

# ESTUDIO AMBIENTAL Y OPTIMIZACIÓN EN LA EXTRACCIÓN DEL ORO UTILIZANDO EL CIANURO

Responsable: Ing° MSc. Julio Vargas Paniagua

## RESUMEN

*Este trabajo de investigación ha sido realizado con la intención de fomentar y divulgar los diferentes conocimientos que existen con respecto al contaminante "cianuro" que tanto daño ocasiona en las industrias que lo utilizan como un insumo importante, en particular en la Industria minera.*

*Pretendo que dicho trabajo sea de utilidad para los estudiantes, docentes y demás personas de nuestra región y que se dedican a la Industria minera, química, metalurgia, y aspectos medio ambientales. Me he preocupado, durante el desarrollo de los diferentes capítulos, en destacar la importancia que tiene el estudio del medio ambiente y sus implicancias en la actualidad, analizando los diferentes riesgos que ocasiona en la explotación del oro utilizando el cianuro para su proceso metalúrgico como objetivo selectivo.*

## ABSTRACT

*This investigation work has been carried out with the intention of to foment and to disclose the different knowledge that exist with regard to the polluting "Cyanide" that so much damage causes in particular in the industries that use it as an important input, in the mining Industry.*

*I seek that said work is of utility for the students, educational and other people of our region and that they are devoted to the mining Industry, Chemistry, Metallurgy, and half environmental aspects. I have worried during the development of the different chapters, in highlighting the importance that have the study of the environment and your implicancias at the present time, analyzing the different risks that it cause in the exploitation of the gold using the Cyanide for your process metallurgist like selective objective.*

## I INTRODUCCIÓN

En muchas minas alrededor del mundo, el oro se obtiene de minerales que contienen entre 0,5 y 13,7 g/ton de roca, de los cuales se recupera por métodos físicos y químicos. La mayoría de las minas de oro, donde el metal puede obtenerse por procesos típicos de la minería, están agotadas en la actualidad. La lixiviación con cianuro, no puede considerarse un procedimiento minero típico, sino más bien un proceso propio de la industria

El proceso de disolución de metales se denomina lixiviación. El cianuro de sodio se disuelve en agua donde, en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina "solución cargada". Luego se agrega zinc o carbón activado a la solución cargada para recuperar el oro extrayéndolo de la solución. La solución residual o "estéril" puede recircularse para extraer más oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos.

Existen dos enfoques generales para la lixiviación del oro de un mineral mediante el cianuro: la lixiviación en tanque y la lixiviación en pila (por percolación).

La lixiviación en tanque es el método convencional por el cual el mineral aurífero se tritura y se muele hasta reducirlo a menos de un milímetro de diámetro. En algunos casos se puede recuperar parte del oro de este material finamente

molido como partículas discretas de oro mediante técnicas de separación por gravedad.

En la mayoría de los casos, el mineral finamente molido se lixivia directamente en tanques para disolver el oro en una solución de cianuro. Cuando el oro se recupera en una planta convencional de lixiviación en tanque, la solución estéril se recogerá junto con los residuos sólidos (relaves).

## II. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Se justifica el presente trabajo de investigación por ser un tema de vital importancia hoy más que nunca, debido a que en nuestro país existen muchas empresas que se han dedicado a la explotación de yacimientos auríferos, en donde utilizan el cianuro como un reactivo químico para la extracción del oro.

Por lo cual por ser el cianuro un reactivo contaminante es importante realizar investigaciones para conocer el grado de toxicidad y daños que pueden estar ocasionando hasta la fecha y a la vez publicarlas, para que se hagan las correcciones y previsiones que requiera según los resultados de las investigaciones.

Además, para tener una bibliografía especializada, y pueda servir para los estudiantes de ingeniería de minas y afines, así como material de consulta para los docentes de la especialidad.

### III. OBJETIVO

Realizar un estudio de la problemática ambiental que representa el uso del cianuro en la extracción del oro.

