

# Estudio técnico, económico y ambiental del tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José

**Gerardo Zamora Echenique**

Docente de la Carrera de Metalurgia – Universidad Técnica de Oruro

Ciudad Universitaria, Edificio Metalurgia

Oruro - Bolivia

gerardozamoraechenique@yahoo.es

## Resumen

El drenaje ácido generado en el interior de la mina San José, con valores de pH de 1.2 – 2.5, es bombeado al exterior con un caudal de 8 m<sup>3</sup>/s, con el fin de mantener accesibles los niveles más profundos para la explotación minera; atraviesa parte de la ciudad de Oruro, y finalmente desemboca gradualmente en el lago Uru Uru, generando un fuerte impacto ambiental por la elevada carga de metales pesados tóxicos disueltos. La carga de metales disueltos anual es de: 11,595 Kg de sólidos disueltos; 1 Kg de Cd; 11 Kg de Cu; 761 Kg de Fe; 14 Kg de Pb; 13 Kg de As; 0,3 Kg de Sb y 22 Kg de Zn.

En el presente trabajo de investigación, se estudiaron cuatro alternativas de tratamiento de estas aguas ácidas a escala de laboratorio y planta piloto.

De los resultados de la valoración técnica, económica, ambiental y social, se concluye que “la mejor alternativa para el tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José es por neutralización – precipitación con cal y separación sólido-líquido en interior mina”.

**Palabras clave:** Medio ambiente, drenaje ácido, tratamiento de aguas ácidas.

## Technical, economic and environmental study of the treatment of acidic waters of the San Jose mine

### Abstract

The acid drainage generated inside the San Jose mine, has pH values of 1.2 - 2.5. It is pumped out at a rate of 8 m<sup>3</sup>/s, in order to keep available the deeper levels for mining operation; it flows through part of the city of Oruro and then gradually flows into Lake UruUru, generating a strong environmental impact because of the high charge of toxic heavy metals dissolved. The annual charge of dissolved metals is: 11,595 kg dissolved solids, 1 kg of Cd, 11 kg of Cu, 761 kg of Fe, 14 kg of Pb, 13 kg of As, 0.3 kg of Sb and 22 kg of Zn.

In this investigation, four alternatives for the treatment of these acidic waters were studied at laboratory scale and at pilot plant scale.

From the results of the technical, economic, environmental and social assessment, it was concluded that “the best alternative for the treatment of acid waters of the San Jose mine is by neutralization - precipitation with lime and solid - liquid separation inside the mine.”

**Keywords:** Environment, acid drainage, treatment of acidic waters.

# Estudo técnico, econômico e ambiental do tratamento das águas ácidas da mina San José

## Resumo

A drenagem ácida gerada no interior da mina de San José, com valores de pH de 1.2 - 2.5, é bombeada para fora a uma taxa de 8 m<sup>3</sup>/s, a fim de manter acessíveis os níveis mais profundos para a operação mineira; atravessa parte da cidade de Oruro e finalmente flui gradualmente no lago Uru Uru, gerando um forte impacto ambiental pela alta carga de metais pesados tóxicos dissolvidos. A taxa anual de metais dissolvidos é: 11.595 kg de sólidos dissolvidos, 1 kg de Cd, 11 kg de Cu, 761 kg de Fe, 14 kg de Pb, 13 kg de As, 0.3 kg de Sb e 22 kg de Zn.

Na presente investigação, quatro alternativas para o tratamento dessas águas ácidas foram estudadas em escala de laboratório e de planta piloto.

A partir dos resultados da avaliação técnica, econômica, ambiental e social, se concluiu que “a melhor alternativa para o tratamento de águas ácidas da mina San José é de neutralização - precipitação com cal e separação sólido - líquido no interior da mina.”

**Palavras chave:** meio ambiente, drenagem ácida, tratamento das águas ácidas.

## 1. Introducción

La mina San José está ubicada en la ciudad de Oruro, en la provincia Cercado del departamento de Oruro-Bolivia. La mina está situada dentro de una cadena de colinas bajas dominadas por el cerro San Felipe (elevación de 4,032 m.s.n.m.). El cerro San Felipe se eleva aproximadamente 300 m por encima de la zona altiplánica que rodea a la ciudad de Oruro.

