

# Cianuro: Toxicidad y Destrucción Biológica

Blgo. José J. Guerrero

Consultoría en Biotecnología Minera y Ambiental Minera

E-mail: [esojgue@hotmail.com](mailto:esojgue@hotmail.com) / [esojgue@yahoo.com](mailto:esojgue@yahoo.com)

## RESUMEN

El cianuro es un producto químico ampliamente utilizado por la industria minera para la disolución o lixiviación de metales preciosos, específicamente el oro. Su alto grado de toxicidad si no es manipulado de manera adecuada, pudiendo originar considerables problemas ambientales.

La toxicidad de depende de que el cianuro se encuentre en forma libre (gas o líquido) o compleja (acuoso o sólido). Este compuesto puede inhalado (gas), ingerido (líquido o sólido) o adsorbido por contacto dérmico. La intoxicación aguda en el ser humano resulta en convulsiones, vómitos, coma y la muerte.

Dentro de las numerosas tecnologías existentes para la remediación del cianuro, la degradación biológica se presenta como una alternativa muy prometedora. El empleo de bacterias que desarrollan normalmente en ambientes de lixiviación con cianuro y su capacidad para utilizar este químico como fuente de nutrientes, convierten a esta tecnología en una valiosa herramienta natural para propósitos ambientales.

En el presente trabajo, brindaremos los principios y potencialidades de la biodegradación de cianuro para la industria minera, particularmente la aurífera.

**Keywords:** cianuro, biotecnología, bio-minería, biodegradación, toxicidad.

## SUMMARY

Cyanide is a chemical compound widely used for mining industry to dissolve or leach precious metals, mainly gold. Its high grade of toxicity turns cyanide into a high dangerous compound if it is not handled in an adequate way, with the potential to cause highest environmental problems.

Cyanide toxicity depends on its presence as in free form (gas or liquid) or complex (aqueous or solid). The compound can be inhaled (gas), ingested (liquid or solid) or adsorbed by dermal contact. Acute intoxication in human being results in convulsions, vomiting, coma and death.

Among existing technologies for remediation of cyanide, biological degradation presents itself as a promising alternative. The use of bacteria growing in cyanide leaching environments and their ability to employ this chemical as source of nutrients turns this technology a valuable natural tool for environmental purposes.

This paper will give a basic concept and potential of cyanide biodegradation to mining industry, particularly gold one.

**Keywords:** cyanide, biotechnology, bio-mining, biodegradation, toxicity.

## Introducción

El cianuro es una sustancia química, caracterizada por la presencia de una unidad química formada por el enlace carbono-nitrógeno (CN) se combina con una gran mayoría de compuestos orgánicos e inorgánicos. Es potencialmente letal, que actúa rápidamente sobre el sistema respiratorio.

Básicamente, el cianuro se presenta como cianuro de hidrógeno (HCN), que es un gas, o en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN). Generalmente, el cianuro se caracteriza por un olor a "almendras amargas", pero no siempre emana un olor y no todas las personas pueden detectarlo.

El cianuro es uno de los principales compuestos utilizados por la industria química debido a su composición de carbono y nitrógeno, ambos elementos comunes, y a la facilidad con la cual reacciona con otras sustancias.

Alrededor del 80% del cianuro fabricado en el mundo se emplea en la producción de químicos orgánicos (nitrilo,

nylon y plásticos acrílicos); así como en la fotografía y la producción de goma sintética.

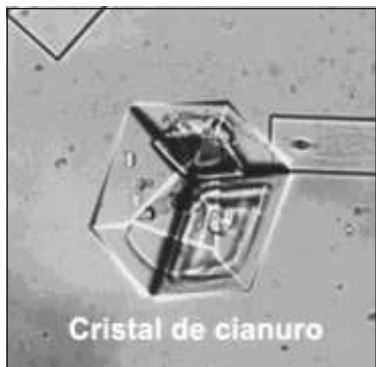
El cianuro de hidrógeno gaseoso se ha utilizado ampliamente para exterminar a los roedores y depredadores grandes, y en la práctica hortícola, para controlar las plagas de insectos que han desarrollado resistencia a otros pesticidas.

