

# PREDICCIONES DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCA MEDIANTE TESTS GEOQUÍMICOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS

\* Dr. Ing. Gerardo Zamora E-chenique

\*\* Ph.D. Ing. Mostafa Benzaazoua

## RESUMEN

*Los tests geoquímicos estáticos y dinámicos son frecuentemente utilizados para predecir la tasa de generación de Drenaje Acido de Roca (DAR) de residuos mineros y la calidad de lixiviados generados. A partir de esta información, es posible entonces definir los procedimientos para su adecuado manejo ambiental o evaluar el efecto del impacto ambiental que generan.*

*Las operaciones mineras desarrolladas en el país han dejado grandes volúmenes de desmontes y colas, las que sin considerar medidas ambientales en su deposición, actualmente se constituyen, junto con las evacuaciones de aguas ácidas de mina, en las principales fuentes potenciales de contaminación de aguas superficiales y subterráneas.*

*El objetivo del presente trabajo es el de presentar diferentes estudios de caso en los que varios residuos mineros han sido evaluados mediante pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas para su respectiva predicción de DAR.*

*Las pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas han sido realizadas en los laboratorios de la URSTM (Unidad de Investigación y de Servicios en Tecnología Mineral) de la Universidad de Québec en Abitibi-Temiscamingue - Canadá.*

*La metodología presentada sobre la ejecución de las pruebas y su evaluación respectiva, podrían constituirse en una guía útil para técnicos involucrados en la evaluación de impactos ambientales generados por residuos y colas de operaciones mineras.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los residuos mineros (desmontes o colas), generados por la actividad de la explotación de una mina y el procesamiento de minerales, se constituyen en la actualidad, junto con las evacuaciones de agua ácida de mina, en las principales fuentes de contaminación de metales pesados de aguas superficiales y subterráneas.

En todas las regiones mineras del país, se han depositado a lo largo del tiempo, grandes volúmenes de estos residuos que contienen sulfuros (especialmente pirita) y, tomando en cuenta que no se han considerado medidas ambientales en su deposición, en contacto con aguas superficiales o de lluvia y el oxígeno de la atmósfera, van generando Drenaje Ácido de Roca (DAR), dando así lugar a una disminución del valor del pH de sus escorrentías y por ende la contaminación de cuerpos acuosos.

La predicción del potencial generador de DAR, puede realizarse mediante pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas, cuya evaluación de sus resultados permite definir el manejo ambiental adecuado de los residuos mineros o, si es el caso, la evaluación del impacto ambiental que pueden generar.

\* Universidad Técnica de Oruro - Profesor del Programa de Tecnologías de Protección Ambiental.

\*\* Universidad de Québec - Canadá - Profesor Titular - Area de Medio Ambiente Minero.

Las pruebas geoquímicas estáticas consideran el equilibrio entre los minerales que pueden producir ácido (potencial de acidificación PA) y los minerales neutralizantes (potencial de neutralización PN) de una muestra de residuo minero representativa.

Las pruebas dinámicas o cinéticas, complementan la información obtenida en las pruebas geoquímicas estáticas, permiten predecir la tasa de producción de ácido y el desarrollo de la cantidad de drenaje en función del tiempo.

El objetivo de este trabajo es presentar varios estudios de caso en los que se han desarrollado pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas y se han evaluado los resultados de predicción de DAR.

La metodología empleada puede ser tomada por los técnicos involucrados en la predicción de DAR a partir de residuos mineros y/o la evaluación de impacto ambiental debido a la generación de DAR.

## 2. METODOLOGÍA DE PREDICCIÓN DE DAR

La metodología empleada para la predicción de DAR puede resumirse en las siguientes etapas:

- a) Muestreo representativo del residuo minero.
- b) Caracterización del residuo minero.
  1. Análisis químico ambiental aplicado.
  2. Análisis mineralógico ambiental aplicado.
  3. Análisis granulométrico.
- c) Pruebas Geoquímicas Estáticas
  1. Determinación del Potencial de Neutralización (PN).
  2. Determinación del Potencial Acido (PA).
  3. Determinación del Potencial Neto de Neutralización (PNN).
  4. Evaluación
- c) Pruebas Geoquímicas Dinámicas

Para el caso en el que se confirme o sea incierto el potencial de generación de DAR obtenido de las pruebas geoquímicas estáticas.

## 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS MINEROS

### A) MUESTREO

Se han tomado muestras representativas de seis colas diferentes procedentes del procesamiento de minerales, con valores distintos en cuanto al contenido de sulfuros.

### B) CARACTERIZACIÓN DE LAS COLAS

#### Análisis Químico Ambiental Aplicado

Las muestras han sido analizadas por digestión total por los metales pesados de interés. Los resultados son presentados en la siguiente tabla:

TABLA 1. Análisis químicos de los elementos incluidos en los minerales sulfurosos.

