

Propuesta de tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante drenes anóxicos calizos

Gerardo Zamora Echenique

Doctor en Metalurgia

Docente, Carrera de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Técnica de Oruro

Tel: (252) 75798 - gerardozamoraechenique@yahoo.es

Vivian Zamora Mercado

Ingeniero, consultora ambiental

Edificio Figliozzi, La Paz - vivianzamora@hotmail.com

Marcelo Gorritty P.

Ingeniero, investigador senior, Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos

Universidad Mayor de San Andrés

Resumen

El trabajo de investigación, se circunscribe a realizar una propuesta técnica y económica para el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante el paso de las mismas por un dren anóxico calizo, como una alternativa al tratamiento actual por precipitación con cal.

La cantidad total de caliza que se calculó para tratar 100 litros por segundo de agua ácida mediante un Dren Anóxico Calizo, considerando un tiempo de residencia de 15 horas y 20 años de operación, fue de 32,271.026 toneladas. El tratamiento de las aguas ácidas por neutralización - precipitación con cal requiere 12.06 toneladas de cal/día; y se forman 134.78 toneladas de lodos/día, que aunque son depuestos "temporalmente" en los sedimentadores, al final son "descargados" a la cuenca. Se ha demostrado que estos lodos "no son estables químicamente" y provocan la "redisolución de metales pesados".

Desde el punto económico, se ha demostrado que con la propuesta existiría un ahorro de 12'600,000 \$us.

Por tanto, el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni es técnico, económico y ambientalmente más favorable que el tratamiento convencional por neutralización - precipitación con cal.

Palabras clave: Drenaje ácido de mina, dren anóxico calizo, tratamiento de aguas ácidas.

Proposal for the treatment of the acid waters from Milluni mine with anoxic limestone drains

Abstract

The research is limited to a technical and financial proposal for the treatment of acid mine waters from Milluni mine, passing them through an anoxic limestone drain, as an alternative to the current treatment by precipitation with lime.

The total amount of limestone which was calculated to treat 100 liters per second of acid water drain in an anoxic limestone drain was 32,271.026 tons. It was considered a residence time of 15 hours and 20 years of operation. The treatment of acid water by neutralization - precipitation with lime requires 12.06 tons of lime/day; and 134.78 tons of sludge/day, although they are deposited "temporarily" in the sedimenter, in the end they are "downloaded" to the basin. It has been shown that this sludge "is not chemically stable" and cause "stripping of heavy metals".

From the economic point of view, it has been shown that with the proposal there is a save of 12'600,000 \$.

Therefore, the treatment of acid mine waters from Milluni mine is technically, economically and environmentally more favorable than the conventional treatment by neutralization – precipitation with lime.

Keywords: Acid mine water drain, anoxic limestone drain, treatment of acid waters.

Proposta para o tratamento de águas ácidas da mina Milluni com drenos anóxicos calcários

Resumo

A pesquisa se limita em realizar uma proposta técnica e econômica para o tratamento de águas ácidas da mina Milluni, mediante o passo das águas por um dreno anóxico calcário, como uma alternativa ao tratamento atual por precipitação com cal.

A quantidade total de calcário que foi calculado para tratar 100 litros por segundo de água ácida mediante um dreno anóxico calcário, considerando-se um tempo de permanência de 15 horas e 20 anos de operação, foi de 32'271,026 toneladas. O tratamento da água ácida por neutralização - precipitação com cal requer 12,06 toneladas de cal / dia; e 134,78 toneladas de lodos /dia, embora sejam depósitos "temporariamente" nos sedimentadores, no final, são "descarregados" para a bacia. Demonstrou-se que estes lodos "não são quimicamente estáveis" e causam "re-dissolução de metais pesados".

Do ponto de vista econômico, tem sido demonstrado que com a proposta existe uma poupança de 12'600,000 US\$.

Portanto, o tratamento de águas ácidas da mina Milluni é tecnicamente, economicamente e ambientalmente mais favorável do que o tratamento convencional por neutralização - precipitação com cal.

Palavras chave: Drenagem ácida de mina, dreno anóxico calcário.

