

# MINADO IN SITU

Ing° Oswaldo Ortiz Sánchez\*

## RESUMEN

El minado in situ es una técnica poco conocida en la recuperación de minerales y elementos metálicos de los yacimientos minerales. Comprende métodos de disolución en agua y lixiviación mediante compuestos químicos acuosos que se inyectan en los depósitos minerales.

Existe un gran número de minerales que pueden recuperarse por estos dos métodos: Por disolución aprovechando la solubilidad en agua y la forma masiva de ocurrencia geológica; por lixiviación en el propio emplazamiento mediante soluciones químicas similar a la lixiviación superficial. Por lixiviación in situ puede recuperarse metales de yacimientos minerales en los que no son aplicables métodos convencionales de la minería mecanizada debido a su baja ley, profundidad de emplazamiento, diseminación y que poseen alto grado de permeabilidad natural o creada artificialmente mediante técnicas como la hidrofracturación del yacimiento.

En el pasado se aplicó con éxito en depósitos minerales de uranio y en forma experimental en yacimientos oxidados de cobre y oro libre. Esta técnica puede desarrollarse en el futuro en razón de las restricciones medio ambientales introducidas en los últimos años debido a que el sistema no perturba ni contamina la naturaleza, es de bajo costo operativo y baja inversión en desarrollo, equipo e infraestructura siendo sus dos restricciones principales la posible contaminación de acuíferos subterráneos y su baja recuperación.

Otras razones para intensificar la investigación y uso de esta técnica son la tendencia de los yacimientos minerales a bajar en leyes, calidad, tamaño y mayor profundidad de ubicación de tal manera que se aleja de su factibilidad económica de explotación por métodos convencionales.

En este análisis se presenta la aplicación del método a un depósito de cobre oxidado de baja ley cuya explotación por métodos tradicionales resulta ser técnica y económicamente no factible.

Palabras clave: Flujo, lixiviación, disolución in situ, taladro,

## ABSTRACT

In situ mining is an aqueous mining system literally unknown in the mining industry. It is a technique characterized by gravity or pressure driven water or solution flow in a saturated medium that can be applied to a wide range of mineral commodities which are soluble in either water or an aqueous lixiviant.

Water soluble salts can be recovered due to their both high degree of water solubility and geologic occurrence in extensive beds where the salt itself is the matrix. In hard rock insitu mining the values are recovered by a lixiviant chemical compound which also uses water for dilution and transport. In this case some metallic elements can be recovered from mineral deposits where mechanized mining methods cannot be applied due to their low grade, deep emplacement underground, disseminated and discontinuous geologic nature. A basic condition for the success of the method in metallic deposits is an acceptable degree of permeability which may be natural or created by methods as hydrofracturing.

In the last twenty years the system was successfully applied in uranium deposits. Tests were also carried out in oxide copper and free gold ore deposits with relatively satisfactory results. This technique can be developed in the future as a result of recent environmental restrictions faced by the present mechanized extraction methods of mineral values. Insitu mining neither disturbs nor pollutes the environment. Additionally, it is a low investment and production cost system. However, it can contaminate underground water currents in particular if the ore deposit is found in non-isolated formations connected to underground water sources. On the other hand additional reasons for the system's development are the ever decreasing grade, quality, size and deeper emplacement of mineral deposits which make more unfeasible the conventional mechanized mining.

This analysis tries to demonstrate the application of the insitu mining method to a low grade copper oxide deposit located in the disseminated copper belt of southern Peru.

Key words: Flow, lixiviation, insitu, drillhole.

\* Docente, EAP de Ingeniería de Minas. UNMSM.

## 1. INTRODUCCIÓN

El minado in situ comprende técnicas poco conocidos en la minería. Su objetivo es recuperar los valores de los yacimientos minerales no explotados por la minería mecanizada. Como alternativa al minado mecánico, utiliza las propiedades de disolución en agua y lixiviación en soluciones químicas acuosas para recuperar compuestos y elementos metálicos de valor económico.

La minería in situ puede aplicarse a una amplia variedad de recursos como depósitos de sales solubles en agua, depósitos de azufre por fusión en agua caliente o vapor de agua, y elementos metálicos por lixiviación mediante compuestos químicos diluidos en agua.

