

ESTUDIO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS ÁCIDAS POR NEUTRALIZACIÓN- PRECIPITACION EN INTERIOR DE LA MINA SANTA FÉ, BOLIVIA

Calvo, D.⁽¹⁾, Casado, J. ⁽¹⁾, Zamora, G.⁽²⁾, Alfonso, P.⁽¹⁾

(1) Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals, de la UPC. Av. de les Bases de Manresa, 61-73, 08242 Manresa.

(2) Dirección de Posgrado de la Universidad Técnica de Oruro. Edif. Paraninfo 3er Piso, 6 de Octubre N° 5715 Oruro (Bolivia).

E-mails: danielcalvotorralba@gmail.com, jordicasadogarrga@gmail.com,
gerardozamoraehenique@yahoo.es, pura@emrn.upc.edu

ABSTRACT

Due to the intense mining activity that has taken place in Bolivia over the years there have been enormous problems of environmental pollution. One of the most important problems is caused acidification of waters, constituting the so-called acid mine drainage (AMD), with the consequent dissolution of heavy metals

This study aims to develop a proposal for the chemical treatment by neutralization-precipitation inside the mine Santa Fe. After chemical characterization and sedimentation tests determined settler design using one of the galleries and exploited.

The sludge will be disposed in open pits sequentially treated by a solidification process that will provide physical stability and sludge stability to the gallery.

KEYWORDS: heavy metals, acid water, neutralization-precipitation.

RESUMEN

Como consecuencia de la intensa actividad minera que se ha llevado a cabo en Bolivia durante todos estos años se han producido enormes problemas de contaminación ambiental. Uno de los problemas más importantes ocasionados es la acidificación de las aguas, constituyendo el llamado drenaje ácido de minas (DAM), con la consecuente disolución de metales pesados

Este estudio pretende desarrollar una propuesta para el tratamiento físico-químico por neutralización-precipitación en interior de la mina Santa Fe. Después de la

caracterización química y las pruebas de sedimentación se determina el diseño del sedimentador utilizando una de las galerías ya explotada.

Los lodos serán dispuestos en tajos abiertos de manera secuencial tratados mediante un proceso de solidificación que dotará de estabilidad física a los lodos y de mayor estabilidad a la galería.

PALABRAS CLAVE: metales pesados, aguas acidas, neutralización-precipitación.

1. Introducción

En Bolivia las actividades mineras se desarrollan desde la etapa colonial en diversas áreas como Catavi, Milluni, Viloco, Caracoles, Machacamarca, Japo, Morococala, Santa Fé, San José, El Cerro Rico de Potosí, etc., en donde los residuos mineros producen serias afecciones medioambientales (Salvarredy-Aranguren, 2008) (Figura 1.1).

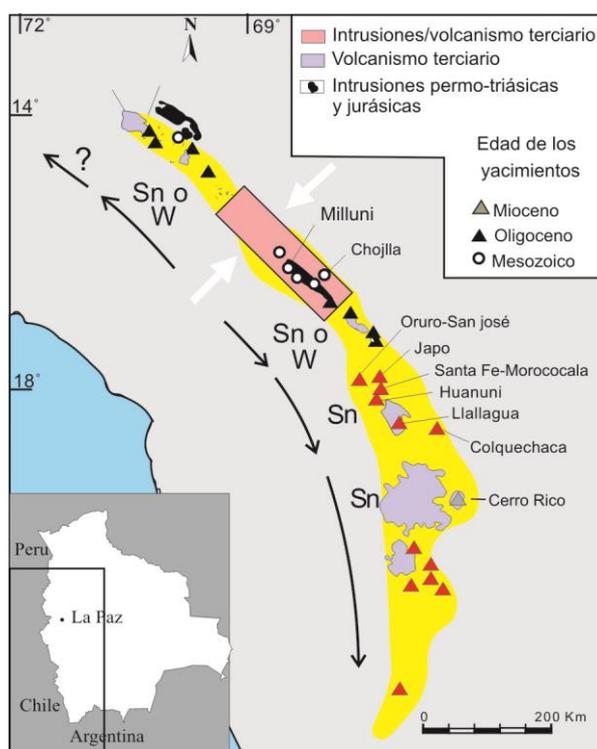


Figura 1.1 Situación de la mina de Santa Fe.