	% S	Cu, ppm	Zn, ppm	Pb, ppm	As, ppm
Residuo 1	2.83	220	350	50	<Id
Residuo 2	6.92	88	121	29	35
Residuo 3	10.6	25	130	25	830
Residuo 4	8.25	568	8,950	<Id	<Id
Residuo 5	4.85	<Id	421	<Id	524
Residuo 6	20.33	368	1,500	47	<Id

Id. Límite de detección

#### Mineralogía Ambiental Aplicada

Mediante un análisis cualitativo de difracción de rayos X de los seis residuos estudiados, se ha detectado que los minerales sulfuros presentes son: pirita, pirrotina, calcopirita, esfalerita, arsenopirita y galena. También se ha establecido que el hierro proviene únicamente de los sulfuros; que la esfalerita no es férrica y que el arsénico proviene únicamente de la arsenopirita.

En base a cálculos estequiométricos, se ha podido establecer los porcentajes de cada uno de los sulfuros presentes en los residuos.

TABLA 2. Análisis mineralógico a partir de los elementos incluidos en los minerales sulfurosos

	Mineral	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3	Residuo 4	Residuo 5	Residuo 6
ZnS	Esfalerita	0.05	0.02	0.04	1.33	0.06	0.22
PbS	Galena	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01
CuFeS <sub>2</sub>	Calcopirita	0.06	0.03	0.01	0.16	0.00	0.11
FeAsS	Arsenopirita	0.00	0.01	3.33	0.00	0.11	0.00
FeS <sub>2</sub>	Pirita	5.22	12.91	17.81	14.51	8.99	37.82

El residuo número 3, ha mostrado la presencia también de pirrotita.

## 2.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GEOQUÍMICAS ESTÁTICAS

Tanto las pruebas geoquímicas estáticas como las dinámicas han sido realizadas en los laboratorios de la URSTM (Unidad de Investigación y de Servicios en Tecnología Mineral) de la Universidad de Québec en Abitibi-Témiscamingue - Canadá.

- a) La determinación del Potencial Neutro del residuo fue llevado a cabo mediante las técnicas de  $NP_{Sobek}$  Modificado y  $NP_{Carbonato}$ . En la tabla 3, se presentan los resultados obtenidos:

TABLA 3. Resultados del PN de las 6 muestras estudiadas.

	NP Sobek kg CaCO <sub>3</sub> /t	% C	% CO <sub>2</sub>	NP carbonato Kg CaCO <sub>3</sub> /t
Residuo 1	93.53	1.21	4.44	101.23
Residuo 2	66.35	0.72	2.64	60.15
Residuo 3	65.20	0.76	2.78	63.38
Residuo 4	276.81	3.35	12.28	279.98
Residuo 5	196.56	2.26	8.29	188.95
Residuo 6	17.39	0.16	0.59	13.45

$NP_{carbonato} = \%CO_2 * 22.8$

- b) La determinación del Potencial Acido de las muestras estudiadas fue realizada a partir de los resultados del análisis químico de  $St_{total}$  y  $SO_4^-$ . En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

TABLA 4. Resultados del PA de las 6 muestras estudiadas.

	% $St_{total}$	% $SO_4^-$	PA %S*31.25 kg CaCO <sub>3</sub> /t	PA (neto) %Sulf*31.25 kg CaCO <sub>3</sub> /t
Residuo 1	3.00	0.50	93.75	88.54
Residuo 2	7.00	0.23	218.75	216.35
Residuo 3	13.00	4.49	331.25	326.24
Residuo 4	8.30	0.15	259.38	257.81
Residuo 5	5.00	0.45	156.25	151.56
Residuo 6	21.00	2.00	656.17	635.31

- c) La determinación del Potencial Neto de Neutralización (PNN) y la Relación PN/PA fue determinado en base a los resultados presentados en las tablas 3 y 4, y se muestra en la tabla 5.
- d) Para la evaluación de los resultados obtenidos pueden considerarse dos criterios:

**Primer Criterio:** Un residuo minero es considerado como generador de DAR si el valor del PNN es menor a 20 kg CaCO<sub>3</sub>/t. Valores de PNN mayores a 20

Kg CaCO<sub>3</sub>/t hacen de que el residuo no sea generador de DAR.

