

## **ECONOMÍA CIRCULAR EN MINERÍA – CASO DE ESTUDIO: PRODUCCIÓN MINERA DE CONCENTRADOS DE Pb-Ag-Zn EN BOLIVIA**

**\*Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.**

**\*\*M. Sc. Ing. Octavio Hinojosa C.**

Docentes Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales – Universidad Técnica de Oruro  
Ciudad Universitaria – Zona Sud – Oruro – Bolivia

\*gerardozamoraechenique@yahoo.es

\*\* octahinojosacarrasco@hotmail.com

### **RESUMEN**

En el contexto de la economía circular, las empresas mineras deberán desarrollar sus procesos extractivos no sólo precautelando los efectos de impacto negativo al medio ambiente que generan cada una de las operaciones unitarias del proceso extractivo; sino que también, creando soluciones innovadoras que permitan disminuir los consumos de agua y energía; pero además, tratando que los residuos generados sean reutilizados en el cierre de la operación minera; permitiendo así, un claro beneficio económico, social y ambiental para la industria minera.

En ese contexto, el presente trabajo de investigación, presenta una propuesta circunscrita en la explotación minera de complejos de Pb-Ag-Zn, bajo el modelo de economía circular que permite, mediante un manejo integral tanto de los residuos mineros generados en la etapa de explotación, como de los residuos orgánicos y aguas residuales generadas en los campamentos mineros, así como el uso de los suelos del sector minero, no sólo disminuir los consumos de agua y energía en la operación, sino disminuir los costos vinculados al cierre ambiental de los sitios finales de disposición de desmontes y de relaves generados en la operación minera.

La propuesta aborda en una primera etapa, la separación selectiva de los desmontes generados en la explotación a cielo abierto en base a sus posibilidades de generación de drenaje ácido de roca; además, en una segunda etapa, la desulfurización de las colas del proceso de flotación por espirales, a objeto de que el producto no sulfurado de éste proceso, sea utilizado como cobertura seca, previo deslame, en el cierre tanto del sitio de disposición de relaves como el de desmontes; además, de ser utilizado también para la conformación de top soil artificial, junto con el compost generado a partir de la materia orgánica de los residuos del comedor del campamento minero y de los lodos del proceso de tratamiento de las aguas residuales tratadas. Así mismo, el uso de las aguas residuales tratadas para la etapa de flotación de minerales.

**Palabras Clave:** Economía Circular en Minería - Desulfurización – Cierre Ambiental – Compost para Coberturas Secas

### **ABSTRACT**

In the context of the circular economy, mining companies must develop their extractive processes not only protecting the effects of negative impact on the environment generated by each of the unit operations of the extractive process; but also, creating innovative solutions that allow reducing the consumption of water and energy; but also, trying that the waste generated be reused in the closing of the mining operation; thus allowing a clear economic, social and environmental benefit for the mining industry.

In this context, the present research work presents a limited proposal in the mining exploitation of Pb-Ag-Zn complexes, under the circular economy model that allows, through an integral management of both the mining waste generated in the stage of exploitation, as well as the organic waste and wastewater generated in the mining camps, as well as the use of the soils of the mining sector, not only to reduce the consumption of water and energy in the operation, but to decrease the costs related to the environmental closure of the final disposal sites for tailings and tailings generated in the mining operation.

The proposal deals in a first stage, the selective separation of the clearings generated in the open-pit exploitation based on its possibilities of generation of acid rock drainage; in addition, in a second stage, the desulfurization of the tailings of the flotation process by spirals, in order that the non-sulfurized product of this process, be used as a dry cover, after deslame, in the closure of both the tailings disposal site like the one of despetes; in addition, of being used also for the conformation of artificial top soil, together with the compost generated from the organic matter of the residues of the dining room of the mining camp and the sludge of the treatment process of the treated residual waters. Likewise, the use of treated wastewater for the flotation stage of minerals.

**Key Words:** Circular Mining Economy - Desulfurization - Environmental Closure - Compost for Dry Covers

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales desafíos de la aplicación de la economía circular en minería, es la reingeniería en los procesos extractivos que basan su accionar en una economía lineal basada en el “explotar – producir -desechar” a un modelo circular que trata de alcanzar el aprovechamiento y uso eficiente de los recursos no renovables y que considera los desechos como un error de diseño.

En el contexto de la economía circular, las empresas mineras deberán desarrollar sus procesos extractivos no sólo precautelando los efectos de impacto negativo al medio ambiente que generan cada una de las operaciones unitarias del proceso extractivo; sino que también, creando soluciones innovadoras que permitan disminuir los consumos de agua y energía; pero además, tratando que los residuos generados sean reutilizados en el cierre de la operación minera; permitiendo así, un claro beneficio económico, social y ambiental para la industria minera.

En ese contexto, el presente trabajo de investigación, presenta una propuesta circunscrita en la explotación minera de complejos de Pb-Ag-Zn en zonas semiáridas, bajo el modelo de economía circular no sólo disminuir los consumos de agua y energía en la operación, sino disminuir los costos vinculados al cierre ambiental de los sitios finales de disposición de desmontes y de relaves generados en la operación minera.

La propuesta aborda:

- La separación selectiva de los desmontes generados en la explotación a cielo abierto en base pruebas geoquímicas estáticas (determinación del valor del Potencial Neto de Neutralización y la relación del Potencial Neutro sobre el Potencial Ácido).
- Desulfurización de las colas del proceso de flotación que permite obtener los concentrados de Pb-Ag y Zn-Ag, por medio de concentración en espirales.
- Uso del producto no sulfurado de la concentración en espirales como cobertura

seca, previa etapa de deslame, en el cierre ambiental tanto del sitio de disposición de relaves y de los desmontes; además de su uso para la conformación del “top soil artificial”, mezclando con el compost generado a partir del proceso de compostaje de la materia orgánica de los residuos del comedor del campamento minero y de los lodos del proceso de tratamiento de las aguas residuales tratadas.

- Uso de las aguas residuales tratadas para la etapa de flotación de minerales a objeto de disminuir el consumo de las aguas subterráneas o superficiales requeridas para el proceso.
- Producción de cobertura vegetal autóctona en invernaderos con colas del proceso de desulfurización, enriquecidos con materia orgánica y nutrientes procedentes del proceso de compostaje.