### IV. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 1) Lugar de Ejecución

El presente trabajo se ha realizado con la finalidad de evaluar las consecuencias que originan el uso del cianuro en la extracción de los minerales del oro, para lo cual se han considerado la problemática que se está desarrollando en Cajamarca (mina Yanacocha) así como en Tacna con el nuevo proyecto Pucamarca de Minsur S.A. Se han considerado como base los diferentes análisis físico-químico tomados en los laboratorios realizando un análisis evaluativo ambiental.

### V. MARCO TEÓRICO

#### 1) Historia, Orígenes y Usos del Cianuro

Desde sus primeros usos comerciales en Nueva Zelanda hace más de un siglo, el cianuro ha sido utilizado en todo el mundo en la extracción de oro y plata. Si bien durante décadas se han investigado productos químicos para reemplazarlo, sigue siendo el único producto de lixiviación utilizado, debido a la combinación de una serie de factores como la disponibilidad, la eficacia, el costo y la posibilidad de utilizarlo con un nivel de riesgo aceptable para los seres humanos y el medio ambiente.

En 2000 había 875 establecimientos de producción de oro y plata, de los cuales 500 eran grandes productores. Más del 90% de la recuperación de oro del mundo se basa en la utilización de cianuro.

Hay minas de oro y plata en todo el mundo, aunque la producción se está concentrando cada vez más en América del Sur y Australia, en canteras a cielo abierto y lixiviación en montones.

En 2003 se recuperaron en el mundo unas 2.650 toneladas de oro, de las cuales una cuarta parte correspondió a las 20 minas de mayor producción. Si bien ha disminuido la confianza en la industria minera, la demanda mundial de metales, minerales y otras materias primas sigue aumentando permanentemente varios puntos porcentuales por año.

#### 2) Química del Cianuro Libre

La pérdida de cianuro libre de un sistema por volatilización es uno de los principales mecanismos de atenuación del cianuro. Con el término 'cianuro libre' se denominan tanto los iones cianuro  $CN^-$  como el cianuro de hidrógeno (HCN).

En disolución acuosa, el cianuro de hidrógeno forma un ácido débil. La relación entre el cianuro de hidrógeno y el ion cianuro puede expresarse por una reacción de hidrólisis:

Esta relación es importante porque en los procesos de extracción de oro por cianuración, que se conducen a un pH. de 10,3 (e incluso mayor en algunos casos), la mayor parte del cianuro libre que hay en el agua de la pulpa del proceso o como fluido intersticial en lixiviación en pila está en forma de iones  $CN^-$ . Dado que en los fluidos del proceso la relación  $HCN/CN^-$  es baja, la capacidad de pérdida de cianuro por volatilización es limitada.

#### Especificación de cianuro libre en función del pH

pH	HCN (%)	CN <sup>-</sup> (%)
7	>99	<1
8	96	4
9	70	30
9,36 (pKa)	50	50
10	12	88
11	<1	>99

En los sistemas acuosos naturales que tienen valores de pH. en el intervalo de 5 a 8.5 la mayor parte del cianuro libre está en forma de HCN y puede perderse por volatilización. El HCN molecular tiene un punto de ebullición bajo y una presión de vapor alta y puede perderse desde la disolución, especialmente cuando hay una interfaz agua/aire.

Desde el punto de vista práctico, económico o de seguridad, el pH. de la disolución debe ser superior a 11 para limitar o prevenir la formación o la pérdida de HCN desde los sistemas acuosos.

#### 3) Minería de Oro a Cielo Abierto por Lixiviación con Cianuro

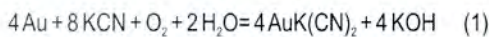
El creciente interés por la explotación de oro de parte de muy diversas compañías mineras se origina tanto en los aumentos en los precios del oro (una onza se cotiza actualmente a un precio cercano a los 695 dólares), que brindan un alto margen de utilidad, como en la reciente creación de métodos rentables en función de los costos de producción, para la extracción de oro en yacimientos sumamente pobres, gracias a la tecnología de extracción de oro por lixiviación con cianuro.