TABLA 5. Resultados del PA de las 6 muestras estudiadas

	PNN ( $NP_{sob-AP}$ ) kg CaCO <sub>3</sub> /t	PNN (carb-AP) kg CaCO <sub>3</sub> /t	PN/AP Sobek modif.	PN/AP Carbonato
Residuo 1	4.99	12.52	1.06	1.14
Residuo 2	-150.0	-156.30	0.31	0.28
Residuo 3	-261.04	-262.82	0.46	0.18
Residuo 4	19.00	21.70	1.07	1.08
Residuo 5	45.00	37.07	1.30	1.24
Residuo 6	-617.92	-621.88	0.03	0.02

Si el valor de PNN se encuentra entre estos dos valores, entonces se tiene un rango de incertidumbre. Por tanto, tomando en cuenta los resultados obtenidos, se tiene:

	-20 kg CaCO <sub>3</sub> /t	+20 kg CaCO <sub>3</sub> /t
GENERADOR	INCERTIDUMBRE	NO GENERADOR
Residuo 2 Residuo 3 Residuo 6	Residuo 1 Residuo 4	Residuo 5

**Segundo Criterio (ABA):** Si la relación de NP/AP es menor a la unidad, entonces el residuo puede ser considerado como generador de DAR. Por el contrario, si dicha relación es mayor a 3, entonces el residuo no es generador del DAR. Valores intermedios, dan lugar a una incertidumbre sobre la generación o no de DAR. Por tanto, tomando en cuenta los resultados obtenidos, se tiene:

	NP/AP < 1	NP/AP > 3
GENERADOR	INCERTIDUMBRE	NO GENERADOR
Residuo 2 Residuo 3 Residuo 6	Residuo 1 Residuo 4 Residuo 5	

Este criterio es más severo que el primero. La normativa canadiense aplica, para fines de exigencia de restauración, una relación de NP/AP > 3.

Es posible afinar el cálculo, tomando en cuenta que para la determinación del PN se asumió que: la calcita es considerada como el único carbonato; los silicatos no son tomados en cuenta; la siderita no se encuentra presente en el mineral y no son considerados los fenómenos de inhibición "coating".

Si se tienen análisis de Ca y Mg de las muestras, puede calcularse los valores del PN de manera más precisa, considerando la cantidad correcta de CaCO<sub>3</sub>.

Tabla 6. Resultados del cálculo mineralógico para los carbonatos<sup>(+)</sup>.

	% Ca	% Mg	% dolomita calculado	% Ca dolomita calculado	% Ca Residual	% Calcita calculado
Residuo 1	2.1	0.85	6.45	1.40	0.70	1.74
Residuo 2	1.7	0.33	2.50	0.54	1.16	2.89
Residuo 3	6.79	2.5	18.97	4.12	2.67	6.66
Residuo 4	5.22	3	22.76	4.95	0.27	0.68
Residuo 5	4.85	1.43	10.85	2.36	2.49	6.22
Residuo 6	0.12	0.21	1.59	0.35	-0.23	-0.57

Entonces, el PN puede ser calculado por el método de Lappako et Li (1997).

TABLA 7. Resultado del cálculo del PN mediante Lappako y su comparación con otros métodos.

	Método Lappako NP kg CaCO <sub>3</sub> /t	NP Sobek kg CaCO <sub>3</sub> /t	NP carbonato kg CaCO <sub>3</sub> /t
Residuo 1	94.18	93.53	101.06
Residuo 2	58.66	66.35	60.05
Residuo 3	292.33	334.38	305.24
Residuo 4	277.67	276.81	279.51
Residuo 5	191.34	196.56	188.63
Residuo 6	13.31	17.39	13.43

Para establecer la correlación de los métodos citados que permiten determinar el NP, se ha graficado NP carbonato y NP Lappako versus NP Sobek. La gráfica muestra una adecuada correlación de los resultados obtenidos.

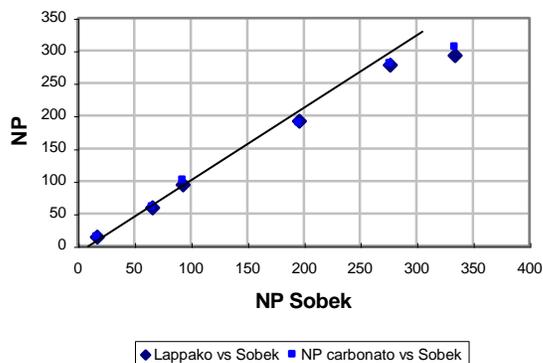


Figura 1. Correlación entre los métodos de determinación de NP.

## 2.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS GEO QUÍMICAS DINÁMICAS

De los resultados de las pruebas geoquímicas estáticas de predicción y tomando en cuenta el segundo criterio, es requerido realizar pruebas geoquímicas dinámicas de los residuos 1, 4 y 5, que se encuentran en la zona de incerti-

dumbre; además, de los residuos 2, 3 y 6, si se desea además predecir la tasa de producción de ácido y el desarrollo de la cantidad de drenaje en función del tiempo.