## II. OBJETIVOS

Desarrollar en forma muy resumida el sistema de lixiviación insitu y presentar un proyecto de aplicación de esta técnica para recuperar un elemento metálico.

## III. DIFERENCIAS CON LA LIXIVIACIÓN SUPERFICIAL

La lixiviación superficial es consecuencia de la minería mecanizada y solo ha sido aplicada a minerales de cobre, oro, plata y uranio que generalmente se asocian a rocas masivas y resistentes.

La disolución y lixiviación in situ son métodos primarios de producción en cambio la lixiviación superficial puede ser una opción de producción primaria o también secundaria o suplementaria. Es una opción de producción primaria cuando se aplica en montones o pilas, un sistema muy difundido en la recuperación de oro, óxidos y sulfuros secundarios de cobre.

## IV. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

La técnica de minado in situ es selectiva en la recuperación de elementos dejando la ganga en su lugar sin originar pilas o botaderos de estéril en superficie, no se crean diques o acumulaciones de relaves sobre la superficie ni origina ruidos o contaminación atmosférica por polvo.

El agua actúa como lixivante, disolvente o medio de transporte para el lixivante y los valores solubles. La solución limpia penetra al yacimiento por gravedad o a presión a través de uno o varios taladros y la solución cargada regresa a la superficie a

través de otros taladros o es captada en galerías subterráneas y luego bombeada a una planta de tratamiento en superficie.

No se requiere equipo pesado de minado ni plantas de tratamiento como concentradoras y fundiciones. Los requerimientos de mano de obra y de energía son reducidos. El riesgo para la salud y seguridad de los trabajadores es mínimo y el inicio y cierre de las operaciones es rápido y flexible ya que el desarrollo y preparación de mina son limitados. Adicionalmente, la inversión requerida y el costo operativo son bajos.

Sin embargo, la minería in situ tiene un potencial de contaminación de aguas subterráneas porque existe dificultad en controlar o contener las soluciones lixiviantes debido a fallamiento o ausencia de masas rocosas de confinamiento. Existe, además, limitación en el lixivante apropiado para el metal contenido en el mineral, imposibilidad de recuperar más de uno o dos metales de minerales polimetálicos, dificultad de evaluar con exactitud el nivel de recuperación de los elementos metálicos del depósito, baja velocidad de extracción y bajo nivel de recuperación de valores en comparación con el obtenido por los métodos de minado convencional, flotación o lixiviación superficial.

## V. CLASIFICACIÓN DEL MINADO IN SITU

Considerando el tipo de yacimiento y los minerales que pueden recuperarse se tiene: a) Minado in situ de sales solubles en agua, b) Minado in situ de azufre y c) Minado in situ de elementos metálicos.

En este análisis se trata de presentar el minado in situ de elementos metálicos, razón por la cual solo se enuncian brevemente los dos primeros métodos.

### 5.1 Minado in situ de sales solubles en agua

Los minerales que pueden recuperarse fácilmente por su solubilidad en agua son: potasa, trona, nalcólita, boratos, sal común, glauber. Estos minerales tienen dos características básicas que permiten su explotación a bajo costo por métodos de disolución in situ: a) son altamente solubles en agua y b) se presentan en mantos o capas de gran tamaño donde el mismo mineral resulta ser la roca encajonante.

En el caso de la sal común la caverna que se origina por disolución puede ser de más valor que el mineral extraído cuando se excavan en domos o

capas potentes de sal que poseen temperatura invariable y buena estabilidad natural tal que pueden ser usadas para silos de combustibles como hidrocarburos o desperdicios peligrosos, compuestos químicos, aire comprimido, etc.

## 5.2. Minado in situ de azufre

Se conoce como método de minado Frasch para recuperar azufre elemental de una formación geológica. La aplicación del sistema requiere que el azufre sea disuelto mediante una corriente de agua caliente a presión. El azufre líquido se bombea a una planta de purificación en superficie.

El empleo económico del método requiere disponer de cuatro recursos básicos: a) depósito de azufre de gran tamaño con leyes por encima de 5% S, b) fuente abundante de agua a bajo costo y con bajo contenido de sólidos, c) fuente de combustible de bajo costo y d) sistema económico de transporte.