Esta tecnología ha venido a substituir a la recuperación de oro por amalgamación con mercurio, proceso ineficiente en términos de recuperación, ya que permite sólo un 60% de recuperación del mineral, en comparación con más de un 97% en caso de extracción con cianuro. (La amalgamación es el proceso mediante el cual el mineral se une con la sustancia utilizada, en este caso mercurio, para efectos de separarlo del resto del material)

#### 4) Lixiviación del Oro y Plata

La lixiviación (Heap Leaching) en montón es un proceso muy económico para tratar metalúrgicamente minerales con baja ley en metales preciosos, este método de tratamiento recibe un fuerte impulso a mediados de la década del 70 del siglo anterior, cuando el oro alcanza cotizaciones de hasta 600 US. \$/onza el año 1980; se implementa el rehusó del carbón activado y se beneficia minerales con fuerte contenido de finos mediante aglomeración.

El principio básico de la cianuración es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral. La reacción enunciada por Elsher en su Journal Prakchen (1946), es la siguiente:



La química involucrada en la disolución de oro y plata en el proceso de cianuración en pilas es la misma aplicada en los procesos de cianuración por agitación.

El oxígeno, esencial para la disolución del oro y plata, es introducido en la solución de cianuro mediante la inyección directa de aire al tanque solución de cabeza, por irrigación en forma de lluvia y por bombeo de la solución recirculante.

La velocidad de disolución de los metales preciosos en soluciones de cianuro depende del área superficial del metal en contacto con la fase líquida, lo que hace que el proceso de disolución sea un proceso heterogéneo; la velocidad de disolución depende también de la velocidad de agitación, lo que indica que el proceso sufre la presión de un fenómeno físico.

#### Diagrama de flujo de proceso metalúrgico utilizando cianuro



#### 5) Reactivos a usar

**Cianuro.**- El solvente más comúnmente utilizado es el cianuro de sodio. El cianuro se prepara con agua no ácida a un pH. neutro cuya concentración es 10% en peso. La concentración mínima en la solución lixivante está entre 0,05 - 0,10 % de NaCN como máximo.

**Cal.**- La cal se agrega directamente con el mineral en el chancado, la función es mantener una alcalinidad de 10 a 11, su consumo variará de acuerdo con cada mineral y está entre 0,5 a 5 kg/TM.

La ley como CaO libre debe estar entre 60 y 70% para evitar transporte de carga inútil.

**Zinc.**- El polvo de zinc se agrega en una proporción que varía de 0,6 a 1,5 partes por parte de oro y plata; para obtener estos consumos debe utilizarse un zinc de la más alta calidad.

**Carbón activado.**- Es utilizado para precipitar oro y plata de las soluciones ricas, se recomienda generalmente cuando el mineral tiene solo o mayores proporciones de oro con respecto a la plata, el carbón usado en estos casos está entre mallas -6+16, -8 + 18 y -10 +20, a veces acompañado de una precipitación opcional de plata con Na<sub>2</sub>S cuando la relación plata/oro en la solución es muy alta.

Las propiedades adsorbentes del carbón son muy conocidas desde el siglo pasado, pero no se usó a falta de una técnica para disolver el oro y la plata del carbón, el cual se calcinaba y fundía, perdiéndose todo el carbón. Recién se puede usar el carbón con los avances que hizo Zadra por los años 1950 y ahora se usa ampliamente en nuestro medio.

La cantidad de oro y plata que pueden cargar los carbones está en función de la concentración de metales preciosos en la solución rica 1,5 mg pl de oro difícilmente llegaría a 6 kg de oro/TM. carbón, un carguío de 12 kg de metales preciosos por TM. de carbón se considera un valor aceptable en la industria.