El estudio se realiza en la mina Santa Fe situada en la provincia de Dalence, municipio de Villa Huanuni (Primera sección) cantón Morococala del departamento de Oruro. Se explotan minerales de plata, aluminio, zinc y estaño. La explotación se efectúa en los niveles +26, 0, -26, -50. El estudio se realiza para desaguar los niveles -75 y -108 para su explotación.

Uno de los problemas que se debe destacar es la presencia de aguas ácidas. Estas pueden tener un origen variado. La acidez se origina al poner en contacto los sulfuros, de origen mineral en rocas encajantes o grandes mineralizaciones, que se oxidan en presencia de oxígeno y agua. El principal mineral sulfuroso que origina acidez es la pirita.

La acidificación de las aguas origina la disolución de los minerales que contiene la formación con alto contenido en metales pesados tales como plomo, mercurio, cadmio, arsénico y cromo. Todo ello tiene como consecuencia que se genera contaminación de las aguas subterráneas y superficiales afectando ríos y lagos. Los cursos fluviales ejercen la mayor influencia en la deposición y la redistribución de estas partículas pesadas en los ecosistemas circundantes (Vaněk et al., 2008). La corrosión generada por la AMD origina muchos problemas en los sistemas de bombeo para su posterior tratamiento es por esto que el objetivo principal es el diseño de un tanque sedimentador en el interior de mina

El principal objetivo del estudio es realizar una propuesta de tratamiento Físico-Químico, mediante neutralización-precipitación de las aguas ácidas de la mina Santa Fe utilizando una metodología simple y económica, asumible para el sector cooperativizado.

2. Procedimiento Experimental

Previo a los análisis se tomaron 20 litros de agua ácida en el interior de la mina Santa Fe, directamente del pozo de entrada con el “Guinche”. Utilizando esta muestra de agua durante todo el procedimiento se realizaron los ensayos que se especifican posteriormente por duplicado para verificar resultados. Previo a las pruebas de neutralización y sedimentación se realizó un estudio físico-químico.

2.1 Pruebas Discontinua de Neutralización – Precipitación

Los ensayos de neutralización-precipitación se realizaron con agitación mecánica y un volumen de 500 ml de muestra (Figura 2.1). El procedimiento utilizado fue añadir 0,1g de cal (CaO) y esperar hasta la estabilización del pH. Una vez el pH estuviera estabilizado volver a añadir 0,1g de cal. Esta operación se repitió hasta alcanzar un valor de pH próximo a 12.

Figura 2.1. Equipo utilizado para las pruebas de neutralización-precipitación



Como agente de neutralización se empleó cal comercial que presenta una pureza del 62,35% de óxido de calcio (CaO).

2.3 Curva de Sedimentación

Para determinar los parámetros referidos a la decantabilidad del producto precipitado, que serán necesarios para el diseño y dimensionado del tanque de sedimentación en interior de mina, se realizan columnas de sedimentación utilizando varias cantidades de floculante. Se realizaron tres ensayos variando la cantidad de floculante. En el primer caso no se añadió floculante, en el segundo 5 ml y en el tercer caso 10ml.

2.4 Pruebas estáticas de Neutralización – Precipitación

El objeto principal de este apartado es observar, en un ambiente casi sin corriente, como evoluciona el pH al introducir el elemento neutralizador a diferentes alturas.

2.4.1. Utilizando cal en polvo como elemento neutralizador

Primero se realizaron las pruebas con cal en polvo vertida en la superficie e introducida a la mitad de la columna dosificando poco a poco.

2.4.2. Utilizando lechada de cal como elemento neutralizador

Las características de la lechada utilizada son:

$$\text{pH} = 11,50 / \text{Concentración} = 2\text{g de cal/l}$$

Se midió el valor de pH en superficie introduciendo la lechada desde la parte inferior de la columna. Se realizó una variante del anterior método manteniendo las características de la lechada y la medición de pH pero introduciendo la lechada desde el punto medio de la columna.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización Físico – Química de las Aguas Ácidas de Mina

Para la caracterización físico-química del agua ácida se tomaron los valores de pH, sólidos disueltos y conductividad mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados de los análisis físico-químicos.

Parámetro	Límite de Detección	Valor
pH	± 0,01	3,22
Sólidos disueltos	± 5 ppm	< 5 ppm
Conductividad	± 1 µS/cm	2.680 µS/cm
Densidad	-	1,015 g/mL

Los resultados de los análisis químicos de metales pesados de la muestra de agua ácida de la mina Santa Fe se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de los análisis químicos de metales pesados.

