

**ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN DE EFLUENTES
LÍQUIDOS CONTAMINADOS CON CIANURO GENERADOS EN EL BENEFICIO
DEL ORO**

**PAOLA ANDREA HERNÁNDEZ SUÁREZ
ESTEBAN GARCÍA JIMÉNEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2014

**ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN DE EFLUENTES
LÍQUIDOS CONTAMINADOS CON CIANURO GENERADOS EN EL BENEFICIO
DEL ORO**

**PAOLA ANDREA HERNÁNDEZ SUÁREZ
ESTEBAN GARCÍA JIMÉNEZ**

**Monografía para optar al título de
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director
MARTHA CRISTINA FORERO USAETA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2014

Ni la Universidad Industrial de Santander,
ni los jurados se hacen responsables de
los conceptos expuestos en el presente
documento.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. CIANURO EN LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ORO.....	17
1.1. PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL ORO.....	17
1.1.1. Explotación del mineral.....	18
1.1.2. Beneficio y transformación de minerales	19
1.2. HIDROMETALURGIA	21
1.2.1. Efluentes de la hidrometalurgia.....	21
1.3. GENERALIDADES DEL CONTAMINANTE	22
1.3.1. Cianuro libre.....	23
1.3.2. Complejos de cianuro	23
1.4. IMPACTO DEL CIANURO A LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE	26
1.4.1. Impactos a la Salud humana.....	27
1.4.2. Impactos al medio Ambiente.....	27
2. MARCO LEGAL	29
2.1. PROYECTO DE LEY MINERA	32
2.2. LEGISLACIÓN VIGENTE EN EL PAÍS (CÓDIGO MINERO).....	33
2.3. CONSIDERACIONES DEL CIANURO EN EL MARCO NORMATIVO AMBIENTAL	34
3. TECNICAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS CON CIANURO.....	36
3.1. BIORREMEDIACIÓN DE COMPUESTOS CIANURADOS	40
3.1.1. Vías de degradación de cianuro	41
3.2. TECNICAS DE BIORREMEDIACIÓN APLICADAS.....	44
3.2.1. Atenuación Natural (AN)	44
3.2.2. Contactores Biológicos Rotativos (CBRs).....	45
3.2.3. Filtros percolados.....	49
3.2.4. Sistemas tipo humedal.....	50

4. COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE BIORREMDIACIÓN.....	56
5. CONCLUSIONES	59
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Clasificación y nomenclatura de los compuestos de cianuro	26
Tabla 2 Valores máximos permisibles de cianuro según su condición	35
Tabla 3 Principales características de las diversas tecnologías de eliminación del cianuro	37
Tabla 4 Comparativo de las técnicas de biorremediación estudiadas	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de beneficio del oro	20
Figura 2 Procesos de atenuación natural del cianuro	45
Figura 3 . Contactor Biológico Rotativo.....	46
Figura 4 Proceso de tratamiento desarrollado en la mina de Homestake.....	48
Figura 5 Proceso de biotratamiento aerobio llevado a cabo por bacterias	49
Figura 6 Funcionamiento del sistema de filtros percolados	50
Figura 7 Esquema propuesto por Smith y Mudder (1991) para un tratamiento de residuos de cianuración mediante sistema pasivo.....	54

RESUMEN

TITULO: ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN DE EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS CON CIANURO GENERADOS EN EL BENEFICIO DEL ORO.*

Autores: GARCÍA JIMÉNEZ, Esteban; HERNÁNDEZ SUÁREZ, Paola Andrea**

Palabras claves: Oro, cianuro, biorremediación, efluentes líquidos, tratamiento pasivo, tratamiento activo.

El cianuro utilizado en los procesos de lixiviación del oro constituye una problemática tanto ambiental como para la salud debido a los impactos causados por la contaminación de efluentes líquidos, por lo que se requiere implementar tecnologías para su tratamiento.

En este trabajo se realizó una revisión de las técnicas de biorremediación implementadas en el tratamiento de efluentes líquidos contaminados con cianuro. Se estudió los procesos de explotación y extracción del oro, evaluando las generalidades del contaminante y sus principales impactos. Así mismo, se relacionó la normatividad ambiental de Colombia en cuanto a los límites permisibles de cianuro y se analizó el estado de reglamentación de la actividad minera en el país. Por último, se estudiaron las técnicas de biorremediación más reportadas a nivel mundial aplicadas en la reducción de las concentraciones de cianuro en efluentes líquidos y se compararon para evaluar factores asociados a su implementación y operación.