Para fines ilustrativos, se considerará los resultados obtenidos del residuo 3 que se llevó a cabo en columnas.

La columna, en este estudio tiene una altura de 70 cm, y donde 10 cm se utilizan como recámara de oxígeno para la prueba de consumo de oxígeno. La masa de materia seca colocada en la columna es de 4.8 kg.

Un análisis químico completo del residuo fue ejecutado antes de cargarlo a la columna. Los resultados están resumidos en la tabla siguiente:

TABLA 8. Análisis químico completo del residuo 3.

Elemento	Unidad	Análisis	Elemento	Unidad	Análisis
Al	%	2.49	K	%	0.19
As	µg/g	830	Mg	%	1.95
Ba	µg/g	48	Mn	%	0.93
Ca	%	4.34	Na	%	0.83
Cd	µg/g	<5	Pb	µg/g	25
Cu	µg/g	25	S	%	10.6
Fe	%	23.2	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	%	0.479

El estudio de la mineralogía de la muestra fue realizada con ayuda de varios métodos: difracción de rayos X, el cálculo mineralógico utilizando los análisis químicos y la caracterización por microscopio electrónico a barrido (MEB) con un microanálizador en espectroscopía de energías (EDS). Los principales resultados de estos estudios están resumidos en la tabla 9.

TABLA 9. Resultados de análisis en difracción de rayos X del residuo 3.

Mineral	Análisis	Mineral	Análisis
Cuarzo	A	Calcita	F
Ortosa	F	Dolomita	M
Albita	F	Siderita	-
Micas	T	Pirita	F
Clorita	T	Goetita	-
Amfíbole	T	Yeso	-

Con A = entre 30 y 50%, M = entre 10 y 30%, F = entre 2 y 10%, T < 2%.

Las observaciones en el microscopio electrónico y el estudio con el EDS permitieron identificar los minerales siguientes: calcita; dolomita; dolomita ankérica; siderita (manganesífera en general); pirita; silicatos (albita y cuarzo principalmente). Estos resultados confirman los resultados de la difracción X que están presentados.

La tabla 10, resume las principales características de la muestra en lo que concierne a granulometría, densidad relativa ( $D_r$ ) y superficie específica (S.S.A.).

Los resultados correspondientes a los diferentes parámetros fisicoquímicos encontrados en las soluciones de enjuague en relación con el tiempo están presentados en la tabla 11. El arsénico, cadmio, plomo, potasio y sodio no están representados debido a su bajo tenor.

Tabla 10: Principales características físicas de la muestra estudiada.

	Residuo 3
$D_r$	3.26
S.S.A, $m^2/g$	0.8451
% pasa a 80 $\mu m$	89.0
$D_{10}$ , $\mu m$	0.8
$D_{50}$ , $\mu m$	16.2
$D_{90}$ , $\mu m$	80
Media, $\mu m$	58.9

TABLA 11. Resultados de la prueba geoquímica dinámica en columna.

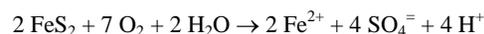
	Días	Vol. Adi.	Vol. Recup.	pH	Eh MV/ENH	Conductividad	Acidez	Alcalinidad
						$\mu ohms$	mg/l $CaCO_3$	mg/l $CaCO_3$
Ciclo 1	45	2.5	0.61	8	365	2,940	10	487
Ciclo 2	82	2.5	2.22	7.34	396	4,790	47	397
Ciclo 3	115	2.5	2.24	7.01	399.3	8,060	63	442
Ciclo 4	150	2.5	2.32	7.21	396.4	5,160	61	508
Ciclo 5	188	2.5	2.24	7.12	427	3,860	52	378
Ciclo 6	228	2.5	2.21	7.13	428.9	4,770	50	396
Ciclo 7	279	2.5	2.1	7.24	434.8	6,610	69	539
Ciclo 8	310	2.5	1.94	7.11	427.2	5,880	86	575
Ciclo 9	340	2.5	2.16	7.04	430.7	5,050	68	541
Ciclo 10	370	2.5	2.2	6.99	471.2	4390	68	452
Ciclo 11	405	2.5	2.17	6.99	454	nd	74	422