1. Introducción

La compañía minera inglesa Fabulosa Mines Limited, como concesionaria original de la Mina Milluni, explotó la veta "Rothschild" para la producción de estaño desde comienzos del siglo XX, hasta el año 1974, cuando la Compañía Minera del Sur S. A. (COMSUR S. A.) se hizo cargo de la administración de las operaciones. COMSUR S. A. continuó con las actividades mineras en la misma escala hasta el año 1985, año que se produjo la crisis de los precios de estaño, lo que obligó a reducir el volumen de sus operaciones hasta el año 1986, cuando la mina, en ese mismo año, suspendió toda actividad productiva.

Después del cierre de la operación de explotación minera subterránea, los niveles freáticos en interior mina comenzaron a ascender; para finalmente, alcanzar la cota del socavón Milluni, que al encontrarse por debajo del nivel freático natural de las aguas subterráneas, provocan la descarga al medio ambiente de estas aguas subterráneas ácidas, conocidas como Drenaje Ácido de Mina, DAM.

Por otra parte, el sistema de aguas superficiales proviene de lluvias y deshielo del nevado Huayna Potosí, que se almacenan principalmente en la laguna llamada Jankho Khota, y que por rebalse, son conducidas por un canal abierto que recorre el lado oeste del valle hasta la planta de Achachicala donde es utilizada para accionar una planta hidroeléctrica operada por la Compañía Boliviana de Energía Eléctrica (COBEE). (ALBA, 2005)

Posteriormente, EPSAS utiliza estas mismas aguas para el abastecimiento de agua doméstica a algunas áreas de la ciudad de La Paz, previa potabilización. Sin embargo, la demanda de agua potable ha tenido que ser compensada por las aguas ácidas que emergen de la mina Milluni, especialmente durante la época de estiaje. A continuación, estas aguas son tratadas por neutralización-precipitación con cal, y, una vez precipitados los metales pesados disueltos en dicha aguas, son potabilizadas.

Los lodos que se forman en el proceso de tratamiento físico-químico con cal que se realiza en la cuenca baja de Milluni, son objeto de sedimentación en grandes piscinas; pero que, después de ciertos períodos de tiempo se colmatan, y hacen que dichos lodos, sean vertidos en la primera etapa de neutralización al río Kantutani; y en la segunda etapa, a la cuenca del Choqueyapu; generado así, la **redisolución de los metales pesados** y provocando un impacto ambiental en la cuenca.

Por lo tanto, se concluye que se debe buscar una nueva forma de tratar las aguas ácidas de la mina Milluni a objeto de que se precipiten los metales pesados disueltos y se neutralice la acidez de las mismas; pero al mismo tiempo, se evite la descarga de enormes volúmenes de lodos formados, que generan contaminación de los factores ambientales de la cuenca y riesgos a la salud humana.

2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo de investigación fue el de estudiar técnica y económicamente el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni, mediante la aplicación de drenes anóxicos calizos a partir de pruebas a escala de laboratorio para su aplicación a escala industrial.

Para alcanzar el objetivo general descrito, se formularon los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un diagnóstico de los factores ambientales del entorno y del actual tratamiento físico-químico con cal de las aguas ácidas de la mina Milluni.
- Estudiar a nivel laboratorio el tratamiento de las aguas ácidas de mina aplicando drenes anóxicos calizos.
- Establecer los costos de la implementación del dren anóxico calizo.

El alcance del trabajo de investigación desarrollado fue delimitado a:

- Un análisis y evaluación técnica y económica del actual tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni.
- Pruebas experimentales para determinar las condiciones más adecuadas para el tratamiento de las aguas ácidas de mina mediante drenes anóxicos calizos.
- Una propuesta técnica y económica del tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante drenes anóxicos calizos.

3. Resultados y discusión de la investigación

3.1 Caracterización de las aguas ácidas de la mina Milluni

Los resultados de la caracterización físico-química del Drenaje Ácido de Mina (DAM) o Aguas Ácidas de Mina provenientes del socavón Milluni, ubicado al nivel -36 de la mina abandonada, es presentada en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del análisis de parámetros físicos de la muestra de agua ácida de mina.

Parámetro	Norma	Límite de Detección	DAM (época húmeda)	DAM (época seca)
Temperatura		+/- 0.1 °C	10.4 °C	12.5 °C
pH	ASTM D 1293	+/- 0.01	3.5	2,5
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	1,906 ppm	4,200 ppm
Conductividad	ASTM D 1125	5 µS/cm	2,859 µS/cm	2,620 µS/cm

Los resultados del análisis químico por metales pesados de la muestra de las Aguas Ácidas de Mina estudiada, se presentan en la TABLA 2.