Actualmente, el método es poco atractivo debido a los altos costos operativos y restricciones en los recursos requeridos. Adicionalmente, desde 1970 la producción de azufre como subproducto del tratamiento del petróleo se ha ido incrementando debido a la necesidad de eliminar el azufre del petróleo hasta que en los últimos años la mayor fuente de azufre lo constituye el proceso de purificación del petróleo.

## 5.3. Minado in situ de elementos metálicos

La recuperación in situ de metales de la roca matriz sólo ha sido aplicado con éxito en óxidos de uranio y en forma experimental en óxidos de cobre. Consiste en hacer circular soluciones lixiviantes a través del mineral in situ recuperando las soluciones cargadas para su procesamiento. La operación puede efectuarse desde su superficie a través de taladros o pozos de inyección y recuperación o desde labores subterráneas combinando las operaciones de planta de procesamiento en superficie y minado remoto en el subsuelo en forma diferente de la técnica convencional.

## VI. MÉTODO DE LIXIVIACIÓN

Dos factores son de máxima importancia en una operación minera metálica de lixiviación in situ: a) las características físicas del yacimiento como profundidad, presión hidrostática y permeabilidad y b) la mineralogía del yacimiento si responde o no químicamente al sistema de lixiviación.

Es necesario que el yacimiento se encuentre confinado en formaciones de baja permeabilidad y en estructuras no falladas o acuíferos confinados. La velocidad de las corrientes subterráneas dependen de la permeabilidad y de la diferencia de presiones del agua entre taladro y formación.

Debe estudiarse las características de la mineralización y su distribución en los tipos de roca huésped para deducir la accesibilidad del mineral al lixivante. La mineralización errática, por ejemplo, es de difícil acceso al lixivante en un periodo razonable de tiempo.

## VII. PRUEBAS PARA ESTIMAR FACTIBILIDAD DE LIXIVIACIÓN

Las pruebas son de laboratorio y de campo y nos permiten conocer algunas variables como: factibilidad de separación selectiva en un lapso de tiempo razonable, porcentaje de mineral que puede ponerse en contacto con el lixivante para asegurar la factibilidad económica del proyecto, nivel de flujo del lixivante en la zona mineralizada y su influencia en la eficiencia del barrido de la solución, grado de confinamiento y recuperación del lixivante.

La lixiviación in situ de minerales de cobre siguen principios químicos conocidos pero pueden ocurrir reacciones colaterales con la ganga formada por minerales como calcita, feldespato, arcilla, zeolita, pirita y otros que alteran la composición de la solución lixivante o puede movilizar contaminantes impidiendo la recuperación del cobre y la restauración del acuífero; así por ejemplo la oxidación de la pirita produce ácido sulfúrico que puede activar algunos elementos.

Entre las pruebas comunes de laboratorio se tiene lixiviación por agitación en depósito sellado y lixiviación en columna, esta última simula mejor las variables de campo como la permeabilidad de la masa que se lixivia y la velocidad de flujo de la solución lixivante.

## VIII. MALLAS DE TALADROS DE LIXIVIACIÓN

Las pruebas piloto in situ permiten evaluar la solución lixivante, establecer técnicas de construcción y acabado de los taladros y procedimientos de restauración. Las pruebas son de flujo total separando los taladros de inyección y extracción pudiendo invertir el movimiento de la solución convirtiendo un taladro de inyección en otro de extracción.

La figura N.º 1 presenta algunos arreglos de taladros en un área de explotación. La configuración

mas común es la de 5 taladros simple o múltiple que da información sobre dirección de la permeabilidad, muestreo del yacimiento y control de flujo de la solución. El orden preferido de flujo es inyección en los extremos y producción en el centro porque minimiza la dilución y hay más resistencia al flujo de inyección que al de producción. La distancia entre taladros inyectoros y productores puede ajustarse a las condiciones de permeabilidad pudiendo variar entre 6 y 20 metros lo que puede determinarse mediante pruebas. La figura N.º 2 presenta un arreglo de 2 taladros aplicables a lixiviación in situ en depósitos de oro libre.

## IX. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el cobre no se conocen records de costos publicados como es el caso del uranio cuya explotación en los años '80 fue posible gracias al sistema de lixiviación in situ que registró bajos costos directos de producción. Variables importantes son el espaciamiento de taladros, la ley de la solución y la potencia del yacimiento. La ley de corte para lixiviación in situ es menor que para minado convencional y varía con la profundidad, tipo de minerales, costos y precios.

