tratamiento de efluentes ácidos en la actividad minera.
- Mostrar cómo se crea de un registro práctico que puede servir como un primer diagnóstico para la selección de la tecnología a utilizar.

II. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS

2.1 Descripción de la actividad minera

En la actividad minera realiza la obtención selectiva de minerales, los métodos de extracción de esta actividad son cuatro: minería de superficie en las cuales se realizan exploraciones de cielo abierto o excavaciones abiertas, segundo están las minas subterráneas en las que se tienen que realizar túneles para el ingreso, minería por dragado y por último es la recuperación de minerales y combustibles a través de pozos de perforación.

A continuación se describe brevemente los métodos de extracción mencionados:

Minería de Superficie

Las minas de superficie son minas a cielo abierto las cuales adoptan forma de grandes fosas en terrazas, son cada vez más profundas y anchas, generalmente tienen forma más o menos circular. La extracción empieza con la perforación y voladura de roca, esta se carga y se transporta a la planta de recuperación en la cual realizan la clasificación. Muchas minas empiezan como de superficie pero cuando llegan a un punto en el que es necesario extraer demasiado mineral utilizan métodos de minería subterránea.

Otro tipo son las que se realizan como exploraciones al descubierto con frecuencia se realiza para extraer carbón, la diferencia con las minas a cielo abierto, es que el material de deshecho no se transporta y se vuelve a dejar en la cavidad creada estas minas van avanzando poco a poco rellenando el terreno.

También se considera minas de superficie las canteras las cuales son consideradas parecidas a las minas de cielo abierto, la diferencia es que de las canteras se extraen minerales industriales y materiales de construcción, el material que se extrae en su mayoría se transforma en otro producto por lo que hay menos material de desecho, al final del uso de la cantera queda una gran excavación.

Se tienen también como mina de superficie, las minas de placer, las cuales son excavaciones de depósitos de aluvión en los que encontramos la arena, grava, arcillas entre otros. Los minerales de valor se separan mediante sistemas de lavaderos y cribas, los minerales valiosos extraídos son el oro, platino, estaño y gemas (como diamantes y rubíes). Este tipo de minas suelen estar situados en lechos de ríos y depósitos glaciares.

El proceso de extracción es sencillo y la recuperación de los minerales es física y no química.

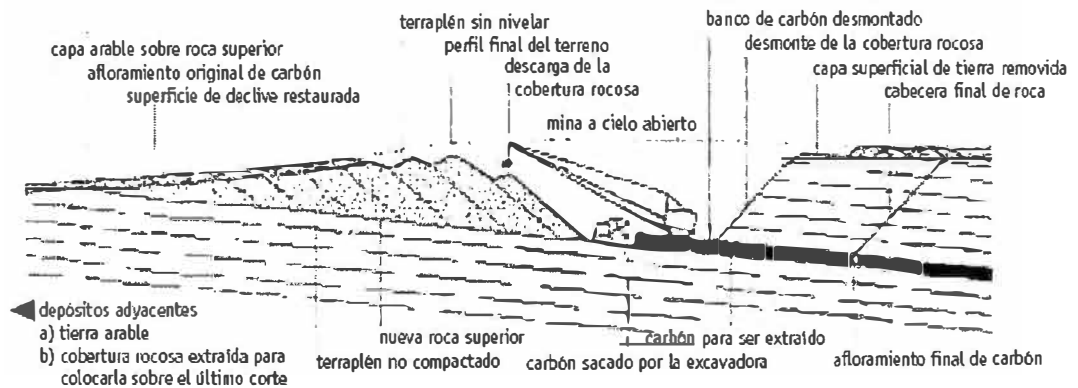


Figura N° 1: Diagrama de una mina a cielo abierto

Fuente: Waltham, T. 1994. Foundations of Engineering Geology.
Routled: London, Pg. 60

Minería Subterránea

Esta actividad extractiva implica procesos donde se debe perforar la corteza terrestres y se deberá acceder a través de galerías o túneles.

La minería subterránea se puede subdividir en minerías de roca blanda cuando no exige el empleo de explosivos en el proceso de extracción pudiéndose cortar con herramientas que proporciona la tecnología de hoy, y la minería de roca dura cuando utiliza explosivos como método de extracción.

La actividad minera en el Perú es en su mayoría una minería subterránea de roca dura pues para la extracción deben perforar la corteza y realizan voladuras. Lo que realizan primero en esta actividad es la realización de agujeros con perforadoras de aire comprimido, se insertan luego barrenas

(instrumento de acero para taladrar o hacer agujeros) y se hace explotar, luego la roca fracturada es extraída.

Para acceder al yacimiento del mineral se excava una red de galerías de acceso. La minería subterránea suele ser la más peligrosa por lo que se emplea primero métodos superficiales cuando sea posible. Este método de explotación exige una mayor complejidad técnica.

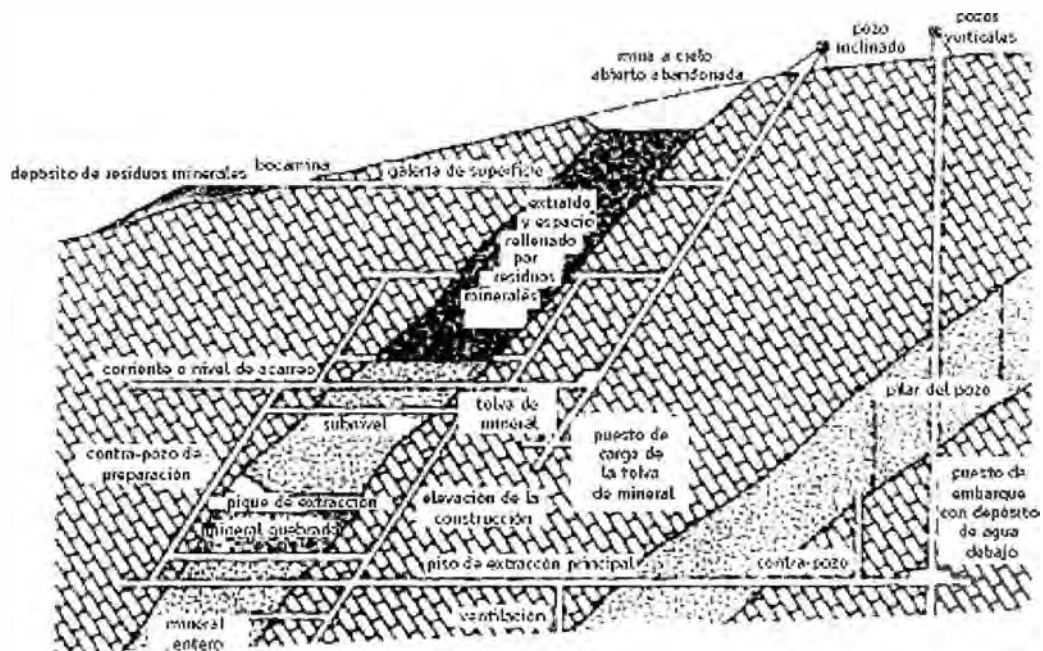


Figura N° 2: Diagrama de una mina subterránea

Fuente: Evans, A.M. 1993. *Geology and Industrial Minerals: An Introduction* Third Ed. Blackwell: Oxford, Pg.20

Minería por dragado

El dragado de las aguas poco profundas es el método más barato de extracción, en este tipo de extracción se recupera sedimentos poco compactos empleando dragas (máquina que se emplea para ahondar y limpiar los puertos, ríos, canales, etc., extrayendo de ellos fango, piedras, arena, etc.) con cabezales de corte situados en el extremo de tubos de succión.

En la actualidad en otros países se realiza la minería oceánica en las plataformas continentales, en su actividad está la extracción de áridos,

diamantes y oro. La tecnología de recuperación de dragado existe aunque aún se encuentra en fase experimental.

Minería por pozos de perforación

Se pueden extraer minerales del subsuelo a través de los pozos de perforación sin la necesidad de excavar galerías y túneles. Se pueden recuperar también materiales solubles en el agua haciendo pasar agua por ellos a través del pozo de perforación extrayendo la disolución.

Este tipo de sistema se denomina extracción por disolución, el método consiste en perforar los pozos hasta el yacimiento, luego insertan un sistema de tubos, bombean agua por el pozo dejando que la sal se disuelva, esta solución es bombeada a la superficie y se recuperan las sales disueltas, el tubo interior se utiliza para inyectar aire comprimido para elevar la mezcla.

Se considera también dentro de este método la lixiviación in situ para algunos metales, se ha empleado con éxito para la extracción de uranio y cobre. En este caso siempre se emplean pozos separados para inyectar el disolvente y para extraer la disolución de mineral. Este tipo de minería presenta importantes ventajas medioambientales, ya que se mueve una menor cantidad de roca y las operaciones de limpieza son mucho más sencillas.

2.2 Descripción / caracterización de los efluentes de las actividades del sector

El efluente del proceso puede contener constituyentes orgánicos e inorgánicos, incluyendo reactivos utilizados en procesos tales como el cianuro el que es altamente ácido. En muchas operaciones de beneficio, el efluente del proceso si se descarga directamente en el suelo o en corrientes receptoras sin tratamiento conduciría a la contaminación del agua superficial y subterránea. A pesar que la calidad de algunos efluentes puede ser relativamente buena y éstos pueden ser reciclados o eliminados con mínimo o sin tratamiento, frecuentemente, estos efluentes se combinan con otros de menor calidad y son eliminados.

Las presas de agua de proceso son fuentes potenciales adicionales de contaminación asociadas con el proceso de beneficio. En las operaciones de

lixiviación en pilas, las pozas de proceso se utilizan para almacenar soluciones cargadas para la extracción de metales o soluciones gastadas para el reciclaje. Las pozas de proceso pueden ser una fuente de contaminación de agua a través de la filtración de soluciones en las aguas superficiales y subterráneas y flujos que se derraman.

Uno de los principales problemas de contaminación ambiental de las minas son sus efluentes y drenajes ácidos originados en la exploración de metales preciosos (oro, plata), base (plomo, zinc, cobre) y siderúrgicos (hierro), ya sea por los métodos superficial o subterránea.

El bombeo para extraer agua de la minas puede conducir a un drenaje ácido de mina (DAM) y a una contaminación de metales pesados esto ocurre cuando los minerales que contienen sulfuros en las rocas se exponen al aire o al agua convirtiendo el sulfuro en ácido sulfúrico, estos muchas veces se mezclan con los efluentes que se generan en los procesos mineros. En ciertas áreas esta agua puede ser salina o hipersalina, y su liberación puede contaminar grandes áreas y degradar la vegetación.

El ácido puede disolver metales pesados como el plomo, zinc, cobre, arsénico entre otros presentes en las rocas hacia el agua superficial o subterránea.

Los procesos extractivos físicos y químicos producen efluentes que pueden contaminar y también liberar sedimentos hacia cursos de agua.

La Tabla N° 1 se muestra los diferentes tipos de efluentes de acuerdo a su acidez.

2.3 Marco Normativo aplicable al sector

El Perú tiene una norma específica para el control de los efluentes mineros en las minas, esta resolución fue aprobada en el año 1996 y debe ser aplicadas por todos los centros mineros y la autoridad para su cumplimiento es el Sector de Energía y Minas. La finalidad de controlar los vertimientos producto de sus actividades en cumplir con la protección ambiental. Los límites máximos permisibles son presentados en la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/EVM mostrados en las Tablas N° 2 y N° 3. Los parámetros que no se encuentran regulados en este Decreto Supremo deberán cumplir con las disposiciones legales de otros países o

demostrar a las autoridades correspondientes que sus vertimientos no tienen efectos negativos a la comunidad.



Figura N° 3: Confluencia del río Yauli y el efluente del T. Kingsmill frente a M. Túnel, Mayo 2004



Figura N° 4: Drenaje Ácido de Mina

Fuente: Dept. of Environmental Protection, Commonwealth of Pennsylvania, U.S.A

Tabla N° 1: Tipos de efluentes de acuerdo a su acidez

Tipo	pH	Descripción
I	<4.5	Alta concentración de Fe, Al, Mn, Cu, Ni, Pb y otros metales
		Alto contenido de oxígeno
		Muy ácido llamado Drenaje Acido de Mina
II	<6.0	Alta cantidad de sólidos disueltos
		Alta concentración de Ion ferroso y manganeso
		Por oxidación, el pH del agua baja drásticamente hasta convertirse en tipo I
III	>6.0	Moderada a alta cantidad de sólidos disueltos
		Bajo a moderado contenido de Ion ferroso y manganeso
		Bajo contenido de oxígeno
		Alta alcalinidad (llamado drenaje alcalino de mina)
		Por oxidación de metales la acidez generada es neutralizada por la alcalinidad presente en el agua
IV	>7	Alta cantidad de partículas disueltas
		Drenaje neutralizado, pero todavía no se han fijado los hidróxidos en el agua
		A mayor tiempo de residencia en las balsas mayor fijación de partículas y el agua puede llegar a ser similar al tipo V
V	>8	Agua de drenaje es neutralizado
		Alta cantidad de sólidos disueltos
		Gran cantidad de hidróxidos precipitados y fijados en las balsas
		Cationes restantes son disueltos por el calcio y manganeso
		Oxi-aniones solubles como bicarbonato y sulfato quedan en la solución

Tabla N° 2: Límites Máximos Permisible de Emisión para las Unidades Minero Metalúrgico

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/EVM - Anexo 1

NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERO-METALURGICAS

PARAMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
pH	Mayor que 6 y Menor que 9	Mayor que 6 y Menor que 9
Sólidos suspendidos (mg/l)	50	25
Plomo (mg/l)	0.4	0.2
Cobre (mg/l)	1.0	0.3
Zinc (mg/l)	3.0	1.0
Hierro (mg/l)	2.0	1.0
Arsénico (mg/l)	1.0	0.5
Cianuro total (mg/l) *	1.0	1.0

* CIANURO TOTAL, equivalente a 0.1 mg/l de Cianuro Libre y 0.2 mg/l de Cianuro fácilmente dissociable en ácido.

Tabla N° 3: Valores Máximos de Emisión para las Unidades Mineras en Operación o que Reinician Operaciones

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/EVM - Anexo 2

PARAMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
pH	Mayor que 5.5 y Menor que 10.5	Mayor que 5.5 y Menor que 10.5
Sólidos suspendidos (mg/l)	100	50
Plomo (mg/l)	1	0.5
Cobre (mg/l)	2	1
Zinc (mg/l)	6	3
Hierro (mg/l)	5	2
Arsénico (mg/l)	1	0.5
Cianuro total (mg/l)	2	1

Los valores establecidos en la Tabla N° 3 deberán igualar a los valores de la Tabla N° 2 en un periodo no menor de 10 años.