Elemento	Límite de detección	Valor en muestra
S	0,500	663,866
Mn	0,002	3,666
Fe	0,010	165,003
Co	0,002	0,039
Cu	0,020	0,045
Zn	0,100	29,946
Pb	0,002	0,048

3.2 Pruebas Discontinua de Neutralización – Precipitación

Los valores mostrados en la tabla 3.3 fueron los obtenidos en los dos ensayos. Estos valores son los que se utilizaron para realizar la curva de neutralización que se muestra en la figura 3.1.

Tabla 3.3. Valores utilizados para la realización de la curva de neutralización

	1r ensayo	2o ensayo
Peso cal (g)	pH	pH
0	3,22	3,23
0,1	3,59	3,65
0,2	6,01	6,03
0,3	9,77	10,05
0,4	10,46	10,5
0,5	11,42	11,2
0,6	11,74	11,74
0,7	11,89	11,91
0,8	12,01	12

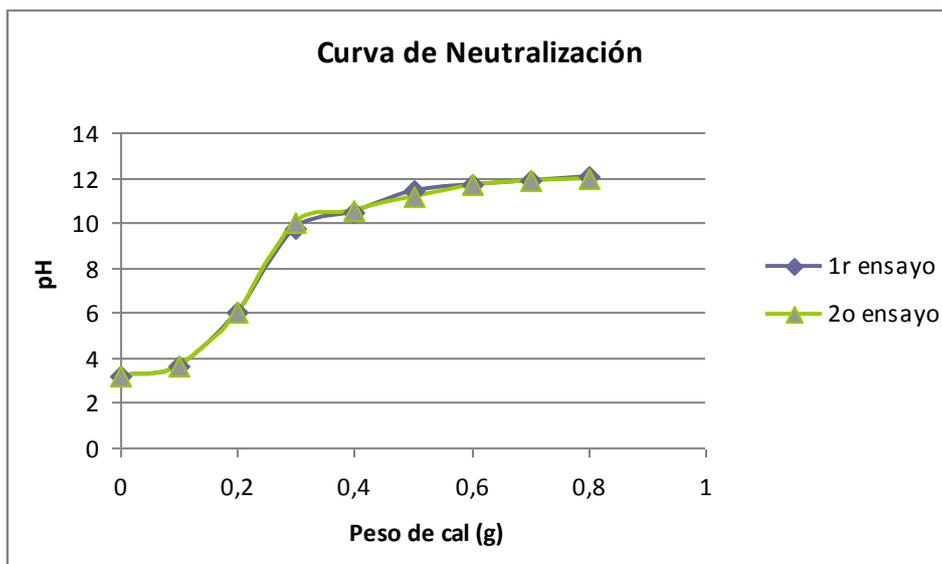


Figura 3.1. Curva de Neutralización

Para el cumplimiento de la normativa ambiental boliviana vigente el valor del pH de descarga debe ser entre 6 y 9. Observando en la gráfica se obtiene un peso de entre 0,2 y 0,3g de cal por cada 500ml, de lo que se deduce que serán necesarios de 0,4 a 0,6g de cal por litro de agua a tratar.

3.3 Curva de Sedimentación

Primero se realizó un ensayo con 5ml de floculante y el segundo ensayo se realizó tomando 10ml de floculante obteniendo los resultados representados en la figura 3.2.