#### Flow Shet del Tratamiento del Oro



## 6) Toxicidad e Impacto Ambiental

La controversia generada en torno a la minería se ha centrado más recientemente en la industria del oro y la utilización del cianuro mediante campañas ambientales y documentos como *Dirty Metals: Mining, Communities, and the Environment*. Si el cianuro se utiliza de modo incorrecto, puede ser tóxico para los seres humanos y la flora y la fauna.

Si bien comparativamente la exposición al cianuro en la minería es alta, hubo aproximadamente media docena de accidentes fatales en todo el mundo durante el siglo pasado, lo que equivale a una muerte cada dos décadas. En todo el mundo se registran unas 15,000 muertes laborales por año en el sector minero, más de las dos terceras partes en China.

Los casos más numerosos de exposición al cianuro de la población de los Estados Unidos se deben a las emisiones de los automóviles y al cigarrillo. La mayor parte del cianuro y sus compuestos que se descargan en aguas superficiales se originan en los efluentes de plantas municipales de tratamiento de aguas servidas y del cianuro de hierro incluido en las sales utilizadas como antiaglutinante en los caminos.

La forma más tóxica del cianuro es el HCN gaseoso. La Conferencia Norteamericana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) establece el límite de umbral tope de HCN en 4.7 ppm. En concentraciones de 20 a 40 ppm. de HCN en el aire, se puede observar cierto malestar respiratorio después de varias horas.

La muerte ocurre en pocos minutos con concentraciones de HCN por encima de aproximadamente 250 ppm. en el aire. Para el cianuro libre, la dosis letal en humanos por ingestión o inhalación varía entre 50 y 200 mg (1 a 3 mg. de cianuro libre por kg. de masa corporal). La dosis letal por absorción dérmica es considerablemente mayor, alrededor de 100 mg/kg. de peso.

Si esta partícula está neutralizada con un ión positivo como Na (sodio) o K, es una sal: NaCN, KCN, soluble en agua, cuyo aspecto es el de un sólido blanco sin olor, sumamente tóxico.

El CNH cianuro de hidrógeno que se forma cuando se combina la sal con agua, es un gas altamente tóxico y con olor a almendras amargas.

Una de las propiedades químicas del cianuro, que es la clave para entender tanto su toxicidad como su utilidad en la minería, es la capacidad de combinación con

metales: Fe, Ag, Au, Ni, Zn, Cd, Hg, etc. En todas las células procariotas o eucariotas (de bacterias, hongos, plantas, animales, incluido el hombre) una función vital es la respiración.

Cuando el cianuro entra en las células "captura" el Fe y la enzima deja de ser funcional. La consecuencia es que la célula deja de "respirar" y muere. Por esta razón el cianuro es un veneno para todos los seres vivos, y en dosis muy pequeñas. En minería se usa por su gran poder de combinación con el oro (Au).

## VI. PRUEBAS Y DISCUSIÓN

### ¿Cómo puedo estar expuesto al cianuro?

La exposición se puede dar por respirar aire contaminado, por beber agua que contenga concentraciones de cianuro, o ingerir alimentos contaminados.

Es importante saber que algunas plantas pueden absorber cianuro, lo mismo que la tierra, de manera que la contaminación podría extenderse a los cultivos de la zona afectada por la presencia del cianuro.

El riesgo para el hombre está presente al ingerir cualquier alimento (animal o vegetal) o agua contaminada. Las vías de absorción de las sustancias contaminantes son: digestiva (vía oral) inhalatoria (vía respiratoria) o cutánea (al contacto con la piel o heridas abiertas).

### Síntomas más comunes:

Falta de oxígeno, dolor de cabeza, agitación, confusión e irritación del sistema nervioso central. Aun si la intoxicación es menor puede afectar los riñones e inflamar las vías respiratorias.

Manifestaciones en la piel: tradicionalmente se describe un color rojo debido al incremento de la saturación de hemoglobina con oxígeno en sangre venosa.