La presencia de sulfuros en el interior de la mina, que al ponerse en contacto con el agua de infiltración y el oxígeno del aire de los socavones, generan las condiciones óptimas para la formación de drenaje ácido de mina; que se caracteriza por su elevada acidez, presencia de metales pesados tóxicos disueltos y sulfato.

El drenaje ácido generado en el interior de la mina, con valores de pH fuertemente ácidos de 1.2 – 2.5, es bombeado a 8 l/s con el fin de mantener accesibles los niveles más profundos para la explotación por parte de más de 1,000 trabajadores de tres cooperativas mineras, y sin ningún tratamiento, es vertida al medio ambiente; en principio, atravesando parte de la ciudad de Oruro, y finalmente desembocando gradualmente en el lago Uru-Uru; generando así un fuerte impacto ambiental por la elevada carga de metales pesados tóxicos disueltos.

La carga de metales disueltos en las aguas ácidas de la mina San José en kg/año, es mostrada en la siguiente tabla, que muestra los principales contaminantes que se evacúan de la mina y generan un fuerte impacto ambiental al blanco de descarga: “el lago Uru Uru”.

**Tabla 1.** Carga de metales pesados que se descargan al medio ambiente de la Mina San José.

Parámetro	mg/l	Kg/año
pH	1.2	
Sólidos Disueltos	50,541	11,595
Cadmio	4.7	1
Cobre	47.63	11
Fierro Soluble	3,315.1	761
Plomo	61.71	14
Antimonio	1.42	0.3
Arsénico	57.69	13
Zinc	95.18	22

## 2. Objetivo

El objetivo del presente estudio se circunscribió a estudiar técnica, económica, ambiental y socialmente, las alternativas de tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José a partir de pruebas a escala de laboratorio y planta piloto, para su posible aplicación a escala industrial

## 3. Estudio de alternativas de tratamiento

Las alternativas de tratamiento estudiadas fueron:

- Tratamiento de las aguas ácidas de mina por evaporación - cristalización.

- Tratamiento físico-químico activo por Neutralización – Precipitación con cal y separación sólido-líquido, en superficie.
- Tratamiento en sistemas reductores y productores de alcalinidad (principio de Drenes de Caliza Anóxico o ALD).
- Tratamiento de las aguas ácidas activo por Neutralización – Precipitación con cal y separación sólido-líquido, en interior mina.

El análisis y la evaluación de las alternativas de tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José arriba mencionadas, tuvieron por objeto establecer las ventajas y desventajas técnicas, económicas y ambientales, para recomendar la aplicación de una de éstas; para finalmente, en función a la propuesta elegida, se presente el estudio a diseño final de la misma.

La primera alternativa estudiada, fue la del **tratamiento de las aguas ácidas de mina por evaporación - cristalización**.

La aplicación técnica de ésta alternativa, se basa en las condiciones climáticas imperantes (balance entre evaporación y precipitación) en la ciudad de Oruro, que son favorables para tratar el agua ácida de la mina San José mediante evaporación - cristalización.

Se desarrollaron pruebas a nivel laboratorio y en pozas de evaporación - cristalización a nivel piloto. Los resultados obtenidos demuestran que los productos de cristalización obtenidos fueron:

- Sulfatos de baja solubilidad: cristales aciculares de yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y precipitados pulverulentos de anglesita  $\text{PbSO}_4$ , cuando se tiene una concentración de plomo mayor a 25 mg/l.
- Precipitados ferruginosos de color ocre amarillento: costras y geles de jarosita  $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , hidroniojarosita  $\text{H}_2\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{OH})_7$ , natrojarosita  $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , goethita  $\alpha\text{-FeOOH}$ , pequeñas cantidades de  $\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot 7\text{ClO}_3$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .
- Cristales cúbicos de cloruro de sodio  $\text{NaCl}$ .

Mediante un balance hídrico, en el cual se consideran también la precipitación y el caudal promedio de bombeo de agua ácida, se obtiene que el área necesaria para la evaporación de los 7.97 l/s, en promedio de agua ácida, es de 44.22 Ha.