Tabla 2. Resultados del análisis químico por metales pesados de la muestra de agua ácida de mina en mg/l.

Elemento	Norma	Límite de Detección	DAM (época húmeda)	DAM (época seca)
As	ASTM D 2972	0.002	<0.002	1.67
Cd	ASTM D 3557	0.01	0.91	0.045
Cu	ASTM D 1688	0.02	2.54	0.852
Ca	ASTM D D511	0.5	---	54.5
Mn	ASTM D 858	0.02	---	32.7
Fe total	ASTM D 1068	0.03	296.63	576.1
Sb	ASTM D 3697	0.002	---	< 0.4
Pb	ASTM D 3559	0.1	<0.03	0.41
Zn	ASTM D 1691	0.005	190.88	154.2

Finalmente, el análisis por aniones de la muestra, es resumida en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados del análisis de anión principal del agua ácida de mina en mg/l.

Aniones	Norma	Límite de Detección	DAM (época húmeda)	DAM (época seca)
Sulfato	ASTM D 516	1	1,679.4	2,250

Los resultados en negrita, indican que las condiciones iniciales cumplen con los requisitos para la implementación de drenes anóxicos calizos. Por otra parte, se llevó a cabo la medición de caudales de descarga en el socavón Milluni de acuerdo a la metodología estándar. El caudal promedio medido, es de 100 litros por segundo.

A partir de los resultados del análisis químico de las aguas ácidas de la mina Milluni y considerando el valor del caudal medido, se determinó la carga de metales pesados por año que se aporta a la cuenca, proveniente de la descarga de las aguas ácidas de dicha mina en época de estiaje, antes de su tratamiento con cal.

Tabla 4. Carga de metales pesados aportados por las aguas ácidas de la mina Milluni, previo tratamiento con cal.

Parámetro	mg/l	ton/a
Sólidos Disueltos	4,200	13.245.12
Cadmio	0.045	0.14
Cobre	0.852	2.69
Fierro soluble	576.1	1,816.79
Plomo	0.41	1.29
Antimonio	< 0,4	1.26
Arsénico	1.67	5.27
Zinc	154.2	486.29

3.2 Caracterización de los lodos del tratamiento con cal de EPSAS

La separación de los lodos, producto de la neutralización con cal de las aguas de deshielo en la época húmeda y de la mezcla de estas con las aguas ácidas en la época de estiaje, se realiza en sedimentadores.

Se ha llevado adelante una prueba de toxicidad con el precipitado obtenido, de acuerdo a los protocolos de la OPS. Los resultados de las pruebas de toxicidad y su comparación con los valores de concentración máximos permisibles establecidos en la normativa 40 CFR 261,30 (EPA 1312), son presentados en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de análisis químico de la solución filtrada del Test de Toxicidad y su comparación con las Concentraciones Máximas Permisibles.

Elemento	Muestra (mg/l)	Norma (mg/l)
Arsénico	0.14	5
Cadmio	184.2	1
Cobre	156.4	25
Plomo	3.4	5
Zinc	1,698	250

De la comparación de los datos presentados en la tabla 5, se puede deducir que se trata de residuos que **“no son estables químicamente”**; por lo que, su deposición final requerirá de medidas ambientales.

Resultados y discusión de las pruebas de laboratorio

Pruebas de precipitación con cal en vasos de precipitación agitados fueron corridas a objeto de determinar los consumos de cal en la neutralización - precipitación de las aguas ácidas de la muestra de la mina Milluni. La figura 1 muestra los resultados obtenidos.



Figura 1. Curva de neutralización-precipitación (variación del pH en función al consumo de cal) de las aguas ácidas de mina.

De la gráfica anterior se deduce que para alcanzar el pH de 9.0 se requiere cerca de 1.2 gramos de cal por litro de agua ácida de mina.

Los resultados del análisis físico-químico de la muestra de la solución filtrada del proceso fueron objeto de análisis físico-químico. Los resultados reportados se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 6. Resultados del análisis de parámetros físico-químicos de la solución filtrada en mg/l.

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Solución filtrada	Límite Permissible Descarga*
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5 ppm	1,707	
Conductividad	ASTM D 1125	5 µS/cm	2,560	
As	ASTM D 2972	0.002	<0.002	1.0
Cd	ASTM D 3557 A	0.05	<0.05	0.3
Cu	ASTM D 1688 A	0.05	<0.05	1.0
Fe total	ASTM D 1068 A	0.02	0.04	1.0
Pb	ASTM D 3559 A	0.03	<0.03	0.6
Zn	ASTM D 1691	0.05	0.09	3.0

*Anexo 2: Reglamento en materia de contaminación hídrica – Ley 1333

Es decir que, la concentración de metales pesados disueltos se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles de descarga.