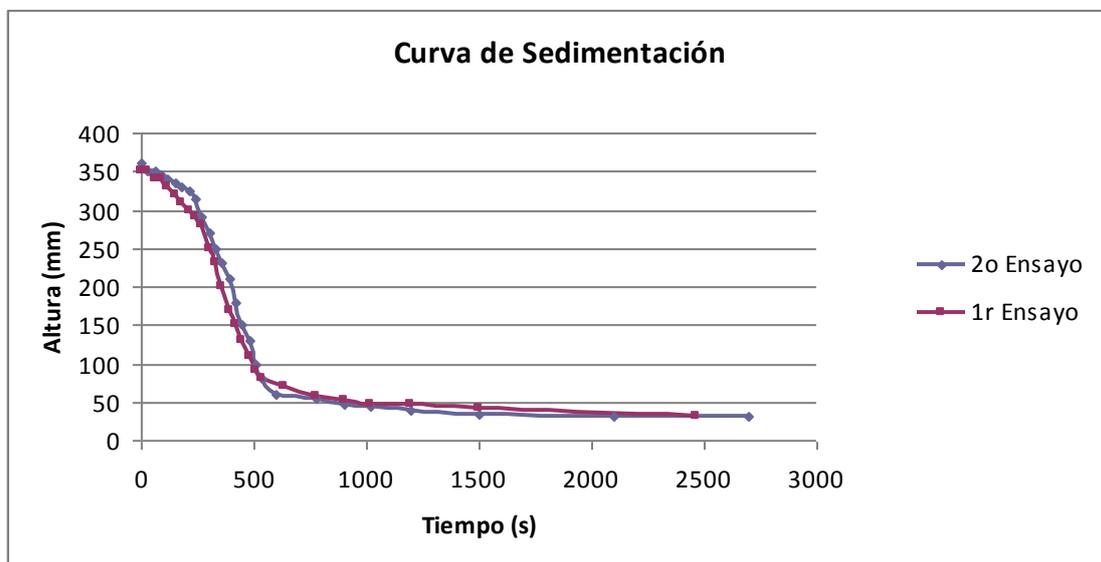


Figura 3.2. Curvas de Sedimentación

Se realizó un ensayo preliminar sin el uso de floculante pero el tiempo de decantación fue muy elevado y lo desestimamos.

Observando la figura 3.2 es posible determinar que el tiempo de sedimentación necesario con el uso de floculante es de unos 10 minutos.

3.4 Pruebas estáticas de Neutralización – Precipitación

3.4.1. Utilizando cal en polvo como elemento neutralizador

El primer caso no dio resultado puesto que la cal no se disolvía en un tiempo aceptable.

Como muestra la tabla 6 en el segundo caso se necesita 8 minutos para llegar a un pH de 6 en la parte inferior de la probeta y 7,20 en la parte superior. Una vez estabilizado, el pH de la muestra es de 11,61.

Tabla 3.4. Resultados de las pruebas estáticas de Neutralización – Precipitación utilizando cal en polvo.

t(s)	pH
0	3,32
30	3,32
60	3,32
90	3,32
120	3,44
150	3,47
180	3,53
210	3,54
240	3,55
270	3,56
300	3,54
330	3,64
360	3,75
390	3,99
420	4,58
450	5,6
480	6

3.4.2. Utilizando lechada de cal como elemento neutralizador

Vemos que introduciendo la lechada desde el fondo el tiempo requerido para obtener un pH de 6 en la parte superior es de 10 minutos. El método que emplea menos tiempo es el de introducir la lechada desde el medio con un tiempo de 7 minutos.

Tabla 3.5. Resultados de las pruebas estáticas de Neutralización – Precipitación utilizando lechada desde el fondo.

mL	t (s)	pH
0	0	3,24
25	30	3,3
50	60	3,4
75	90	3,45
100	120	3,65
100	150	3,69
110	180	3,69
150	210	4,15
170	240	4,86
180	270	5,4
200	300	5,37
210	330	5,13
220	360	5,03
250	390	4,88
260	420	4,72
270	450	5,32
280	480	5,6
290	510	5,79
300	540	5,89
310	570	5,96
320	600	6,02

Tabla 3.6. Resultados de las pruebas estáticas de Neutralización – Precipitación utilizando lechada desde el medio.

mL	t (s)	pH
0	0	3,39
10	30	3,35
50	60	3,49
70	90	3,52
100	120	3,6
140	150	3,61
170	180	4
200	210	4,66
230	240	4,76
260	270	4,58
290	300	4,57

320	330	4,64
350	360	5,5
380	390	5,74
410	420	6

4. Propuesta de Tratamiento para la evacuación de las aguas ácidas hasta el nivel -75.

Para la construcción del equipamiento para el tratamiento de aguas ácidas en interior de mina es necesario evacuar el agua hasta el nivel -75. Para ello se diseñará un proceso temporal con la finalidad de que el agua de descarga cumpla con la normativa vigente.

4.1 Diseño Conceptual

En trabajos previos se adaptó uno de los tramos de galería sellándolo y adaptándolo para que cumpliera la función de un tanque de sedimentación. Según los planos proporcionados los datos y dimensionamiento de dicho depósito son:

Tabla 4.1. Caracterización del tanque de sedimentación.