## 2.- ETAPAS DE LA APLICACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR

Las muestras geológicas obtenidas en la etapa de evaluación del potencial minero del yacimiento, deben ser objeto de una caracterización física, química y mineralógica, además de establecer el comportamiento geoquímico de las mismas mediante pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas. Esta información permitirá establecer el manejo ambiental de los residuos en la etapa de explotación a cielo abierto a partir de su posibilidad o no de generación de drenaje ácido de roca. Es decir, los desmontes generados en la explotación, con contenidos de metales de interés económico por debajo de la ley cut of, deberán ser “dispuestos separadamente” en zonas de disposición de óxidos y sulfuros, respectivamente; esto permitirá, disminuir “notablemente” los costos de cierre de los mismos.

A continuación, se muestran los resultados de la caracterización de muestras obtenidas en los sitios de desmontes oxidados y sulfurados, después de una homogenización y cuarteo sistemático de dichas muestras:

**a) Caracterización física de los residuos sólidos mineros**

La tabla siguiente, resume las características físicas de las muestras estudiadas:

Muestra	Lugar	d <sub>60</sub> (µm)	d <sub>10</sub> (µm)	Porosidad	ρ <sub>real</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>ap</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
Muestra A	Stock de óxidos	1300	14	0.408	2.520	1.493
Muestra B	Óxido Sedimentario	2400	65	0.503	2.462	1.223
Muestra C	Stock sulfuros baja ley	>100000	55	0.378	2.524	1.571
Muestra D	Stock sulfuros alta ley	40000	300	0.417	2.661	1.551
Muestra E	Relaves del proceso	107	14	0.486	2.618	1.345

**Tabla 1.- Resultados de la Caracterización Física de las muestras de residuos estudiados**

**b) Caracterización Química de los Residuos Mineros**

En la Tabla B, se presentan los resultados de la caracterización química de las muestras objeto de estudio.

PARAMETRO	UNIDAD	MA	MB	MC	MD	ME
Calcio	%	0.05	0.02	0.04	0.07	0.05
Cobre	%	< 0.01	< 0.01	< 0.01	<0.01	0.01
Hierro	%	1.56	1.96	1.64	3.7	3.89
Manganeso	%	0.04	0.05	0.14	1.53	0.23
Plata	g/t	1.21	<0.33	5.6	4.11	11.3
Plomo	%	<0.03	0.05	0.09	0.09	0.06
Zinc	%	0.01	0.05	0.3	0.19	0.35
Azufre Total	%	0.06	0.07	1.00	1.71	3.54
Sulfato Soluble	mg/kg	328.1	776.7	6410.4	1032.1	8743.9

**Tabla 2.- Análisis Químico de las muestras de residuos estudiados**

**c) Caracterización Mineralógica de los Residuos Mineros Estudiados**

A objeto de identificar con precisión las especies sulfuradas presentes en las muestras con presencia de un contenido mayor a 1 % de Azufre Elemental, se llevó adelante la flotación bulk de sulfuros de las mismas. Los concentrados sulfurados, fueron luego sometidos a un análisis por Difracción de Rayos X. El objetivo de dicho procedimiento, fue el de determinar con mayor precisión los componentes “acidogénicos” presentes; y a partir de su

determinación, predecir el comportamiento de los mismos. Los resultados del análisis por Difracción de Rayos X se encuentran en la Tabla 3.

**a) Pruebas Geoquímicas Estáticas**

Se ha determinado el Potencial Neutro y el Potencial Ácido de las muestras estudiadas a objeto de calcular el Potencial Neto de Neutralización. La tabla siguiente, presenta los resultados obtenidos

Mineral	Formula	M10	M11	M15
Pirita	FeS <sub>1.96</sub>	X	X	X
Sílice	SiO <sub>2</sub>	X	X	X
Sanidine	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	X	X	
Aluminofosfatos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	X	X	
Mordenite	Na <sub>7.88</sub> (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>7.87</sub> (SiO <sub>2</sub> ) <sub>45.13</sub> 25H <sub>2</sub> O	X		
Quintinite	Mg <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> (OH) <sub>12</sub> CO <sub>3</sub> 3H <sub>2</sub> O	X		
Hyalophane	(K,Ba,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	X		
Gismondine	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> 4H <sub>2</sub> O		X	
Ekatite	Fe <sup>+3</sup> ,Fe <sup>+2</sup> ,Zn) <sub>12</sub> (OH) <sub>6</sub> (AsO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> (AsO <sub>3</sub> ,HOSiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		X	
Ortoclase	K(Al,Fe) SiO <sub>2</sub> O <sub>8</sub>			X
Ankerita	Ca(Mg <sub>0.67</sub> Fe <sub>0.33</sub> )(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>			X
Anortoclase	(Na,K)(Si <sub>3</sub> Al)O <sub>8</sub>			X
Illita	(K,H <sub>2</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>			X
Tecto-aluminotrisilicato	K(SiO <sub>0.75</sub> Al <sub>0.25</sub> ) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>			X
Delhayelite	(K,Na) <sub>10</sub> Ca <sub>5</sub> Al <sub>6</sub> Si <sub>32</sub> O <sub>80</sub> Cl <sub>6</sub> 18H <sub>2</sub> O			
Hydrobiotite	K-Mg-Al-Fe-Si-OH-F			
Flusston	SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Na-OH			
Iron(III)oxide	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
Metakottigite	(Zn,Fe)(AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 8(H <sub>2</sub> O,OH)			

**Tabla 3.- Resultados del análisis de difracción de rayos X de las muestras estudiadas con mayor contenido de sulfuros**

	Descripción	NNP (kgCaCO <sub>3</sub> /t)	NP/AP	Dictámen
Muestra 4	Stock de óxidos	-1.87	0.0006349	NO GENERADOR
Muestra 7	Óxido Sedimentario	-2.19	0.0002177	NO GENERADOR
Muestra 10	Stock sulfuros baja ley	-31.25	0.0000305	GENERADOR
Muestra 11	Stock sulfuros alta ley	-53.44	0.0000312	GENERADOR
Muestra 15	Relaves del proceso	-110.62	0.0000108	GENERADOR

**Tabla 4.- Resultados de las pruebas geoquímicas estáticas de los residuos estudiados**

## 2.2. ETAPA DE DESULFURIZACIÓN AMBIENTAL DE LAS COLAS DEL PROCESO DE FLOTACIÓN POR ESPIRALES

Es conocido que los relaves de las plantas de flotación de minerales sulfurosos para obtener concentrados de Zn-Ag y Pb-Ag, son generadores de DAR por presentar en su composición especialmente pirita.

La “desulfurización ambiental”, como etapa previa a la disposición final de los relaves de un proceso de flotación, permitirá separar los minerales sulfurosos de los relaves por medio de la aplicación de una concentración gravimétrica continua en espirales; así, se producirá una fracción de sulfuros, con menor porcentaje en peso y fuertemente reactiva o generadora de DAR (producto pesado); y otra fracción, mayoritaria en peso, y con bajo contenido de sulfuros y por tanto no generadora de acidez (producto liviano).