En las zonas circundantes a la mina San José, no existe dicha disponibilidad de área requerida; por lo que se buscó en otras zonas que puedan apropiarse para desarrollar la evaporación-cristalización de dichas aguas ácidas. La mejor opción se encuentra en la zona de Itos, donde se dispone de un área disponible de superficie menor a la requerida por el diseño,

que alcanza a 16.61 Ha; por lo que, tendría una capacidad para evaporar eficientemente un caudal anual de 93,286.08  $\text{m}^3$  o 2.95 l/s. Por tanto, de aplicarse este proceso, sería necesario implementar medidas que ayuden a reducir el caudal actual al mínimo.

La vida útil de la piscina sería de 25 años, y considerando que al cabo de este tiempo la piscina estará colmatada con precipitados, y se podrá proceder al cierre aplicando una cobertura de material impermeable.

Desde el punto de vista económico, la propuesta requiere de un costo de inversión de 3'555,006.74 \$us; un costo variable total anual de 58,686.51 \$us; y costos administrativos anuales de: 10,563.60 \$us.

Desde el punto de vista ambiental, se presentarían los problemas siguientes:

- Los productos de precipitación son altamente solubles y tóxicos.
- Al finalizar la vida útil del área de disposición (25 años), se requeriría realizar un plan de cierre costoso.
- La laguna de evaporación – cristalización se constituiría en un riesgo potencial para los transeúntes del sector y las aves que aterricen en su espejo de agua.

La segunda alternativa estudiada, fue la del **tratamiento físico-químico activo por neutralización – precipitación con cal y separación sólido-líquido, en superficie**.

Para una descarga del agua ácida de mina tratada, y en aplicación a la normativa ambiental boliviana para descargas líquidas, experimentalmente se determinó que sería necesaria la adición de 8.5 a 11 gramos de cal por litro de agua ácida de la mina San José; alcanzando un pH del efluente de descarga de entre 6.0 y 7.0.

La concentración de metales disueltos en el efluente del tratamiento a pH de 6.7, cumple para la mayoría de los metales pesados disueltos con los límites máximos permisibles de descarga establecidos en el anexo 2 del Reglamento en materia de Contaminación Hídrica de la Normativa Ambiental Boliviana.

Es necesario llevar adelante un proceso de oxidación del  $\text{Fe}^{+2}$  del agua ácida de la mina tratada a objeto de que no se produzca la redisolución de los metales pesados ya precipitados por la generación de acidez producida por la reacción de oxidación posterior.

El tratamiento bajo el principio de lodos de alta densidad, es el más conveniente para el tratamiento de las aguas ácidas por su elevada acidez y elevada presencia de metales pesados.

Las pruebas de toxicidad y su comparación con los valores de

concentración máximos permisibles establecidos en la normativa 40 CFR 261.30 (EPA 1312) de los lodos obtenidos después del tratamiento con cal, demuestran que se trata de residuos que “**no son estables químicamente**”; por lo que, su deposición final requiere de medidas ambientales.

En la zona de San José, no existen los espacios necesarios para acopiar el tratamiento sencillo que se diseñó para tratar las aguas ácidas de la bocamina de Japo - Oruro.

A partir del balance de caudales mostrado, las dimensiones de los reactores necesarios fueron los siguientes:

Reactor de mezcla:

Volumen	4.9 m <sup>3</sup>
Altura	3 m
Diámetro	1.4 m

Reactor de cal:

Volumen	18 m <sup>3</sup>
Altura	3.5 m
Diámetro	2.6 m

Clarificador:

Volumen	13.3 m <sup>3</sup>
Altura	3 m
Diámetro	4.09 m.

Desde el punto de vista económico, la propuesta requiere de un costo de inversión de 518,504.45 \$us; un costo variable total anual de 820,731.19 \$us; y finalmente costos administrativos anuales de 147,731.61 \$us.

Desde el punto de vista ambiental, se presentarían los problemas siguientes:

- Los productos de precipitación no son estables químicamente, por lo que se requiere un sitio adecuado de disposición final
- Al finalizar la vida útil, dicho sitio requerirá de un proceso ambiental de cierre.