Las compañías mineras están obligadas a establecer en sus Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) y/o Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) o su Declaración Jurada de PAMA un punto de control en cada efluente minero para poder determinar la concentración de cada uno de sus parámetros regulados así como el volumen de su descarga en metros cúbicos por día, estos

valores serán medidos al momento de tomar la muestra. El punto de control debe ser identificado mediante un registro que se muestra en Figura N° 4

Nombre :
Coordenadas U.T.M. (± 100 m):
Descripción (Ubicación):

Figura N° 5: Ficha de Identificación Punto de Control

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/EVM – Anexo 3

En el registro la Figura N° 4 se deberá tomar en cuenta en las descripciones las referencias topográficas que determinen saber los puntos de control.

Cuando se obtiene la aprobación de Dirección General de Minería y opinión de Dirección General de Asuntos Ambientales se puede realizar la eliminación o cambio de los puntos de control donde se realiza el monitoreo respectivo, los titulares mineros deberán presentar la documentación para sustentar la eliminación o cambio.

El número de muestreos a realizar así como los análisis químicos respectivos y los reportes serán determinados de acuerdo al volumen de descarga total de efluente al cuerpo receptor, la escala es la siguiente:

- Mayor de 300 metros cúbicos por día
- Entre 50 y 300 metros cúbicos por día
- Menor de 50 metros cúbicos por día

La frecuencia del análisis químico de acuerdo al volumen de descarga total del efluente se presenta en Tabla N° 4.

El registro del muestreo se tendrá que realizar en un formato establecido según Figura N° 5.

RESULTADOS ANALITICOS

Nombre Compañía/Unidad :
 Tipo de muestreo : (puntual o automático)
 Punto de muestreo :
 Cuerpo de agua Receptor : (nombre)

Fecha y hora de Muestreo		:	
Código de la muestra		:	
Nombre del laboratorio		:	
Flujo en el punto de muestreo		:	(m ³ / día)
PARAMETROS		RESULTADOS ANALITICOS	
pH (unidades estándar)			
Sólidos suspendidos (mg/l)			
Plomo (disuelto) (mg/l)			
Cobre (disuelto) (mg/l)			
Zinc (disuelto) (mg/l)			
Fierro (disuelto) (mg/l)			
Arsénico (disuelto) (mg/l)			
Cianuro Total (mg/l)			

Firma del Titular o Representante Legal :

Figura N° 6: Resultados Analíticos

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/EVM – Anexo 6

Tabla N° 4: Frecuencia de Análisis Químico

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/EVM - Anexo 5

PARAMETRO	EFLUENTE MAYOR QUE 300 m ³ /día	EFLUENTE DE 50 A 300 m ³ /día	EFLUENTE MENOR QUE 50 m ³ /día
pH	Semanal	Trimestral	Semestral
Sólidos suspendidos	Semanal	Trimestral	Semestral
Pb, Cu, Zn, Fe, As	Mensual	Trimestral	Semestral
CN total	Semestral	Quincenal	Trimestral

III. DESARROLLO DEL PROCESO

3.1 Descripción del proceso productivo en un proceso minero.

3.1.1 Proceso productivo

Este caso presenta una mina polimetálica donde su producto principal es concentrado de oro, plata y plomo.

La mina es una mina subterránea, como se explicó en el Capítulo 2 exige una mayor complejidad técnica ya que se debe perforar la corteza terrestre utilizándose incluso explosivos como método de extracción.

Las operaciones de la planta concentradora son:

a. Reducción de tamaño

- *Circuito de Chancado*

Donde se procede a la trituración de los minerales, con el objetivo de obtener la reducción de tamaño para liberar los minerales de valor desde la roca de donde son depositados.

Normalmente, la reducción de tamaño por chancado es de importancia limitada más allá del tamaño tope del producto que se va a chancar.

A continuación se muestran las siguientes chancadoras estacionarias:

- Giratorio primario, los chancadores son normalmente dimensionados a partir del tamaño máximo de alimentación. A cierto tamaño de alimentación, sabiendo su capacidad, podemos seleccionar la máquina adecuada.
- Chancador secundario, la segunda etapa comienza a tener importancia para el control del tamaño y la forma. Debido a esto, en la mayoría de los casos, el chancador de mandíbula queda descalificado como chancador secundario. A su vez, se utiliza con más frecuencia el chancador de cono.
- De impacto, se utiliza normalmente roca para la impactación del metal. Esto significa una restricción en los circuitos de chancado con material duro de alimentación y donde el desgaste puede ser dramáticamente alto.



Figura N° 7: Tipos de Chancadoras

- *Circuito de Molienda*

Como la reducción de tamaño por chancado tiene un límite de tamaño para los productos finales para una reducción mayor de 5 – 20 mm, debemos utilizar el proceso de molienda. Este es un proceso de reducción a polvo o pulverización utilizando fuerzas mecánicas de impacto, compresión, corte y frotación de roca. La finalidad de este proceso es la liberación de minerales atrapados en el interior de la roca y aumentar el enriquecimiento en la separación y producir finos aumentando la superficie específica. Los métodos de molienda pueden ser de tres tipos según Figura N° 7.



Figura N° 8: Tipos de Molienda

b. Enriquecimiento

- *Circuito de flotación*

La flotación es un proceso de separación de mineral, que se lleva a cabo en pulpas de agua y mineral.

Las superficies de los minerales seleccionados son hechas hidrofóbicas (repelentes al agua) acondicionando este proceso con reactivos selectivos.

Las partículas hidrofóbicas se adhieren a burbujas de aire que son introducidas en la pulpa y son transportadas a una capa de espuma sobre el lodo y en consecuencia se separan de las partículas hidrófilicas (mojadas).

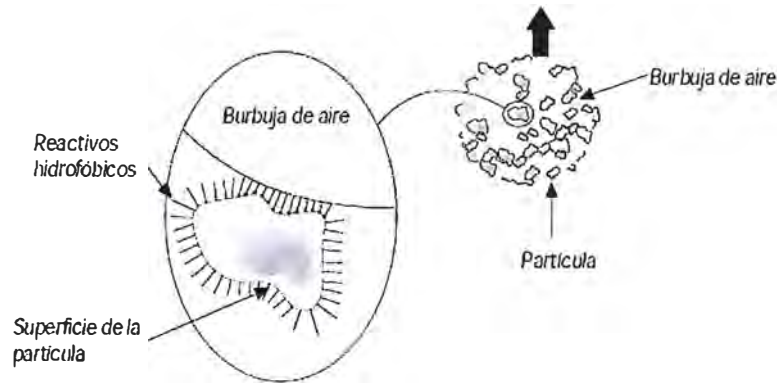


Figura N° 9: Explicación gráfica del proceso de flotación

Además de los reactivos que se han agregado, el proceso de flotación depende de dos parámetros principales:

- El tiempo de retención necesario para que se produzca el proceso de separación, determina el volumen y la cantidad de celdas de flotación necesarias.
- La agitación y aireación necesaria para obtener las condiciones óptimas de flotación, determinan el tipo de mecanismo de flotación y la cantidad de energía requerida.

Los diseños de los circuitos de flotación varían en su complejidad dependiendo mayormente del tipo de mineral, grado de liberación de los minerales de valor, grado (pureza) del producto y el valor de éste. Así pueden ser:

- Circuito Simple, cuando son de una etapa y no hay limpieza de la espuma.

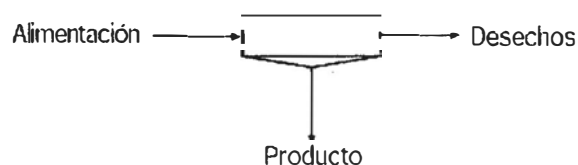


Figura N° 10: Circuito simple de flotación

- Circuito utilizado comúnmente, tiene cepillo de etapa simple con dos etapas de limpieza y sin retritución.

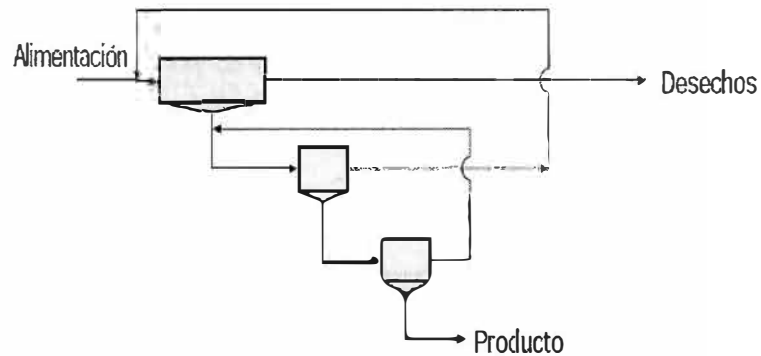


Figura N° 11: Circuito de flotación de etapa simple con dos etapas de limpieza

- Circuito complejo, tienen dos etapas de picado, una etapa primaria, tres etapas de limpieza, barredor de limpieza y retritución.

c. Refinación

Significa mejorar la calidad de valor del producto llevando el concentrado a una forma transportable o a una forma completamente seca. El proceso puede seguir hacia la calcinación y sinterización. En lo que respecta al relave, el refinamiento significa que el material de desecho (agua de lavado, efluentes del proceso, etc.), es tratado en forma adecuada para así proteger el medio ambiente, recuperar el agua de proceso y transformar ciertas porciones en de valor. Se tienen los siguientes procesos:

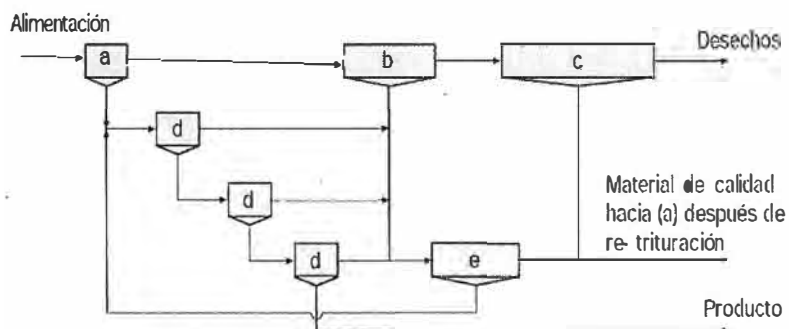


Figura N° 12: Circuito de flotación complejo

- *Espesado*

Es el proceso de concentración de las partículas en suspensión por la compresión de la gravedad. Para lograr la concentración requerida en el flujo de fondo depende del balance de la relación de flujo de los sólidos volumétricos en una concentración crítica con el diámetro del espesador.

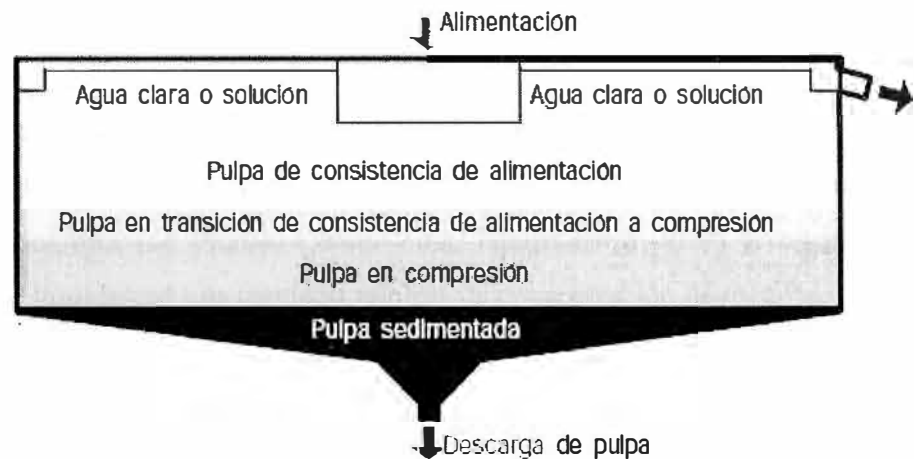


Figura N° 13: Espesador

- *Lixiviación*

Cuando los métodos mecánicos de separación no pueden asegurar un valor óptimo metálico de un mineral, la alternativa es la lixiviación, ya sea como complemento o como proceso general. La mayor parte del proceso de lixiviación es la preparación de la alimentación por medio del chancado, triturado y en algunos casos pre-concentración y calcinado. La separación se realiza normalmente creando un tiempo de retención para los químicos que penetran la alimentación.

- *Filtración*

Es la extracción mecánica de líquidos de los lodos para obtener sólidos en una forma adecuada y/o la recuperación de un líquido de valor para seguir procesándolo o para transportarlo. Se muestra en Figura N° 13 diferentes equipos de filtración de acuerdo a la presión de trabajo y dimensiones de partículas.

En Figura N° 14 se presenta el procesamiento de los minerales, así como los niveles de sistema en el mineral metálico.

3.1.2 Caracterización del efluente

Actualmente los efluentes ácidos generados por la actividad minera provienen de la planta concentradora y depósitos oxidados de desmontes. Se debe considerar también el contenido de sólidos totales en suspensión y por otro lado los floculantes (polímeros sintéticos), coagulantes (Fe, Al sales) así otros reactivos químicos para ajustar el pH como la cal los cuales pueden ayudar a la reducción de las partículas suspendidas.

Las empresas mineras tratan desde hace años sus efluentes ácidos con agentes alcalinos en este caso particular cal y floculantes elevando el pH hasta valores entre 6 y 10 para que los hidróxidos, óxidos, arseniatos y otros compuestos metálicos insolubles (de Plomo, Cobre, Zinc, Hierro entre otros) precipiten y quede la fase líquida con una cantidad mínima de concentración de metales y una acidez aceptable luego de realizarse la separación de los precipitados.