Existe alta flexibilidad económica en el minado por lixiviación in situ debido a que los costos fijos son inferiores a los del minado subterráneo y a cielo abierto y la producción puede variarse de acuerdo a los cambios de los precios. Los costos fijos están en el rango de 30-35% del costo total comparado con el 50-65% para una explotación subterránea convencional y el 80 a 90% en el caso de una operación a cielo abierto cuya relación de desbroce es de 8 a 1 en este caso.

## X. DESARROLLO EN EL ÁREA DEL TALADRO

En relación al diseño, perforación, cementado y desarrollo del minado, existe la experiencia de los taladros para uranio. No obstante, estos detalles no se presentan en este análisis por no considerarlos dentro del alcance de estudio.

## XI. BOMBEO Y ENTUBADO

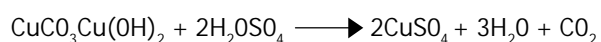
El sistema de bombeo es la base de este tipo de minado. La selección de la bomba depende de las características del sitio y de la naturaleza del lixivante. Se requiere gran número de bombas de acero inoxidable por su resistencia a la corrosión. El entubado puede ser PVC por resistir los efectos corrosivos del lixivante y por su bajo costo. Se usa tam-

bién tubería de fibra de vidrio en lugar de PVC por su mejor resistencia aunque de mayor costo que el PVC.

Para perforar el taladro es preferible usar equipo hidráulico rotativo con bomba de lodos de tamaño suficiente como para mantener flujo turbulento en el fluido ascendente (20-35m/min). Los taladros deben ser verticales y sin desviaciones. La presión de perforación debe ser inferior a la resistencia al fracturamiento de la formación para evitar el deterioro de las paredes del taladro. Cerca del fondo del taladro es preferible la perforación neumática manteniendo características adecuadas del fluido como densidad, viscosidad, nivel de filtración y baja resistencia.

## XII. RECUPERACIÓN DEL PRODUCTO

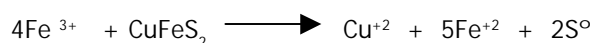
El método de recuperación del cobre depende del mineral. Los óxidos de cobre se lixivian económicamente con ácido sulfúrico según la ecuación siguiente para el caso de la malaquita:



En el proceso del cobre, el ácido sulfúrico tiene la ventaja de ser poco reactivo con otros materiales inertes de construcción y es compatible con el proceso siguiente de electro deposición donde se requiere sulfato de cobre en solución ácida. Además, el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  es de bajo costo y es producido como subproducto en las fundiciones de cobre y de los procesos industriales del zinc. El problema radica en que debe ser diluido por lo que las pilas de lixiviación deben tratarse en capas delgadas para evitar que el ácido se consuma totalmente produciendo la precipitación del cobre en la masa rocosa. Por otro lado, un ácido concentrado atacaría a la ganga incrementando el consumo de ácido por unidad de cobre recuperado y precipitaría yeso en el proceso originando, además, arcillas y lodos que disminuirán la permeabilidad produciendo pérdida de cobre en operaciones de lixiviación de larga vida.

En la lixiviación in situ el requerimiento de capas delgadas se podría obtener variando las distancias entre taladro de inyección y producción o por medio de túneles de captación a intervalos experimentales.

La lixiviación de sulfuros es más compleja debido al requerimiento de un oxidante que generalmente es el hierro férrico que ataca a todos los sulfuros comunes de cobre incluyendo la chalcopirita, aunque ésta es más refractaria que los minerales secundarios. La reacción del férrico con la chalcopirita es:



El azufre elemental sólo existe en tránsito y se convierte en  $H_2SO_4$  por acción del agua y el oxígeno según la siguiente ecuación:



El hierro oxidante proviene de la pirita que es 10 a 20 veces más abundante que los minerales de cobre. Su oxidación es similar al de la chalcopirita. La pirita es, además, fuente de  $H_2SO_4$  que origina un bajo pH para mantener al cobre y al hierro en solución, y también levanta la temperatura de la masa rocosa que acelera la lixiviación del cobre. El calor generado produce una fuerza convectiva de aire a través de la masa de mineral que se lixivia. La pirita al oxidarse estimula la convección del aire que proporciona el oxígeno que es el oxidante del sistema.