	Al mg/l	As mg/l	Ba mg/l	Ca mg/l	Cd mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l	Fe <sup>2+</sup> mg/l	Fe <sup>3+</sup> mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Mn mg/l	Na mg/l	Pb mg/l	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> g/l	Si mg/l	Zn mg/l
Ciclo 1	<0.05	<0.05	0.036	331	<0.01	0.05	0.21	<0.2	<0.2	10.2	290	0.35	11	<0.05	1.65	3.5	0.9
Ciclo 2	<0.05	<0.05	0.066	666	<0.01	0.06	18.4	0.6	17.8	11.1	550	1.39	11.9	<0.05	3.59	13.5	0.29
Ciclo 3	<0.05	<0.05	0.089	572	<0.01	0.04	21.4	0.6	20.8	11.2	614	1.7	8.71	<0.05	3.77	16.7	0.16
Ciclo 4	<0.05	<0.05	0.057	555	<0.01	0.04	15.2	0.9	14.3	10.4	741	0.54	7.47	<0.05	4.07	15.7	0.28
Ciclo 5	<0.05	<0.05	0.043	531	<0.01	0.05	18.7	<0.2	18.7	6.1	514	2.95	3.57	<0.05	3.32	12.5	0.2
Ciclo 6	<0.05	<0.05	0.047	543	<0.01	0.06	23.1	0.8	23.1	6.5	601	5.31	8	<0.05	3.65	12.8	0.13
Ciclo 7	<0.05	<0.05	0.06	590	<0.01	0.06	20.6	0.6	20	7.9	1,040	1.87	9.23	<0.05	5.09	3.7	0.19
Ciclo 8	<0.05	<0.05	0.037	580	<0.01	0.05	21.9	1	21	5.95	860	1.85	6.2	<0.05	4.10	16.6	0.17
Ciclo 9	<0.05	<0.05	0.086	574	<0.01	0.06	18	0.7	17.3	6.3	691	2.25	5.5	<0.05	3.65	16	0.12
Ciclo 10	<0.05	<0.05	0.036	630	<0.01	0.04	17.5	<0.2	17.5	4.9	435	4.43	2.7	<0.05	3.11	15.6	0.13
Ciclo 11	<0.05	<0.05	0.036	622	<0.01	0.06	22.4	0.5	21.9	4.6	452	6.15	2.3	<0.05	3.08	19	0.10

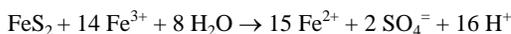
Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos, se han llevado a cabo las gráficas puntuales y acumuladas.

Las gráficas siguientes, muestran el comportamiento del potencial redox, el pH y la conductividad para cada ciclo de enjuague.

La disminución del valor del pH, en los primeros días, se debe a la reacción de generación de ácido de acuerdo a la oxidación directa:



La oxidación de  $FeS_2$  por el mecanismo indirecto, de acuerdo a la siguiente reacción:



es poco probable al inicio.

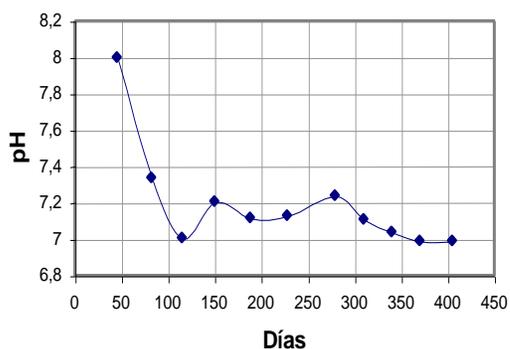


Figura 2. Comportamiento del pH

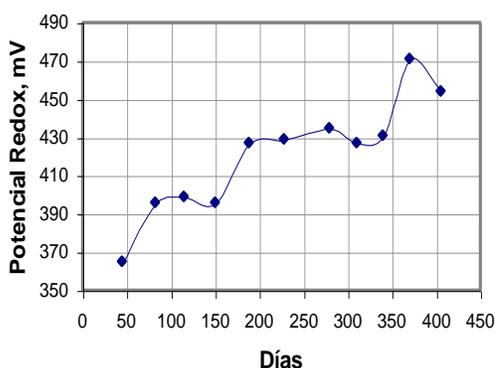


Figura 3. Comportamiento del Eh.

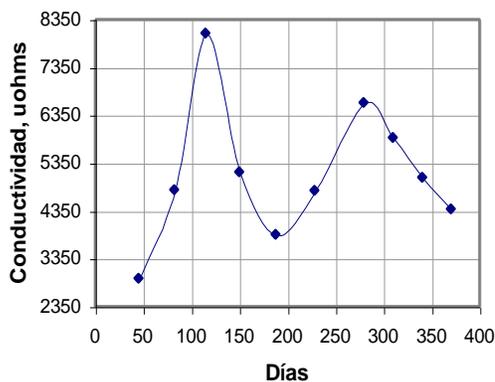
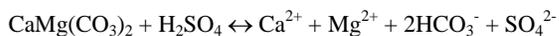
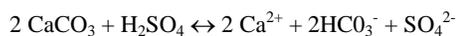


Figura 4. Comportamiento de la conductividad

Pese a la formación de ácido, la presencia de calcita y dolomita en el mineral, dan como respuesta una parcial neutralización de acuerdo a las reacciones siguientes:



El inicio de la disolución temprana de dolomita y calcita se nota desde el principio, pero sobre todo a partir de los 82 días, lo cual explica porque el pH no descendió aún más por debajo de 7,0; ya que justamente ese es el pH buffer de neutralización por disolución de calcitas. A partir de los 120 hasta los 280 días, en los que el potencial redox aumenta, debido a una mayor relación  $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ , la reacción de disolución de la pirita se ve más favorecida por el mecanismo indirecto. Sin embargo, nótese el potencial fuerte de neutralización del mineral, que hace que el pH tienda a mantenerse relativamente constante.