Se evidencio que los tratamientos biológicos pasivos constituyen una buena alternativa debido a su eficiencia y bajo costos de implementación y operación; sin embargo se hace necesario realizar un análisis preliminar de las características del efluente a tratar que permita definir que tecnología es la más conveniente a fin de cumplir la normatividad. Es importante que las empresas y el estado fomenten en primera medida la adopción de buenas prácticas ambientales y técnicas de producción más limpia, que permitan lograr mayores rendimientos en los procesos de beneficio del oro y reducir la contaminación con cianuro a los cuerpos de agua.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director M.I. Martha Cristina Forero

ABSTRACT

TITLE: STATE OF THE ART OF TECHNIQUES OF BIOREMEDIATION OF LIQUID EFFLUENTS CONTAMINATED WITH CYANIDE GENERATED IN GOLD PROFIT.*

Authors: GARCÍA JIMÉNEZ, Esteban; HERNÁNDEZ SUÁREZ, Paola Andrea**

Key words: Gold, cyanide, bioremediation, liquid effluent, passive treatment, active treatment

The cyanide used in gold leaching process is a problem to environmentally and health due to impacts caused by pollution of wastewater, so it is necessary to implement technologies for treatment.

In this paper a review of bioremediation techniques implemented in the treatment of wastewater contaminated with cyanide was performed. Processes of exploitation and extraction of gold was studied by evaluating the generality of the contaminant and its major impacts. Also, the environmental regulation in Colombia was related as to the permissible limits of cyanide and state regulation of mining activities in the country was analyzed. Finally most bioremediation techniques applied globally reported in reducing the concentrations of cyanide in effluents and compared to assess factors associated with its implementation and operation were studied.

It was evident that passive biological treatments are a good alternative because of its efficiency and low cost of implementation and operation; however it is necessary to perform a preliminary analysis of the characteristics of the effluent to be treated in order to define which technology is most suitable to meet the regulations . It is important for companies and the state promote in a first step the adoption of good environmental practices and cleaner production techniques that allow higher yields in gold beneficiation processes and reduce cyanide pollution to water bodies.

* Thesis

** Faculty of Engineering Physicochemical. Chemical Engineer School. Environmental Engineer Specialist. Director: M. Eng. Martha Cristina Forero

GLOSARIO

BALSA DE SEDIMENTACIÓN: Excavación artificial destinada a la acumulación de sólidos y líquidos con alto contenido de sedimentos, cuya función principal es permitir la decantación de los sólidos en suspensión en un determinado período de tiempo.

BIORREMEDIACIÓN: La biorremediación es una tecnología emergente que utiliza organismos vivos (plantas, algas, hongos y bacterias) para absorber, degradar o transformar los contaminantes y retirarlos, inactivarlos o atenuar su efecto en suelo, agua y aire.

CIANURACIÓN: Proceso de extracción de oro del mineral mediante el uso de cianuro.

CIANURO SAD: Especies de cianuro de difícil disociación en ácido, se caracterizan por formas fuertes y estables complejos con metales como el Fe, Co, Au, Pt, y Pd, los cuales se degradan más lentamente que los mencionados anteriormente.

CIANURO WAD: Especies de cianuro de fácil disociación en ácido, son liberadas con un pH moderado (pH 4,5) como HCN y CN⁻ acuosos, la mayoría de los complejos de Cu, Cd, Ni, Zn, Ag y otros con constantes de baja disociación.

DESCONTAMINAR: Eliminar total o parcialmente los elementos que contribuyen a disminuir la calidad del medio ambiente.

IMPACTO AMBIENTAL: Efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos.

LIXIVIACIÓN (BENEFICIO): Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo apropiado.

LIXIVIADOS: Soluciones obtenidas por extracción o lixiviación, mediante el transporte de agua y movilización descendente de sustancias.

MENA: Es el mineral de base del que es posible extraer otro mineral de mayor pureza o importancias económica.

MINERÍA: Es una industria extractiva de yacimientos minerales, incluye operaciones a cielo abierto, canteras, dragado, y operaciones combinadas orientadas a la transformación de minerales bajo tierra o en superficie.

MINERÍA A CIELO ABIERTO: Conjunto de procedimientos mineros desarrollados en superficie.

VERTIMIENTO LÍQUIDO: Cualquier descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o a un alcantarillado, con sustancias de interés sanitario o contaminante.

OXIDACIÓN: Cambio en el estado de oxidación de un elemento representado por la pérdida de electrones. O proceso durante el cual son eliminadas sustancias químicas oxidables como carbono y azufre presentes en el mineral por la acción de oxígeno u otro agente oxidante.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de ambientes por la extracción aurífera está asociada a las diferentes etapas del proceso, siendo el beneficio del oro una etapa relevante y estudiada debido a la contaminación con metales como el cianuro, utilizado en los procesos de lixiviación, con importantes riesgos a la salud y efectos negativos al ambiente. Existen diversos métodos para el tratamiento de estos efluentes contaminados con cianuro y se pueden dividir en tres grandes grupos: degradación natural, química y biológica. Aunque los métodos de degradación química, como la cloración alcalina, peróxido de hidrógeno y el procesos INCO (SO₂/aire) se utilizan con más frecuencia, los métodos de degradación biológica están ganando terreno como alternativas efectivas en el tratamiento de las diversas formas de cianuro mediante procesos de bajo costo, simples y respetuosos con el medio ambiente.