Además, el cianuro se utiliza en productos farmacéuticos como el laetril, una sustancia para combatir el cáncer, y el nitroprusiato, una droga para reducir la presión arterial. Los compuestos de cianuro también se utilizan en vendas quirúrgicas que promueven la cicatrización y reducen las cicatrices.

Tabla 1.- Algunas drogas farmacéuticas que presentan molécula de cianuro en su composición (Williams, 1948).

NOMBRE	ECUACIÓN
Cocaína	$\text{CuCN} \cdot 9(\text{C}_{17}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N} \cdot \text{HCN}) \cdot 7\text{HCN}$
Novocaína	$\text{CuCN} \cdot 9(\text{C}_{17}\text{H}_{20}\text{O}_2\text{N}_2 \cdot \text{HCN}) \cdot \text{HCN}$
Codeína	$\text{CuCN} \cdot 4(\text{C}_{18}\text{H}_{21}\text{O}_3\text{N} \cdot \text{HCN}) \cdot 3\text{HCN}$
Nicotina	$\text{CuCN} \cdot 2(\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2 \cdot \text{HCN}) \cdot 1.5\text{HCN}$
Morfina	$\text{CuCN} \cdot 9(\text{C}_{17}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N} \cdot \text{HCN}) \cdot 7\text{HCN}$
Cafeína	$4\text{CuCN} \cdot (\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}_2\text{N}_4 \cdot \text{HCN})$

En otros sectores industriales, el cianuro se empleado en la producción de papel, textiles y plásticos. Las sales de



cianuro son utilizadas en la metalurgia para galvanización, limpieza de metales y la recuperación del oro del resto de material removido. El gas de cianuro se utiliza para exterminar plagas e insectos en barcos y edificios.

Las sustancias químicas encontradas en productos hechos con base en acetonitrilo, utilizados para remover uñas postizas, pueden producir cianuro si se ingieren accidentalmente.

### Cianuro en la naturaleza

En la naturaleza, el cianuro es formado, excretado y degradado por miles de animales, plantas, insectos, hongos y bacterias. Los niveles de cianuro potencialmente liberado por la digestión o inadecuada preparación de plantas cianogénicas pueden llegar a concentraciones de cientos de partes por millón. La ingesta de estos vegetales puede originar la muerte en animales y el envenenamiento del ser humano.

En la naturaleza se encuentran presentes bajas concentraciones de cianuro, por ejemplo, en muchos insectos y plantas, entre las que se incluyen una amplia variedad de especies vegetales. El cianuro se encuentra en almendras, albaricoques, bambúes, frijoles germinados, cerezas, aceitunas, papas, sorgo, soya, y nueces, a las que brinda protección contra los depredadores.

Tabla 2.- Concentraciones de cianuro en plantas seleccionadas (Extractado de Eisler, 1991)

Especies de Plantas	Concentración (mg/Kg)
Yuca	
Hojas	377-500
Raíces	138
Raíces desecadas	46-< 100
Puré	81
Punte de Bambú	Máx. 8000
Poroto Blanco (Birmania)	2100
Almendra (amarga)	280 2500
Sorgo (planta joven)	Máx. 2500

Además, este compuesto está presente en gran parte del ambiente diario al que estamos expuestos, por ejemplo, en la sal usada para derretir el hielo en los caminos y en los escapes de los automóviles. También es un estabilizante de la sal de mesa.

También se encuentra en el humo del cigarrillo y en los productos de combustión de los materiales sintéticos como los plásticos y que se desprenden al quemar un material.

### Cianuro en minería aurífera

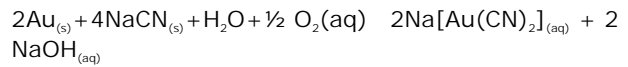
Desde aproximadamente finales del siglo XIX, el cianuro de sodio es empleado intensamente en operaciones auríferas para la disolución o lixiviación de oro. El proceso fue patentado en el Reino Unido por J.S. MacArthur y los hermanos W. y R. Forrest el 19 de octubre de 1887.