3.3 Pruebas en Drenes Anóxicos Calizos

Con el equipo experimental se procedió a realizar el estudio del comportamiento de las aguas ácidas en dren calizo anóxico. Se tomaron muestras cada 15 horas y se determinó el valor de la alcalinidad. La gráfica siguiente muestra los resultados obtenidos:

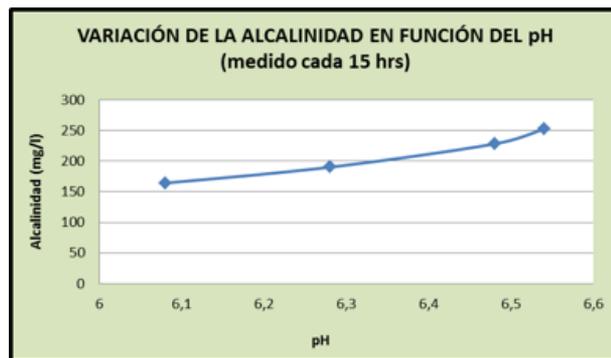


Figura 2. Resultados del comportamiento de la alcalinidad en función al pH.

Una muestra del efluente de descarga del dren calizo anóxico fue tomada y se envió al laboratorio de SPECTROLAB. Los resultados del análisis físico-químico en mg/l de dicho efluente se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultados del análisis de parámetros físico-químicos de la solución Filtrada en mg/l del efluente de descarga del dren anóxico calizo.

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Solución filtrada	Límite Permissible Descarga*
pH	ASTM D 1293	+/- 0.01	6,3	6 - 9
Sólidos Disueltos	ASTM D 2540 C	5	1,567	1,000
As	ASTM D 2972	0.002	<0.002	0.05
Cd	ASTM D 3557 A	0.05	0.02	0.005
Cu	ASTM D 1688 A	0.05	<0.05	0-0,5
Fe total	ASTM D 1068 A	0.02	0.15	0.3
Pb	ASTM D 3559 A	0.03	<0.03	0.05
Zn	ASTM D 1691	0.05	25.47	0.2

(*) Clase A: Agua apta para el consumo humano – Ley 1333

Posteriormente, se realizó una prueba de precipitación de metales con cal del efluente de descarga del tratamiento en dren calizo anóxico. Los resultados de dicha prueba son presentados en la figura 3.

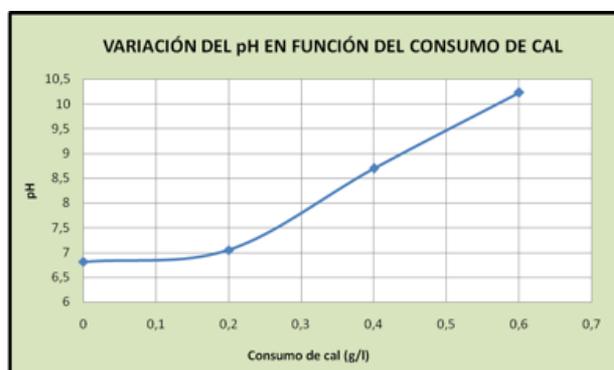


Figura 3. Curva de neutralización-precipitación (variación del pH en función al consumo de cal) del efluente de descarga del dren calizo anóxico.

De la gráfica anterior se deduce que para alcanzar el pH cercano a 9,0, se requiere de 0,45 gramos de cal por litro de agua tratada del dren anóxico calizo. Los resultados del análisis físico-químico del tratamiento con cal del efluente del dren calizo anóxico, se muestran en la tabla 8.

Por tanto, el agua tratada es "apta para el consumo humano"; puesto que, las concentraciones de metales pesados se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la Clase A de la normativa boliviana.

Obviamente, es necesario el proceso de cloración para la eliminación de patógenos y microorganismos.

Tabla 8. Resultados del análisis de parámetros físico-químicos de la solución Filtrada en mg/l del efluente de descarga del dren anóxico tratado con cal.