**A) CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES ESTUDIADOS**

La caracterización de las muestras de relaves objeto de investigación, involucra el estudio de las características físicas, químicas y mineralógicas; además de la determinación del comportamiento geoquímico mediante pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas.

Se tomó una muestra fresca de los relaves de descarga de la planta de procesamiento mineral (M1), antes de su disposición final; además de, una muestra del dique de relaves (M2). En la tabla 1, se presentan los resultados del análisis químico de las muestras de relaves del proceso.

PARAMETRO	UNIDAD	M1	M2
Antimonio	%	0,02	0,02
Arsénico	%	0,07	0,07
Calcio	%	0,89	0,45
Cadmio	%	0,002	0,005
Cobre	%	0,01	0,02
Hierro	%	3,25	3,68
Plomo	%	0,12	0,14
Zinc	%	0,31	0,71
Azufre	%	2,59	3,85
Sulfato	%	0,04	0,02

**Tabla 5.- Análisis Químico de las muestras de COLAS DEL PROCESO**

Los resultados del análisis por difracción de rayos X de las muestras anteriormente citadas, se presentan en la Tabla 2.

Mineral	Formula	M1	M2
Esfalerita ferrosa	$(Zn_{0.984}Fe_{0.026})S$	X	
Pirita	$FeS_2$	X	X
Galena	$PbS$	X	
Tetratioantimoniato de Cobre(I)	$Cu_3(SbS_4)$		X
Monóxido de plomo	$PbO$	X	
Hidroxiantimoniato	$Sb_3O_6(OH)$		X
Dickite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$		
Franklinita	$(Zn_{0.93}Fe_{0.07})(Fe_{1.95}Zn_{0.04})O_4$		
<b>GANGA</b>			
Sílice	$SiO_2$	X	X
Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	X	
Muscovita	$K(Al_4Si_2O_9(OH)_3)$	X	

**Tabla 6.- Resultados del Análisis de Difracción de Rayos X de las Muestras de las Colas del Proceso**

Asimismo, se ha determinado el Potencial Neutro y el Potencial Ácido de las muestras de las Colas del Proceso a objeto de calcular el

Potencial Neto de Neutralización. La tabla 3, presenta los resultados obtenidos.

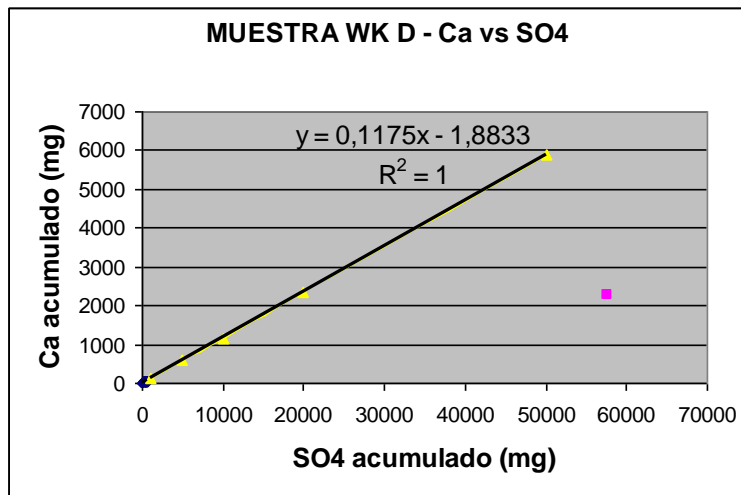
	NNP (kgCaCO <sub>3</sub> /t) AP Análisis	NP/AP Análisis
M1	-58.27	0.28
M2	-108.85	0.09

**Tabla 7.- Resultados de la Prueba Geoquímica Estática de las Muestras de Relaves del proceso**

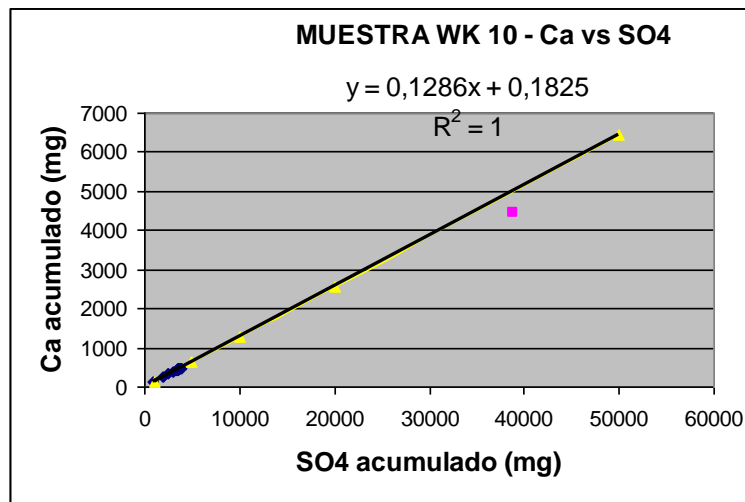
Por otra parte, al graficar el contenido de calcio acumulado presente en las soluciones de enjuague versus el sulfato acumulado, y graficar el punto que representa las condiciones iniciales de Calcio y Sulfato en las muestras, éste se encuentra ubicado en la zona del sulfato; por lo que, se confirma que el **RESIDUO NO TIENE**

La evaluación de los resultados obtenidos de acuerdo a los dos criterios conocidos, pueden resumirse que los residuos son “**altamente generados de DAR**”; puesto que, el NNP es menor a menos 20 kg CaCO<sub>3</sub>/t (Primer Criterio); o la relación NP/AP, es menor a la unidad (Segundo Criterio).

**EL PODER NEUTRALIZANTE SUFICIENTE!** Es decir, las muestras de relave estudiadas son “Inestables Químicamente”; por lo que, al finalizar la operación minera, deberá llevar adelante la “rehabilitación ambiental del sitio de disposición”.