Del total de la producción mundial de cianuro, alrededor del 20% se utiliza para fabricar cianuro de sodio, una forma sólida de cianuro cuya manipulación es relativamente fácil y segura. De este porcentaje, el 90%, es decir, el 18% de la producción total, se utiliza en minería en todo el mundo, mayormente para la recuperación de oro.

Los procesos de extracción aurífera empleada en operaciones mineras requieren de soluciones muy diluidas de

cianuro de sodio, generalmente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón).

En contacto con el oro, el cianuro forma complejos estables, razón por la cual su importancia en minería aurífera.



En procesos industriales asociados con la extracción de oro y plata se conocen varias formas de cianuros: total, libre, y disociable en ácido débil (WAD, por sus siglas en inglés).



### Toxicidad del cianuro

La inadecuada manipulación o empleo del cianuro lo convierte en un compuesto potencialmente tóxico.

En Canadá, el cianuro puede ser descargado en valores de CN<sup>-</sup> total de entre 1-2 mg/l y CN<sup>-</sup> WAD de 0.1 0.5 mg/l; mientras que en Estados Unidos los límites establecidos por la *Agencia de Protección Ambiental (EPA)*, por sus siglas en inglés son de 0.2 mg/l de cianuro WAD y 1 mg/l de cianuro total. En el Perú, la legislación establece niveles de cianuro total de 1 mg/l; 0.1 mg/l de cianuro libre y 0.2 mg/l de cianuro WAD.

Diariamente los seres humanos tienen contacto directo con el cianuro o sus derivados a través de los alimentos que consume y productos que utiliza. De otro lado, en la industria minera son numerosos los trabajadores que tienen contacto frecuente con este reactivo no reportándose accidentes fatales o muertes originadas por la intoxicación de este compuesto. La causa principal de muerte por cianuro involucra la ingesta de plantas cianogénicas, cuyos elevados niveles de cianuro provocan una parálisis permanente de las extremidades.

A nivel tisular (tejidos), el cianuro actúa sobre el sistema respiratorio, impidiendo el uso del oxígeno mediante la inhibición de la acción de las enzimas respiratorias. Una vez que se encuentra en el torrente sanguíneo, el cianuro forma un complejo estable con la citocromo oxidasa, una enzima que promueve el traspaso de electrones a las mitocondrias de las células durante la síntesis de adenosin trifosfato (ATP)<sup>2</sup>.

Si la citocromo oxidasa no funciona correctamente las células no consiguen aprovechar el oxígeno del torrente sanguíneo, lo que causa hipoxia citotóxica o asfixia celular. La falta de oxígeno provoca que el metabolismo cambie de aerobio a anaerobio, lo que conlleva a la acumulación de lactato en la sangre. El efecto conjunto de la hipoxia y la acidosis láctica provoca una depresión en el sistema nervioso central que puede causar paro respiratorio y resultar mortal.

La exposición a períodos de inhalación crónica (a largo plazo) resulta en efectos sobre el sistema nervioso central (SNC). Otros efectos incluyen efectos sobre el sistema respiratorio y cardiovascular, un agrandamiento de la glándula tiroides e irritación a los ojos y la piel.

En términos generales, se puede señalar que las personas expuestas a pequeñas cantidades de cianuro por la respiración, la absorción de la piel o el consumo de alimentos contaminados con cianuro pueden presentar algunos o todos los síntomas siguientes en cuestión de minutos: respiración rápida; agitación; mareo; debilidad; dolor de cabeza; náusea y vómito; y ritmo cardíaco rápido.

Asimismo, la exposición por cualquier medio a una cantidad grande de cianuro puede también causar otros efectos en la salud como: convulsiones; presión sanguínea baja; ritmo cardíaco lento; pérdida de la conciencia; lesión en el pulmón y falla respiratoria que lleva a la muerte.

El cuerpo posee diversos mecanismos para expulsar el cianuro de forma efectiva. El cianuro reacciona con el tiosulfato y produce tiocianato en reacciones catalizadas por enzimas de azufre como la rodanasa. El tiocianato es liberado por la orina en cuestión de días.