La biorremediación de ambientes contaminados con metales pesados, es un tema que se ha venido abordando de forma lenta pero segura, ya que la contaminación de cuerpos de agua y suelos con efluentes líquidos o aguas residuales con altos contenidos de metales constituye una problemática global y creciente en diferentes países y regiones. A nivel nacional el cianuro es considerado sustancia de interés sanitario según el decreto 1594 de 1984, y así mismo determina que los valores máximos permisibles de cianuro en vertimientos es de 1,0 mg CN/L, dentro de los mecanismos que han sido aplicados para el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados como el cianuro, se encuentran diversos métodos pasivos y activos.

Los altos índices de contaminación del agua y suelos ha llevado a los científicos y empresarios a centralizar sus investigaciones en tratar de descontaminar estos recursos mediante técnicas modernas como la biorremediación; sin embargo, este

procedimiento es de escasa aplicación en nuestro país. En el presente trabajo se estudiará y analizará las principales técnicas de biorremediación como alternativa para disminuir la concentración de cianuro en efluentes líquidos generados en los procesos del beneficio del oro.

1. CIANURO EN LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ORO

La minería aurífera es una de las actividades económicas más antiguas de la humanidad, con gran variedad de métodos y técnicas empleadas para su proceso de extracción, diferentes porcentajes de eficiencia de recuperación y niveles de afectación al ambiente y a la salud humana. Países como Sudáfrica, Estados Unidos, Australia, Canadá, China y Rusia constituyen los mayores productores de oro a nivel mundial. Desde los años noventa, América Latina se ha convertido en la zona geográfica más importante del mundo en la captación de inversiones para la exploración y desarrollo de la minería aurífera. En Colombia, esta actividad ocupa un importante renglón de la economía, siendo el vigésimo segundo país más productor de oro a nivel mundial con un 1.2% de la producción total (1)

1.1. PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL ORO

Dentro del proceso de extracción del oro se involucran las etapas de exploración, planeación y desarrollo, beneficio y cierre de la mina. La etapa de la exploración se basa en la caracterización de los yacimientos mediante el uso técnicas que permitan evaluar las condiciones geológicas, físicas y culturales del depósito. La planeación y desarrollo, comprende la etapa de organización, diseño, establecimiento de la infraestructura y equipos para adelantar la explotación del mineral. Seguido a esto, se encuentra la etapa del beneficio y transformación de minerales, que tiene como objeto aumentar el contenido metálico en concentrados de fácil manejo y mayor valor agregado; en esta etapa se involucran las operaciones mecánicas de reducción, con mecanismos de molienda, trituración y clasificación, operaciones físico-químicas de lixiviación, mediante el uso de cianuro, y procesos de refinación mediante operaciones técnicas de fundición y moldeado del metal. Por último, está la etapa de cierre de la mina, que implica el

desmantelamiento y retiro de las instalaciones, maquinaria y equipos, así como la ejecución de trabajos de manejo de residuos, recuperación y rehabilitación del área de explotación.

1.1.1. Explotación del mineral

La explotación aurífera se puede desarrollar mediante dos sistemas básicos: explotación de filón o subterránea y explotación aluvial o a cielo abierto.

➤ Explotación de filón (subterránea)

Consiste en la apertura de zanjas, siguiendo el rumbo de los afloramientos o mediante túneles, cámaras y pilares a tajo abierto. La apertura para la extracción se realiza por voladuras con explosivos y la perforación se realiza en forma manual, con herramientas como la pica, pala, y barreno, o mecanizada, mediante el uso de taladros mecánicos o neumáticos. Posterior a esto, se carga el material y es transportado para su beneficio, lo cual involucra operaciones mecánicas de reducción del tamaño, concentración del mineral, operaciones físico-químicas de lixiviación y formación de aleaciones, operaciones térmicas de fundición y moldeado del metal (2).

➤ Explotación aluvial (a cielo abierto)

Consiste en succionar el material del lecho o las orillas de los ríos o quebradas mediante el uso de procesos, ya sean mecanizados, con retroexcavadoras, buldózer, motobombas, monitores, dragas, taladros mecánicos o neumáticos; o con el uso de herramientas manuales como picas, barrenos y palas. El beneficio del mineral se realiza simultáneamente a la explotación en el canalón el cual va montado en la misma dragueta. El sistema aluvial produce alta contaminación de los recursos hídricos y grandes pérdidas de oro fino (1).