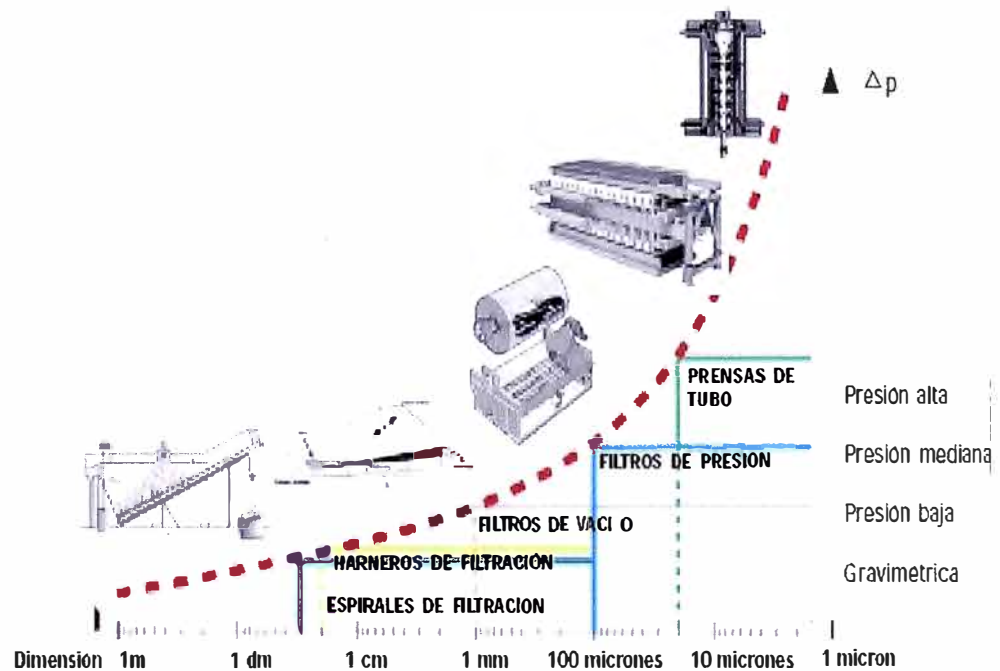


Figura N° 14: Equipos para filtración Presión vs. Dimensión de Partículas

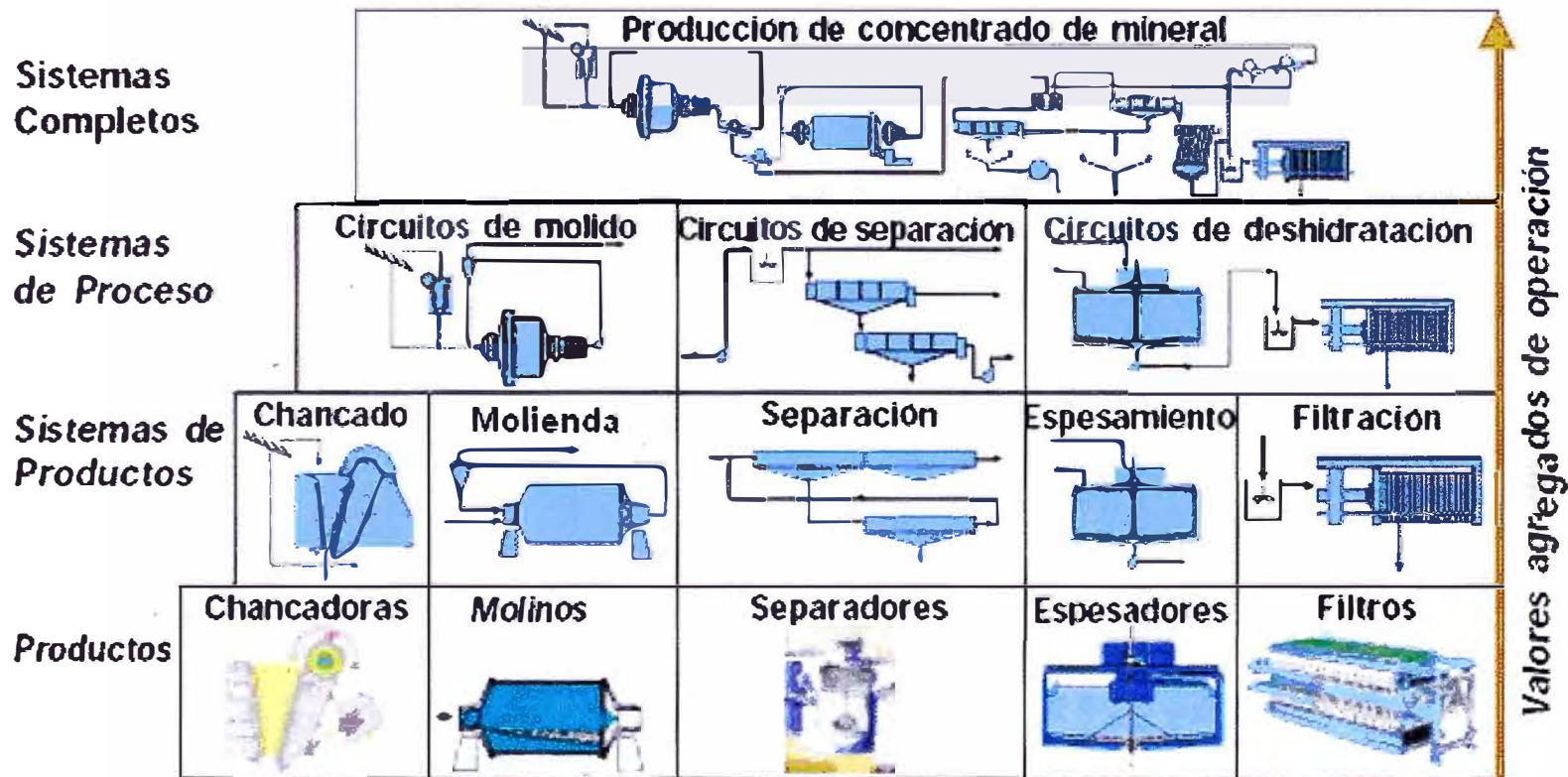


Figura N° 15: Niveles de Sistema en el Mineral Metálico / Procedimiento de Minerales.

3.2 Exploración de opciones para el tratamiento de efluentes ácidos

Para el siguiente informe se está considerando los tratamientos activos que se realizan para este tipo de efluente. A través de los años se han ido investigando tecnologías para controlar el pH de los efluentes ácidos. En el Perú, el tratamiento realizado en la mayoría de minas es la neutralización simple con un agente alcalino y luego la sedimentación con este simple tratamiento han ido controlando la descarga de sus efluentes. En estos últimos años importantes centros mineros están invirtiendo por tecnologías que si bien son conocidas y empleadas hace años por otros países recién en nuestro país están siendo utilizadas. Una de las tecnologías más usadas es de origen canadiense la cual ha obtenido buenos resultados en cuanto a la calidad de sus efluentes, esta tecnología se denomina proceso de Lodos de Alta Densidad llamado HDS (High Density Sludge), dicha tecnología recién en estos últimos años ha sido utilizada por una o dos empresas actualmente con buenos resultados, en la búsqueda de la optimización y la mejora de la calidad de las aguas se han realizado en estos tiempos investigaciones teniendo como base la tecnología HDS como son Gecco Process y Staged-Neutralization Process (el cual no ha sido usado a gran escala) estas nuevas tecnologías se nombrarán en este informe pero aún en el Perú no se tienen datos de empresas que hayan utilizado esta tecnología, por lo que se tendrán solo como referencia. El Perú no se ha quedado atrás en estas investigaciones; es por ello que existe también un tratamiento patentado por ingenieros peruanos. El tratamiento tiene por nombre Proceso de Neutralización y Coagulación Dinámica (NCD) y está siendo utilizada actualmente por la empresa minera Volcán desde el año 2004 con buenos resultados.

Describiremos a continuación la tecnología más usada y las otras tecnologías que están empezando a emplearse en las empresas mineras peruanas, también mencionaremos de manera muy general las nuevas tecnologías Geco Process y Staged-Neutralization Process.

3.2.1 Tecnología convencional en el Perú.

Actualmente el Perú tiene 180 minas metálicas en operación con un número desconocido de depósitos de relaves activos e inactivos, de las cuales 54 producen más de 100 toneladas/día y sólo 26 más de 500 toneladas/día, unas 25 a 30 presentan un declarado problema de drenaje ácido de mina, en el Perú no existe un tratamiento del drenaje ácido de mina a excepción de una compañía de mediana minería.

La descarga descontrolada de grandes cantidades de relaves a partir de los años 1940 directamente a los ríos y lagos; la mayoría de minas lo que han hecho es construir presas de relaves en un intento de mantener fuera de los arroyos y ríos.

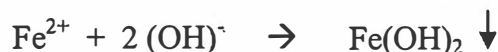
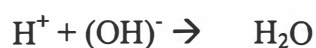
La tecnología convencional más conocida y aceptada en nuestro país es el tratamiento químico que consiste en un circuito de neutralización química para extraer la solución.

El efluente ácido proveniente de las operaciones mineras de beneficio tiene que pasar por un proceso de neutralización, en el cual se debe subir el pH por encima de 8.5 obteniéndose precipitados de hidróxidos metálicos que se separan por sedimentación o filtración; se usa álcalis tales como cal, carbonato de calcio, carbonato de sodio e hidróxido de sodio.

Se mencionan a continuación los tratamientos con los diferentes álcalis.

a) Tratamiento con cal

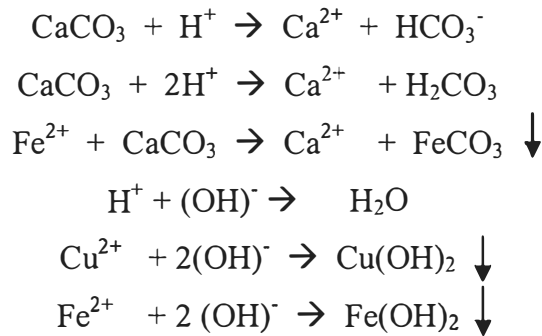
El CaO al disolverse en la fase líquida del efluente ácido produce iones $(OH)^-$ que eleva el pH y produce la formación y la precipitación de hidróxidos metálicos.



b) Tratamiento con carbonato de calcio o calcita

Normalmente insoluble en agua, reacciona directamente con la fase líquida del efluente ácido para neutralizar los iones de hidrógeno H^+ produciendo iones bicarbonato o moléculas neutras de carbonato, de este modo elevan el pH y

produce iones hidroxilo (OH)⁻. El rango de acción de estos carbonatos está limitado a pH menores a 7.0.



c) Tratamiento con carbonato de sodio e hidróxido de sodio

Ambos compuestos son solubles en agua y eficaces como agentes neutralizantes, sin embargo el problema es que son demasiado costosos para aplicarse para la neutralización de aguas ácidas de operaciones mineras, su uso está destinado para procesos industriales con menores caudales y otras características del mismo proceso.

Uno de los factores importantes para la selección del agente neutralizante es el precio. Para estos agentes neutralizantes se puede encontrar un valor definido, el costo de la caliza tiene un valor muy variable pues está relacionada al costo del minado y del transporte. Los valores teóricos de de Cal y Calcita puras para la neutralización de soluciones ácidas desde pH 2 a pH 7 son de 0.280 y 0.505 g/l respectivamente. En la práctica el consumo de dichos agentes dependerá también del contenido de metales disueltos, la calidad de los agentes neutralizantes y de su granulometría. El consumo de Hidróxido o Carbonato de Sodio es menor que el consumo de Cal considerándose que es de 70 a 80 % del consumo de Cal.

En la Tabla N° 5 se tiene altos costos unitarios de Hidróxido de Sodio y de Carbonato de Sodio por lo que en la práctica se descartan su uso. Se aprecia que el costo unitario de Cal es superior al de la Caliza, pero si se necesitaran para esta operación obtener pH sobre valores de 9; el agente más usado es Cal. También en este proceso se utilizan gran variedad de floculantes los cuales se emplean para acelerar la sedimentación.

Tabla N° 5: Datos comparativos de Consumo (Kg/m^3), Precio Unitario ($\text{US}\$/\text{TM}$) y Costo Unitario ($\text{US}\$/\text{m}^3$) de los principales álcalis.

Fuente: Neutralización de aguas ácidas, precipitación de metales disueltos y sedimentación de los mismos mediante el uso de relaves.

Joyce Villachica Llamosas, Febrero 2006

Agente Neutralizante	Consumo Unitario Kg/m^3	Precio Unitario $\text{US}\$/\text{TM}$	Costo Unitario $\text{US}\$/\text{m}^3$
Cal	1.71	120	0.21
Caliza	5.13	30	0.15
Hidróxido de Sodio	1.2	590	0.71
Carbonato de Sodio	1.37	500	0.68

Los costos anuales típicos para un efluente ácido con pH 3.2 y caudal 200 l/s son los siguientes:

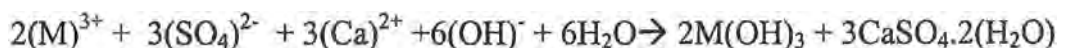
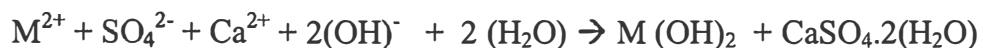
Costo de Cal: 1, 276,500 US\$/Año

Costo de Energía: 125,200 US\$/Año

(**Fuente:** Neutralización de aguas ácidas, precipitación de metales disueltos y sedimentación de los mismos mediante el uso de relaves. Joyce Villachica Llamosas, Febrero 2006)

En este tratamiento los aniones formarán compuestos insolubles con muchos metales pesados a pH neutro y también pueden ser removidos simultáneamente.

La neutralización con cal ocurre según las siguientes reacciones (M es metal):



Este proceso de neutralización simple es el tratamiento en la forma más simple de neutralización con lechada de cal (adición de cal al efluente, luego procede el proceso de agitación y sedimentación dentro de una poza de relaves).

El proceso de neutralización es eficiente, no obstante su simplicidad, para precipitar metales y obtener una solución que cumple con los LMP.

La neutralización directa con Cal no es un proceso eficiente con respecto al sedimento generado, debido a que los precipitados metálicos tienen un carácter coloidal amorfo con densidades sumamente bajas (menos de 1% sólidos) que originan depósitos inestables y voluminosos; en vista de ello la tecnología se ha orientado hacia la obtención de sedimentos criptocristalinos o cristalinos más compactos (20% sólidos).

Esta tecnología se caracteriza por:

- Mínima inversión
- Bajo costo de operación.
- Produce lodos sedimentados con 2.4 a 5.0% de sólidos, ocupando grandes volúmenes en la poza de decantación (esto implica un alto costo en infraestructura y terrenos para su almacenamiento).
- La estabilidad de los lodos decantados es cuestionable a largo plazo.

3.2.2 *Tecnologías alternativas para el tratamiento de efluentes ácidos.*

El método para el tratamiento de efluentes ácidos de mina es muy específico para cada proyecto y ubicación, requiere de una considerable investigación dependiendo de las circunstancias únicas de la mina las cuales incluyen:

- Ubicación de la mina y topografía
- Método de minado y geología del cuerpo mineralizado
- Métodos de procesamiento y características físicas resultantes de los relaves
- Características químicas de los relaves y su potencial para generar drenajes ácidos de relaves.
- Factibilidad económica
- Funcionalidad o factibilidad técnica
- Durabilidad o longevidad
- Seguridad o riesgo de fracaso
- Impactos ambientales como consecuencia tanto de la construcción como de la operación
- Requerimientos y tiempo de construcción

- Requerimientos de inspección y mantenimiento
- Efectividad

Estos factores forman la base de discusiones que se presentan a continuación sobre principales métodos alternativos para el tratamiento de efluentes mineros.