La exposición a altos niveles de cianuro por cortos tiempos causa daños en el cerebro y el corazón, e incluso puede ocasionar estados de coma y muerte.

Puede causar la muerte casi inmediata, debido a que actúa como bloqueador de la respiración celular. Sin embargo, esto depende en gran medida de los niveles de contaminación.

### Prueba de lixiviación en pila

Presentamos a continuación una prueba de investigación de lixiviación por agitación y en pila, que representan las mejores condiciones de trabajo y resultados obtenidos para este mineral.

Peso	15 Kg
Malla	100%-½"
Ley	0.49 OZ/TC

Muestra completamente oxidada con abundante contenido de finos en forma de limonitas.

pH	10.5
Tiempo	20 días
Cianuro	0.1 %
Rate	2.1 gal/lib/pie <sup>2</sup>

Control y reajuste de concentración de reactivos cada 12 h. Siendo el consumo de reactivos:

Cal	3.0 kg/TMS
NaCN	2.1 kg/TMS

**Nota.**- El mineral fue aglomerado con el 50% del consumo de reactivos determinado por agitación, al 10% de humedad durante 24 horas.

La lixiviación en pila es una operación simple que no requiere molienda fina del mineral, usa menores consumos energéticos y agua, tiene ventajas económicas con respecto a métodos de agitación, por este motivo es posible procesar minerales marginales.

Los costos de instalación fluctúan entre 20 y 30% de los de una planta por agitación decantación Merrill-Crowe y los costos de operación entre 30 y 65%, ante lixiviación - adsorción en carbón activado - electro obtención.

Después de haber extraído el oro por medio de procesos hidrometalúrgicos, pueden estar presentes tres tipos principales de compuestos de cianuro en los efluentes residuales o en las soluciones de los procesos: cianuro libre, cianuro débilmente complejo y cianuro fuertemente complejo. Juntos, los tres compuestos de cianuro constituyen el "cianuro total".

Al conocer la química de estos tres tipos de cianuro se puede comprender su comportamiento respecto de la seguridad y el ambiente.

Otro factor importante es el pH del agua residual que se descarga y de las aguas del sistema receptor. Para un pH inferior a 8.0 aproximadamente el 95 por ciento del cianuro presente está en forma libre. El análisis de los datos conocidos indica que la toxicidad anión cianuro es de aproximadamente 0.4 veces la toxicidad del ácido (HCN) libre el pH. influye también sobre la solubilidad y la disociación de los complejos cianurados metálicos.

Las dosis letales para humanos son, en caso de que sean ingeridas, de 1 a 3 mg/kg del peso corporal, en caso de

ser asimilados, de 100-300 mg/kg, y de 100-300 ppm. si son aspirados. Esto significa que una porción de cianuro más pequeña que un grano de arroz sería suficiente para matar a un adulto.

La exposición a largo plazo a una dosis subletal podría ocasionar dolores de cabeza, pérdida del apetito, debilidad, náuseas, vértigo e irritación de los ojos y del sistema respiratorio. Hay que tener mucho cuidado al manejar el cianuro, para efectos de prevenir el contacto dañino de parte de los trabajadores.

Los trabajadores mineros suelen tener contacto con el cianuro, sobre todo durante la preparación de la solución de cianuro y la recuperación del oro de la solución.

Para los trabajadores mineros, los riesgos son el polvo de cianuro, los vapores de cianuro (HCN) en el aire provenientes de la solución de cianuro y el contacto de cianuro con la piel.

Hay que tener mucho cuidado al manejar el cianuro, para efectos de prevenir el contacto dañino de parte de los trabajadores.