Finalmente, a partir de los 300 días hasta la finalización de las pruebas, se observa un incremento de la relación  $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ , y por tanto un incremento del potencial redox: favoreciendo así a la reacción de disolución de la pirita.

Sin embargo en esta etapa disminuye sostenidamente la conductividad, posiblemente debido a mayor precipitación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , sin significar que se haya agotado la oxidación de los sulfuros porque continúa aumentando el potencial redox, y al desmontar la celda el residuo es aún generador de ácido.

El texto arriba anotado, puede también corroborarse a partir del seguimiento de la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ , como se muestra en la gráfica siguiente:

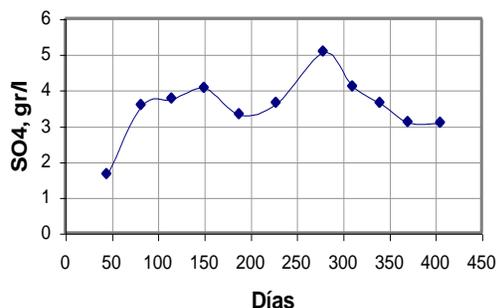


Figura 5. Concentración de sulfato en función del tiempo.

La gráfica siguiente muestra que si se consideran los acumulativos de  $\text{SO}_4^{2-}$  versus el tiempo, se obtiene una correlación lineal.

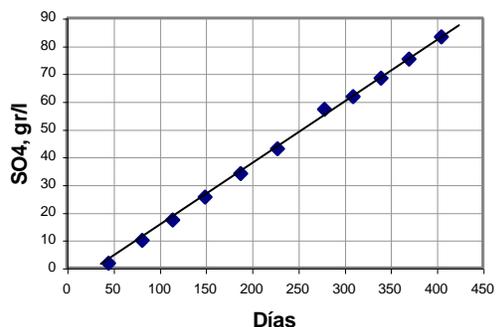


Figura 6. Cinética de disolución de sulfato.

Es decir, se demuestra una tasa de reacción constante en la formación de sulfato que no disminuye al final del ciclo, por lo que se puede asumir que la oxidación de los sulfuros no ha sido agotada.

El poder neutralizante del mineral, puede confirmarse si se grafica el comportamiento del Ca, Mg y la alcalinidad en función del tiempo.

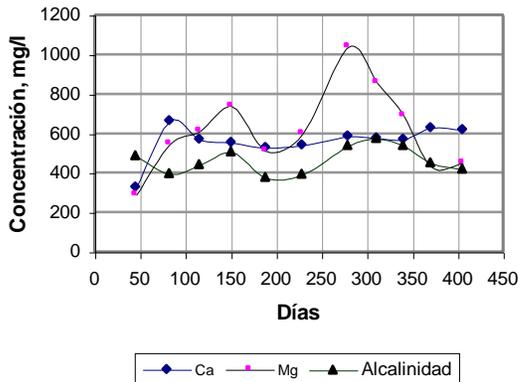


Figura 7. Concentración de calcio, magnesio y alcalinidad en función del tiempo.

Si se considera la disolución de dolomitas y calcitas como el origen de la alcalinidad, existe mayor correspondencia entre la disolución de magnesio liberado por la dolomita y las fluctuaciones de alcalinidad que respecto al calcio procedente de la calcita, lo que hace suponer que la dolomita es la principal generadora de la alcalinidad.

El comportamiento lineal de la presencia de Ca, Mg y Mn graficado a partir de los valores acumulativos, es demostrada en la gráfica siguiente.

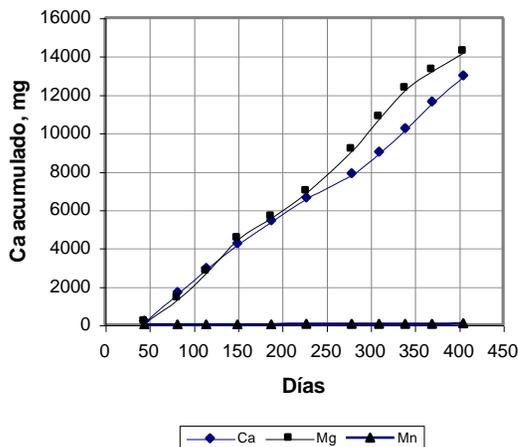


Figura 8. Peso acumulado de Ca, Mg y Mn en función del tiempo.