Parámetro	Norma	Límite de Detección	Solución	Límite Permissible Descarga*
pH	ASTM D 1293	+/- 0,01	9	6 - 9
As	ASTM D 2972	0.002	0.008	0.05
Cd	ASTM D 3557 A	0.05	<0.05	0.005
Cu	ASTM D 1688 A	0.05	<0.05	0-0.5
Fe total	ASTM D 1068 A	0.02	0.07	0.3
Pb	ASTM D 3559 A	0.03	<0.03	0.05
Zn	ASTM D 1691	0.05	0.14	0.2

*Clase A: Agua apta para el consumo humano.

Resultados del diseño y dimensionamiento del Dren Anóxico Calizo

A partir de los resultados de la alcalinidad determinada en las pruebas del dren anóxico calizo, se procedió a diseñar y dimensionar del dren calizo anóxico. La cantidad de caliza necesaria para el tratamiento para un tiempo de residencia de 15 horas se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$M = \frac{Q \cdot \rho \cdot t_R}{V_p}$$

Donde:

- Q es el caudal del efluente a tratar = 100 l/s (360,000 l/h).
- D es la densidad de la caliza suelta (1.6 Kg/l).
- tR es el tiempo de residencia, que debe ser igual a 15 h para lograr el nivel máximo de generación de alcalinidad.
- Vp es el volumen de poros expresado en forma decimal (0.5).

Por tanto M es igual a **17,280.0** toneladas de caliza.

Por otra parte, para compensar las pérdidas por disolución durante un periodo de tiempo determinado, la cantidad de caliza requerida se calculó a partir de:

$$M = \frac{Q \cdot C \cdot T}{X}$$

Donde:

- Q es el caudal del efluente a tratar = 100 l/s (360,000 l/h)
- C es la concentración esperada de alcalinidad en el efluente tras el tratamiento = 300 mg/l
- T es el periodo de tratamiento que se pretende = 20 años (175,200 h)
- X es el contenido en carbonato cálcico de la caliza expresado en forma decimal (0.69)

Por tanto, el cálculo es de 14,991.026 toneladas de caliza.

Finalmente, la suma de estas dos ecuaciones representa la cantidad total de caliza, será de 32,271.026 toneladas de caliza. Las dimensiones del lecho para el Dren Anóxico Calizo calculado y que permitirá tratar 100 l/s de agua ácida de mina, serán de:

Tabla 9. Dimensiones del lecho para el dren anóxico calizo.

Dimensiones	
Profundidad (m)	2,5
Ancho (m)	40
Largo (m)	201,7

Para el cálculo se mantuvo la relación recomendada en la literatura del largo a ancho de 5 a 1. Por otra parte, a partir de los resultados del dimensionamiento, se han calculado los siguientes requerimientos:

- Requerimiento de geomembrana = 8,067.8 m²
- Requerimiento de geotextil = 8,067.8 m²
- Requerimiento de cobertura de suelo = 4,840.7 m³
- Requerimiento de cobertura vegetal (especies autóctonas establecidas en el diagnóstico) = 8,067.8 m²

Cálculo económico de la implementación de la alternativa

Finalmente, tomando en cuenta los materiales y procedimientos técnicos para la implementación del dren calizo, se requerirán 4'400,000 de dólares para su implementación, de acuerdo al desglose y costos unitarios siguientes:

Tabla 10. Cálculo económico de la implementación de la alternativa.

	Unitario	Requerido	Costo (\$us)
Excavación	10.0 \$us/m ³	20,169.4 m ³	201,700
Trituración	25.0 \$us/t	32,271.0 Ton	806,800
Geotextil	8.0 \$us/m ²	8,067.8 m ²	64,500
Geomembrana	10.0 \$us/m ²	8,067.8 m ²	80,700
Suelo de relleno	16.0 \$us/m ³	4,840.7 m ³	77,450
Revegetación	2.5 \$us/m ²	8,067.8 m ²	20,200
Instalación	15.0 \$/m ³	20,169.4 m ³	302,500
Caliza	88.0 \$us/t	32,271.0 ton	2'840,000
COSTO TOTAL			4'400,000

Por tanto, para la implementación del dren anóxico calizo se requerirán 4'400,000 \$us (cuatro millones cuatrocientos mil 00/100 dólares americanos) para una vida útil de 20 años.