1.1.2. Beneficio y transformación de minerales

Por lo general, el beneficio del mineral se realiza en áreas inmediatas a la explotación o en la cabecera municipal más cercana, involucrando las siguientes operaciones:

➤ Operaciones mecánicas (molienda, trituración y clasificación)

En este proceso, el mineral que está acopiado en la planta de cianuración se transporta a través de una cinta en la cual se ajusta pH adicionando cal; posteriormente se realiza la molienda primaria a través de un molino que genera un polvo fino. En este punto, el mineral es retenido mediante un trómel clasificador y así mismo es enviado un separador en donde se recuperan las bolas del molino. Al final, el mineral retenido es recirculado a la trituradora. El material que no es retenido en el trómel, es llevado a un tanque alimentador y posteriormente a una batería de hidrociclones para su correspondiente clasificación. Finalmente se obtiene una pulpa de tamaño de grano pequeño (aprox. 75 μm) que ingresa a la etapa de lixiviación. En este punto, se elimina el exceso de agua empleando un espesador.

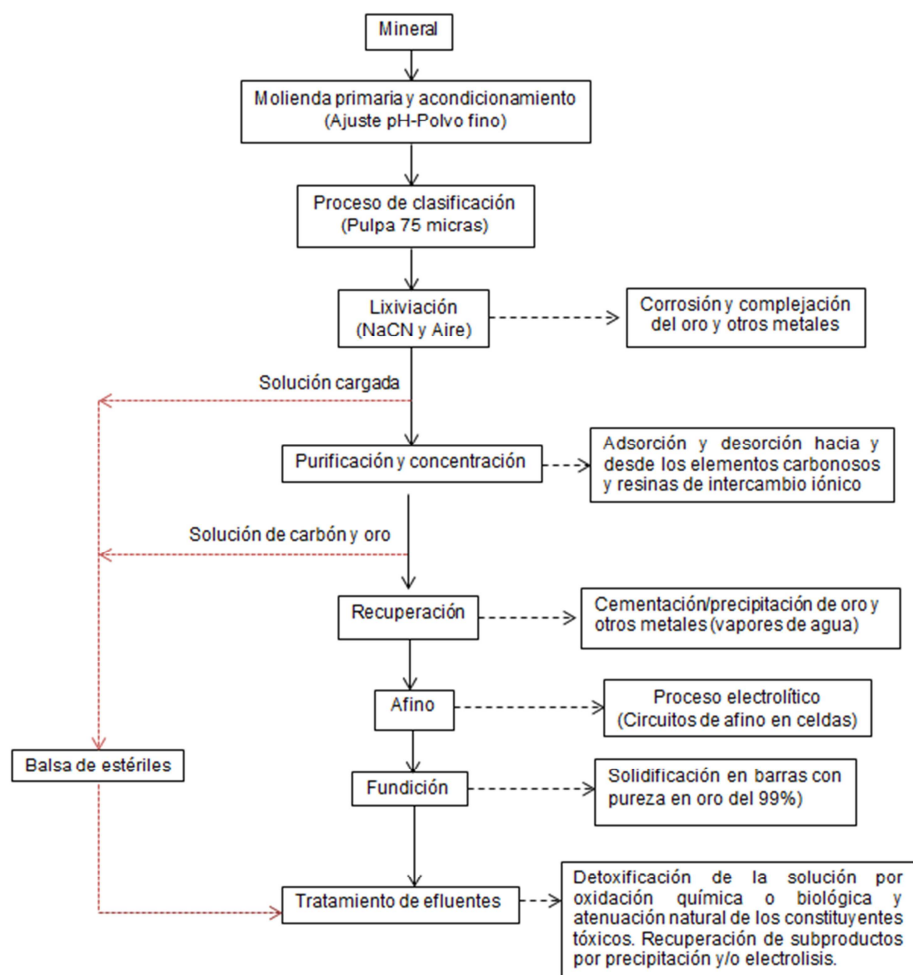
➤ Lixiviación

Una vez concentrado y acondicionado la pulpa, se introduce en una serie de tanques de lixiviación en donde se le adiciona cianuro y se inyecta oxígeno para mejorar el rendimiento del proceso. La solución constituida por metales preciosos pasa a un proceso de adsorción por carbón activado en donde se recupera el oro de la solución. Cuando la solución llega al último tanque, es bombeada hacia una balsa de estériles, mientras que las partículas de carbón con el oro absorbido en su superficie son llevadas al circuito de elución donde el metal noble es recuperado mediante la aplicación de vapor de agua y conducido a circuitos de afino mediante un proceso electrolítico.

➤ Refinación

La solución que resulta de la descarga del metal del carbón activado se pasa a través de varias celdas electrolíticas en donde las partículas de oro migran a los cátodos de las mismas. El material precipitado del proceso de cianuración es sometido a altas temperaturas (1200 a 1500°C) en hornos eléctricos o de ACPM; tras varias horas en su interior, la colada resultante es vertida en los moldes en donde se realizará el proceso de solidificación (pureza del 99%). En la figura 1 se presenta de manera general el proceso de beneficio del oro.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de beneficio del oro



1.2. HIDROMETALURGIA

La hidrometalurgia se basa en el uso de soluciones a base de agua para extraer y recuperar metales que no pueden tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples como la trituración y la separación por gravedad. En la minería aurífera se opta por el uso de soluciones de cianuro debido a que este elemento se caracteriza por ser uno de los pocos reactivos químicos que disuelven el oro en agua. En la etapa de lixiviación del proceso de extracción del oro se utilizan soluciones diluidas de cianuro de sodio (NaCN) en concentraciones promedio de 0.01% a 0.05%, las cuales en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina “solución cargada”. Mediante el uso de carbón activado o zinc, se puede extraer el oro de esta solución cargada, dando como resultado una solución residual que puede recircularse nuevamente al proceso de extracción o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos.