En la producción comercial del cobre por el sistema de solventes y electro deposición se usan reactivos como gelatina, kerosene, especies minerales de cobre y otros. El hidrógeno cumple su ciclo y controla la dirección de la reacción mediante su nivel de concentración.

### XIII. FACTORES MEDIOAMBIENTALES

Para asegurar que los acuíferos no se contaminen se debe perforar pozos de monitoreo cuyo número dependerá de la velocidad del flujo del agua subterránea y la proximidad a acuíferos de consumo humano. Los pozos de monitoreo controlan los límites del minado y permiten el muestreo del acuífero ligado a la operación. Otros acuíferos en los niveles superiores e inferiores deben monitorearse mediante pozos de control de migración del lixivante a través de estratos, discontinuidades naturales, taladros abandonados o a lo largo de taladros de inyección o producción.

El proceso de restauración de la calidad del agua subterránea puede ser largo y costoso en áreas lixiviadas. Esta restauración podría comprender un lavado del campo con agua a presión la que posteriormente puede ser reciclada y limpiada por osmosis invertida. La restauración es parte de la operación y el requerimiento mínimo es el restablecimiento del agua de bebida a los estándares de concentración media antes de la inyección. Se debe restaurar los niveles de los elementos constitutivos como calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, sulfato, cloruro, fluoruro, nitrato, sílica, pH, total sólidos disueltos, conductividad, alcalinidad, arsénico, cadmio, hierro, plomo, manganeso, mercurio, selenio, amonio, molibdeno. Los valores de restauración son los análisis de agua antes del minado.

La restauración superficial debe consistir en la remoción de toda la tubería, el taponado y recubrimiento de todo el entubado de los taladros, transporte del material de las cochas de evaporación a un lugar autorizado, rellenado de excavaciones, revegetación apropiada. Debe haber, además, garantía financiera para restaurar y mejorar la superficie perturbada.

Además del agua subterránea, deben protegerse el aire y los recursos culturales y biológicos. Los mayores efectos potenciales sobre el medio ambiente recaen en el sistema de inyección y recuperación y el elemento principal de protección es el agua subterránea. No debe iniciarse una operación si el fluido de inyección puede movilizar un contaminante hacia una fuente subterránea de agua de bebida en su captación primaria o si afectara la salud pública.

### XIV. TENDENCIAS FUTURAS

A medida que se dicten controles más estrictos sobre el medio ambiente y las leyes de los depósitos minerales sigan disminuyendo en calidad y tenor a sus límites económicos y medioambientales, surgirá el minado in situ como opción viable de explotación minera dependiendo de varios factores como el hidrológico, geológico, hidrometalúrgico y el producto comercial.

El minado in situ tiene futuro para depósitos pequeños de alta ley y depósitos grandes de baja ley emplazados en roca fracturada, porosa o permeable. La técnica se desarrolló en minerales de uranio pero se espera su uso en minerales metálicos, pudiendo concluir que su aplicación en otros metales va a ser prometedora. La lixiviación in situ de óxidos de cobre debe ser el siguiente paso porque el cobre se lixivia con un solvente ácido diluido en especial los depósitos de cobre en microfracturas y juntas.

El minado in situ de minerales sulfurados de cobre debe avanzar con la ayuda de la biotecnología, perforación direccional con martillo en el fondo y la inyección de oxidantes en el yacimiento.

No existe hasta ahora una operación comercial de lixiviación in situ de gran tamaño en minerales oxidados o sulfurados de cobre. Las grandes reservas existentes de minerales apropiados para lixiviación in situ en muchos países entre ellos el Perú, asegura que en el largo plazo se desarrollará la tecnología del minado por lixiviación in situ para sulfuros de cobre.

Algunos de los minerales estratégicos y críticos podrían también extraerse por lixiviación in situ. Es-

tos minerales son esenciales en la industria del acero, aeroespacial, electrónica y en las industrias orientadas a la defensa; entre ellos tenemos manganeso, cobalto, níquel o metales del grupo del platino. Estos elementos se presenta en muchos depósitos pequeños y profundos y son de baja ley. Tenemos por ejemplo depósitos de níquel y cobalto en la zona de Marcona y toda la franja costera desde Cañete hasta Chala. Estos depósitos no pueden extraerse aplicando sistemas convencionales pero puede aplicarse minería in situ en aquellos cuyas características sean las apropiadas para este tipo de minado.