## VII. CONCLUSIONES

1. La extracción en 30 - 60 días puede llegar a 60-80% de oro total, lográndose extraer el 50% en la segunda semana de tratamiento.
2. El consumo de agua es pequeño, fluctúa alrededor de 1,5M<sup>3</sup>/tonelada.
3. El consumo de energía está centrado fundamentalmente en el chancado que está en función de la granulometría requerida.
4. El método encuentra su aplicación para explotar numerosos recursos mineros donde la inversión es un factor determinante y los recursos económicos son escasos; lixiviando los minerales con metales preciosos es factible tener liquidez inmediata.
5. El método de lixiviación en pila, adsorción en carbón activado desorción y electro obtención es más apropiado para minerales que sólo tienen oro o mayor proporción de oro respecto a plata.
6. Cuando los minerales tienen mayor contenido de plata y poco oro se recomienda precipitar la Ag con Na<sub>2</sub>S enseguida adsorber el oro con carbón o precipitar ambos elementos con polvo de zinc con el equipo de Merrill-crowe, obteniendo en este último caso un precipitado rico en oro.
7. La utilización de cianuro reduce los costos operativos, pero asume muchos riesgos. Sin embargo, existen técnicas de remediación que permiten la extracción del oro en forma óptima.

### VIII. BIBLIOGRAFÍA

**Addion, Richard:** "Gold and silver extraction from sulfide ores", Mining congress Journal, pags 47 –54, october 1986.

**Arias Arce, Vladimir A.** *Disolución del oro y plata en medio clorurado V Simposium Nacional de Minera Aurífera*, pág 87 –90, Mayo 1999.

**Dutrillac, J.e.,** *the leaching of sulfide in chloride hydrometallurgy* 29, 1992, pág 1 –45.

**Bonan, J.M. Demarthe, H. Renon and F. Baratin,** "Chalcopyrite leaching by CuCl in strong NaCl solutions", *Met, trans. B* 12b (1981), 269 –274.

**Flynn, C. M. and S. M. Haslem,** 1995, *Cyanide Chemistry-*

*Precious Metals Processing and Waste Treatment:* U. S. Bur. Of Mines Information Circular 9429,282 pg.

**Flynn, C. M. and S. M. Haslem,** 1995, *Cyanide Chemistry-Precious Metals Processing and Waste Treatment:* U. S. Bur. Of Mines Information Circular.

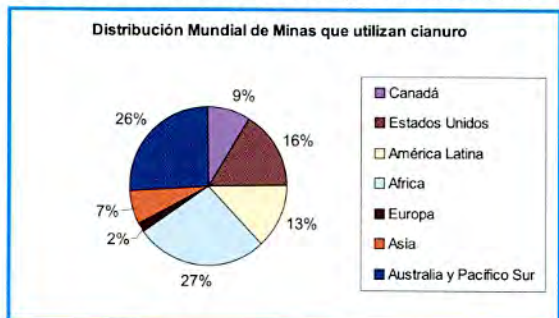
**Filmer, A. o:** "The dissolution of gold from roasted pyrite concentrates" *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy.*

**Hiskey, J.B, and Atluri, V.P.** *Dissolutions Chemistry of Gold and Silver in different Lixiviants.* Min. Proc. Review, 1988

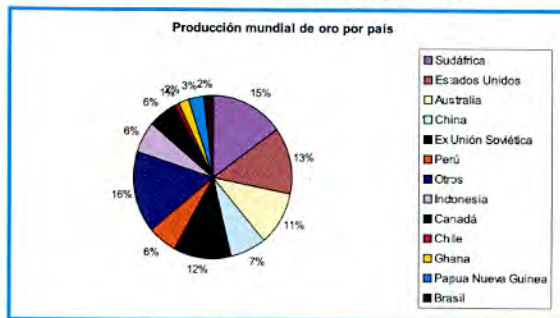
**Moran, R., 1998,** *Cyanide Uncertainties, Observations on the Chemistry, Toxicity and Análisis of cyanide in Mining-Related Waters.* Mineral Policy Center Issue Paper N°

### IX. ANEXOS

**Distribución mundial de Minas que utilizan Cianuro**



**Producción Mundial de Oro por País**



**Accidentes por Causas**