1.2.1. Efluentes de la hidrometalurgia

La minería de oro como todo proceso productivo genera diferentes tipos de residuos; en este caso nos centraremos en las soluciones de cianuro presentes en las aguas del proceso, aguas de las pilas de lixiviación y aguas de relaves (3).

➤ Aguas del proceso

Una vez el mineral se ha lixiviado con cianuro y el oro se ha recuperado de la “solución cargada”, el agua utilizada en el proceso contiene cianuro acuoso, diferentes complejos de cianuro, cianatos, tiocianatos y otras especies químicas. Cuando la solución contiene cantidades excesivas de tiocianatos y complejos de cianuro, no puede ser reutilizada debido a que se encuentra saturada y su capacidad de extracción se ha agotado y debe ser descartada. Estas soluciones se deben tratar para reducir los niveles de cianuro y ser bombeadas a depósitos

de relaves y estanques, o descargada a cuerpos de agua cumpliendo los requerimientos de vertimiento.

➤ **Residuos de pilas de lixiviación**

Después de las operaciones de lixiviación con cianuro, se producen pilas de mineral de oro que contiene cantidades altas de sulfuros que no son susceptibles a la lixiviación con cianuro, lo cual genera lixiviados de minerales sulfurosos. Para poder extraer el oro de este tipo de mineral se deben realizar procesos alternos con soluciones fuertemente alcalinas (pH 10,3), generando la oxidación de sulfuros y producción de drenajes ácidos de mina (DAM). Estas soluciones debido a su fuerte alcalinidad no pueden ser usados en el suelo o, vegetación, debido a que esa alcalinidad disminuye la disponibilidad de nutrientes, además estos residuos suelen contener altos contenidos de sodio debido al uso de cianuro de sodio, elemento que genera sodicidad (dispersión de las partículas de arcilla) en el suelo. Por esto, los residuos de las pilas de lixiviación no solo requieren atenuación del cianuro, sino también reducción del pH a niveles apropiados.

➤ **Relaves**

Son usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. Los cuales contienen altas concentraciones de cianuro, que posteriormente son transportados y almacenados en tanques de relaves donde lentamente los materiales restantes se van decantando en el fondo y el agua es recuperada. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos que se utiliza como relleno de minas a cielo abierto, o se vierte a los cuerpos de agua; y el agua es almacenada para posteriormente ser recirculada en nuevos procesos de extracción o finalmente tratada.

1.3. GENERALIDADES DEL CONTAMINANTE

El cianuro es un grupo químico que consiste de un átomo de carbono conectado a un átomo de nitrógeno por tres enlaces ($\text{:C}\equiv\text{N:}$). Los compuestos orgánicos que contienen este grupo se denominan nitrilos. El HCN molecular es una molécula neutra a la que se denomina ácido cianhídrico o cianuro de hidrógeno. El cianuro en las soluciones generadas de los procesos hidrometalúrgicos puede estar presente en tres tipos principales de compuestos: cianuro libre, cianuro débilmente complejado, y cianuro fuertemente complejado, los cuales constituyen el denominado “cianuro total” (Tabla 1). Al conocer la química del cianuro se puede comprender su comportamiento y generar las alternativas para su tratamiento en la industria minera (3).

1.3.1. Cianuro libre

Este nombre es utilizado para describir tanto el ion cianuro (CN^-) como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma cuando se disuelve en agua. Las cantidades de ion cianuro, cianuro de hidrogeno y su equilibrio está determinado especialmente por el valor de pH de la solución, en donde valores por encima de 10.5 la mayoría del cianuro se presenta en forma CN^- y a un pH menor de 8, en donde hay abundantes iones hidrogeno, predomina el HCN. Estas formas de cianuro se consideran como las más tóxicas. Sin embargo, también son las formas que se eliminan con mayor facilidad mediante los diferentes procesos de tratamiento y los mecanismos de atenuación natural (3).

1.3.2. Complejos de cianuro

Las soluciones de cianuro utilizadas en el proceso de extracción aurífera también pueden reaccionar con otros metales que por lo general se encuentran con el oro, entre ellos el hierro, zinc, cobre, plata y níquel, así como con otros elementos como el arsénico. Los análisis químicos de las soluciones utilizadas en los procesos y de las aguas residuales resultantes del procesamiento, indican que la

mayor parte del cianuro en solución está químicamente ligado a metales distintos de las pequeñas cantidades de oro o plata. La combinación de estos elementos químicos en una solución se denominan “complejos”, los cuales pueden ser de naturaleza estable o de fácil destrucción y se denominan complejos fuertes o débiles respectivamente (4).