Comparación técnica y económica del tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni con dren calizo anóxico con el tratamiento por neutralización – precipitación con cal

Desde el punto de vista técnico, el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni por neutralización - precipitación con cal presenta los siguientes datos técnicos:

a. Cantidad de cal requerida para la precipitación

Para el tratamiento del agua ácida de mina, de acuerdo a la figura 1, se demostró que son requeridos 1.2 gramos de cal por litro de agua ácida de mina; por lo que, para tratar 100 l/s, se requieren: 10.368 toneladas de cal por día.

b. El volumen de lodos a obtener

De acuerdo a los resultados obtenidos, se generan 15.6 gramos de lodo por litro de agua ácida de mina; por lo que, para tratar 100 l/s, se formarán: 134.78 toneladas de lodos por día.

c. La estabilidad de lodos

Se ha demostrado que los lodos “no son estables químicamente”. Su descarga produce la siguiente carga de metales pesados disueltos a la cuenca, considerando que los mismos al ser vertidos a la cuenca, se encuentran a un 20% de sólidos y que el pH del cuerpo receptor estaría con el peor escenario ambiental de 5.3:

Tabla 11. Carga de metales pesados a la cuenca.

Elemento	Muestra (mg/l)	Carga (Kg/d)
Arsénico	0,14	0,08
Cadmio	184,2	99,31
Cobre	156,4	84,32
Plomo	3,4	1,83
Zinc	1.698	915,45

Por otra parte, desde el punto de vista técnico, el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni mediante Drenes Anóxicos Calizos presenta los siguientes datos técnicos:

Largo = 201.7 m; ancho = 40 m y profundidad = 2.5 m; calculados a partir del volumen de caliza requerido para tratar 100 l/s de agua ácida de mina; con un requerimiento total de caliza de 32,271.026 toneladas para una vida útil del dren de 20 años. El efluente de descarga de dicho dren calizo anóxico debe ser tratado mediante precipitación con cal a objeto de precipitar los metales pesados presentes.

a. Cantidad de cal requerida para la precipitación del efluente de descarga del dren anóxico calizo

Para el tratamiento del efluente del dren calizo anóxico, de acuerdo a la figura 3, se demostró que son requeridos 0.45 gramos de cal por litro de agua tratada; por lo que, para tratar 100 l/s se requiere: 3.888 toneladas de cal por día; es decir, se requerirían 6.48 toneladas menos que las que se usan para el tratamiento directo de las aguas ácidas por precipitación – neutralización.

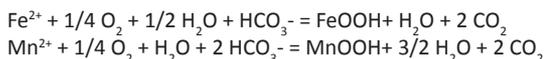
b. El volumen de lodos a obtener

De acuerdo a los resultados obtenidos, se generan 5.0 gramos de lodo por litro de agua tratada; por lo que, para tratar 100 l/s se formarán: 43.2 toneladas de lodos por día;

es decir, 91.58 toneladas de lodos por día menos que con el tratamiento directo de las aguas ácidas por precipitación – neutralización.

a. La estabilidad de lodos

La adición de cal a la solución de descarga del dren anóxico calizo, generan las siguientes reacciones de precipitación:



Por lo que los productos precipitados ya no son “hidróxidos”; sino compuestos monohidratados. Se conoce que el FeOOH o Goethita “es más estable químicamente” que el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y es de más fácil filtración.

Desde el punto de vista económico, se tienen los siguientes datos:

El tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni por neutralización - precipitación con cal, refleja los siguientes costos:

Requerimiento de cal: 10.368 t/d; a un costo de 1.50 Bs/ton; por tanto:
Costo cal = 15.552 Bs/d

Por otra parte, considerando 3 obreros, que trabajan en turnos de 8 horas por día; y asumiendo un monto de 3,000 Bs de salario/mes, se tiene:

Costo mano de obra = 300 Bs/d

Es decir, considerando el costo de la cal y la mano de obra, el costo de tratamiento por neutralización – precipitación con cal asciende a 15,800 Bs/d o 5'800,000 Bs/año.

Finalmente, si se considera para un tiempo de 20 años, el costo de tratamiento por neutralización – precipitación con cal asciende a: 116'000,000 Bs. (ciento dieciseis millones, 00/100 bolivianos), equivalente a: 17'000,000 \$us (diecisiete millones, 00/100 dólares americanos)

Por otra parte, desde el punto de vista económico, el tratamiento de las aguas ácidas de la mina Milluni por Dren Anóxico Calizo, presenta los siguientes datos:

Costo Implementación: 30'600,000 Bs. (Treinta millones seiscientos, 00/100 bolivianos), equivalente a: 4'400,000 \$us (cuatro millones cuatrocientos, 00/100 dólares americanos).