La tercera alternativa estudiada, fue la del **tratamiento en sistemas reductores y productores de alcalinidad** (principio de Drenes de Caliza Anóxico o ALD).

Los resultados de la caracterización físico-química de las aguas ácidas de la mina San José, en términos de los parámetros que podrían limitar la aplicabilidad del sistema ALD presentados en la literatura, se muestran en la tabla 2.

La concentración de oxígeno disuelto es de 1.48 ppm; siendo el límite de aplicabilidad del método < a 2 ppm. Por tanto, el pH de las aguas ácidas de la mina San José es “demasiado ácido”; además de que, la concentración de sulfato está “muy por

encima” de los valores limitantes para la aplicación del sistema ALD.

**Tabla 2.** Caracterización físico-química de las aguas ácidas de la mina San José.

Parámetro	Agua ácida de mina	Límite de Aplicabilidad Proceso ALD (mg/l)
pH	1.2	> 4.5
Hierro total Fe <sup>+3</sup>	3,315.09 6.03	1
Sulfato	16,411	2,000

Para determinar la cantidad de alcalinidad generada por las aguas ácidas de la mina San José bajo condiciones de Dren Anaeróbico Calizo, se realizaron pruebas de laboratorio. Los resultados obtenidos, permiten concluir que:

- Después de las primeras 48 horas de contacto de las aguas ácidas en el dren calizo bajo condiciones anóxicas, la alcalinidad subió hasta 132 mg/l.
- En los lapsos posteriores de 48 hrs, la alcalinidad comenzó a bajar notoriamente; luego a 72; 12 y 6 mg/l, a 96; 144 y 192 horas, respectivamente. Esto quiere decir que, el Dren Calizo comienza a “bloquearse” a medida que transcurre el tiempo.

La explicación a este comportamiento, puede deberse a la intensa formación de CaSO<sub>4</sub> que precipita y cubre la superficie de la caliza.

Por otra parte, se notó una fuerte disminución del tamaño de las partículas de caliza que se introdujeron. Por lo expuesto, se puede concluir que la aplicación de un “Dren Calizo Anóxico” para el tratamiento industrial de las aguas ácidas de la mina San José, generaría:

- En corto tiempo, el recubrimiento de su superficie por el elevado contenido de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> presente en las aguas que reaccionan con el Ca<sup>+2</sup> generado por la reacción de las aguas ácidas con la caliza.
- Se puede predecir un “arrastre” del dren calizo colocado en la fosa de tratamiento; puesto que, se comprobó una disminución del tamaño de las rocas introducidas

Aunque se demostraron problemas técnicos en la posible aplicación del dren calizo anóxico, se procedió al diseño y dimensionamiento del mismo, a objeto de tener referencias en cuanto a sus costos de aplicación.

La cantidad total de caliza, es de 2,347.7 toneladas. Por tanto, las dimensiones de lecho para el Dren Calizo Anóxico, serán de:

Profundidad:	2 metros
Ancho:	12 metros
Largo.	61,1 metros
Relación largo:ancho	5.09 : 1

Desde el punto de vista de los costos, esta alternativa requeriría una inversión de **324,052.6 \$us** para su aplicación.

Sin embargo, nuevamente se debe resaltar que su aplicación técnica es “limitada” para el caso de las aguas ácidas de la mina San José.

Finalmente, la última alternativa estudiada, fue la del **tratamiento de las aguas ácidas activo por Neutralización – Precipitación con cal y separación sólido-líquido, en interior mina.**

Pruebas a pequeña escala e industriales, han sido desarrolladas en la mina Santa Fe. Un estanque de 82,8 m<sup>3</sup> construido en el interior de la mina, permitió tratar un caudal de 61,5 litros por segundo; correspondiendo un tiempo de residencia de 23 minutos.