Generalmente a este grupos están asociados los cianuros metálicos que son representados por la formula $M(CN)_x$ o $AyM(CN_x)$, donde M es un metal, X es el número de valencia del mismo, A es un alcalinotérreo y Y el número de valencia de A, dependiendo de esto algunos cianuros se disuelven formando iones metálicos o iones de cianuro, lo cual también va estar condicionado por los valores de pH, temperatura y otras condiciones específicas (5). Distinguir los diferentes compuestos de cianuro nos permite elegir la mejor metodología para los procesos de descontaminación (Tabla 1).

➤ **Complejos simples**

Son las denominadas sales de ácido cianhídrico, las cuales se caracterizan por contener un solo tipo de catión, que generalmente es un metal alcalino o ion alcalinotérreo, como sodio, potasio, calcio. Específicamente el cianuro de sodio utilizado en la extracción de oro, su forma sólida se disuelve en agua para formar el ion sodio y un anión de cianuro, anión que se combina luego con el ion hidrogeno para formar HCN (3).

➤ **Complejos débiles (WAD)**

Estos complejos se caracterizan por ser disociables en ácidos débiles y pueden producir concentraciones ambientalmente significativas de cianuro libre. Dentro de los complejos débiles podemos encontrar los complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El proceso de disociación depende en gran medida del pH de la solución (4).

➤ **Complejos fuertes (SAD)**

Estos complejos se degradan más lentamente que los mencionados anteriormente. Los complejos de cianuro con oro, cobalto y hierro se caracterizan por ser fuertes y estables en solución, es por esto que el cianuro es utilizado en la extracción aurífera para la separación del oro del mineral. La velocidad a la cual los complejos se disocian y liberan cianuro libre en la solución depende de factores como la concentración inicial del complejo cianuro, la temperatura, el pH de la solución y la intensidad de los rayos UV (3).

➤ **Tiocianato y cianato**

Los cianuros libres y simples pueden convertirse en cianatos (compuestos que contienen el grupo CNO^-) cuando se les somete a procesos de oxidación, como ocurre con el tratamiento de efluentes. De la misma manera, pueden formar tiocianato (compuestos que contiene el grupo SCN^-) por efecto de la reacción entre compuestos reducidos de azufre y cianuro.

➤ **Cianato**

El cianuro puede ser oxidado a cianato, considerado un compuesto 1000 veces menos tóxico que el propio cianuro, esta oxidación se da con ayuda de agentes oxidantes fuerte, como el ozono, peróxido de hidrógeno, hipoclorito u oxígeno gaseoso. El cianuro puede ser adsorbido por materiales orgánicos e inorgánicos y ser oxidado bajo condiciones naturales a cianato, proceso que normalmente se da en las soluciones de cianuración debido a la formación de peróxido de hidrógeno en la etapa inicial del proceso. El cianato no se acumula en las soluciones y por un proceso de hidrólisis genera amoníaco y carbonato, reacción que se ve favorecida por valores de pH menores de 6 y temperaturas elevadas (6).

➤ **Tiocianato**

La reacción con algunas especies de azufre convierte el cianuro en un compuesto siete veces menos tóxico denominado tiocianato. Minerales sulfurosos que

contienen trazas de azufre libre (ejemplo, pirita, calcopirita, calcocita, etc) reaccionan con el cianuro generando tiocianato, reacción que se ve favorecida por condiciones de baja alcalinidad y poca aireación. Finalmente este tiocianato se puede descomponer química o biológicamente en amoníaco y nitrato, o carbonato y sulfato (6).

Tabla 1 Clasificación y nomenclatura de los compuestos de cianuro

Nombre	Nombre común	Grupo	Ejemplos
Cianuro Total (CT)	Cianuros WAD	Cianuro libre	$\text{CN}^-_{(\text{aq})}$ $\text{HCN}_{(\text{aq})}$
		Complejos simples	$\text{NaCN}_{(\text{s})}$ $\text{Cd}(\text{CN})_{2(\text{s})}$ $\text{KCN}_{(\text{s})}$ $\text{CuCN}_{(\text{s})}$ $\text{Ca}(\text{CN})_{2(\text{s})}$ $\text{Ni}(\text{CN})_{2(\text{s})}$ $\text{Hg}(\text{CN})_{2(\text{s})}$ $\text{AgCN}_{(\text{s})}$
		Complejos débiles	$\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$ $\text{Cd}(\text{CN})_4^{2-}$ $\text{Cd}(\text{CN})_3^-$
		Complejos moderados	$\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$
	Cianuros SAD	Complejos fuertes	$\text{Au}(\text{CN})_2^-$ $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ $\text{Co}(\text{CN})_6^{4-}$ $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$
Otros		Tiocianato	SCN^-
		Cianato	CON^-