El desarrollo del minado por lixiviación in situ a escala comercial requerirá la integración de muchas disciplinas técnicas con métodos innovativos avanzados de minado. El éxito de esta tecnología mantendrá el suministro internacional de los minerales y además será posible la máxima utilización de los recursos porque se recuperará metales que no pueden ser minados por métodos convencionales.

#### XV. PROYECTO DE EXPLOTACIÓN DE UN DEPÓSITO DE COBRE

Para la aplicación del método se tiene el depósito de cobre oxidado Cerro Azul ubicado en la zona norte del yacimiento Toquepala en el departamento de Tacna y que ha sido confirmado mediante 15 taladros diamantinos en un área de 350 x 450 m<sup>2</sup>.

Cerro Azul se emplaza en una estructura geológica de rumbo N15W siguiendo la orientación de la falla Toquepala en el lado SW de la misma. El depósito ha sido formado por brechamiento de varias etapas que originaron varios tipos de brechas y determinaron la orientación de la mineralización.

La formación tiene relación con las estructuras regionales. Las fallas principales corren con rumbo N 45° W. Otras fallas se orientan al este y otras al oeste. Las fallas secundarias siguen el rumbo N45°E cortando a las fallas principales. Hay otro sistema de fallas con rumbo N15°W variando hasta N15°E.

La interacción de estas fallas ha originado condiciones favorables debilitando las rocas preminerales en las que se emplazan intrusivos dioríticos monzoníticos y dacíticos causantes de todo el proceso hidrotermal del área.

La zona de óxidos del depósito Cerro Azul contiene una fuerte alteración argílica y está formada por brechas hidrotermales siendo la principal de tipo angular en la parte central del depósito y definido por un sistema de fracturamiento N10°E y N80°E

con buzamiento subvertical al sureste. Los valores más altos de cobre oxidado y de fácil lixiviación se emplazan en la zona NE de la brecha de tipo guijaro. Se tiene además otros tipos de rocas como la riolita e intrusivas como la granodiorita.

#### XVI. LIXIVIACIÓN IN SITU

El yacimiento Cerro Azul posee una reserva de 18'530,000 tm de mineral oxidado con una ley media de 0,2% cobre total. Se estima que es posible recuperar por lixiviación in situ con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido, el 63% del cobre oxidado cuya ley es de 0,188% Cu soluble. La recuperación por el método de explotación se estima en 45%.

El yacimiento posee bajo desencapado pudiendo aplicar lixiviación desde la superficie. Como muestra la figura N.º 3, el área mineralizada de óxidos ha sido delimitado en profundidad entre los niveles 3745 y 3580 (165 m de potencia). El diseño conceptual del sistema se presenta en la figura N.º 4. La topografía del terreno permite correr una galería en la parte inferior del cuerpo de óxidos para recibir la solución de CuSO<sub>4</sub> y enviarla a superficie mediante bombeo. Un diseño alternativo consiste en un arreglo de malla de 5 taladros de inyección del lixiviante por cada taladro de producción. La distancia entre taladros de inyección y producción se estima en 20 m.

El cálculo del flujo de fondos del proceso incluye la posible inversión en mina y planta hasta electrodeposición. El precio de venta se fijó en US \$ 1,540/tm y el costo de preparación y operación se da a continuación:

##### a) Costo de preparación

Taladros de inyección: 15 pulg. de diám. a \$ 40/m. l.	
300 x 160 x 40	= \$ 1'920,000.
Taladros de recuperación: 15 pulg. de diám. a \$ 40/m.l.	
60 x 160 x 40	= \$ 384,000s.
Preparación de taladros \$ 5/ m.l. = 300 x 160 x 5	= \$ 240,000.
Corrida de galería de 2 x 2.50 m., 850 m a \$ 400/m.l.	= \$ 340,000.
Total Costo de preparación	\$ 2'994,000
Equipo (bombas, tuberías, otros)	\$ 650,000
Total Mina, sin planta	\$ 3'534,000
Costo unitario de preparación	\$ 0.19/Tm