**Figura 1.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra M1**



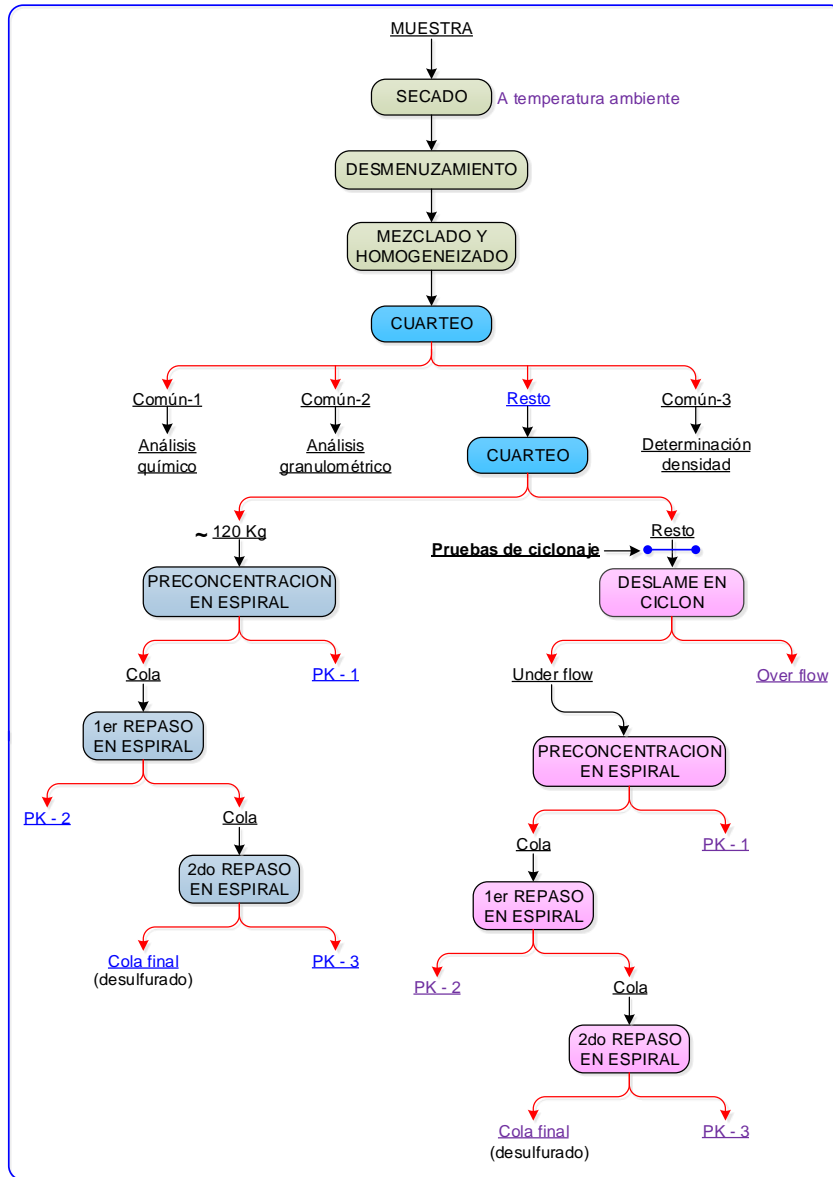
**Figura 2.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra M2**

**B) ESTUDIO DE LA DESULFURIZACIÓN DE RELAVES DEL PROCESO MEDIANTE ESPIRALES**

El estudio de desulfurización se basa en la eliminación de sulfuros mediante espirales de las muestras de las colas del proceso metalúrgico a objeto de disminuir su grado de inestabilidad química o aptitud de generación de DAR; y así, considerar un manejo ambiental de una pequeña fracción como “colas generadoras de acidez (concentrado sulfuroso) que requerirá una

disposición final ambientalmente apropiada; y otra fracción mayoritaria, “colas estables químicamente”, para una disposición final sin medidas ambientales costosas.

La experimentación metalúrgica en sí, se llevó a cabo de acuerdo a las siguientes operaciones unitarias: Secado - Homogeneización, cuarteo y obtención de muestras representativas para las diferentes pruebas de desulfurización por espirales sin y con etapa previa de deslame en ciclón:



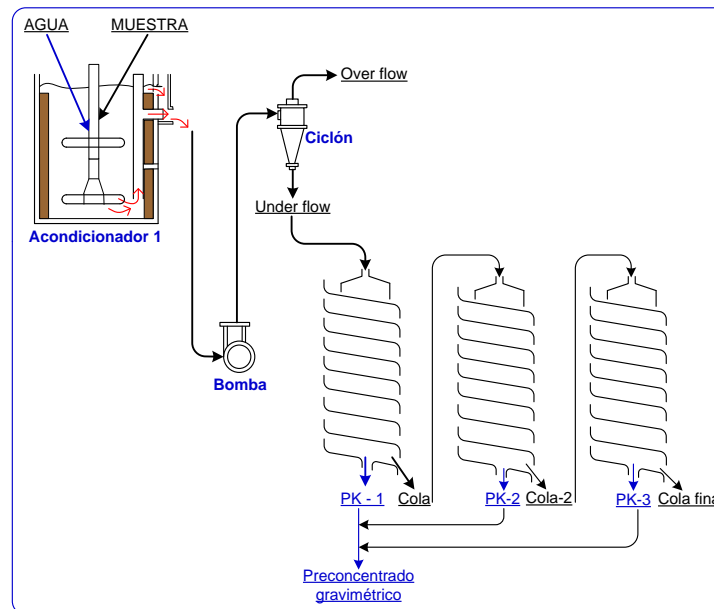
**Figura 1.-** Flujograma del trabajo experimental que se llevó a cabo con la muestra de las colas de flotación mediante espirales con y sin deslame

Entonces, en una primera etapa se realizó el deslame; y el resultado de esta operación se muestra en la siguiente tabla:

Producto	% Peso	Ley, % S	% Dist. S
Overflow	40,85	3,29	45,53
Underflow	59,15	2,72	54,47
Cabeza calculada	100,00	2,95	100,00
Cabeza ensayada		2,83	

**Tabla 8.-** Balance metalúrgico de la operación de deslame en ciclón

El producto under flow del deslame, fue sometido a la desulfurización mediante espirales, como se muestra en la figura siguiente:



**Figura 1.-** Flujograma de la prueba de desulfurización en espirales CON deslame

Los resultados de las prueba, se presentan en la tabla siguiente:

Producto	% P. Etapa	% P. Total	Ley, % S	% D. Etapa	% D. Total
Preconc.- 1	21,93	12,97	7,90	63,73	34,72
Preconc.- 2	14,61	8,64	3,00	16,12	8,78
Preconc.- 3	23,04	13,63	1,71	14,49	7,89
Total Precon	59,57	35,24	4,30	94,35	51,39
Cola	40,43	23,91	0,38	5,65	3,08
Cabeza calc.	100,00	59,15	2,72	100,00	54,47

**Tabla 9.-** Balance metalúrgico de la prueba de desulfurización usando espirales

La Tabla siguiente, presenta los resultados de la prueba geoquímica estática, a partir de las determinaciones del valor del Potencial Neto de Neutralización y la relación NP/AP de la cola

obtenida en el proceso de desulfurización en espiral, con previo deslame.