1.4. IMPACTO DEL CIANURO A LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE

Para realizar una evaluación completa del riesgo que representa el cianuro es necesario contemplar las especificaciones detalladas de las condiciones y los procedimientos operativos inherentes al sitio. Sin embargo, se puede describir los peligros inherentes que representa el cianuro para la salud humana y el medio ambiente, teniendo en cuenta que alrededor del 90% de la extracción de oro en el mundo se realiza utilizando cianuro y según datos, para procesar 250.000 toneladas de mineral por año se utilizan aproximadamente 125 toneladas de cianuro de sodio y el área de tierra necesaria para volcar los residuos generados y la cantidad de agua necesaria para el proceso de extracción son

aproximadamente 1,56 ha de superficie terrestre y 365.000 m³ de agua respectivamente (7).

1.4.1. Impactos a la Salud humana

Los seres humanos pueden estar expuestos al cianuro mediante inhalación, ingestión o absorción a través de la piel. Este elemento actúa impidiendo la utilización del oxígeno por parte de las células, generando hipoxia de los tejidos y cianosis (decoloración azulada de la piel). El cianuro constituye un veneno de rápida acción capaz de matar a una persona en cuestión de minutos a una exposición elevada (8).

Aunque existen muchas fuentes naturales de cianuro, este no se acumula en los tejidos porque el cuerpo transforma esas pequeñas cantidades en un compuesto menos tóxico llamado tiocianato, que luego se excreta. No es conocido que el cianuro cause cáncer, defectos congénitos o que pueda afectar adversamente la reproducción (8). La forma más tóxica del cianuro es el HCN_(g) el cual tiene un umbral establecido de 4,7 ppm, en concentraciones superiores de 20 ppm en el aire se pueden observar una toxicidad aguda, y en concentraciones cercanas a 250 ppm puede ocasionar la muerte. 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) y por absorción dérmica alrededor de 100 mg por kg de peso corporal (4).

1.4.2. Impactos al medio Ambiente

En los ambientes mineros existen cinco grupos importantes de receptores ecológicos o ambientales: los mamíferos, los reptiles los anfibios, las aves y los peces. Del primer grupo existe poca información sobre los impactos adversos generados por el cianuro debido a que la actividad minera se desarrolla en áreas

restringidas; por otro lado, si existe una preocupación por las aves silvestre migratorias por su posible contacto con los estanques abiertos, para lo cual se han establecidos normas eficaces y buenas prácticas de manejo en la actividad que han permitido limitar el contacto con estos estanques. En el caso de los peces, existen especies que son más sensibles que otras; su afectación está asociada a la falta de control de los efluentes generados durante el beneficio del mineral (4).

La acción biológica del cianuro lo caracteriza como un inhibidor enzimático no específico; el cual inhibe diferentes enzimas necesarias para el transporte de oxígeno en la célula como la citocromo oxidasa, bloqueando la producción de ATP e induciendo muerte celular. En los animales superiores, el principal órgano afectado es el cerebro, con una disminución de la función celular que conduce a coma y colapso de los sistemas respiratorio y cardiovascular. Así las especies con mayor riesgo son las que pueden llegar a interactuar de alguna forma con el entorno de los relaves (5, 8). Por otro lado, tal vez el impacto ambiental más significativo es el efecto en la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos en la zona del proyecto. Donde tanto el agua superficial como el agua subterránea puede ser alterada y sus condiciones para el consumo humano y supervivencia de especies acuáticas y terrestres no son aptas. Condición que con los procesos mineros actuales está dada por posibles accidentes en los procesos de extracción de oro, como derrames de cianuro, accidentes de transporte, el desbordamiento y ruptura de presas de relaves o tubería, posibles infiltraciones de las mismas, y el incumplimiento de los límites permisibles en aguas residuales de la minas y plantas de procesamiento (3).

2. MARCO LEGAL

El primer gran soporte de la legislación ambiental en Colombia, lo constituye la convención de Estocolmo en 1972, cuyo conjunto de principios se acogieron en el Código de los recursos naturales renovables y protección del medio ambiente (Decreto-Ley 2811 de 1974), a partir del cual se establecieron diversas disposiciones legales de protección y control. En 1991, la protección del medio ambiente alcanzó una nueva dimensión con la Constitución Política colombiana, elevando su categoría a derecho colectivo y dándole mecanismos de participación y veeduría ciudadana (9).

Posteriormente, con base en las recomendaciones que surgieron en la Cumbre de la tierra en Rio de Janeiro en 1992 sobre medio ambiente y desarrollo, se expide la Ley 99 de 1993, que establece los fundamentos de la política ambiental colombiana, y permite conformar el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y crear el Ministerio del Medio Ambiente, en este punto la gestión ambiental en Colombia asume un nuevo enfoque (10, 11). Posteriormente con los decretos 1220 de 2005 y 500 de 2006 (Derogados por el Decreto Nacional 2820 de 2010) se reglamenta la Ley 99 sobre las licencias ambientales adoptando una legislación ambiental como un factor fundamental en el desarrollo de la actividad minera en el país (12).