Si bien el tiocianato es siete veces menos tóxico que el cianuro, en concentraciones altas provenientes de una exposición crónica al cianuro puede afectar la glándula tiroidea. El cianuro tiene más afinidad por la metahemoglobina que por la citocromo oxidasa, y juntos forman cianometahemoglobina. Si estos u otros mecanismos de desintoxicación no son superados por la concentración de cianuro y el tiempo de exposición a la que el cuerpo estuvo expuesto, se puede evitar que el envenenamiento por cianuro sea fatal.

### Vida silvestre

Además del hombre, los animales pueden verse afectados por los efectos del cianuro. Los mamíferos terrestres son afectados de manera limitada, debido principalmente a que las operaciones mineras se encuentran debidamente aisladas.

Un aspecto a tomar en cuenta lo constituye la exposición de animales domésticos y salvajes a plantas cianogénicas y recipientes que contengan cianuro empleados en el control de predadores molestos, como el coyote.

Un segundo grupo de animales afectados por este compuesto químico son las aves migratorias y acuáticas que llegan a pozas o espejos de agua abiertos con altos contenidos de cianuro. Este problema ambiental es evitado mediante la colocación de coberturas o "bolas flotantes", o disminuyendo la concentración del cianuro WAD.

El componente más vulnerable del ecosistema a los impactos adversos de una exposición al cianuro lo constituye la vida acuática. Los organismos acuáticos son más sensibles a los efectos tóxicos de este reactivo, y físicamente no es posible evitar su ingreso a los cuerpos de agua.

### Métodos de tratamiento

Los sistemas o métodos de tratamiento del cianuro deberán estar dirigidos a eliminar la potencial toxicidad del reactivo para la vida silvestre y acuática, así como de las aves. Estos procedimientos podrían incluir la remoción del cianuro de: pulpas de relave de operaciones de molienda; eliminación de soluciones provenientes del proceso de Merrill-Crowe; soluciones de exceso de operaciones de lixiviación en pilas o "vat"; soluciones sobrenadantes de presas de relaves; y de filtraciones.

Los tratamientos para el cianuro pueden ser clasificados como destructivos y de recuperación.

En los primeros, reacciones químicas o biológicas son utilizadas para convertir al cianuro en un compuesto menos tóxico; mientras que en los segundos, el proceso de reciclaje involucra la remoción del cianuro de la solución o la pulpa.

### Destrucción Biológica<sup>6</sup>

La degradación biológica de cianuro aprovecha de la capacidad de ciertos grupos de microorganismos, mayormente bacterias, de utilizar compuestos cianurados como fuente de carbono y nitrógeno convirtiendo el compuesto tóxico en sustancias inocuas.

La biodegradación de cianuro, como también se le conoce, resulta en la formación de amonio. Los microorganismos involucrados poseen varios sistemas enzimáticos específicos que les permite desarrollar en ambientes con alta concentración de cianuro.

Entre los microorganismos se conoce de la capacidad degradadora de muchos hongos (*Fusarium*, *Hasenula*) y bacterias (*E.coli*, *Pseudomonas fluorescens*, *Citrobacter*, *Bacillus subtilis* y otros) quienes asimilan cianuro y lo usan como fuente de nitrógeno y/o carbono, teniendo como intermediario NH<sub>3</sub>.

Son diversos los mecanismos empleados para utilizar o romper la molécula de cianuro. Uno de los mecanismos involucra a la enzima cianuro hidratasa, que resulta en la conversión irreversible del cianuro en formamida, que finalmente es transformada en CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>.

El cianuro también puede ser convertido en -cianoalanina o en un -aminonitrilo por la -cianoalanina sintetasa, seguida de la hidrólisis de los productos para liberar un ácido y Nh<sub>3</sub>.