Es decir que, la relación de ahorro por la implementación del tratamiento de las aguas mediante Dren calizo Anóxico representa un valor de 85'400,000 Bs. (ochenta y cinco millones cuatrocientos mil, 00/100 bolivianos).

4. Conclusiones

Se demostró que los residuos mineros presentes en la zona, como producto de actividades mineras antiguas, se caracterizan geoquímicamente por presentar un Potencial Neto de Neutralización de 610 Kg CaCO_3 /tonelada y una relación NP/AP de 0.001, por lo tanto, dichos residuos son “altamente generadoras de Drenaje Ácido de Roca” o “inestables

químicamente”; por lo que contribuyen con una fuerte carga de metales pesados y acidez a la cuenca.

Se verificó que en época de alta precipitación fluvial, la represa Milluni llega a encontrarse completamente llena, y el rebalse de sus aguas con un valor de pH de 3.2, son vertidas a la cuenca sin tratamiento.

Las aguas de deshielo canalizadas presentan un pH de 5.3 por lo que requieren ser neutralizadas con la adición de cal como etapa previa a su potabilización en la Planta de EPSAS - Achachicala.

Para alcanzar un pH de 9.0 mediante el proceso de neutralización – precipitación, se requieren cerca de 1.2 gramos de cal por litro de agua ácida de mina tratada.

A partir de los resultados del análisis químico de las aguas ácidas de la mina Milluni y considerando el valor del caudal medido de 100 l/s, la carga de metales pesados que se aporta por año, debido a la descarga de las aguas ácidas de dicha mina en época de estiaje al río Kantutani son las presentadas en la tabla 4.

Causa enorme preocupación la descarga de lodos sedimentados al río, puesto que; resultados de las pruebas de toxicidad y su comparación con los valores de concentración máximos permisibles establecidos en la normativa 40 CFR 261,30 (EPA 1312), se deduce que se trata de residuos que “**no son estables químicamente**”; por lo que, la descarga a los ríos no es amigable con el medio ambiente.

En las pruebas en dren anóxico calizo se determinó que para un tiempo de residencia de 15 horas, la alcalinidad alcanzada fue de 164 mg/l. Posteriormente, al tratar el efluente de descarga del dren anóxico calizo, y precipitar los metales pesados con la adición de cal, hasta alcanzar el pH cercano a 9.0, se requirió de 0.45 gramos de cal por litro de agua tratada.

La cantidad total de caliza que se calculó para tratar 100 litros por segundo de agua ácida de la mina Milluni y considerando un tiempo de residencia de 15 horas y para 20 años de operación del dren, es de 32,271.026 toneladas de caliza.

Las dimensiones de lecho para el dren anóxico calizo se muestran en la tabla 9. A partir de estos resultados se determinó los requerimientos de geomembrana, geotextil, cobertura de suelo y cobertura vegetal.

Tomando en cuenta los materiales y procedimientos técnicos para la implementación del dren calizo, se requerirán 4'000,000 \$us, (cuatro millones 01/100 de dólares americanos), para su implementación.

Se consideraron las comparaciones técnicas y económicas de las alternativas, dando como resultado la aplicación de los drenes anóxicos calizos como una alternativa técnicamente posible, de menor costo, y de menor impacto ambiental.