##### b) Costo de procesamiento, sistema Lix.- Sx -Ew.

Costo de instalación por Tm tratada	\$ 450
Costo operativo por Tm tratada	\$ 60

Gastos generales por Tm tratada \$ 40  
 Costo total de procesamiento \$ 550/Tm

c) Resumen de costos y análisis

Reservas lixiviables:  $18'530,000 \times 0.45 = 8'340,000$  Tm  
 Cobre recuperable:  $8'340,000 \times 0.00188 \times 0.63 = 9,877$  Tm  
 Ingresos:  $9,877 \times 1,540 = \$ 15'210,580$   
 Costos:  
 Inversión y Preparación: \$ 3'534,000  
 Procesamiento:  $550 \times 9,877 = \$ 5'432,350$   
 Total Costos: \$ 8'966,350  
 Utilidad Total \$ 6'244,230

La rentabilidad de la operación es atractiva y probablemente mejor que por cualquier otro método por tratarse de un yacimiento marginal poco realizable por otros métodos de mayor costo. Adicionalmente, el sistema de minado in situ no demanda mayor inversión para poner el proyecto en marcha comparado con los métodos superficiales de cielo abierto o lixiviación en superficie.

XVII. RECOMENDACIONES

- Efectuar estudios del flujo del agua subterránea en el área del emplazamiento para lo cual deberá instalarse piezómetros en los taladros de exploración.
- Efectuar un estudio geológico estructural detallado del yacimiento para determinar el grado de

fracturamiento del depósito y de la roca encajonante y posibles pérdidas o contaminación de los acuíferos circundantes. Debe determinarse el grado de permeabilidad de la roca que contiene la mineralización.

- Determinar la distancia óptima entre taladro de inyección y taladro de producción con el objeto de evitar pérdidas del lixivante, excesivo costo de desarrollo en taladros de inyección y producción.
- Efectuar un análisis de los testigos de perforación dentro y fuera del depósito para determinar o chequear la permeabilidad.
- Las pruebas de laboratorio deberán complementarse con un mínimo de dos pruebas in situ en un arreglo de 5 taladros de inyección y un taladro central de producción.

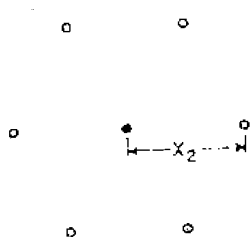
XVIII. BIBLIOGRAFÍA

Ahlness Jon K.; Tweeton Daryl R. y Otros, 1992. "Insitu Mining of hard rock ores". En *Mining Engineering Handbook*, 2<sup>nd</sup>. Edition, v. 2, SMME. Inc, Colo., USA, p. 1515-1524.  
 Pool T.C., 1989. Solution Mining, The flexible approach, Chap. 1. Proceedings, Insitu All Mineral Symposium. Wyoming Mining and Metal Section of SME-AIME, May 22-24.  
 Tweeton, D. R. And Lake, L.W., 1986. Insitu mining push-pull field test for evaluating cation exchange parameters. Preprint 86-119. SME-AIME 12 pp.  
 Estudiantes de Minas, UNMSM, 1999. Reporte de Prácticas Preprofesionales, Mina Toquepala.

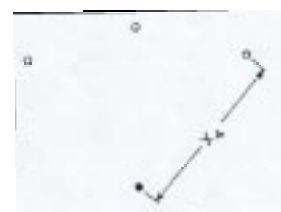
Figura N.º 1. Configuración de mallas de prueba/producción para taladros de lixiviación in situ



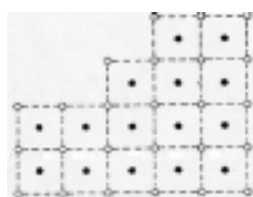
Arreglo de 5 taladros



Arreglo de 7 taladros



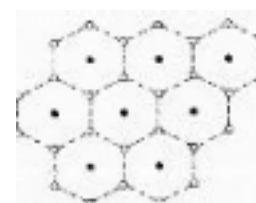
Arreglo de 2 taladros



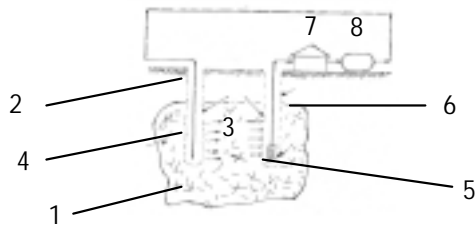
Arreglo múltiple de 5 taladros

X1 = 6 - 60 m  
 X2  
 X4 = 7.60 m

Espaciamentos típicos



Arreglo múltiple de 7 taladros



Leyenda: 1. Cuerpo mineralizado, 2. Pozo de inyección, 3. Flujo de la solución, 4. Funda perforada, 5. Bomba, 6. Pozo de recuperación, 7. Planta de procesamiento, 8. Tanque de solución lixivante.