Tabla 3.- Vías de biodegradación de cianuro

Compuesto degradado	Micro-organismo involucrado	Reacción
HCN via HNCO	<i>P. fluorescens</i>	NADH+H <sup>+</sup> +HCN+O <sub>2</sub> HNCO+H <sub>2</sub> O+NAD <sup>+</sup> HCNO+ H <sub>2</sub> O CO <sub>2</sub> +NH <sub>3</sub>
HCN	<i>Stemphylium loti</i>	HCN + H <sub>2</sub> O HCONH <sub>2</sub>
HCN	<i>Alcaligenes xylosoxidans</i> subsp. <i>Denitrificans</i>	No precisado en la literatura
NaCN	<i>P. putida</i>	No precisado en la literatura
KCN	<i>Pseudomonas stutzeri</i> Ak61	No precisado en la literatura
KCN	<i>Bacillus pumilus</i> C1	No precisado en la literatura
Cianuros Orgánicos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	No precisado en la literatura
HCN	Cultivos mixtos - no se ha determinado un microorganismo anaerobio específico	HCN+2H <sub>2</sub> OHCOO <sup>-</sup> +NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> En condiciones metanogénicas

Una tercera ruta involucra la utilización de la cianuro monoxigenasa para catalizar la conversión de HCN en cianato (HOCN), lo que lleva a una descomposición catalítica mediada por otra enzima, cianasa, para producir CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>. La cianasa es inducible con el cianato mientras que la enzima cianuro monoxigenasa no lo es.

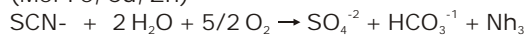
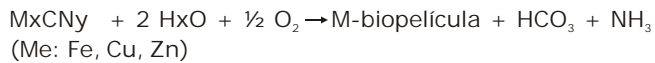
Algunas cepas bacterianas transforman directamente cianuro en CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> por medio de la cianuro dioxigenasa, sin la formación de cianato como intermediario.

Los tratamientos biológicos se han convertido en una alternativa interesante para la industria minera debidos principalmente al éxito obtenido por *Homestake Mining* en su planta de Lead, South Dakota, Estados Unidos.

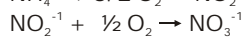
En esta planta, un proceso aeróbico es empleado para remover cianuro, tiocianato, cianato, amonio y metales provenientes de soluciones cianuradas. En una segunda etapa, el amonio, altamente tóxico para la vida acuática, es transformado en nitrato. El principal microorganismo involucrado en la aplicación de la tecnología es *Pseudomonas sp.*

El proceso se realiza empleando Reactores Biológicos Rotatorios donde películas de bacterias se encuentran adheridas a discos giratorios que rotan de manera lenta para permitir el adecuado contacto, y degradación de cianuro, entre el microorganismo y el efluente cianurado.

Primera Etapa:



Segunda Etapa:



Los microorganismos involucrados en el tratamiento biológico de cianuro y tiocianato incluyen una mezcla heterogénea de bacterias indígenas del suelo que se han adaptado a vivir en ambientes de cianuro luego de una constante y continúa exposición.

Aunque el cianuro es fácilmente degradado por las bacterias aeróbicas, lo mismo no ocurre con el tiocianato que no puede ser removido fácilmente mediante procesos anaeróbicos (en ausencia de oxígeno). En suma, el tratamiento biológico anaeróbico es un proceso más lento y más susceptible a la presencia de productos tóxicos resultantes de la exposición a otros constituyentes en el efluente<sup>11</sup>.

Como en todo sistema biológico, los factores ambientales más críticos para una buena eficacia del tratamiento biológico incluyen al pH, temperatura, niveles de oxígeno y la disponibilidad de nutrientes.

Los microorganismos responsables de la destrucción de cianuro pueden ser aislados a partir de ambientes de lixiviación en operaciones mineras auríferas. Su cultivo requiere de medios de cultivo simples y/o específicos. En este último caso, los medios deberán contener exclusivamente cianuro (CN-) como única fuente de carbono y nitrógeno.

Hoy en día, aunque los distintos mecanismos que rigen la degradación microbiana de cianuro están bien comprendidos, falta comprender los principios de ingeniería que permitan disminuir los costos del proceso. En este sentido, un mejor futuro se vislumbra con el empleo de reactores de cama fluidizada y película fija más que reactores de cama fija.