Nivel	-42 m
Anchura	1,8 m
Altura	2 m
Longitud	23 m
Volumen	82,8 m ³

Por la dimensiones del tanque se dispone de un volumen de 82,8 m³ a un caudal de 61,5 L/s esto corresponde a un tiempo de llenado de 23 minutos.

Las aguas ácidas de minas serán tratadas con la adición manual de cal y en períodos establecidos. Dichas cantidades estarán reguladas según el diseño. Para asegurar una correcta homogenización cal-agua la adición de cal se realizará en el corriente de entrada al sedimentador.

En el lado opuesto a la entrada y a una altura aproximada de 1.6m se realizará la descarga de agua neutralizada hacia la superficie. En este mismo lado pero por la parte inferior se realizará la descarga de los lodos decantados de forma intermitente. Los lodos serán reenviados a la zona inundada donde se redisolverán.

a) **Volumen de Agua Ácida de Mina a Tratarse y Dosificación de Cal**

Teniendo en cuenta un caudal de 61,5 L/seg el volumen de agua a tratar diario será de **5313,6 m³**.

Mediante las pruebas experimentales desarrolladas podemos determinar el consumo de cal en función del pH del efluente de descarga como muestra la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Concentración de cal (g/L); dosificación de cal (kg/día) y pH de descarga para el tratamiento de las aguas ácidas a un caudal de 61,5 L/seg.

Cal (g/L)	Dosificación cal por día (kg/día)	pH
0	0.00	3.23
0.2	1062.72	3.62
0.4	2125.44	6.02
0.6	3188.16	9.91
0.8	4250.88	10.48
1	5313.60	11.31
1.2	6376.32	11.74
1.4	7439.04	11.90
1.6	8501.76	12.01

Teniendo en cuenta las pruebas estáticas realizadas en el laboratorio y la curva de sedimentación el consumo de cal mínimo debe ser de 0,6 gramos por litro de agua ácida. Esto corresponde a un consumo diario aproximado de **3200Kg** de cal.

La dosificación de cal se realizaría mediante un pequeño depósito de cal situado justo en la entrada al sedimentador. Este depósito mediante una apertura inferior dosificaría la cantidad de cal. De esta forma la cal caería justo en corriente de entrada favoreciendo la mezcla. Dicho depósito de cal se rellenaría según los periodos establecidos.

b) **Tratamiento de los lodos generados.**

El tanque está provisto de una zona inferior donde se acumularían los lodos generados, estos serán bombeados de forma intermitente hacia el fondo del cuadro. De esta forma se redisoverían los lodos.

Según el caudal a tratar la cantidad de lodos generada diariamente será de **5313,6 Kg**.

5. Propuesta de Tratamiento de las Aguas Ácidas en Interior Mina

Desaguado hasta el nivel -75 el bombeo correría a cargo de la cooperativa. Actualmente la cooperativa dispone de dos bombas. Una bomba sumergible de 30 Hp situada aproximadamente en el nivel -70. Dicha bomba realiza el desagüe del cuadro de mina para, posteriormente, una bomba estacionaria situada en el nivel -42 lograr el desagüe hasta el nivel de bocamina.

Según los estudios realizados de desagüe es necesario implementar el equipo hasta lograr un caudal de descarga de 80L/seg para lograr llegar al nivel -108 donde se ubican las principales reservas de la mina. Esto implica que diariamente se tratará un volumen de agua ácida de 6912 m³.

5.1 Diseño Conceptual

Para el proceso de neutralización-precipitación es necesaria la adecuación de un tramo de galería. Para ello podría adecuarse una de las galerías situadas en el nivel -75 para dicho tratamiento. Las características de la galería se encuentran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Características de la galería donde se ubicará el tanque de sedimentación.

Nivel	-75 m
Anchura	1,8 m
Altura	2 m
Longitud	150 m
Volumen	540 m ³

Según el dimensionamiento se obtendrá un volumen de 540 m³ lo que implica un tiempo de llenado de 2 horas aproximadamente, a un caudal de 80L/seg.

Las aguas ácidas que inundan el cuadro serán tratadas con la adición de lechada de cal. Para la preparación de esta se acondicionará un pequeño reactor donde se adicionará cal de forma manual y el agua utilizada provendrá de una pequeña recirculación de las aguas tratadas. La cinética de la reacción de neutralización-precipitación, será favorecida por la mezcla generada por la bomba y que se bombeará hasta la galería sellada.