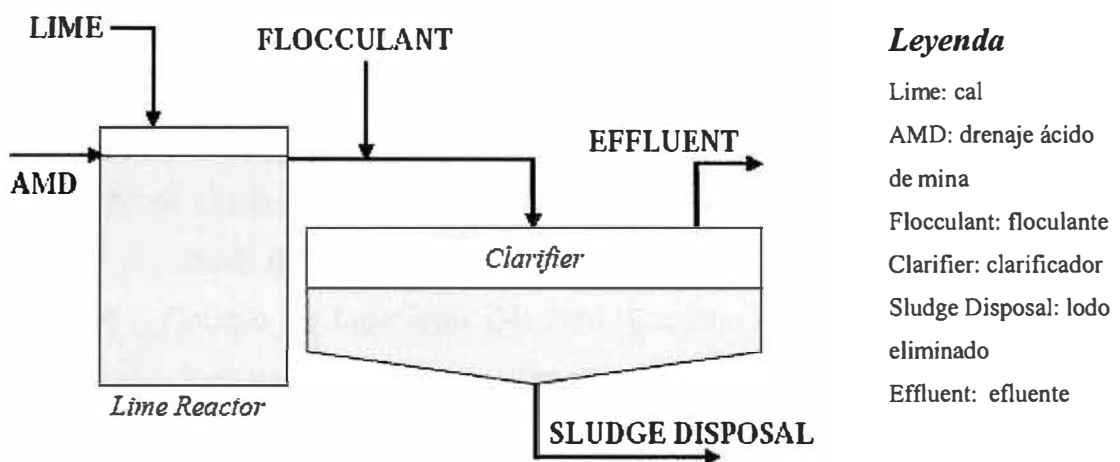


Figura N° 16: Esquema de tratamiento convencional – Neutralización Simple

a) Proceso de neutralización HDS

Una tecnología alternativa para el tratamiento de efluentes ácidos en nuestro país es el que se desarrolló principalmente en Canadá. Esta tecnología viene siendo utilizada en Canadá desde los años 1979 en Teck Cominco's Kimberley Site (Kuit, 1980). En los años 1982 el gobierno canadiense estableció la creación de un grupo de investigación "National Uranium Tailings Program" el cual luego fue llamado MEDS (Cuidado Ambiental del desagüe de mina) con la creación de este programa en los años 1996 se han dirigido más de 200 proyectos en Canadá donde los temas de investigación han sido el desarrollo de métodos químicos de prevención, desarrollo y aplicación de los modelos de prevención, evaluación de tratamientos pasivos así como la estabilización de los lodos de cal. El denominado proceso de Lodos de Alta Densidad, llamado también HDS (High Density Sludge) es el proceso estándar para el tratamiento de efluentes ácidos y drenajes ácidos de mina en las industrias en estos tiempos operando exitosamente

en diferentes partes del mundo, pero en el Perú recientemente se está empezando a difundir, siendo utilizada por una o dos empresas mineras.

Una de las plantas mineras que han implementado este proceso ha tenido un costo instalado en el orden de los 3 millones de dólares.

El caudal que trata es de 40 a 80 l/s de efluente ácido con un costo de operación de 1.5 millones de dólares y dentro de un costo anual de Cal de 1.4 millones de dólares (datos de la mina Quiruvilca en la Libertad).

Tabla N° 6: Costos de plantas HDS según información publicada de la planta HDS de Quiruvilca

Fuente: Colegio De Ingenieros Del Perú -Capítulo de Ingeniería Metalúrgica, Revista de Metalurgia, Proceso NCD: tecnología nacional para el tratamiento de efluentes ácidos de mina Carlos Villachica León, Jaime Llamosas Bueno, Joyce Villachica Llamosas, p. 6-20

	300	1,000	1,500	2,000
Capacidad, m ³ /h	83	278	417	556
Capacidad, l/s	4.0*	5.2	6.7	8.2
Costo, millones US\$	48.0*	18.7	16.1	14.7
Costo unitario, miles US\$/(l/s)				

El proceso HDS opera del siguiente modo, el sistema recicla los lodos con cal mezclándose para la neutralización. La solución de cal y el lodo recirculado son bombeados al tanque de mezcla cal-lodo donde se le agrega suficiente cal para la neutralización. La descarga de este se alimenta al tanque de mezcla rápida donde se mezcla con el efluente ácido, neutralizándolo, precipitando la mayoría de los metales y donde el pH es controlado.

La pulpa neutralizada se alimenta al reactor principal donde es intensamente aireado para oxidar el ión ferroso a férrico y oxidar otras especies donde la precipitación es completada; la descarga de este reactor recibe una solución de floculante aglomerando todos los precipitados, esta mezcla luego alimenta al clarificador para separar el efluente tratado el cual se descarga por la parte

superior mientras que por la parte inferior los lodos sedimentados son en parte recirculados nuevamente.

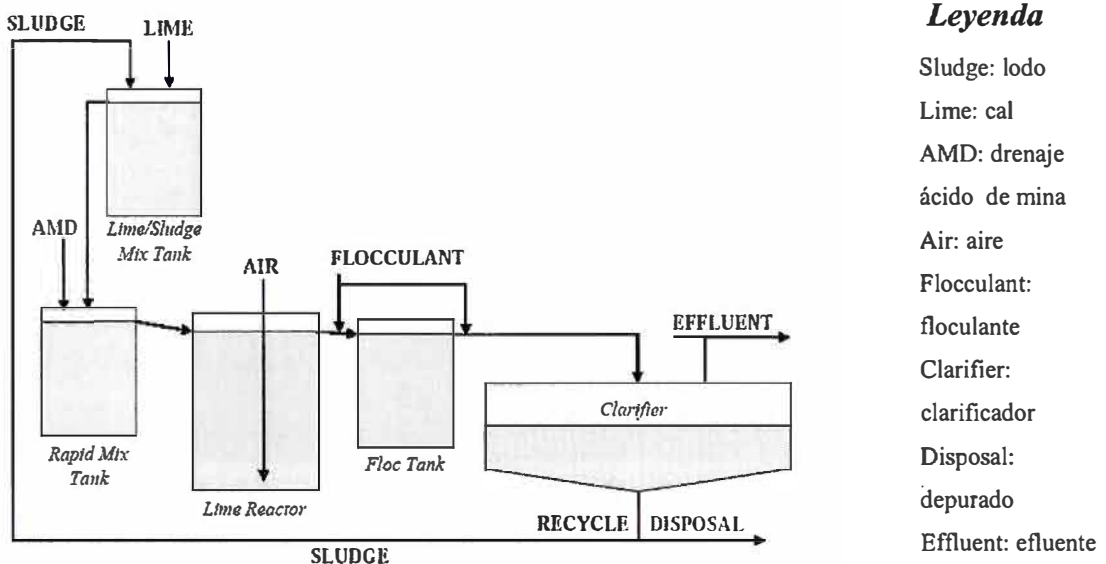
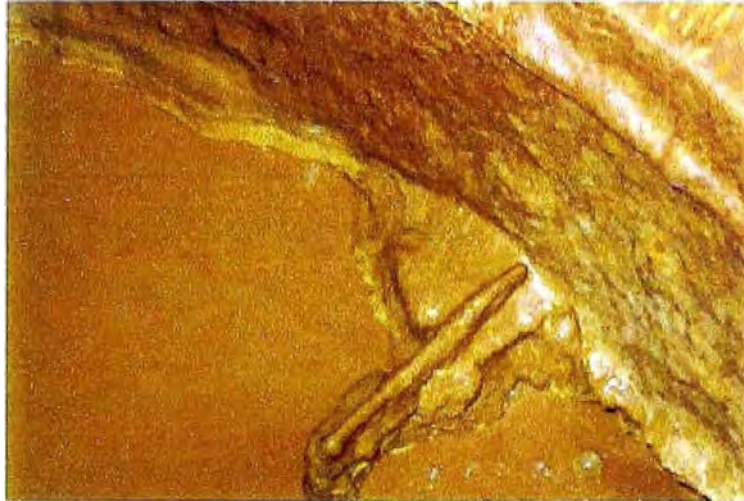


Figura N° 17: Esquema de tratamiento HDS

La eficiencia del proceso HDS va a depender de un riguroso control del flujo de recirculación de lodo sedimentado, demanda una instrumentación sofisticada y costosa; mantener una descarga continua es difícil y casi todas las plantas HDS terminan descargando sus lodos en forma intermitente. También se ha reportado que estas plantas requieren de varias semanas para alcanzar la densidad de 20% sólidos, lo que implica un retraso en su disponibilidad al inicio de operaciones y después de paradas programadas. Estas mismas limitaciones afectan su eficiencia en el caso de incrementos pronunciados del caudal del efluente ácido y obligan a contar con reservorios de emergencia de gran magnitud. Asimismo las variaciones estacionales del caudal implican variaciones pronunciadas del pH que ocasionan a su vez gran variación en la relación Fe/Total de metales debido a que el hierro precipita a pH menores que el resto de metales; estas circunstancias limitan nuevamente la eficiencia del proceso HDS.

Finalmente se ha reportado que el caudal de aire insuflado al reactor principal tiene que adecuarse al caudal del efluente y a su contenido de hierro. Algunos

parámetros comunes de este proceso son un tiempo de retención de 50 a 60 minutos, consumo de floculantes de 2 a 3 g/m³, caudal de aire de 2 pie³/minuto/m³ reactor y concentración de sólidos en el orden de 0.5 a 1.0 g/l.



Picture of Lime/Sludge Mix Tank

Figura N° 17: Fotografía en el tanque de mezcla Cal - Lodo

El tiempo de retención es notablemente mayor que el requerido únicamente para neutralizar soluciones ácidas y precipitar metales el cual puede ser de hasta 5 minutos, esto es debido a la necesidad de oxidar el hierro de ferroso a férrico para lograr un precipitado compacto; es decir que emplea un tiempo 12 veces mayor que el de neutralización para lograr la consolidación de los precipitados.

El consumo de floculante referido al peso del sedimento es también sumamente alto (4.0 Kg/t) cuando se compara con el de pulpas de mineral o relave fino (0.05 Kg/t).

En consecuencia, las plantas HDS requieren reactores de gran volumen y un alto consumo de energía.

La etapa crítica del proceso HDS es la recirculación del lodo sedimentado; la eliminación de metales disueltos en un precipitado estable ocurre al formarse un co-precipitado con hierro en la superficie de la partícula recirculada; la estabilidad de los precipitados mejora al incrementarse la relación Fe/Total de metales, al extremo de que en ocasiones es necesario adicionar hierro al efluente. La

oxidación es también un parámetro importante del proceso HDS y la transferencia de oxígeno necesaria tiene gran influencia en el dimensionamiento (y costo) del reactor y en el diseño de su sistema de agitación y dispersión de aire; influye asimismo en la potencia necesaria para el reactor y el compresor.

Los equipos principales para una planta HDS son:

- Planta de preparación de Cal (Tolva, Molino de bolas, Tanque agitador)
- 1 Tanque de mezcla Lodo / Cal , con motor
- 2 Tanques de Neutralización
- 2 Sopladores
- 1 Clarificador
- 3 Bombas para el reciclado de lodos
- Bombas de transporte de los lodos

Las ventajas de esta tecnología son:

- Costos más bajos de operación en el largo plazo
- El volumen que ocupan los sólidos decantados es alrededor del 1% al 5% del volumen que ocupan en el método de neutralización
- Se genera una mejor calidad de agua
- Los lodos producidos son superiores en cuanto a la estabilidad química y física llegando a tener entre 25-30% de sólidos en clarificados y aproximadamente el 50% en la poza de almacenamiento.

c) Proceso de Neutralización y Coagulación Dinámica (NCD)

En el Perú se ha patentado una nueva tecnología para el tratamiento de los efluentes ácidos, dicha tecnología ha sido desarrollada por SMALLVILL, desde mayo del 2004 inició sus operaciones una planta descontaminante utilizando la técnica "Neutralización y Coagulación Dinámica" (NCD), con buenos resultados. El proceso NCD se basa en el fenómeno de "slime coating" o recubrimiento con lamas de partículas granulares el cual es un fenómeno que ocurre en la flotación de minerales y afecta la recuperación metalúrgica; esta adsorción ocurre mediante fuerzas electrostáticas que existen entre superficies sólidas de carga opuesta suspendidas en agua.

El proceso NCD introduce un coagulante sólido granular para adsorber los precipitados coloidales generados en la neutralización y sedimentarlos conjuntamente. El resultante es simple, rápido, eficaz, bajo costo de inversión y operación, porque emplea tiempos de retención de 5 a 10 minutos reduciendo notablemente la dimensión de los tanques de neutralización mientras que la alta velocidad de sedimentación reduce el tamaño del clarificador.

En esta tecnología se trata de aprovechar el subproducto obtenido de los procesos de concentración y lixiviación de minerales, los relaves. Una de las características que posee es la granulometría fina y la capacidad de neutralizar soluciones ácidas ya que contienen minerales no sulfurados tales como carbonatos, óxidos, silicatos, entre otros, los cuales consumen ácidos.

La capacidad de neutralización de los relaves se llama *Potencial Neutralizante* y se determina experimentalmente. Este valor es expresado en kilogramos de CaCO_3 por toneladas y expresa el equivalente de CaCO_3 puro que proporciona la capacidad de neutralización similar del relave o mineral considerado. Se tomaron muestras de relaves de algunos centros mineros y se analizó su potencial de neutralización mostradas en Tabla N° 7.

Tabla N° 7: Potencial Neutralizante (Kg CaCO_3 /TM) de varios relaves de flotación

Fuente: Neutralización de aguas ácidas, precipitación de metales disueltos y sedimentación de los mismos mediante el uso de relaves. Joyce Villachica Llamosas, Febrero 2006

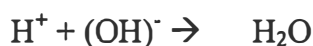
Relave	Yauricocha	Mahr Túnel	Casapalca	Cobriza	San Vicente
Potencial Neutralizante	258	103	105	65	903

La Tabla N° 7 nos muestra que el potencial neutralizante varía de 65 a 903 KgCaCO_3 /TM dependiendo del contenido de carbonatos, un relave equivalente a 903 KgCaCO_3 /TM equivale a una caliza con pureza del 90.3%.

Por lo tanto se puede decir que los relaves pueden ser empleados para neutralizar soluciones ácidas en Plantas de Neutralización reemplazando total o parcialmente a la cal molida. Como el relave no necesita una molienda adicional significa un ahorro en energía frente al uso de cal.

El relave puede añadirse después de la neutralización si solo actúa como coagulante. En el caso de minerales polimetálicos la pulpa del relave es alcalina debido a que en su última etapa de la planta concentradora se requiere pulpas con pH en el orden de 10 a 12 para la flotación de los sulfuros de Zn.

Cuando la pulpa del relave alcalina se mezcla de manera directa con una solución ácida la reacción es la siguiente:



Cuando la disponibilidad de los iones hidroxilo es agotada el ácido remanente reaccionará con los carbonatos del relave, debido a la menor acidez el carbonato reaccionará con menor eficiencia neutralizando sólo el ion hidrógeno por cada molécula de CaCO_3



A pH muy ácidos, como el agua ácida original los carbonatos neutralizan dos iones hidrógeno por cada molécula de CaCO_3 .



El incremento del pH por encima de 7 se puede obtener gracias a la mezcla de la pulpa neutralizada con una solución alcalina (pH de 10 a 12).

Para este caso el relave se añade antes que la Cal, y reduce el consumo de este además de actuar como coagulante.

Finalmente el proceso NCD ofrece en cualquiera de sus variantes un depósito de lodos de mayor estabilidad, menor costo y con menor área disturbada que el correspondiente depósito de lodos del proceso HDS.