Para asegurar una correcta homogenización cal-agua, la adición de cal se realizó en la corriente de entrada del estanque sellado. En el lado opuesto a la entrada y a una altura aproximada de 1.6 m, se realizó la descarga de agua neutralizada hacia la superficie. En este mismo lado, pero por la parte inferior, se realizó la descarga de los lodos decantados de forma intermitente. Los lodos fueron luego enviados a parajes abandonados aprovechando la gravedad.

Por otra, las aguas tratadas con un pH de 6, bombeadas al exterior desde la “galería sellada”, pueden ser posteriormente recolectadas en un reservorio en la superficie, podrían ser utilizadas para riego en las épocas de estiaje.

Para el caso de la mina San José, se tiene planificado llevar adelante un desagüe a un ritmo de 8 lt/seg; es decir que por día se deben tratar 691.2 m<sup>3</sup>. Por tanto, para cumplir con la normativa ambiental de descarga, el efluente del tratamiento de las aguas ácidas de la bocamina San José debe presentar un pH de 6.0; por lo que, el consumo de cal mínimo debe ser de 10 gramos por litro de agua ácida tratada. Es decir que, se requerirán de por lo menos 6,912 kilogramos de cal por día.

La galería elegida para el tratamiento mediante neutralización – precipitación con cal, se encuentra en el nivel -340 m, y tienen aproximadamente las siguientes dimensiones: largo: 105 m; ancho: 2,2 m; y finalmente, alto: 1,8 m, implica que permitirá tener un volumen de 415,8 m<sup>3</sup>.

Las aguas ácidas que son bombeadas de los cuadros inundados de la mina San José, serán en principio llevadas a dicha “galería sellada” y tratadas con la adición de cal la que será introducida en la zona de alimentación de la galería sellada.

Por otra parte, los lodos formados en la “galería sellada” y que han sido decantados, serán recolectados de manera intermitente y serán bombeados y dispuestos en rajos abiertos de manera secuencial. Los lodos serán tratados mediante un proceso de “solidificación por fraguado” que permitirá el sellado de los rajos en retirada. Una pequeña fracción los lodos, será enviada al sector del cuadro, a objeto de simular el método de formación de “lodos de alta densidad”.

Finalmente, las aguas tratadas con un pH de 6, serán bombeadas al exterior desde la “galería sellada”, para ser posteriormente recolectadas en un reservorio en la superficie; a objeto de que las mismas, puedan ser utilizadas para uso de en el campamento para baños, duchas y regado de jardines en la zona.

Se ha demostrado que la roca en el sector del proyecto tiene una **calidad buena** RQD (Rock Quality Designation) del 81%.

Se tiene un estanque antiguo de acumulación de aguas que en la actualidad está cerrado por que se encontrado una pequeña ramificación mineralizada, que ha permitido hacer un pequeño desarrollo de galería pero sin mayor éxito. Se estima que el RQD de la roca en este sector sea relativamente menor al del sector 1; por lo que, lo que los pilares y travesaños en los sectores de debilitamiento serán reforzados con marcos de madera (callapo eucalipto) de diámetro entre 6 y 8” a una distancia de cada 2 metros de acuerdo a la zona. Este puede ser utilizado también como estanque de tratamiento.

Desde el punto de vista económico, la propuesta requiere de un costo de inversión de 260,578.51 \$us; un costo variable total anual de 351,459.32 \$us; y costos administrativos anuales de 63,262.68 \$us.

#### **4. Análisis integral de valoración técnica, económica, ambiental y social de las alternativas de tratamiento propuestas**

Desde el punto de vista técnico se consideraron los aspectos referidos a la facilidad técnica y el tiempo de implementación; el grado de dificultad en el mantenimiento; los problemas en la operación; y finalmente, las posibles fallas del sistema.

Desde el punto de vista económico se consideraron los aspectos referidos a los costos de: inversión; operación; mantenimiento; cierre; y finalmente, costos administrativos.