Por otra parte, la gráfica del comportamiento del Fe, permite aseverar la presencia mayoritaria de Fe<sup>3+</sup> comentada párrafos arriba.

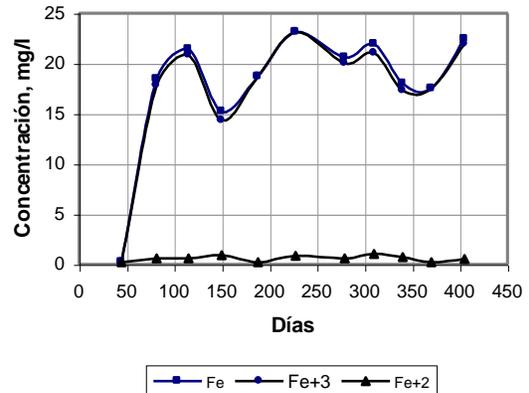


Figura 9. Concentración de las especies de hierro en función del tiempo.

La gráfica siguiente muestra el porcentaje de remoción de los elementos tampones Ca, Mg y Mn; además, del K y Zn.

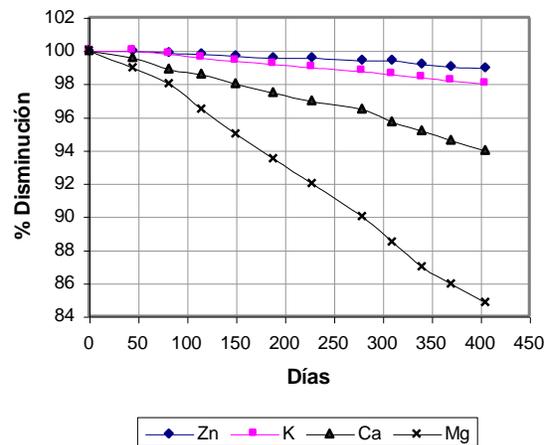


Figura 10. Porcentaje de remoción de elementos tampones en la columna.

Por los argumentos arriba señalados, la dolomita se constituye en el mineral que genera el mayor efecto de neutralización, corroborado por el comportamiento del Mg en la gráfica.

Si consideramos el comportamiento del  $\text{SO}_4^{2-}$  y si se considera como base de cálculo la concentración de sulfato inicial, se tiene:

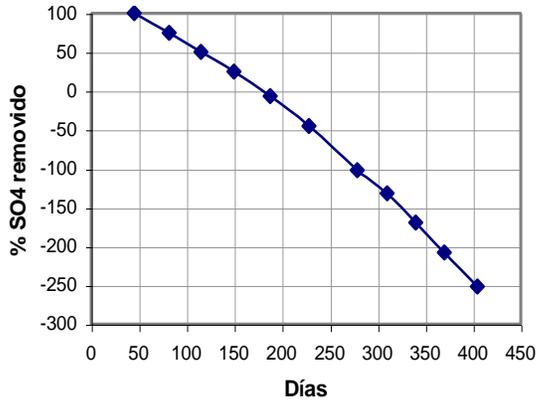


Figura 11. Porcentaje de sulfato removido en la columna en función del tiempo.

Los valores negativos, expresan que existe un incremento con respecto al valor inicial; es decir, que se demuestra que el sulfato generado proviene de la oxidación de los sulfuros presentes y en especial de la pirita.

De la gráfica de los elementos neutralizantes (Ca+Mg+Mn) contra los productos de acidificación (5,042~), se puede establecer una correlación entre los minerales acidívoros y los acidificantes.

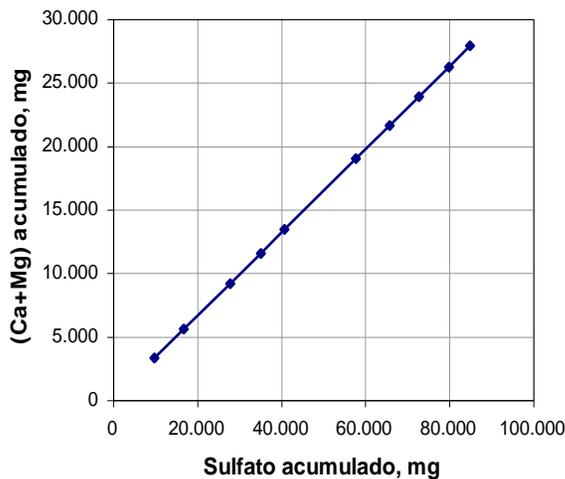


Figura 12. Ca + Mg versus sulfato acumulado.  $Y = 0.3273X - 44.65$ ;  $R^2 = 0,9996$ .