Las dimensiones del clarificador y bomba de recirculación, dependen de la carga circulante y densidad del lodo sedimentado y el volumen requerido para el depósito de lodos depende directamente de la densidad del sedimento. El mismo estudio indica que se requerirán varios meses de operación para alcanzar la densidad objetivo en los lodos. En el Perú, la planta de NCD instalada para tratar

el efluente del Túnel Victoria costó alrededor de 1.6 millones de dólares y maneja un caudal hasta de 520 l/s de efluente ácido. Se muestra Figura N° 18 el esquema del tratamiento NCD.

VOLCAN puso en marcha la planta NCD Victoria en mayo del 2004 y ésta ha operado satisfactoriamente manejando caudales de efluente ácido hasta 550 l/s; gracias a ello el proceso NCD es ahora tecnología probada. La planta trata el mayor caudal de agua ácida del país y uno de los mayores del mundo, y los beneficios sobre la ecología del río Yauli ya son una realidad.

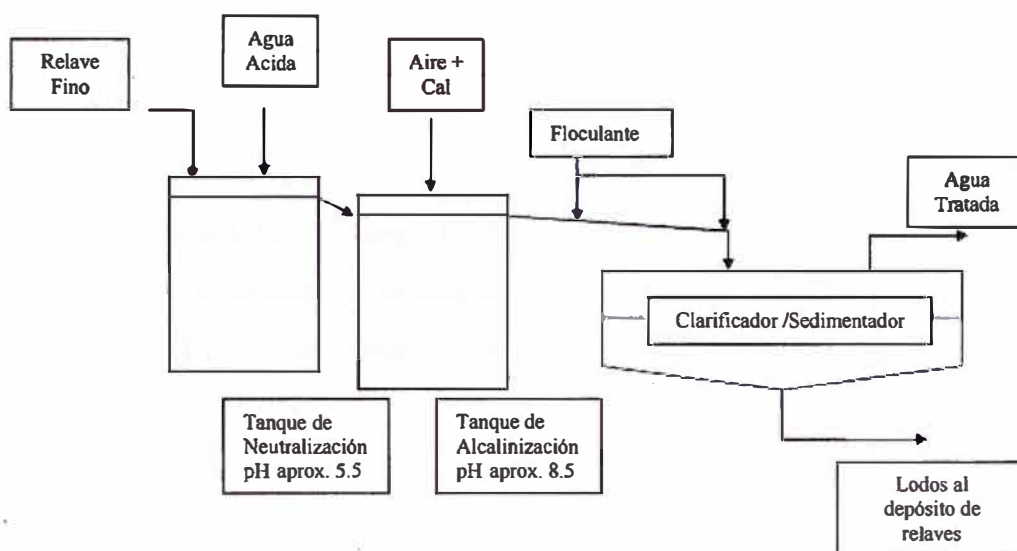


Figura N° 19: Esquema de tratamiento NCD



Figura N° 20: Planta de Neutralización NCD de T. Victoria – Empresa Volcán Cía. Minera

c) Otras Tecnologías

Geco Process

En 1995, se construyó un nuevo tratamiento optimizado en The Noranda Inc., la división Geco realizó una modificación al proceso HDS. La tecnología se describe a continuación, los lodos recirculados del clarificador son llevados a un primer reactor donde se pone en contacto directamente con el efluente ácido con un tiempo de retención de 30 minutos para una parcial disolución de los lodos y el precipitado de los metales. El pH es controlado en un tanque de mezcla rápida donde se le adicionará la cal directamente. La mezcla pasará a un reactor 2 con un tiempo de retención de 40 minutos, en ese tiempo precipitará la oxidación de ferroso a férrico, pasado ese tiempo todo es llevado a un tanque de floculación donde se le adicionará los floculantes. Toda esta mezcla luego es llevada a un clarificador donde se obtiene el efluente tratado y los lodos de los cuales una parte irá a recirculación. Los lodos de este proceso alcanzaron en el primer año de operación 30% de sólidos. En una revisión de la calidad de los lodos se probó que esta planta tenía una única precipitación de hierro donde su estructura era amorfa. Los lodos de este proceso presentaron otra característica, el bajo potencial de neutralización, lo cual podría significar una desventaja para la estabilidad del lodo pero este proceso resulta más eficiente en el consumo de cal. Se muestra esquema del proceso Figura N° 20.

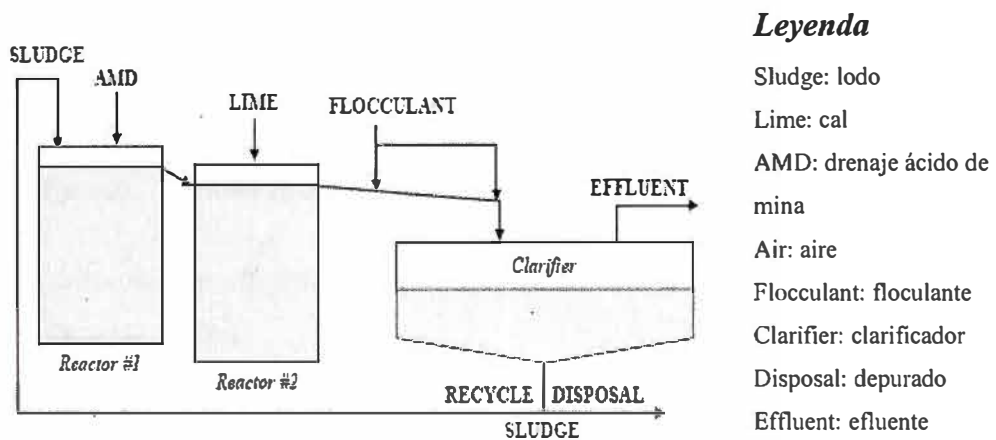


Figura N° 21: Esquema de tratamiento Geco Process

El bajo potencial de neutralización podría indicar la presencia de cal que aún no ha reaccionado o la formación en exceso de carbonato de calcio en el sistema. Mediante este proceso al tener contacto directo el lodo con el efluente ácido, la cal que no había reaccionado es consumida y disuelta.

Esta tecnología no ha sido aplicada en nuestro país, sin embargo en otros países ha sido aplicada como The Wheal Jane mina ubicada en Inglaterra en Octubre del 2000.

Proceso de Neutralización por Etapas (Staged-Neutralization Process)

Este proceso aplica los principios de cristalización para mejora la morfología de los lodos y la reducción del volumen de los mismos. Este proceso ha sido patentado por los Estados Unidos y Canadá. Este proceso implica la neutralización en serie tomando control de los niveles de supersaturación durante la precipitación de los metales. El proceso usa el reciclado de los lodos en el primer y segundo reactor los cuales neutralizan parcialmente el efluente ácido. El lodo adicionado deberá ser controlado hasta la obtención del pH deseado. Luego se le deberá agregar el floculante para la aglomeración de los precipitados. El proceso diseñado por Stage-Neutralization es una solución específica. El número de reactores requeridos y el pH que se desea alcanzar es basado en el tipo del metal y la concentración del efluente a tratar.

Este proceso todavía no ha sido aplicado a gran escala. Por otro lado las propiedades del los lodos y el bajo consumo de cal podrían ser positivos si se emplea esta tecnología, sin embargo los costos podrían ser superiores que los demás procesos por la cantidad y el tamaño de los reactores que se deben aplicar en este proceso. Se muestra el esquema del proceso en la Figura N° 21.

3.2.3 Comparación de tratamiento activo de las tecnologías nombradas de efluentes ácidos

En este punto se quiere realizar las comparaciones de todas las tecnologías diferenciando las ventajas y desventajas de las mismas.

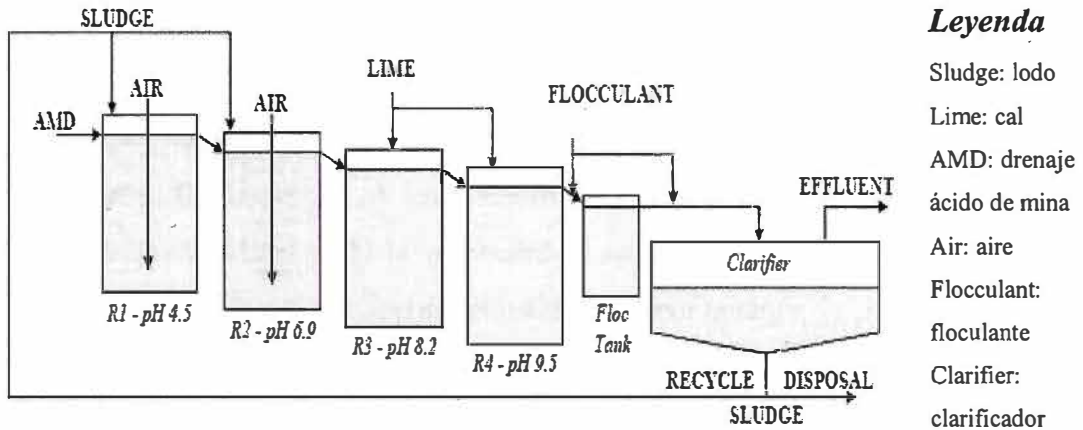


Figura N° 22: Esquema de tratamiento Staged-Neutralization Process

Comparación de tecnologías convencional de neutralización y las otras mencionadas en este informe

Si bien el tratamiento de neutralización con cal es el tratamiento más utilizado en nuestro país y con óptimos resultados no sólo por la calidad del efluente tratado si no por los bajos costos que representa tiene una consideración importante y es el manejo y disposición de lodos precipitados, particularmente.

El manejo y disposición de lodos se presenta como uno de los problemas más significativos en la práctica de las operaciones de tratamiento. Se espera un volumen de lodos que oscila del 5% al 10% del flujo diario a través de una planta de tratamiento lo cual no es bueno en comparación con los resultados de los otros tratamientos que representan una estabilidad de sus lodos del 25% a más, es por ello que especialmente las grandes empresas mineras con altos volúmenes de efluentes ácidos están optando por buscar nuevas soluciones que aunque son inversiones costosas con el tiempo los resultados serán mejores en cuanto al impacto ambiental que podría producir por los lodos generados.

Comparación de tecnologías HDS y NCD

Primero se quiere comparar las nuevas tecnologías empleadas en la actualidad en el Perú, se tiene Tabla N° 8 datos de dos minas peruanas Quiruvilca y Victoria que

han utilizado las tecnologías HDS y NCD para luego poder establecer las comparaciones de dichas tecnologías.

- En cuanto al tiempo de retención la tecnología HDS necesita de 50 – 60 minutos mientras que el tratamiento NCD sólo necesita 5 minutos por lo que el consumo de energía de los reactores sería menor.
- En el tratamiento NCD la velocidad de sedimentación se incrementa de 3 a 5 veces por lo que el tamaño del clarificador sería menor.
- En ambos casos la estabilidad de los lodos son aceptables, en el caso del proceso HDS son superiores en cuanto a la estabilidad química y física llegando a tener entre 25-30% de sólidos en clarificados y aproximadamente el 50% en la poza de almacenamiento.
- En el proceso NCD la eficiencia de neutralización no depende del contenido de fierro ni es imprescindible insuflar aire; el sistema es más flexible frente a variaciones de caudal, pH y concentraciones metálicas.
- Debido a su simplicidad no requiere de sistemas sofisticados y costosos de control en el caso del tratamiento NCD.
- En el tratamiento no requiere un depósito específico de lodos, se emplea el depósito de relaves sin afectar su capacidad.
- En muchos casos el relave empleado en el tratamiento NCD reduce significativamente el consumo y costo de cal, pero hay que tener en cuenta las características del relave del centro minero que se quiere tratar, por tanto a pesar de que esta sea una ventaja del NCD en comparación del HDS este tratamiento se puede adecuar a cualquier tipo de mina.
- La planta NCD es compacta, ocupa muy poco espacio y puede ser construida rápidamente y los costos de inversión son inferiores que el tratamiento HDS.
- La ventaja de la tecnología HDS en comparación con la NCD son los años que vienen siendo usada esta tecnología en el mundo con óptimos resultados y la más conocida, lo que podría dar mayor confianza a las empresas mineras en arriesgarse a invertir en este tipo de tratamiento.

Tabla N° 8: Datos de las minas Quiruvilca y Victoria

Fuente: Colegio De Ingenieros Del Perú -Capítulo de Ingeniería Metalúrgica, Revista de Metalurgia, Proceso NCD: tecnología nacional para el tratamiento de efluentes ácidos de mina *Carlos Villachica León*, Jaime Llamosas Bueno, Joyce Villachica Llamosas, p. 6-2

PARAMETRO	UNIDAD	HDS / Quiruvilca	NCD T. / Victoria
Capacidad de diseño	L/s	83	350
Capacidad Máxima	L/s	95	550
Costo de inversión	millón US \$	4	1.6
Costo Especifico de Inversión	US \$ (L/s)	48,193	4,571
Tiempo de Residencia	minutos	65	10
Volumen de Reactores	m ³	325	244
Volumen Especifico de Reactores	m ³ / (L/s)	3.9	0.7
Diámetro del Clarificador	m	16	18.3
Área Especifica de Clarificación	m ² / (L/s)	2.42	0.75
Potencia Consumida	Kw	175	65
Potencia Especifica Consumida	Kw(L/s)	2.11	0.19
Consumo de Floculante	gr/m ³	3	2.5
Concentración del sedimento	% sólidos	30	23
Recirculación del sedimento	%	300	0
Descarga de Sólidos	T/d	106	960
Tipo de descarga del sedimento	pie ³ /minuto	450	0
Consumo de aire		2	2.9
pH inicial		3.65	0.19
pH final		7.8	8.5
Consumo de Cal Actual	Kg/m ³	3.65	0.9
Ahorro de Cal Claridad del Rebose	% mg/L	40	10

Comparación de tecnologías HDS y Geco Process

Se realizaron por el año 1996 pruebas en plantas pilotos comparando ambos procesos, en cuanto a los valores de % de sólidos (alrededor del 25%) y la viscosidad (40cP) se obtuvieron resultados parecidos para ambos procesos.

En cuanto al consumo de Cal, el proceso Geco Process tiene un menor consumo por realizar primero la mezcla de los lodos con el efluente ácido directamente neutralizando parte del efluente por lo que el consumo de Cal en el siguiente tanque es menor.

La ventaja de del tratamiento HDS en comparación con el otro tratamiento es la estabilidad de sus lodos ya que estos van a tener un mayor potencial de neutralización.

La decisión del tratamiento a seguir dependerá de la de las necesidades de la mina. Por ejemplo si el efluente contiene muchos iones de fierro y bajas concentraciones de Zn, Ni y Cd, la estabilidad de los lodos no podría verse afectada y el tratamiento Geco Process podría ser empleado.

Si los lodos contienen metales pesados solubles se deberá aplicar el tratamiento HDS.