La función de esta galería sellada será la de sedimentar los lodos formados por la reacción de neutralización-precipitación. Para favorecer la sedimentación de estos se colocarán en el interior de la galería unas placas inclinadas con la finalidad de generar más superficie de sedimentación, de esta forma se reducirá el tiempo de sedimentación y obtendrá un rebose de agua clara desaguada en régimen continuo al exterior.

Por otra parte, los lodos formados y decantados en la galería sellada, se bombearán de manera intermitente y serán dispuestos en rajos abiertos de manera secuencial. Estos lodos serán tratados mediante un proceso de solidificación que permitirá el sellado de los rajos en retirada aportando estabilidad física a los lodos y dotar de mayor estabilidad a la galería.

Una pequeña fracción los lodos, será enviada al sector del cuadro, a objeto de simular el método de formación de “lodos de alta densidad”. Aprovechando que en el lugar se haya la construcción de un depósito exterior y sus respectivas canalizaciones, el agua bombeada será conducida al depósito creando un reservorio de agua provisto para ocasiones de sequía.



Fig. 5.1 Depósito donde se almacenaría el agua bombeada.

5.2 Tratamiento de las Aguas Ácidas en Interior Mina

a) Volumen de Agua Ácida de Mina a Tratarse y Dosificación de Cal

Se tiene planificado llevar adelante un desagüe a un ritmo de 80 L/seg; es decir se deberán tratar **6912 m³**. En base a las pruebas experimentales desarrolladas, es posible determinar el consumo de cal en función del pH del efluente de descarga. Dicha información se presenta en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Concentración de cal (g/l); dosificación de cal (Kg/día) y pH de descarga para el tratamiento de las aguas ácidas de Santa Fe a un caudal de 80 L/seg

Cal (g/L)	Dosificación cal por día (kg/día)	pH
0	0.00	3.23
0.2	1382.40	3.62
0.4	2764.80	6.02
0.6	4147.20	9.91
0.8	5529.60	10.48
1	6912.00	11.31
1.2	8294.40	11.74
1.4	9676.80	11.90
1.6	11059.20	12.01

Para cumplir con la normativa ambiental de descarga, el pH de las aguas de descarga debe estar por encima de 6 por lo que el consumo de cal mínimo será de **0,6 gramos de cal por litro de agua ácida tratada**. Por lo tanto se requerirán **4150 kg de cal por día**.

La dosificación requerida en el pequeño reactor puede realizarse añadiendo 175 kg de cal por hora. Posteriormente la lechada será vertida al interior del cuadro mediante una manguera introducida unos 20 metros por debajo del nivel de succión de la bomba.

Las corrientes generadas en la succión generaran un contacto suficiente para que la cal pueda reaccionar y se lleve a cabo la neutralización.

b) Sedimentación de los Lodos en la Galería Sellada

El agua tratada en el cuadro será bombeada a la galería sellada. Una vez allí los lodos generados por la precipitación de los metales pesados se sedimentarán en el fondo de dicha galería. Para ello se adecuará la galería dotándola de un sistema de separación en contracorriente laminado.

Según las gráficas de sedimentación que se encuentran en apartados anteriores el tiempo necesario para la sedimentación será de 8 minutos utilizando floculante. Sin embargo se deberán realizar pruebas en la galería para determinar si será necesario el uso de floculante.

El bombeo de agua clara se realizará por la zona de rebose y será enviada a la superficie donde se desviará una pequeña parte al depósito.

6. BIBLIOGRAFÍA

Nordstrom, D.K., and Alpers, C.N. (1999). Geochemistry of Acid Mine Waters. In: The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques and Health Issues (Eds.: Plumlee, G.S., and M.J. Logsdon). Reviews in Economic Geology Vol 6A. *Society of Economic Geologists, Inc.*

Salvarredy-Aranguren, M.M., et al. (2008). Contamination of surface waters by mining wastes in the Milluni Valley (Cordillera Real, Bolivia): Mineralogical and hydrological influences. *Appl. Geochem.* 23, 1299-1324.

Vaněk, A., et al. (2008). Combined Chemical and Mineralogical Evidence for Heavy Metal Binding in Mining- and Smelting-Affected Alluvial Soils. *Pedosphere*, 18, 464-478, 2008.