La correlación de los parámetros gráficos es demostrado por el factor de correlación obtenido.

### 2.3 INTERPRETACIÓN FINAL DEL POTENCIAL DE ACIDIFICACIÓN DEL MATERIAL

De las pruebas geoquímicas estáticas se ha establecido que el valor del Potencial Neto de Neutralización (PNN), del residuo 3 es de  $-261.04 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$ . Es decir, si aplicamos el primer criterio descrito, el residuo analizado es: **¡GENERADOR DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCA!**

Aplicando el segundo criterio, el valor del NP/AP es de 0.46 es también **¡GENERADOR DE DAR!**. Sin embargo, si consideramos la correlación de  $\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Mn}$  versus  $\text{SO}_4$  y extrapolando la gráfica para finalmente "establecer si el poder de neutralización del residuo es suficiente como para que el ácido generado a partir de la oxidación de la pirita sea completamente neutralizado por los minerales tampón" se deduce que:

**¡EL RESIDUO NO TIENE EL PODER NEUTRALIZANTE SUFICIENTE! Por tanto se concluye que: ¡SON REQUERIDAS MEDIDAS DE REMEDIACIÓN!**

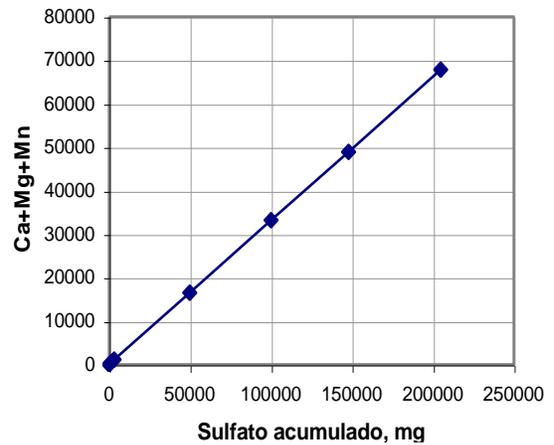


Figura 13. Ca + Mg + Mn acumulados versus sulfato acumulado.  $Y = 0.3297X + 155.65$ ;  $R^2 = 0,9996$ .

Además si se toma en cuenta la granulometría original muy fina de la muestra, con un  $D_{90} = 80 \mu\text{m}$  y una superficie específica alta de  $0.8451 \text{ m}^2/\text{g}$ , se puede deducir que además de tener un potencial generador de DAR muy alto, el material tendrá una cinética rápida de oxidación debido a la finza del material y la enorme área específica expuesta a las reacciones de superficie.

### 3. BIBLIOGRAFÍA

1. Benzaazoua Mostafa. Curso sobre "Gestión Ambiental Minera"- Módulo II Drenaje Ácido de Roca. UTO-REFORMIN, Mayo 2002.
2. Zamora G. y Salas A. Trabajo Práctico. Módulo II - Gestión Ambiental Minera Módulo II - Drenaje Ácido de Roca. UTO-REFORMIN, Mayo 2002.

3. ASTM Standard test method for accelerated weathering of solid materials using a modified humid cell. D5744-96.
4. Acid Rock Drainage Prediction Manual -- CANMET - MSL DIVISION. Department of Energy, Mines and Resources, Canada. (MEND Project. 1.16.1, 1999).
5. Shaw S.C. - L.A. Groat - Mineralogical study of base metal tailings with various sulfide contents, oxidized in laboratory columns and field lysimeters. - Environmental Geology 33, 1998.
6. C.M. Elliot and L.Liu. - Subaqueous Deposition of generating tailings into an acidic lake environment: Pilot column test results. Proceedings 29<sup>th</sup> Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors. 1997.
7. M.D. Germain, N. Tasse and M. Bergeron.- Limit to self neutralization in acid mine tailings. Institut National de la recherche scientifique-geosciences de Quebec. (199) .
8. R.W. Lawrence and Y. Wang. Determination of neutralization potential in the prediction of acid rock drainage. MENDJNEDEM Report 1. 16.1b.
9. Lapakko K. Prediction of acid mine drainage from Duluth Complex mining wastes. In Proceedings Mine Drainage and Surface Mine Reclamation Conference. Vol. I., 1998.
10. Michael G. Li. Hydrogeochemistry of secondary mineral dissolution: column leaching experiment using oxidized waste rock. In Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, 1997.
11. Kim A. Lapakko - Evaluation of neutralization potential determination for metal mine waste and proposed alternative. In Third International Conference on Acid Rock Drainage, 1994.
12. S. Miler, A. Roberston and T. Donahue - Advances in acid drainage prediction using the net acid generating test. Environmental Geochemistry International, 2001.