Figura N.º 2. Configuración de 2 taladros para lixiviación in situ en depósito de oro libre.

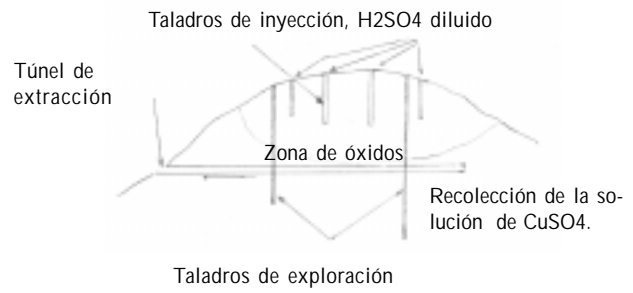


Figura N.º 4. Sección vertical longitudinal. Esquema de lixiviación in situ. Sistema: Túnel. Depósito Cerro Azul.

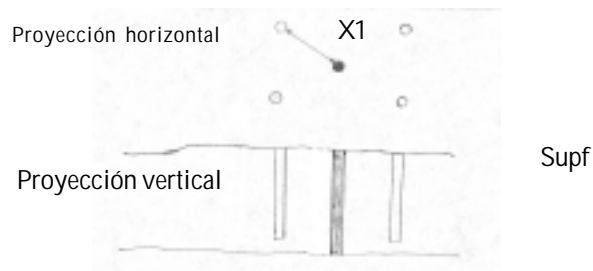


Figura N.º 5. Configuración de 5 taladros (4 de inyección y 1 de recolección). Sistema: Taladros. Depósito Cerro Azul.

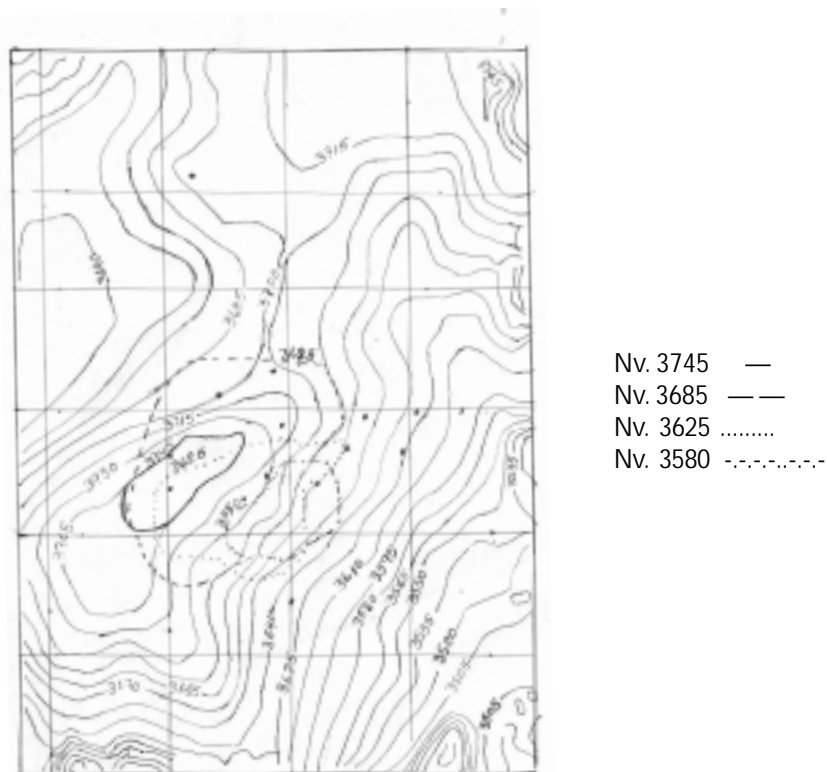


Figura N.º 3. Curvas de nivel y zona mineralizada de óxidos de cobre. Yacimiento Cerro Azul, Tacna.