3.3 Herramienta para selección del tratamiento a emplear para efluentes ácidos

Para la selección de el tratamiento se necesita realizar diversos estudios no sólo tema de costos sino otros factores como ubicación de la mina, procesos realizados para la concentración de minerales, caracterización de minerales, espacio en la planta, caudal de efluentes, entre otros. Es por ello que para hacer más práctica la selección del tratamiento o por lo menos estar seguros qué tratamiento conviene utilizar de acuerdo a ciertas características, se ha creado un formato el cual puede ser empleado por los ingenieros como una herramienta práctica para tener una noción de la tecnología que podría funcionar en su centro minero.

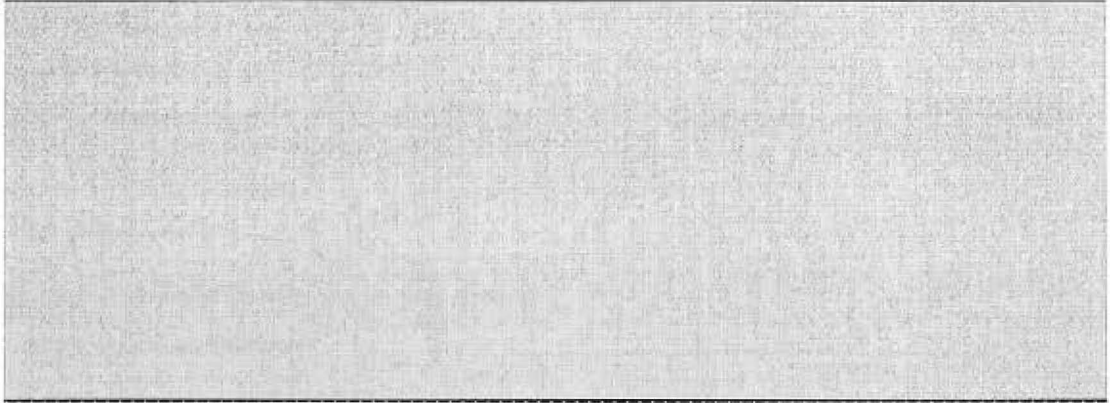
Esta herramienta es una lista de chequeo en la cual en base a los datos que se registran ayudan a tener un primer paso para la selección del tratamiento previa a la investigación.

Tabla N° 9 muestra los datos tomados en un monitoreo a un centro minero, con dichos obtuvieron los siguientes resultados.

Especificar punto de control:

Coordenadas UT :

Croquis:



Tratamiento de efluentes ácidos

Dispone de espacio para los lodos: Sí No

Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No

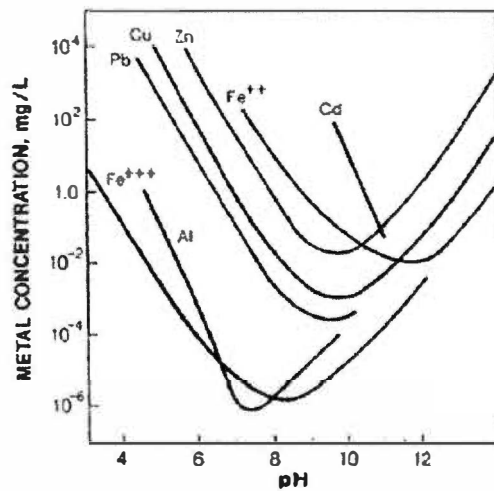
Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro

pH: _____

Si se tiene pH menores que 3 se tiene estos datos referenciales:

Costo de Cal: 1'276,500 US\$/Año
Costo de Energía: 125,200 US\$/Año

Si se tiene metales de Cu, Zn se necesita alcanzar un pH de 10 los costos de cal son muy altos.



Proceso HDS

Flujo (m³/d) _____

Dispone de espacio para los lodos: Sí No

Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No

Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro

pH: _____

Disponibilidad de espacio: Sí No

Tener en cuenta que la estabilidad de los precipitados mejora al incrementarse la relación Fe/Total de metales, al extremo de que en ocasiones es necesario adicionar fierro al efluente.

Cantidad de Fe en el efluente ácido: _____

Cantidad de Fe en el efluente ácido: _____

NOTA: este proceso se puede adaptar a cualquier centro minero, pero se debe contar con espacio suficiente para la instalación de los reactores y gran poza para la colocación de lodos para lograr que estos se establezcan.
Sus lodos son estables
Tiempos de retención de 50 - 60 minutos

Proceso NCD

Flujo (m³/d) _____

Dispone de espacio para los lodos: Sí No

Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No

Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro

pH: _____

Disponibilidad de espacio: Sí No

Potencial de Neutralización de sus relaves: _____

NOTA:
Si el Potencial de Neutralización es demasiado bajo no se recomienda este método, utilizar el proceso de neutralización simple
Tener en cuenta que en la flotación de sulfuros de Zn los relaves tienen pHs en el orden de 10 a 12
No se requiere de mucha disponibilidad de espacio en comparación con el proceso HDS
Tiempos de retención en los reactores 5 minutos
Sus lodos son estables

Proceso Geco-Process

Flujo (m³/d) _____

Dispone de espacio para los lodos: Sí No

Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No

Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro

pH: _____

Disponibilidad de espacio: Sí No

Concentración de iones Fe (mg/l): _____
 Concentración de iones Zn (mg/l): _____
 Concentración de iones Ni (mg/l): _____
 Concentración de iones Cd (mg/l): _____

NOTA:

Los lodos de este método no tienen un bajo potencial de neutralización, por lo tanto pueden tener una baja estabilidad. Si el efluente contiene muchos iones de fierro y bajas concentraciones de Zn, Ni y Cd, la estabilidad de los lodos no podría verse afectada y el tratamiento Geco Process podría ser empleado.
 Tiempos de retención en los reactores 30 - 40 minutos

Neutralización por Etapas (Staged-Neutralization Process)

Flujo (m3/d) _____

Dispone de espacio para los lodos: Sí No

Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No

Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro

pH: _____

Disponibilidad de espacio: Sí No

NOTA:

El número de reactores requeridos y el pH que se desea alcanzar es basado en el tipo del metal y la concentración del efluente a tratar.

Se debe contar con disponibilidad de espacio por la cantidad de reactores que llene.

Estabilidad de su lodos

Este proceso aún no ha sido realizado a gran escala

ANEXO

NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERO-METALURGICAS

PARAMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
pH	Mayor que 6 y Menor que 9	Mayor que 6 y Menor que 9
Sólidos suspendidos (mg/l)	50	25
Plomo (mg/l)	0.4	0.2
Cobre (mg/l)	1.0	0.3
Zinc (mg/l)	3.0	1.0
Fierro (mg/l)	2.0	1.0
Arsénico (mg/l)	1.0	0.5
Cianuro total (mg/l) *	1.0	1.0

* CIANURO TOTAL, equivalente a 0.1 mg/l de Cianuro Libre y 0.2 mg/l de Cianuro fácilmente disociable en ácido.

Tabla N° 9: Datos tomados de un efluente en la presa de relave de la planta concentradora de un centro minero

FECHA	CAUDAL (m ³ /d)	pH	T(°C)	SS	Pb (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
1996	2023	4.23	0	197.1	0.13	0.5	5.91	237.96	0.099
1997	1270	4.05	10.6	142.8	0.42	0.6	11.1	264.14	0.09
1998	638	3.71	10.3	74.81	0.24	0.28	22.73	350.16	0.265
1999	573	4.27	10.2	70.27	0.19	0.31	25.69	322.28	0.224
2000	453	5.21	10.32	22.71	0.18	0.27	18.72	65.48	0.117
2001	569	5.61	9.94	27.16	0.14	0.17	3.38	3.22	0.014

A partir de Taba N° 9 se obtuvieron las gráficas siguientes:

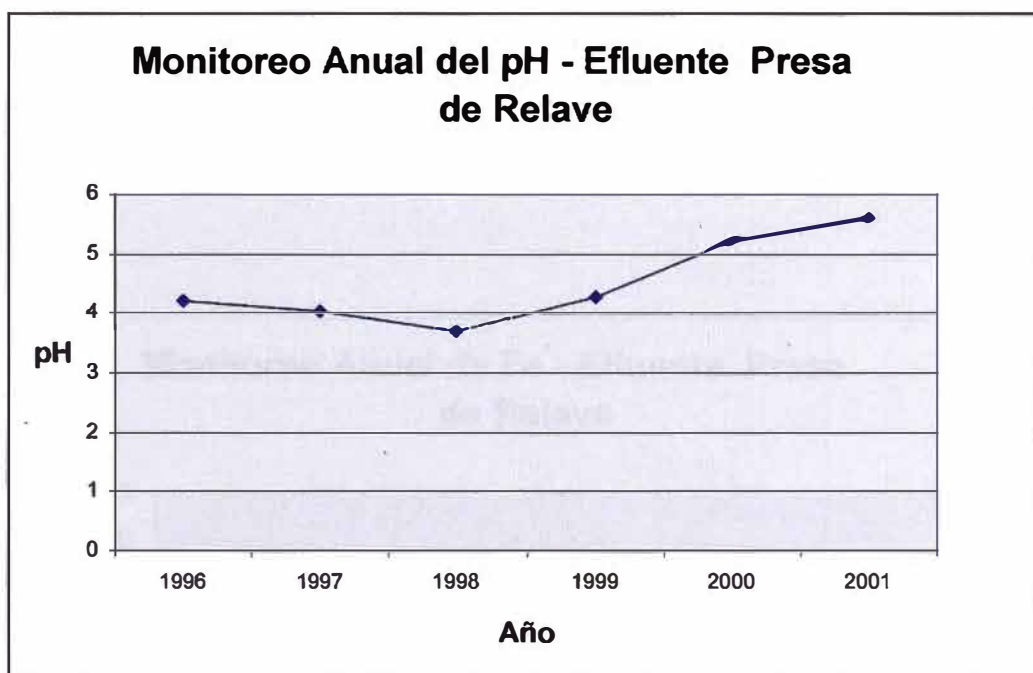


Figura N° 23: Monitoreo Anual del pH

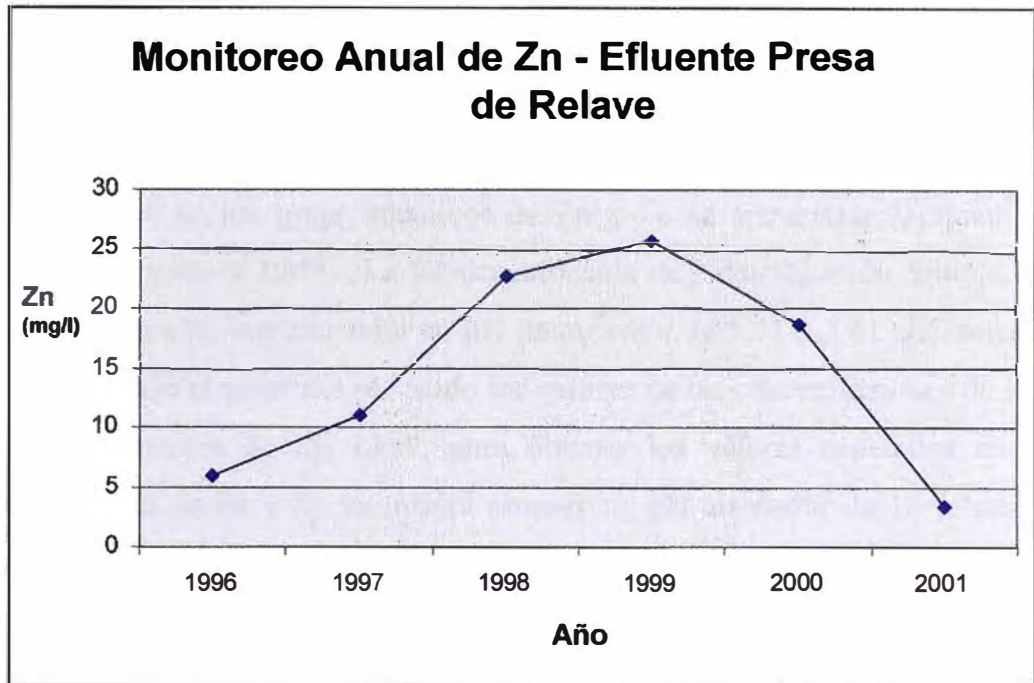


Figura N° 24: Monitoreo Anual del Zn

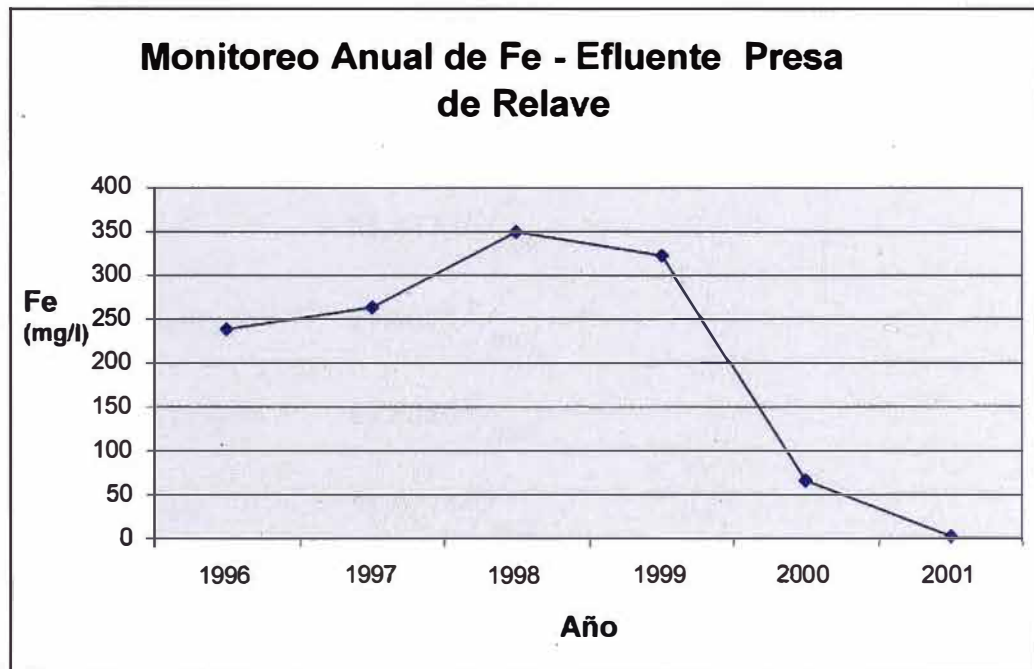


Figura N° 25: Monitoreo Anual del Fe

Se observa a través de los años 1996 al 2001 que los valores de acidez han ido mejorando debido al empleo de la tecnología convencional, sin embargo aún el valor del pH se encuentra por debajo de los LMP razón por la cual las concentraciones de los iones metálicos de Zn y Fe se encuentran también por encima de los valores LMP. La técnica utilizada de Neutralización Simple con Cal y floculantes ha logrado subir su pH de un valor de 3.71 a 5.61 sin embargo por mantener aún el valor del pH ácido los valores de las concentraciones de Fe y Zn no están dentro de los LMP, para obtener los valores esperados en las concentraciones de Fe y Zn se deberá obtener un pH alrededor de 10 (observar Figura N° 25) aumentándose el consumo de Cal dentro del proceso.