	%S total	%Sulfato	AP (kgCaCO3/t)	NP (kgCaCO3/t)	NNP (kgCaCO3/t)	NP/AP (kgCaCO3/t)
CE 2	0,32	0.01	9,9	9,5	-0,4	0,96

**Tabla 10.-** Resultados del Potencial Ácido de la Prueba Geoquímica Estática de las Muestras de la Cola del Proceso de Desulfurización en espirales con deslame

Es decir que, prácticamente solo un 23.91% en peso de las colas finales de la operación minera podrían, después de su deslame, ser dispuestas “sin necesidad de medidas ambientales de remediación por su contenido menor a 1% de S”.

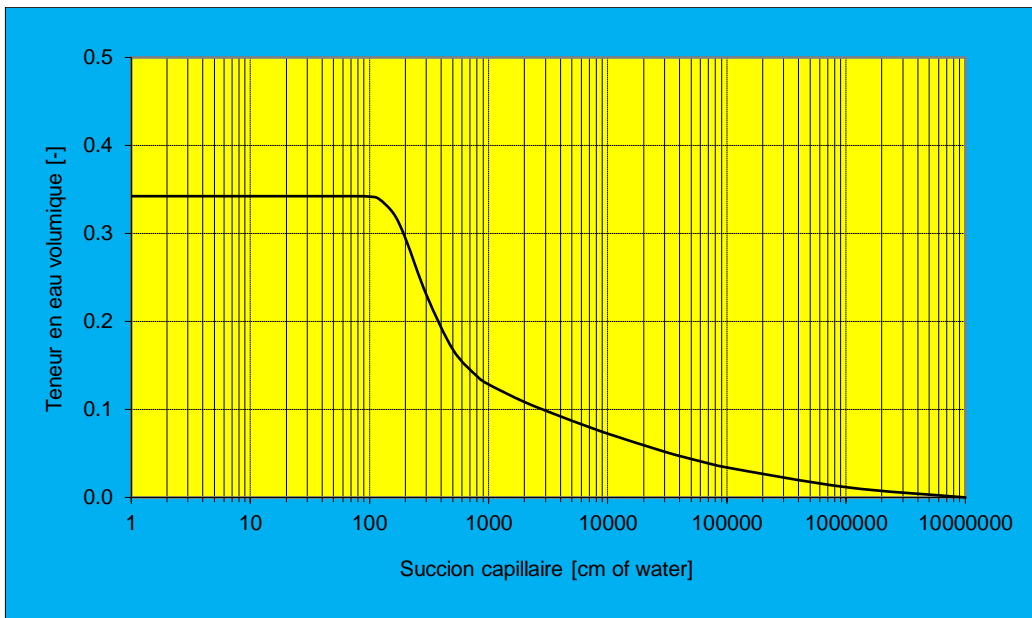
La caracterización de las colas de las espirales permitió obtener la siguiente e importante información adicional:

d10 ( $\mu$ )	d60 ( $\mu$ )	Cu	$\rho_{ap}$ g/cm3	$\rho_{real}$ g/cm3	$\epsilon$	AEV cm	Ksat cm/s
6.5	95	14.6	1.233	2.571	0.52	105	2.53x10-5

**Tabla N° 11.-** Parámetros geotécnicos de la muestra CE - 1

Donde Cu, es el coeficiente de uniformidad;  $\epsilon$ , es el Índice de vacío, y Ksat, es la conductividad hidráulica saturada;  $\rho_{ap}$ , es la densidad aparente y  $\rho_{real}$ , es la densidad real.

Introduciendo toda la información obtenida al modelo MK-Model, se puede obtener el siguiente gráfico de la curva de retención de humedad (WRC):



**Figura 2.-** Curva de succión-retención de agua de la muestra CE - 1

Con los valores arriba presentados, se concluye que el residuo estudiado “no es apto para su uso en coberturas”; puesto que, el valor del punto de

entrada de aire AEV ocurre a una succión de apenas 100 cm de columna de agua y son requeridos valores cercanos a 1000.

Por otra parte, se pudo calcular que, al mezclar un 25% del Over Flow de las espirales con un contenido de 3.29% de Azufre, con las colas de espiral que presentan un contenido de azufre de apenas 0.38% de Azufre, se puede obtener un producto con 1.18% de Azufre; y por las pruebas geoquímicas dinámicas efectuadas con este residuo se demostró que dicho residuo NO GENERADOR DE DRENAJE ÁCIDO.

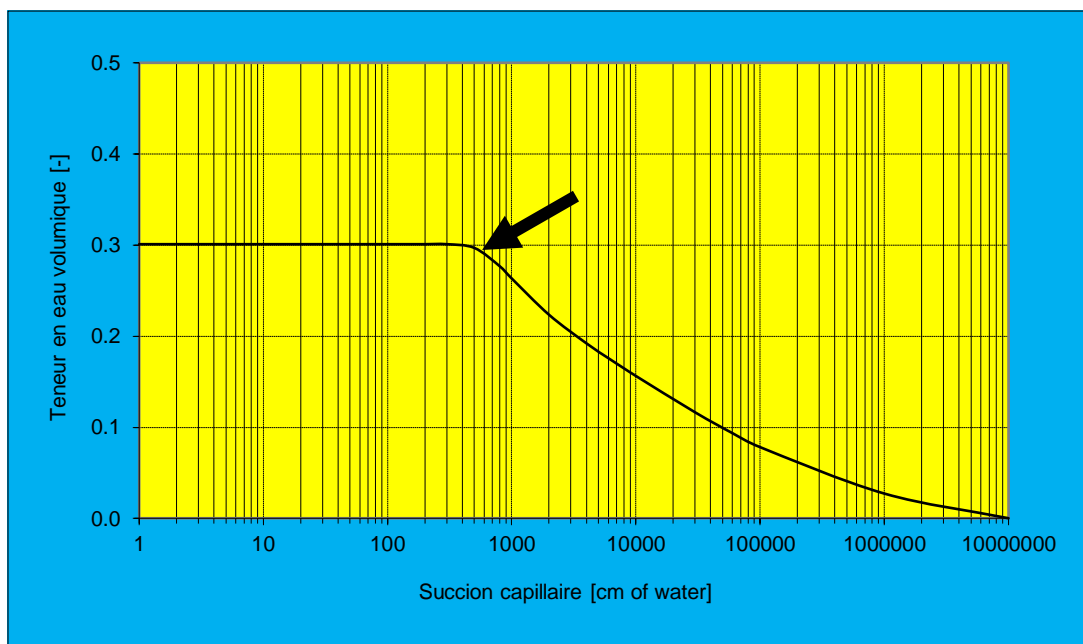
Para ser más objetivo el cálculo, si las descargas de las colas del proceso son de 400000 t/d, tras un deslame por cicloneo de las mismas, el 25% en peso (over flow), que representa a 10000 t/d,

sería mezcladas con el 23.91 % en peso colas de la espiral, que representa en peso 9564 t/d ; lo que representa que en términos de peso, un total de 19564 t/d (48.91%), que serían descargadas en el sitio de disposición final, sin que estas requieran de medidas de remediación en la etapa del cierre. Es decir, en términos de costos de cierre, se habría ahorrado ca. de un 50%.