Fitorremediación de cianuro<sup>7,9,10</sup>

Una nueva posibilidad para el tratamiento de suelos contaminados con residuos de cianuro lo constituye el empleo de plantas cianogénicas, especies con capacidad para sintetizar *glucósidos cianogénicos*, compuestos que se descomponen rápidamente hacia cianuro cuando una planta es dañada. Debido a que el cianuro es un componente natural de estas plantas, poseen elevadas capacidades para degradar este compuesto químico.

Tabla 4.- Algunas plantas y los glicosidos que producen <sup>10</sup>

Glicosidos Cianogénicos	Especie Vegetal	
	Nombre común	Nombre Científico
Amygdalin	almonds	Prunus amygdalus
Dhurrin	sorghum	Sorghum album, Sorghum bicolor
Linamarin	cassava	Manihot esculenta M. carthaginensis
	lima beans	Phaseolus lunatus
Lotaustralin	cassava	Manihot carthaginensis
	lima beans	Phaseolus lunatus
Prunasin	stone fruits	Prunus species e.g., P. avium, P. padus, P. persica, P. macrophylla.
Taxiphyllin	bamboo shoots	Bambusa vulgaris

Conclusiones

1. Dada la importancia del cianuro en la extracción de metales preciosos constituye un aspecto de preocupación desde el punto de vista ambiental.
2. El empleo de novedosas tecnologías como la biodegradación o la fitorremediación de cianuro se presentan como una alternativa para el control de la contaminación en la industria minera.
3. Los beneficios del empleo del tratamiento biológico permite emplear bacterias indígenas con la habilidad de degradar cianuros libres y complejos a niveles de pH que se emplean en las plantas de proceso. Además, del uso de productos agrícolas como fuente de nutrientes para las bacterias responsables.
4. El proceso produce efluentes de bajo costo que se ajustan a los criterios de descarga establecidos.

Referencias Bibliográficas

1. Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) , "Emergencias causadas por agentes químicos: Datos del Cianuro", 2003, en [www.bt.cdc.gov/agent/cyanide/basics/espanol/pdf/cyanide/facts\\_esp.pdf](http://www.bt.cdc.gov/agent/cyanide/basics/espanol/pdf/cyanide/facts_esp.pdf)
2. "Efectos del cianuro en la salud humana y en el medio ambiente", en [www.caem.com.ar/novedades/EfectosdelCianuro.html](http://www.caem.com.ar/novedades/EfectosdelCianuro.html)
3. Logsdon, Mark J.; Karen Hagelstein, and Terry I. Mudder; "El manejo del cianuro en la extracción de oro", en [www.cyantists.com.-ICMMEIManejodelCianuro.pdf](http://www.cyantists.com.-ICMMEIManejodelCianuro.pdf)
4. Meehan, Samantha; 2000. "The fate of cyanide in groundwater at gasworks in south eastern Australia". Ph. D Thesis, chapter 3
5. U.S. Environmental Protection Agency, Cyanide, [www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/cyanide.html](http://www.epa.gov/ttn/atw/hlthef/cyanide.html) and [www.epa.gov/safewater/dwh/c-loc/cyanide.html](http://www.epa.gov/safewater/dwh/c-loc/cyanide.html)
6. Guerrero, José; 2002, "Cianuro: destrucción, recuperación y lixiviantes alternativos". Información no publicada.
7. Institute of Environmental Research (Biology five); "Cyanide Phytoremediation" en [www.bio5.rwth-aachen.de/ubcen/Research/Bioremediation/bioremediation.html](http://www.bio5.rwth-aachen.de/ubcen/Research/Bioremediation/bioremediation.html)
8. Jandhyala, DM; Wilson, RC; Sewell, BT & Benedik, MJ; 2005, "Comparison of cyanide-degrading nitrilases", Appl. Microbiol. Biotechnol, 2005, Feb. 10.
9. Banks, M. Katherine and Mannering, Fred; "Phytoremediation of Cyanide contaminated soils"; en [www.hsrc.org/mw-cyanide.html](http://www.hsrc.org/mw-cyanide.html)
10. G. Speijers, "Cyanogenic Glycosides", en [www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v30je18.htm](http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v30je18.htm)
11. Ata Akcil; "Destruction of cyanide in gold mill effluents: biological versus chemical treatments", Biotechnology Advances 21 (2003) 501 511