Se aprecia Figura N° 25 que el incremento del pH hace que los metales disueltos en el efluente precipiten como hidróxidos.

De manera práctica calculemos el pH necesario para que precipite el Fe, analicemos de la Tabla N° 9 los datos que se tienen en el año 2001.

Concentración de Fe: 3.22 mg/l

pH: 5.61

Asumiremos 1 l de solución

Otros datos:

$$\text{Peso molecular } \text{Fe}^{2+} = 55.8470 \text{ g/mol}$$

$$\text{Peso molecular } (\text{OH})^- = 17.0073 \text{ g/mol}$$

$$\text{Peso molecular } \text{Fe}(\text{OH})_2 = 89.8620 \text{ g/mol}$$

$$\text{Peso molecular } \text{CaO} = 56.0774 \text{ g/mol}$$

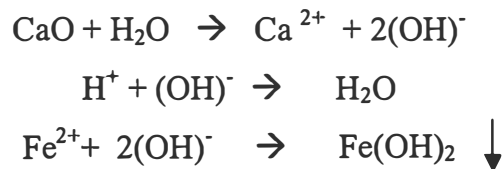
Cálculo de $n_{\text{Fe}^{2+}}$

$$n_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{\text{Masa}(g)}{\text{PesoMolecular } \text{g/mol}}$$

$$n_{\text{Fe}^{2+}} = \frac{3.22 \text{ mg}}{55.847 \text{ g/mol}}$$

$$\boxed{n_{\text{Fe}^{2+}} = 0.058 \times 10^{-3} \text{ moles}} \dots\dots\dots(1)$$

De acuerdo a las siguientes reacciones de neutralización se puede afirmar que un mol de Fe^{2+} reacciona con dos moles de $(\text{OH})^-$



Entonces de (1) se puede decir

0.058×10^{-3} moles de Fe^{2+} reaccionará con 0.116×10^{-3} moles de $(\text{OH})^-$

Cálculo de $m_{(\text{OH})^-}$

$$m_{(\text{OH})^-} = (\text{Moles que reaccionarán}) \times (\text{Peso Molecular } \frac{\text{g}}{\text{mol}})$$

$$m_{(\text{OH})^-} = (0.116 \times 10^{-3} \text{ moles}) \times (17.0073 \frac{\text{g}}{\text{mol}})$$

$$\boxed{m_{(\text{OH})^-} = 1.97 \text{ mg}} \dots\dots\dots(2)$$

Cálculo de CaO reaccionado

$$\text{Peso de CaO reaccionado} = \frac{56.0774 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{17.0073 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \times 1.97 \text{ mg}$$

$$\text{Peso de CaO reaccionado} = 6.50 \text{ mg}$$

Cálculo de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ producido

$$\text{Peso de } \text{Fe}(\text{OH})_2 \text{ producido} = \frac{89.8620 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)}{55.8470 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \times 3.22 \text{ mg}$$

$$\boxed{\text{Peso de } \text{Fe}(\text{OH})_2 \text{ producido} = 5.18 \text{ mg}}$$

Cálculo del pH necesario para que precipite $\text{Fe}(\text{OH})_2$

$$pOH = -\log_{10} [(\text{OH})^-]$$

$$pOH = -\log_{10} [0.116 \times 10^{-3}]$$

$$pOH = 2.94 \dots\dots\dots(3)$$

$$pH + pOH = 14$$

Utilizando el resultado (3)

$$pH = 14 - 2.94$$

$$\boxed{pH = 11.06}$$

Lista de verificación para selección de tratamiento para efluente ácido

Informe N° 1
 Fecha (Inicio) 02/02/2007
 Fecha (Término) 09/02/2007

Inspección Seguimiento Acción Correctiva
 Especial Acción Preventiva
 Periodicidad Mensual Semestral Anual

Nombre del Centro Minero _____
 Inspector Viviana Ratto
 Departamento Huancavelica Elevación _____ m
 Provincia _____ Distrito _____

Estado de la mina Inicio Operativa Cierre Cierre Temporal
 Años de Operación 10 Año de inicio _____ Año de cierre _____
 Tipo de mina Metálica Subterránea Tajo Abierto
 No metálica Subterránea Tajo Abierto
 Cantera Arena/grava Caliza

Planta de Beneficio Flotación
 Cianurización
 Otro
 Capacidad de la planta (T/día) _____
 Toneladas tratadas (T/día) _____

Metales extraídos Au Ag Cu Pb Zn Otro

Información Ambiental

Precipitación Anual Promedio _____ (mm)
 Temperatura Anual Promedio _____ (°C)

Cuerpo Receptor de Efluente _____ Constante No regular
 Flujo Anual Promedio _____ (l/s)

Número de Monitoreos Realizados _____

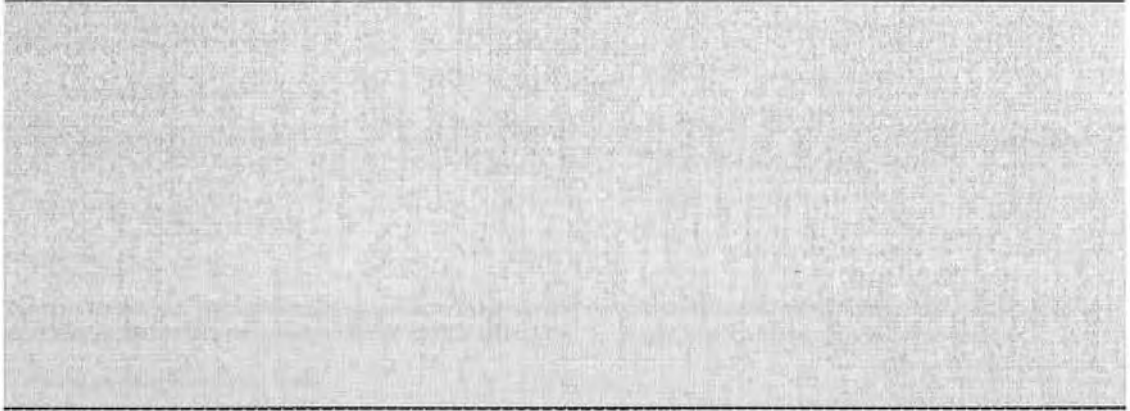
Calidad del Agua

Estación	Parámetros										
	Flujo (m3/d)	Metales					pH	Cianuro	Color	Temperatura	Dureza
Fe		Cu	Zn	Pb	As						
1998	638	350.2	0.28	22.73	0.24	0.26	3.71			10.3	
1999	573	322.3	0.31	25.69	0.19	0.224	4.27			10.2	
2000	453	65.48	0.27	18.12	0.18	0.12	5.21			10.32	
2001	569	3.22	0.17	3.38	0.14	0.01	5.61			9.94	

Especificar punto de control:

Coordenadas UT :

Croquis:



Tratamiento de efluentes ácidos

Neutralización

Flujo (m³/d) _____

Dispone de espacio para los lodos: Sí No

Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No

Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro

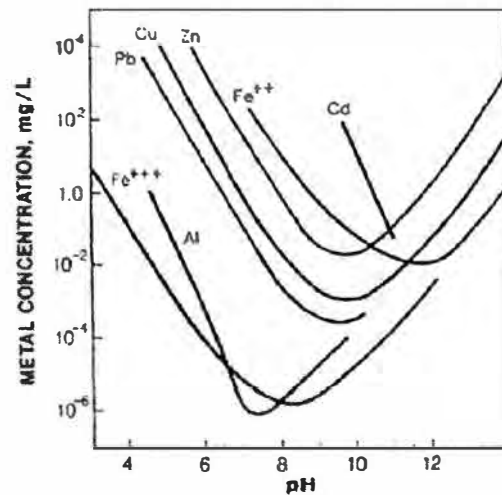
pH: Aprox 5

Si se tiene pH menores que 3 se tiene estos datos referenciales:

Costo de Cal: 1'276,500 US\$/Año

Costo de Energía: 125,200 US\$/Año

Si se tiene metales de Cu, Zn se necesita alcanzar un pH de 10 los costos de cal son muy altos.



Proceso HDSFlujo (m³/d) _____Dispone de espacio para los lodos: Sí No Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro pH: Aprox 5Disponibilidad de espacio: Sí No

Tener en cuenta que la estabilidad de los precipitados mejora al incrementarse la relación Fe/Total de metales, al extremo de que en ocasiones es necesario adicionar fierro al efluente.

Cantidad de Fe en el efluente ácido: 3.22 (mg/l)

NOTA: este proceso se puede adaptar a cualquier centro minero, pero se debe contar con espacio suficiente para la instalación de los reactores y gran poza para la colocación de lodos para lograr que estos se establezcan.

Sus lodos son estables

Tiempos de retención de 50 - 60 minutos

Proceso HCDFlujo (m³/d) _____Dispone de espacio para los lodos: Sí No Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro pH: Aprox 5Disponibilidad de espacio: Sí No

Potencial de Neutralización de sus relaves: _____

NOTA:

Si el Potencial de Neutralización es demasiado bajo no se recomienda este método, utilizar el proceso de neutralización simple

Tener en cuenta que en la flotación de sulfuros de Zn los relaves tiene pHs en el orden de 10 a 12

No se requiere de mucha disponibilidad de espacio en comparación con el proceso HDS

Tiempos de retención en los reactores 5 minutos

Sus lodos son estables

Proceso Geco-ProcessFlujo (m³/d) _____Dispone de espacio para los lodos: Sí No Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro pH: Aprox 5Disponibilidad de espacio: Sí No

Concentración de iones Fe (mg/l): 3.22
 Concentración de iones Zn (mg/l): 3.38
 Concentración de iones Ni (mg/l): _____
 Concentración de iones Cd (mg/l): _____

NOTA:

Los lodos de este método no tienen un bajo potencial de neutralización, por lo tanto pueden tener una baja estabilidad. Si el efluente contiene muchos iones de hierro y bajas concentraciones de Zn, Ni y Cd, la estabilidad de los lodos no podría verse afectada y el tratamiento Geco Process podría ser empleado.
 Tiempos de retención en los reactores 30 - 40 minutos

Neutralización por Etapas (Staged-Neutralization Process)

Flujo (m³/d) _____

Dispone de espacio para los lodos: Sí No

Tiene planta para tratar sus lodos: Sí No

Metales que tienen su efluente: Au Ag Cu Pb Zn Otro

pH: _____

Disponibilidad de espacio: Sí No

NOTA:

El número de reactores requeridos y el pH que se desea alcanzar es basado en el tipo del metal y la concentración del efluente a tratar.
 Se debe contar con disponibilidad de espacio por la cantidad de reactores que tiene.
 Estabilidad de sus lodos
 Este proceso aún no ha sido realizado a gran escala

ANEXO

NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERO-METALURGICAS

PARAMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
pH	Mayor que 6 y Menor que 9	Mayor que 6 y Menor que 9
Sólidos suspendidos (mg/l)	50	25
Plomo (mg/l)	0.4	0.2
Cobre (mg/l)	1.0	0.3
Zinc (mg/l)	3.0	1.0
Hierro (mg/l)	2.0	1.0
Arsénico (mg/l)	1.0	0.5
Cianuro total (mg/l) *	1.0	1.0

* CIANURO TOTAL, equivalente a 0.1 mg/l de Cianuro Libre y 0.2 mg/l de Cianuro fácilmente disociable en ácido.

Se comprueba utilizando un balance estequiométrico que para precipitar la concentración total de Fe^{2+} se necesita llegar a un pH 11.06, para ello se debe utilizar 6.50 mg de CaO por cada litro de solución y por cada litro de solución se producirá 5.18 mg de $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

El problema que se tiene es que al aumentar el consumo de Cal se originaría un gasto mayor del insumo y un mayor consumo de energía, otro factor importante es la falta de espacio que dispone el centro minero para la disposición final de los lodos generados y la poca estabilidad que poseen por lo que no conviene este tipo de tratamiento.

Con los datos que se tienen registrados en Tabla N° 9, se procederá a la utilización de la lista de chequeo creada, obteniendo el siguiente análisis.

- Neutralización Simple: descartamos el proceso actual por la inestabilidad de los lodos generados.
- HDS: es un tratamiento que podríamos utilizar el dato que necesitaríamos es la disponibilidad de espacio para la instalación de planta.
- NCD: a pesar de no tener el dato del potencial de neutralización de sus relaves como podemos observar en el cuadro con los datos en el monitoreo que se tienen datos de Zn por lo que podemos decir que su planta según la nota de la lista de inspección sus relaves deben tener un pH alrededor de 10 con lo que sería factible este tratamiento, no necesita de mucha capacidad instalada de la planta y se logra tener estabilidad de sus lodos.
- Geco Process: a pesar de que habría un ahorro en el consumo de cal en comparación con la tecnología HDS, se puede apreciar en nuestra lista de chequeo que es conveniente cuando las concentraciones de Zn son bajas, sin embargo de nuestros datos se puede apreciar que se tienen altas concentraciones de Zn por que los lodos resultantes de este proceso podrían verse afectados por la falta de estabilidad.
- Neutralización por Etapas (Staged-Neutralization Process); para este nuevo proceso se necesita datos más específicos y aún no ha sido probado a gran escala por lo que se descarta como tecnología alternativa.

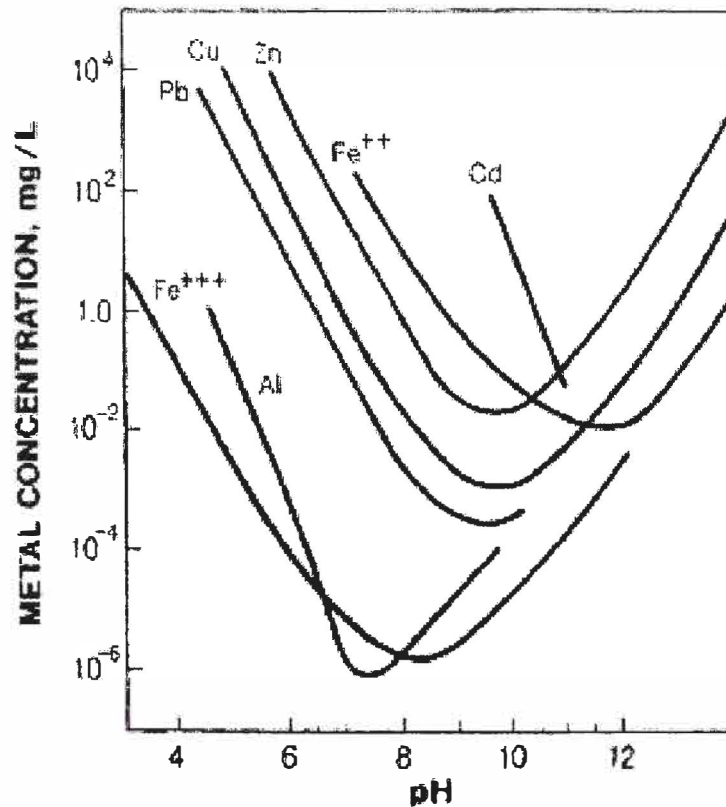


Figura N° 26: Concentración de Metales vs. pH

Por tanto se puede afirmar que los tratamientos que se pueden utilizar son HDS y NCD, sin embargo un dato importante, dependerá del espacio disponible del centro minero pues de no contar con espacio suficiente para instalar una planta HDS convendría el método NCD ya que se controla el pH y se obtienen lodos estables.