Por otra parte, en base a la simulación en el MK, utilizando los parámetros que se citan a continuación, se graficó la curva de retención de dicha mezcla de colas de espiral y over flow del deslame:

d10 (μ)	d60 (μ)	Cu	ε	AEV (cm)	Ksat (cm/s)
2.5	45	18.0	0.43	600	8.23x10-6

**Tabla N° 12.-** Parámetros geotécnicos de la muestra mezcla de colas de espiral y over flow del deslame



**Figura N° 3.-** Curva de retención de humedad (WRC) para la mezcla de 25% de over flow del deslame y 100% de las colas de espiral

De la curva de retención anterior, se deduce que la mezcla estudiada es “apta para su uso como coberturas secas, puesto que, el valor del punto de entrada de aire AEV ocurre a una succión de casi 700 cm de columna de agua”.

### 2.3 USO DE SUELOS DEL SECTOR COMO COBERTURAS SECAS

Entre las técnicas más apropiadas para implementar el cierre ambiental de sitios de disposición final de residuos mineros altamente generadores de drenaje ácido de roca y mitigar el impacto ambiental por DAR generado en pasivos ambientales mineros, se puede citar a la de coberturas de efecto de barrera capilar, existiendo una diversidad de variantes en esta modalidad de las cuales una solución innovadora

podría corresponder a la cobertura multicapa del tipo SDR (Stockage & Relargage) de almacenamiento y descarga, cuya aplicación se justificaría por su adaptabilidad a climas semi áridos.

En éste tipo de cobertura se busca acumular el agua de lluvia (y/o nieve) caída durante la estación húmeda en una capa fina de la cobertura seca de suelo para retornarla a la atmósfera durante el período seco por evapotranspiración. Debajo de la capa fina se coloca una capa gruesa para formar la barrera capilar y evitar que el agua acumulada percole hacia el residuo que se protege con ésta cobertura. Como capa fina se podría utilizar suelos de la zona de la operación minera que presenten propiedades geotécnicas específicas; en especial por su alto contenido de limo.

Para el estudio de caso presentado, se muestran algunos resultados de los suelos analizados aptos para su uso como coberturas secas SDR.

- Las densidades aparentes varias muestras de suelos estudiadas, se encuentran entre los valores 1,29 a 1,782 g/cm<sup>3</sup>; mientras que el rango de valores de las densidades reales oscila entre 1,871 y 2,628 g/cm<sup>3</sup>. Finalmente, el rango de los valores de porosidad de las muestras de suelos estudiadas se encuentra entre 0,22 y 0,436.
- Desde el punto de vista de la caracterización granulométrica realizada a través de la clasificación de cada muestra en malla 48 (0.30 mm) y ejecución del análisis granulométrico del sobre tamaño y del sub tamaño, usando tamices de la serie Tyler y el equipo analizador laser de partículas, respectivamente; además, considerando las propiedades geotécnicas de las mismas, se establecido que: De todos los suelos estudiados, los suelos S1; S2 y S3, tienen las siguientes características, que los hacen suelos “aptos para su uso como coberturas secas”:

	d10 (μ)	d60 (μ)	Cu	ρap g/cm <sup>3</sup>	ρreal g/cm <sup>3</sup>	ε
S1	4	100	25	1,418	1,871	0,242
S2	1.5	70	46.7	1,236	1,673	0,261
S3	20	550	27.5	1,304	2,112	0,383

**Tabla N° 13.-** Parámetros geotécnicos de las muestras de los suelos S1 a S3

Mediante la aplicación de los datos anteriores al MK – Model, se obtuvieron los datos siguientes:

	AEV cm	Ksat cm/s
JAU 342	1000	3.06x10 <sup>-7</sup>
JAU 353	1000	7.62x10 <sup>-8</sup>
TOL 522	1000	7.05x10 <sup>-7</sup>

**Tabla N° 14.-** Parámetros geotécnicos de las muestras de los suelos S1 a S3

De los resultados de la tabla anterior, se demuestra que los suelos estudiados que presentaron un valor del punto de entrada de aire AEV que ocurre a una succión por encima o cercana a 1000 cm de columna de agua; son “aptos para su uso como coberturas”.

## 2.4 PREPARACIÓN DE SUELO VEGETAL (TOP SOIL)

En la etapa de explotación a cielo abierto, es importante que la cobertura de suelo vegetal (top soil) sea celosamente almacenada para su posterior uso en la etapa de cierre. Por lo general, el volumen de éste material será siempre insuficiente para cubrir su demanda en el cierre tanto de los sitios de disposición final de desmontes y como el de los relaves; por lo que, será necesario considerar su fabricación artificial.

Como fuentes de nutrientes del suelo a fabricar, el N, P y K deben ser obtenidos a partir de los residuos de comida y de los lodos de la planta de

tratamiento de aguas residuales del campamento minero; y ser mezclado en las proporciones adecuadas con las colas del proceso de desulfurización de la concentración gravimétrica en espirales y/o con los suelos del sector estudiados para su uso como “top soil”.

Para el caso de estudio presentado, se ha realizado la caracterización de los residuos de comida que se generan en el campamento de una operación minera. Los resultados se presentan a continuación:

Humedad	Alta (75 a 85%)	Baja (20 a 40%)
Materia orgánica	75 a 85%	80%
Nitrógeno orgánico	5.50%	1.20%
Relación C/N	17	32
Densidad	0.6 a 0.8 (t/m3)	0.3 a 0.4 (t/m3)
Mal olor	Si	No

**TABLA 15.-** Caracterización de la fracción orgánica empleada para su compostaje

Para el caso de estudio presentado, se realizó el compostaje en pilas aireadas, considerando los parámetros óptimos de: Relación de C/N mayor a 25; humedad de mayor a 55%; tamaño de residuos sólidos entre 25 y 27 mm; temperatura entre 50 y 55<sup>a</sup> C durante los primeros día y entre 55 a 60 °C en los días posteriores; pH menor a 8.0; y una concentración de oxígeno mayor al

50% del estequiométricamente requerido respecto a la fórmula química de los residuos estudiados de C<sub>586</sub> H<sub>934</sub> O<sub>248</sub> N<sub>12</sub> S.