Desde el punto de vista ambiental se consideraron los aspectos referidos a el manejo de los residuos sólidos generados; el re uso del agua tratada; la eficiencia de descontaminación de contaminantes tóxicos; los impactos posibles al medio

ambiente; y finalmente, la rehabilitación desde el punto de vista de la estabilidad física y química. Finalmente, desde el punto de vista social se consideraron los aspectos referidos a los beneficios positivos de la propuesta;

riesgo a las personas; los impactos futuros a la salud; las oportunidades de futuras fuentes de empleo; y finalmente, el grado de satisfacción de la propuesta. Los resultados del análisis arriba señalado, se presentan en la siguiente matriz:

**Tabla 3.** Matriz de evaluación de las alternativas estudiadas.

Alternativa	Aspectos Técnicos					Aspectos Económicos					Aspectos Ambientales					Aspectos Sociales								
	1	2	3	4	5	Pts	6	7	8	9	10	Pts	11	12	13	14	15	Pts	16	17	18	19	20	Pts
Alternativa 1: Evaporación - Cristalización	2	3	1	1	2	9	2	3	4	1	4	14	1	1	1	1	1	5	1	1	1	2	1	6
Alternativa 2: Precipitación-Neutralización	1	1	3	2	3	10	1	1	1	1	1	5	2	5	5	2	2	16	1	2	3	4	1	11
Alternativa 3: Dren Calizo Anóxico	5	5	1	3	1	15	4	4	5	4	5	22	4	2	3	3	5	17	2	5	5	2	3	17
Alternativa 4: Tratamiento Interior Mina	4	5	5	5	4	23	5	4	5	5	4	23	5	5	5	5	4	24	5	4	5	4	5	23
												escala de valoración del 1 al 5												
												5						1						
Aspectos Técnicos	1	Facilidad Técnica de Implementación					muy factible					poco factible												
	2	Tiempo de implementación					muy corto					muy largo												
	3	Grado de dificultad en el Mantenimiento					muy fácil					muy difícil												
	4	Problemas de operación					pocos problemas					muchos problemas												
	5	Posibles fallas del sistema					pocas fallas					muchas fallas												
Aspectos Económicos	6	Costos de Inversión					muy bajo					muy alto												
	7	Costos de Operación					muy bajo					muy alto												
	8	Costos de Mantenimiento					muy bajo					muy alto												
	9	Costos de Cierre					muy bajo					muy alto												
Aspectos Ambientales	10	Costos Administrativos					muy bajo					muy alto												
	11	Manejo de Residuos Generados					muy sencillo					muy complicado												
	12	Reuso de Agua Tratada					muy reusable					poco reusable												
	13	Eficiencia de descontaminación de tóxicos					muy buena					muy mala												
	14	Impactos posibles al Medio Ambiente					fuerte					bajo												
Aspectos Sociales	15	Rehabilitación (estab. Física y química)					fácil					difícil												
	16	Beneficios Positivos					altos					bajos												
	17	Riesgos a las personas					alto					bajo												
	18	Impactos futuros a la salud					alto					bajo												
	19	Oportunidades de Fuentes de Empleo					mayores					menores												
	20	Grado de Satisfacción con la Propuesta					alta					baja												

## 5. Conclusiones

De los resultados de la valoración técnica, económica, ambiental y social, se concluye que “la mejor alternativa para el tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José es por Neutralización – Precipitación con cal y separación sólido-líquido en interior mina”.

## 6. Referencias bibliográficas

- Mc CABE, W. L. y SMITH, J. C. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. Volumen II. Barcelona: Editorial Reverté, 1980.
- HABASHI, F. A *Textbook of Hydrometallurgy*. Metallurgie Extractive. Québec, Canadá.
- FOUST, A. S. et al. *Principios de Operaciones Unitarias*. México: Compañía Editorial Continental, S. A. 1998.
- PERRY, R. H., GREEN, D. W. y MALONEY, J. O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. USA: McGraw-Hill. 1999.
- BUTLER, J. N. *Ionic Equilibrium: A Mathematical Approach*. USA: Addison – Wesley, 1964.
- FISCHER, R. B. y PETERS, D. G. *Chemical Equilibrium*. USA: W. B. Saunders Company. 1970.
- ZAMORA, G. “Aplicación de Aguas Ácidas de Mina en Procesos de Lixiviación”. *Revista Metalúrgica*. Universidad Técnica de Oruro. Oruro: 19, julio de 1999.
- POURBAIX, M. *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. Brussels: Pergamon Press, 1985.
- IGNACIO, G. “Tratamiento de Aguas Ácidas de Mina”. Proyecto de Grado. Oruro: UTO-FNI, 2000.
- ZAMORA, G. “Posibilidades Fisico-Químicas para la Eliminación de Elementos Tóxicos de Efluentes”. En: *II Congreso Nacional de Metalurgia y Ciencia de Materiales*. Oruro, Bolivia. 1996.
- DAMES & MOORE NORGE. *Feasibility and Design Study for the Remediation of Sources of Contamination, San Jose Mine*. Subproject N° 6, Progress Report. Oruro, November 1999.
- PROYECTO PILOTO ORURO. *Evaluación de la Contaminación de Ríos y Lagos*. Oruro, 1996.