3.4 Tratamiento de Lodos

Si bien el tema que se ha tratado en este informe es del tratamiento de los efluentes ácidos, otro tema que no puede dejarse de lado son los lodos que producen los tratamientos activos.

Los lodos tratados en los procesos de tratamientos de efluentes ácidos son hidróxidos amorfos, los cuales han absorbido los metales por la solución alcalina de la muestra. Estos son mucho más manejables en comparación con el efluente ácido.

Muchos de los lodos que se producen de los tratamientos de los efluentes ácidos en nuestro país son colocados nuevamente en canchas especiales para este tipo de lodos, muchas de ellas tienen un espacio determinado dependiendo del tiempo de vida de las minas. Sin embargo este tipo de residuo deberá de ser descargados en lugares apropiados, para ello se deberá de evaluar la ubicación, diseño y operación de represas y embalses superficiales para los lodos.

Por ejemplo el uso de tecnologías como recubrimientos sintéticos, los cuales se usan para cubrir las balsas de relaves, los materiales más usados son polietilenos de alta densidad, cloruro de polivinilo entre otros.

Otra tecnología que se puede utilizar para la protección de suelos es el recubrimiento con suelos arcillosos con un espesor total de recubrimiento cerca del 0.6 – 0.9 m, colocado y compactado en cuatro a seis capas sucesivas.

Se pueden también combinar el recubrimiento de suelos arcillosos y sintéticos los cuales puede incluir capas de drenaje, de material permeable, para la detección de fugas.

Existen técnicas para el tratamiento exclusivo de este tipo de lodos las cuales están siendo empleadas en países como Estados Unidos y Canadá. La mayoría de las técnicas para la estabilización de estos lodos son basados generalmente en los principios de los tratamientos que se realizan al agua, como reacciones de neutralización, reacciones óxido / reducción, fijaciones con reactivos químicos, tratamientos físicos.

Estos tipos de estabilización para los lodos han sido usados en varias formas en las literaturas de tratamiento de efluentes ácidos. Algunas veces referido a un

proceso particular o como fijación del residuo que se obtiene luego del tratamiento del efluente.

La estabilización de los lodos tiene como fin inmovilizar los metales pesados presentes en el efluente, disminuyendo el área superficial y la permeabilidad del residuo tratado, de tal manera que se pueda asegurar la disposición final del efluente.

Sin tener en cuenta el tratamiento del efluente que se haya seguido, la estabilización de lodos hace que la disposición de los mismos tenga menores impactos ambientales.

Los lodos se pueden estabilizar química o físicamente.

Estabilización química

Previene la disolución de los contaminantes que contienen los lodos los cuales pueden ser transportados por el agua y lixiviar contaminando la superficie de los suelos y subsuelos.

Se tienen los siguientes métodos:

- a) Adición de arcillas y zeolitas, estas interactúan e inmovilizan las moléculas polares como el agua y otros iones.
- b) Base de cal, uso combinado de cal y sílice finamente dividida, cuando la sílice y el calcio son adheridos en el lodo el resultado es una masa sólida de silicato de calcio, como una especie de concreto.
- c) Base de cemento, es parecido a la base de cal pero es más durable. Se agrega cemento Pórtland y cenizas los cuales solidifican el lodo, el resultado es un fuerte concreto de lodo. Este tipo de estabilización es considerado el más versátil y adaptable.
- d) Otros: técnicas termoplásticas, técnicas poliméricas, técnicas de encapsulamiento.

Estabilización física

Es usado para prevenir que las partículas contaminantes sólidas puedan ser transportadas al medio ambiente.

Se tienen los siguientes métodos:

- a) Técnica seca, en esta técnica está incluida el uso de evaporación de estanques, secándolos mediante técnicas mecánicas, congelamiento seco o filtración. Una vez secado los lodos son llevados a un relleno y dispuestos por encima de la capa freática en un tajo abierto o debajo de la tierra. La disposición encima de la capa freática tiene que ser provista por un aislamiento. Si es que no hubiese una protección natural en ese lugar es necesario colocar una protección sintética pues el deterioro de esta protección puede causar problemas de contaminación. La estabilidad del sistema dependerá de las características de la superficie, la resistencia al ataque de la erosión, actividades de los animales y las personas, el tipo de raíces de la zona etc.
- b) Técnica húmeda, es una técnica mucho más reciente y menos aceptada que la técnica seca pues hay muchos riesgos de que esta técnica puede causar daños al medio ambiente. El objetivo de esta técnica es separar o aislar el lodo de los efectos físicos de la erosión por acción de las aguas de la superficie, así como del oxígeno, esto es casi imposible de conseguir con la técnica seca. Lo que se quiere es lograr que el lugar para la disposición de los lodos tenga un control hidrobiológico, esto se puede lograr si la permeabilidad del lodo y los materiales del perímetro son suficientemente altos.

IV. CONCLUSIONES

- 4.1 En el presente trabajo se presentaron las diversas alternativas para el tratamiento activo de efluentes ácidos, así como la mención de la técnica convencional siendo esta la más usada por su simplicidad usando una mezcla de cal, sin embargo se han mostrado otras tecnologías que logran buenos resultados especialmente en la estabilidad de sus lodos pues es esa estabilidad es la que permite la mejor disposición de los mismos sin contaminar el suelo y las aguas subterráneas.
- 4.2 Se utilizó la lista de chequeo basándonos en los datos que se tenían de un monitoreo en un centro minero. Los resultados fueron que pueden utilizar las tecnologías HDS y NCD, la selección de las mismas dependerá del espacio que se disponga para la construcción de la planta.
- 4.3 Todas las tecnologías mencionadas presentan mejor estabilidad de los lodos en comparación con el tratamiento convencional de neutralización, sin embargo el tratamiento Geco Process presenta sus lodos con un bajo potencial de neutralización y con ello una menor estabilidad.
- 4.4 La tecnología HDS es la tecnología más conocida en el mundo y la más utilizada con óptimos resultados a pesar de su mayor costo de instalación, esto se debe que a largo plazo tiene costos de operación bajos es por ello que tratando de optimizar los resultados de este proceso se comenzaron a realizar modificaciones para el mejor aprovechamiento de la recirculación de los lodos como en el caso de Geco Process.
- 4.5 Las tecnologías presentadas presentan una buena calidad de las aguas y todos quieren llegar a tener estabilidad de los lodos, ya que lo que se desea es también obtener la fijación del residuo con el fin de inmovilizar los metales pesados presentes en el efluente, este es mucho más manejable para la disposición final del mismo.
- 4.6 La tecnología NCD es una tecnología peruana y de poco tiempo de aplicación, sin embargo ha presentado buenos resultados no sólo por la calidad de las aguas resultantes sino también el costo empleado para su implementación, otra

de las ventajas de esta tecnología es que se minimiza la inversión requerida en una planta de Neutralización se disminuye el consumo de cal pues se utilizan los relaves de las minas, el uso del relave va depender del Potencial Neutralizante (en $\text{kg.CaCO}_3/\text{TM}$) el cual nos va a indicar la pureza de la caliza.

4.7 Finalmente, hay que tener en cuenta que para las minas existentes, acceder a tecnologías más avanzadas puede ser difícil pues sus instalaciones ya están establecidas, el problema con las minas existentes es qué cosa es posible hacer para realizar algún tipo de control. A pesar que las tecnologías que se explican en el documento se aplican a las empresas mineras de manera muy general, las investigaciones y medidas correctivas no se pueden generalizar para todas las minas por lo que se deben realizar estudios específicos.

Hay que tener en cuenta que las tecnologías avanzadas no necesariamente se podrán aplicar y casi siempre se requerirá realizar correcciones, cambios, adaptaciones específicas para nuestro país, por lo que este informe debe ser usado como base y fundamentos que guiarán en un futuro el tratamiento de los efluentes ácidos en el Perú.

V. BIBLIOGRAFÍA

- 5.1. METSO MINERALS. “Conocimientos básicos en el Procesamiento de Minerales”, Edición 1, Lima: s.e., 2005.
- 5.2. VILLACHICA, Carlos, LLAMOSAS, Jaime, VILLACHICA, Joyce. “Proceso NCD: tecnología nacional para el tratamiento de efluentes ácidos de mina”, Metalurgia, Materiales y Soldadura, N° 5, Colegio De Ingenieros del Perú: Capítulo de Ingeniería Metalúrgica, Lima, octubre 2005, pp.6:20.
- 5.3. AUBÉ, Bernard. “A pilot study on high density sludge production during treatment of acid mine drainage”, Envir Aubé, edición de Internet, 2004, http://www.enviraube.com/tech/aube_theses.pdf, consultada en 6 de diciembre del 2006.
- 5.4. AUBÉ, Bernard. “The Science of Treating Acid Mine Drainage and Smelter Effluents Servern Trent Services”, Robertson Geo Consultants Inc., edición de Internet, 2005, http://www.robertsongeoconsultants.com/rgc_enviromine/publicat/treatment%20science.pdf, consultada 30 de noviembre del 2006.
- 5.5. BIBLIOTECA YBARRA. “La minería y sus métodos de extracción”, Biblioteca de Joyería, edición en Internet, http://www.raulybarra.com/notijoya/archivosnotijoya6/6mineria_metodos.htm consultada 27 de octubre del 2006
- 5.6. CANADIAN ENVIRONMENTAL & METALLURGICAL INC. “Pilot scale testing of the high density sludge process”, Bc Ministry Of Water, Land And Air Protection, edición en Internet, Mayo 2002, http://www.agf.gov.bc.ca/clad/britannia/downloads/reports/tech_reports/WT_Pcemi_final_pilot_plant_report.pdf, consultada 16 de enero del 2007.

- 5.7. CONSULCONT S.A.C. “Proceso NCD”, Smallvillasac, edición en Internet, 2005, <http://www.smallvillsac.com/ncd.htm>, consultada 28 de junio del 2006
- 5.8. HEREDIA, Walter. “Volcán pone en marcha planta de neutralización de aguas ácidas”, Eco portal.net, edición en Internet, s.f., <http://www.ecoportal.net/noti02/n737.htm>, consultada 12 de setiembre de 2006.
- 5.9. MEND REPORT. “Characterization and Stability of Acid Mine Drainage Treatment Sludge”, Natural Resources Canada, edición en Internet, 1997, http://www.nrcan.gc.ca/mms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/reports/3422es_e.htm, consultada 30 de agosto del 2006.
- 5.10. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. “Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM”, el Ministerio edición en Internet, 13 de enero de 1996, http://fonamperu.org/general/pasivos/documentos/imps_efluentes.pdf, consultada 27 de abril del 2006.
- 5.11. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. “Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros”, el Ministerio edición en Internet, pp.53:55, <http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/legislacion/guias/relaveminero.pdf>, consultada el 4 de mayo del 2006
- 5.12. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. “Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas”, el Ministerio edición en Internet, pp. 44:46, <http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/legislacion/guias/manedrenaje.pdf>, consultada el 4 de mayo del 2006

- 5.13. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. “Guía Ambiental de Manejo de Agua en Operaciones Minero-Metalúrgicas”, el Ministerio edición en Internet, p. 18,
<http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/legislacion/guias/manejoagua.pdf>, consultada el 4 de mayo del 2006
- 5.14. ROBERTSON, Mac G. “Options for the Stabilization of Sludge from Acid Mine Drainage Water Treatment Plants”, Robertson GeoConsultants Inc., edición en Internet, 1997,
<http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/sssludges.pdf>, consultada 01 de febrero del 2007.
- 5.15. SERVEN TRENT SERVICES. “Tetra HDS”, SERVEN TRENT SERVICES, edición en Internet, 2007
http://www.severntrentservices.com/water_purification/filtration_products/precipitation_tech/precipitation_hds.html, consultada 01 de febrero del 2007.
- 5.16. UNIVERSIDAD DE NEVADA: Restoration of Abandoned Mine Technology Database. “High-Density Sludge Treatment”, la Universidad, edición en Internet, 2004
<http://www.unr.edu/mines/ramstech/PDFfiles/1highdensity.pdf#search='HighDensity%20Sludge%20Treatment>, consultada 03 de enero del 2007.
- 5.17. VILLACHICA, Carlos, LLAMOSAS, Jaime, VILLACHICA, Joyce. “Proceso NCD: Tecnología nacional para el tratamiento de efluentes ácidos de minas”, Tecnología y Desarrollo, Instituto de Energía Nuclear, edición en Internet, 2006,
http://www.ipen.gob.pe/site/publicaciones/revista/revista_02_06/33%20a%20036.swf, consultada 13 de febrero del 2007.

- 5.13. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. “Guía Ambiental de Manejo de Agua en Operaciones Minero-Metalúrgicas”, el Ministerio edición en Internet, p. 18,
<http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/legislacion/guias/manejoagua.pdf>, consultada el 4 de mayo del 2006
- 5.14. ROBERTSON, Mac G. “Options for the Stabilization of Sludge from Acid Mine Drainage Water Treatment Plants”, Robertson GeoConsultants Inc., edición en Internet, 1997,
<http://www.robertsongeoconsultants.com/papers/sssludges.pdf>, consultada 01 de febrero del 2007.
- 5.15. SERVEN TRENT SERVICES. “Tetra HDS”, SERVEN TRENT SERVICES, edición en Internet, 2007
http://www.severntrentservices.com/water_purification/filtration_products/precipitation_tech/precipitation_hds.html, consultada 01 de febrero del 2007.
- 5.16. UNIVERSIDAD DE NEVADA: Restoration of Abandoned Mine Technology Database. “High-Density Sludge Treatment”, la Universidad, edición en Internet, 2004
<http://www.unr.edu/mines/ramstech/PDFfiles/1highdensity.pdf#search='HighDensity%20Sludge%20Treatment>, consultada 03 de enero del 2007.
- 5.17. VILLACHICA, Carlos, LLAMOSAS, Jaime, VILLACHICA, Joyce. “Proceso NCD: Tecnología nacional para el tratamiento de efluentes ácidos de minas”, Tecnología y Desarrollo, Instituto de Energía Nuclear, edición en Internet, 2006,
http://www.ipen.gob.pe/site/publicaciones/revista/revista_02_06/33%20a%2036.swf, consultada 13 de febrero del 2007.