El compost obtenido presenta una calidad apta para su uso con fines de propagación de cobertura vegetal autóctona. La tabla siguiente resume la calidad del compost obtenido:

pH	Fósforo ( ppm como fosfato)	Nitrato (ppm)	Nitrito (ppm)	Potasio (ppm)
7.64	500	375	< 1	350

**TABLA16.-** Calidad de compost obtenido para la fabricación de top soil artificial

## 2.5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS DEL CAMPAMENTO MINERO PARA SU USO EN RIEGO Y EL PROCESAMIENTO MINERAL

En la etapa de explotación minera, es importante que las aguas residuales domésticas, generadas en el campamento minero, sean tratadas con fines de reuso tanto para el riego en los invernaderos de producción de plantas autóctonas que serán empleadas como cobertura vegetal en el cierre de los sitios de disposición final de residuos mineros, como para su uso en el procesamiento mineral.

Varias tecnologías están disponibles para el tratamiento de las aguas residuales domésticas; sin embargo, el método SBR (Sequencing Batch Reactor) podría ofrecer las siguientes ventajas:

- El procesamiento se realiza en un sólo un tanque y en tiempos de residencia cortos.
- Su operación es independiente de las influencias de flujo.
- Construcción simple y fácil, y posible de ampliación en paralelo para mayores caudales.
- Alta eficiencia de purificación.
- Permite la eliminación de N y P; por ende, obtener lodos con mayores contenidos de N y P para su posterior procesamiento en la planta de compostaje

Para el caso de estudio presentado, se estudió el uso de aguas residuales ya tratadas por el método SBR (Sequencing Batch Reactor) y su uso en procesos de flotación de sulfuros de Zn, de acuerdo al flujograma siguiente:

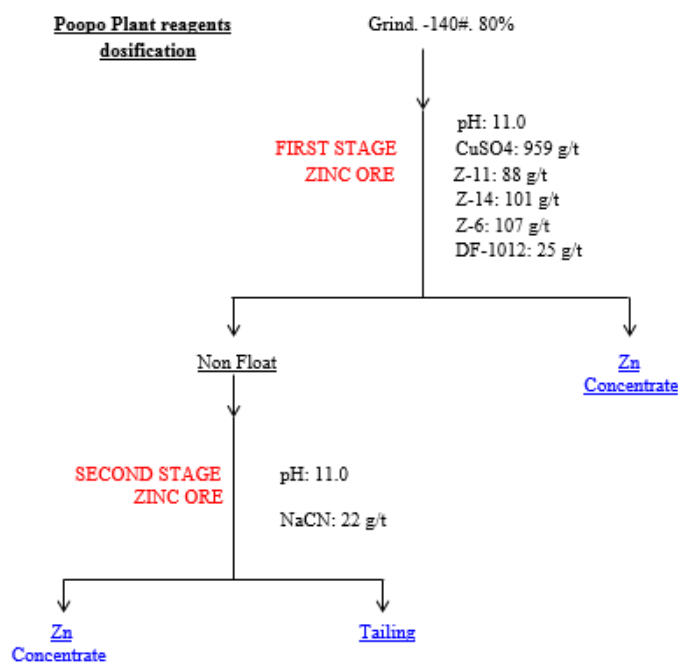


Figura N° 4.- Flujograma de la flotación de Zn con aguas residuales urbanas tratadas

Los resultados obtenidos y su comparación con diferentes tipos de agua utilizada (Potable, de recirculación y de la descarga de la planta de

tratamiento SBR), son presentados a continuación:

Flotación con agua potable			
PRODUCTO	% PESO	LEY % Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	20.40	44.46	85.65
CONCENTRADO	2.80	37.31	9.86
COLA	76.80	0.62	4.49
CAB. CALCULADA	100.00	10.59	100.00
Flotación con agua de recirculación			
PRODUCTO	% PESO	LEY % Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	21.25	44.41	93.94
CONCENTRADO	2.53	7.64	1.88
COLA	76.22	0.59	4.19
CAB. CALCULADA	100	10.59	100.00
Flotación con agua residual urbana tratada			
PRODUCTO	% PESO	LEY % Zn	DIST. Zn
CONCENTRADO	20.20	46.39	88.49
CONCENTRADO	2.40	27.44	6.22
COLA	77.40	0.72	5.29
CAB. CALCULADA	100.00	10.59	100.00

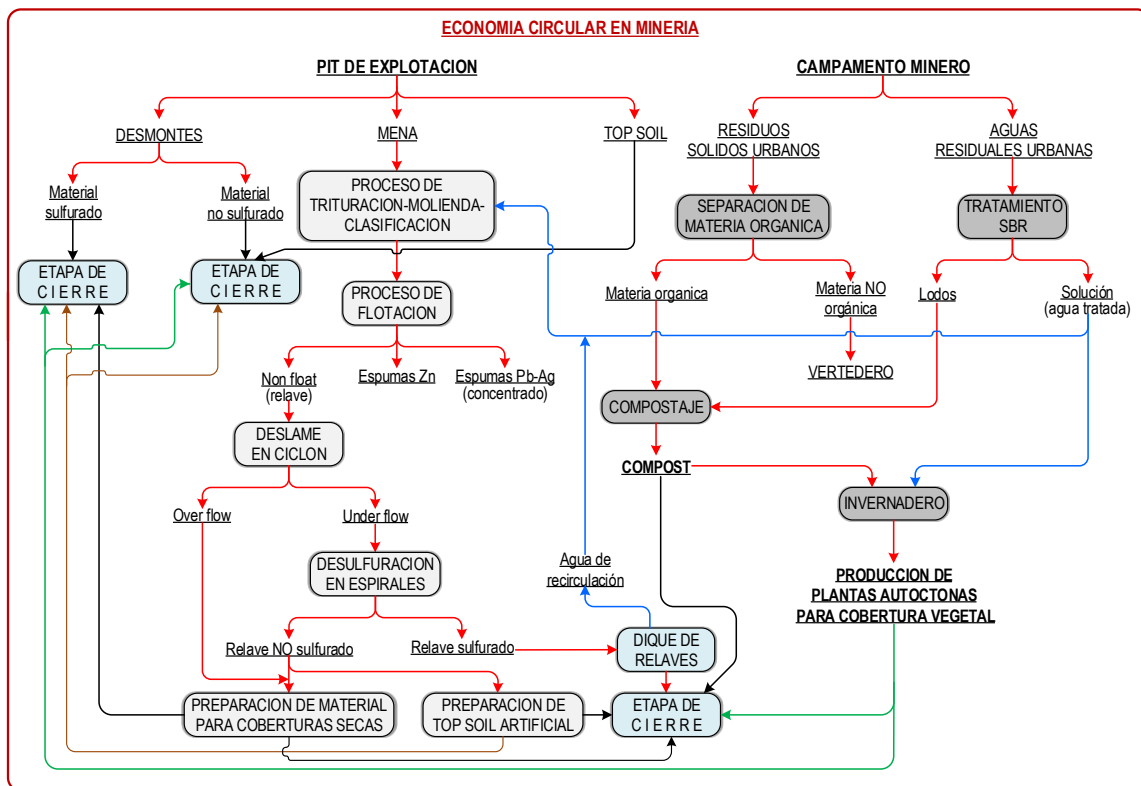
TABLA17.- Resultados de la flotación de menas sulfuradas de Zn con diferentes tipos de aguas