5. Bibliografía

1. BESOAIN, E. *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José, Costa Rica: 1985. pp. 686-687.

2. BRODIE, G.A., BRITT, C.R., TOMASZEWSKI, T.M. y H.N. TAYLOR. "Use of passive anoxic limestone drains to enhance performance of acid drainage treatment wetlands". En: *Proceedings of the 1991 National Meeting of the American Society of Surface Mining and Reclamation*. Durango Co: 1991. pp. 211-228.
3. BRODIE G.A., BRITT C.R., TOMASZEWSKI T.M. y H.N. TAYLOR. "Anoxic limestone drains to enhance performance of aerobic acid drainage treatment wetlands". En: *The Tennessee Valley Authority, West Virginia Surface Mine Drainage Task Force Symposium*. 1992.
4. BRODIE, G.A. "Staged, aerobic constructed wetlands to treat acid drainage - Case history of Fabius Impoundment 1 and overview of the Tennessee Valley Authority's Program". *Wetland Design for Mining Operations*. 1993. pp. 1-14.
5. CAMBRIDGE, M. "Use of Passive Systems for the Treatment and Remediation of Mine Outflows and Seepages". *Minerals Industry International*. 1995. pp. 35-42.
6. CONSULTORA AGRA HERAT & ENVIRONMENTAL. *Auditoría de Línea Base Ambiental*. Compañía Minera del Sur (COMSUR). 2005.
7. ERÓSTEGUI, C.P. "Contaminación por metales pesados". *Revista científica Ciencia Médica*. Cochabamba: Volumen 12, Nº1, , 2009.
8. FAULKNER, B.B. AND J.G. SKOUSEN. "Treatment of acid mine drainage by passive treatment systems". En: *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*. Pittsburgh: PA. 1994. pp. 250-256.
9. FRY, I.V., y R.J. MEHLHORN. "Polyurethane and alginate-immobilized algal biomass for the removal of aqueous toxic metals". *Emerging Technology for Bioremediation of Metals*. J.L. MEANS and R.E. HINCHEE (eds). 1994. pp. 130-134.
10. GUSEK, J. 1995. "Passive-treatment of acid rock drainage: What is the potential bottom line?". *Mining Engineering*. March 1995, pp. 250-253.
11. HEDIN, R.S., NAIRN, R.W. y R.L.P. KLEINMANN. *Passive treatment of coal mine drainage*. U.S. Bureau of Mines Information Circular 9389. 1994.
12. HEDIN, R.S. and G.R. WATZLAF. "The Effects of Anoxic Limestone Drains on Mine Water Chemistry". En: *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*. Pittsburgh: PA. 1994. pp. 185-194.
13. HIGUERAS, P., OYARZUN, R. *Mineralogía y geoquímica ambiental*. España, Madrid: Universidad de Castilla – La Mancha. 2005.
13. En:<http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/Tema08/Minerales_salud_1_4.htm>, (fecha de consulta 02/07/2014).
14. IDEAM, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA. 2002. "Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y aguas subterráneas". pp. 13-14
15. LAPAKKO, K.A. "Treatment of Waste Rock Drainage with Limestone Beds". *Acid Mine Drainage*.
16. IGNACIO, G. "Tratamiento de aguas ácidas de mina". Proyecto de Grado. Oruro: UTO – FNI, pp. 11-16
17. MIRANDA, A., ARANCIBIA, H. y QUISPE, R. *Reconocimiento del patrimonio geológico y minero de la región de Milluni en La Paz Bolivia*. 2010. pp. 74-76
18. NAIRN, R.W., HEDIN, R.S. and G.R. WATZLAF. "Generation of Alkalinity in an Anoxic Limestone Drain. Achieving Land Use Potential through Reclamation". En: *Annual Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation*. Duluth Minnesota: 1992. pp. 206-219.
19. NAKAMURA, K.. "Biological metal removal from mine drainage". *U.S. Bureau of Mines Information Circular 9183*. 1988. pp. 274-278.
20. NAVARRO, G. "Contaminantes minería", En: *Materia "Impactos industria minera y petrolera"*. Cochabamba: Universidad Católica Boliviana "San Pablo". 2011.
21. NAVARRO, G., y MALDONADO M. *Geografía ecológica de Bolivia*. Cochabamba – Bolivia: 2002. pp. 719.
22. POURBAIX, M. *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Brussels: Pergamon Press, 1985.
23. QUEZADA, R. "Estudio del proceso de cristalización de sales de las aguas ácidas de la Mina San José por evaporación". Proyecto de Grado. Oruro: UTO-FNI, 2013.
24. RED MAPSA, RED DE MONITOREO AMBIENTAL PARTICIPATIVO DE SISTEMAS ACUÁTICOS. Determinación de la alcalinidad total. 2007.
25. REFORMIN, REFORMA MINERA. *Muestreo y caracterización de la Cuenca Milluni*. 2006.
26. TURNER, D., McCOY. "Anoxic Alkaline Drain Treatment System". En: *A Low Cost Acid Mine Drainage Treatment Alternative*. 1990. pp. 73-75.
27. WILDEMAN, T., SPOTTS, E., SCHAEFER, B. y GUSEK, J. "Characterization, management and treatment of water for metal-mining operations". En: *Short course notes: International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, PA.
28. ZAMORA, G. 2013. *Estudio de alternativas de tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José – Oruro*. pp. 176-215