13. COMIBOL. *Acciones de Remediación Ambiental en la Mina San José*. Proyecto de Medio Ambiente, Industria y Minería. Oruro, 2000.
14. DAMES & MOORE NORGE. "PMAIM Suproyecto 6 – Informe Final No.3. Definición del Plan de Remediación Global". La Paz, Diciembre de 2000.
15. Sub Proyecto Nº 6; Estudio de Ingeniería, Factibilidad y Diseño para la Remediación de las Fuentes de Contaminación de la Mina San José de Oruro; DAMES & MOORE NORGE; Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, Informe final, 2002.
16. 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, 2002.
17. ZAMORA, G. y QUEZADA, R., *Aplicación de la evaporación - cristalización como alternativa de tratamiento de aguas ácidas de mina*, UTO, 2003.
18. COMIBOL - BANCO MUNDIAL. *Balance de hidrología*, Proyecto de Auditoria ambiental Centro Minero San José, La Paz, 1997.
19. AHMED M., et al. "Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants". *Desalination*. Volume 130, Issue 2, November 2000.
20. MINE WASTE MANAGEMENT REQUIREMENTS, Editors: I.P.G. Hutchison, y R.D. Ellison, California Mining Association, 1992.
21. HEDIN, R.S., NAIRN, R.W. and R.L.P. KLEINMANN. Passive treatment of coal mine drainage. U.S. Bureau of Mines Information Circular 9389. 1994.
22. HEDIN, R. S. and G. R. WATZLAF. "The Effects of Anoxic Limestone Drains on Mine Water Chemistry". International En: *Land Reclamation and Mine Drainage Conference and the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*. Pittsburgh, PA. pp. 185-194. 1994.
24. BLOWES, D.W. PTACEK, C. J. WAYBRANDT, K.R. and J.G. BAIN. "In situ treatment of mine drainage using porous reactive walls". En: *Biotechnology and the Mining Environment*. 11th Annual Meeting of BIOMINET, pp. 119-128. 1995.
25. BRODIE, G.A., BRITT, C.R., TOMASZEWSKI, T.M. and 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. pp. 211-228. 1991.
26. BRODIE G.A., BRITT C.R., TOMASZEWSKI T.M. and 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.
27. 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*. pp. 1-14. 1993.
28. CAMBRIDGE, M.. "Use of Passive Systems for the Treatment and Remediation of Mine Outflows and Seepages". *Minerals Industry International*. pp. 35-42. 1995
29. 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. pp. 250-256. 1994.
30. FRY, I.V., and R.J. MEHLHORN. "Polyurethane and alginate-immobilized algal biomass for theremoval of aqueous toxic metals". En: *Emerging Technology for Bioremediation of Metals*. J.L. Means and R.E. Hinchee (eds). pp. 130-134. 1994.
31. GUSEK, J. "Passive-treatment of acid rock drainage: What is the potential bottom line?". *Mining Engineering*. March 1995, pp. 250-253. 1995.
32. HEDIN, R.S., NAIRN, R. and R.L.P. KLEINMANN. *Passive treatment of coal mine drainage*. U.S. Bureau of Mines Information Circular 9389. 1994.
33. 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. pp. 185-194. 1994.
34. NAKAMURA, K. *Biological metal removal from mine drainage*. U.S. Bureau of Mines Information Circular 9183, pp. 274-278. 1988.