De los resultados presentados en la tabla anterior, se deduce que la flotación de menas con el uso de aguas residuales urbanas tratadas es técnicamente posible.

### 3. PROPUESTA PARA LA PRODUCCIÓN MINERA DE CONCENTRADOS DE Pb-Ag-Zn, EN

## EL MARCO DEL CONCEPTO DE ECONOMÍA CIRCULAR

El flujograma siguiente, muestra la propuesta del diseño conceptual para la producción de concentrados de Pb – Ag- Zn a partir de su explotación a cielo abierto de un yacimiento de complejos sulfurados, enmarcado en el concepto de la aplicación de la economía circular:



### 4.- CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Del estudio presentado, se establecen las siguientes conclusiones:

- En el contexto de la economía circular, las empresas mineras deberán desarrollar sus procesos extractivos no sólo precautelando los efectos de impacto negativo al medio ambiente que generan cada una de las operaciones unitarias del proceso extractivo; sino que también, creando soluciones innovadoras que permitan disminuir los consumos de agua y energía; pero además, tratando que los residuos generados sean reutilizados en el cierre de la operación

minera; permitiendo así, un claro beneficio económico, social y ambiental para la industria minera.

- La propuesta, con el respectivo respaldo técnico, presenta en una primera etapa, la separación selectiva de los desmontes generados en la explotación a cielo abierto en base a sus posibilidades de generación de drenaje ácido de roca; además, en una segunda etapa, la desulfurización de las colas del proceso de flotación por espirales, a objeto de que el producto no sulfurado de éste proceso, sea utilizado como cobertura seca, previo deslame, en el cierre tanto del sitio de disposición de relaves y de desmontes;

además, de ser utilizado también para la conformación de top soil artificial, junto con el compost generado a partir de la materia orgánica de los residuos del comedor del campamento minero y de los lodos del proceso de tratamiento de las aguas residuales tratadas. Así mismo, el uso de las aguas residuales tratadas en la etapa de flotación de minerales

## 5. Referencias Bibliográficas

KIM A. LAPAKKO - Evaluation of neutralization potential determination for metal mine waste and proposed alternative. In Third International Conference on Acid Rock Drainage (1994)

S. MILER, A. ROBERSTON AND T. DONAHUE - Advances in acid drainage prediction using the net acid generating test. *Environmental Geochemistry International* (2001) BENZAAZOUA MOSTAFA. Curso sobre “Gestión Ambiental Minera”- Módulo II – Drenaje. Ácido de Roca. UTO-REFORMIN. (Mayo 2002)

ZAMORA G. Y BENZAAZOUA M. Predicción de DAR por Test Geoquímicos Estáticos y Dinámicos. *Revista Metalúrgica* N° 23 (Noviembre 2002)

ASTM Standart test meted for accelerated weathering of solid materials using a modified humity cell. 5744-96

Acid Rock Drainage Prediction Manual – CANMET - MSL DIVISON. Departament of Energy, Mines and Resources, Canada (MEND Project. 1.16.1 (1999)

AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P., AACHIB, M., BUSSIERE, B., RICARD, J.-F. Et TREMBLAY, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers, *Rapport MEND/NEDEM 2.22.2a*.

AUBERTIN, M; M.BONIMPA, BUSSIÈRE B; CHAOUIS R.P.A. A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Can. Geotech, J 40* ( 2003)

ALBRIGHT W. BENSON CRAIG & COL. Fiel water Balance of Landfill final covers . *J. environmental Qual. Vol 33* 2004)

BUSSIERE, B., AUBERTIN, M. et CHAPUIS, R.P. (1997a). Écoulement non saturé à travers les couvertures avec effets de barrière capillaire (CEBC): Modélisation physique et numérique avec application au drainage minier acide. *Rapport EPM/RT-97/03*, École Polytechnique de Montréal.

BUSSIERE, B., AUBERTIN, M. et JULIEN, M. (2001). Couvertures avec effets de barrière capillaire pour limiter le drainage minier acide: aspects théoriques et pratiques. *Vecteur environnement*, 34(3): 37-50.

AUBERTIN, M., BUSSIERE, B., BARBERA, J.-M., CHAPUIS, R.P., MONZON, M. et AACHIB, M. (1997b). Construction and instrumentation of in situ test plots to evaluate covers built with clean tailings. *Proceedings of the 4th ICARD*, Vancouver, 2: 715-730.

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., AACHIB, M. et CHAPUIS, R.P. (1996b). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*, 1 : 3-13

McMULLEN J. FIRLOTTE R.R. KNAPP R. AUBERTIN M. Les terrains aurifères property site closure and rehabilitation *Proceeding of 29 th. Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa ( 1997)

Acid Rock Drainage Prediction Manual – CANMET - MSL DIVISON. Departament of Energy, Mines and Resources, Canada (MEND Project. 1.16.1 (1999)

R.W. Lawrence and Y. Wang. - Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. *MEND/NEDEM Report 1. 16.1b*

Lapakko K. – Prediction of acid mine drainage from Duluth Complex mining wastes. In *Proceedings Mine Drainage and Surface Mine Reclamation Conference. Vol. I.* (1998)

O. Hinojosa, A. Alvarez, A. Salas, G. Zamora-obertura de efecto SDR en las condiciones climatológicas semi-áridas del altiplano boliviano Proyecto REFORMIN II . La Paz 2006  
Artículo recibido en: 13.02.2019

Manejado por: Elvis Trujillo  
Artículo aceptado: 09.03.2019