➤ **Constitución Política Nacional de 1991**

- ✓ **Artículo 79.** Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especies de importancia ecológica.
- ✓ **Artículo 80.** Establece que el Estado planificara el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo

sostenible, su conservación, restauración o sustitución y que además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

- **Decreto-Ley 2811 de 1974.** Código de Recursos Naturales y de Protección del Medio Ambiente. El ambiente es patrimonio común, el estado y los particulares deben participar en su preservación y manejo. Regula el manejo de los recursos naturales renovables, la defensa del ambiente y sus elementos (13).
- **Ley 9 de 1979.** Por la cual se dictan medidas sanitarias. Se establecen los parámetros generales de protección del medio ambiente, en temas como residuos líquidos, residuos sólidos, disposición de excretas, emisiones atmosféricas y áreas de captación (14).
- **Decreto 1594 de 1984.** Derogado parcialmente por el Decreto 3930 de 2012 y por el Decreto 1575 de 2007, por el cual se reglamenta parcialmente la parte III del Decreto 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y el manejo de residuos líquidos (15).
- **Decreto 2655 de 1988.** Código de minas, derogado por la Ley 685 de 2001 (16)
- **Decreto 948 de 1995.** Adicionado por el Decreto 789 de 2010, derogado parcialmente por la Ley 1333 de 2009. Define el marco de las acciones y mecanismos administrativos de las autoridades ambientales para mejorar y preservar la calidad del aire (17).
- **Decreto 501 de 1995.** Por el cual se reglamentan la inscripción en el registro minero de los títulos para la exploración y explotación de minerales de propiedad nacional. Posteriormente pasa a la Ley 685 de 2001(18).

- **Decreto 1178 de 1999.** Por el cual se reestructura la Comisión Nacional de Regalías. Declarado inexecutable a través de la sentencia C-722 de 1999 (19).
- **Ley 685 de 2001.** Por la cual se expide el Código de minas y se dictan otras disposiciones (20).
- **Decreto 1728 de 2002.** Derogado por el Art.29 del Decreto 1180 de 2003. Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre la licencia ambiental (21).
- **Decreto 1729 de 2002.** Regula el uso del territorio para su apropiado ordenamiento territorial y manejo de cuencas hidrográficas, allí se dispone lo relacionado al plan de ordenamiento: su elaboración, ejecución y fuentes de financiación (22).
- **Decreto 1993 de 2002.** Por el cual se establece el Sistema de Información Minero Colombiano, SIMCO (23).
- **Decreto 3100 de 2003.** Derogado parcialmente por el Decreto 2570 de 2006 y modificado por el Decreto 3440 de 2004, por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas para la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Permite a las autoridades ambientales competentes cobrar a las personas naturales o jurídicas, de derecho público o privado, por la utilización directa o indirecta del recurso como receptor de vertimientos (24).
- **Decreto 838 de 2005.** Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones (25).
- **Ley 1333 de 2009.** Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones (26).

- **Decreto 2372 de 2010.** Por el cual se reglamenta el Decreto-Ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones (27).
- **Decreto 2820 de 2010.** Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales (12).
- **Decreto 3930 de 2010.** Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI –Parte III-Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974 en cuanto usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (28).
- **Decreto 4728 de 2010.** Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010. En cuanto a usos del agua y residuos líquidos, y se dictan otras disposiciones (29).
- **Ley 1382 de 2010.** Por la cual se modifica la Ley 685 de 2001. Código de mina. Fue declarada inexecutable por la Corte Constitucional, la cual decidió diferir los efectos de inexecutable por un lapso de dos años, esto como una medida para salvaguardar los recursos naturales y las zonas de especial protección ambiental mientras se salvan los vicios encontrados en la aprobación de la ley (30).

2.1. PROYECTO DE LEY MINERA

Actualmente en el ministerio de minas está elaborando un proyecto de Ley que busca poner fin al limbo jurídico en que está el sector minero después de declararse inexecutable la ley 1382 de 2010 por la sentencia C-366/11 (31), la cual fue tumbada en 2011 por la Corte Institucional, al no realizarse los procesos de

consulta previa con los pueblos indígenas y minorías étnicas, teniendo en cuenta la importancia de esta norma se dio un plazo de dos años para cumplir con los procesos de consulta y así fuera aprobara una nueva ley, lo que finalmente no ocurrió, y nuevamente a partir de mayo del presente año la actividad minera tendrá que regirse por la Ley 685 de 2001.

2.2. LEGISLACIÓN VIGENTE EN EL PAÍS (CÓDIGO MINERO)

El código de minas regula las relaciones entre los organismos y entidades del Estado y de los particulares entre sí, sobre las actividades de prospección, exploración explotación, beneficio, transporte, aprovechamiento y comercialización de los recursos no renovables que se encuentran en el suelo o subsuelo, así sean de propiedad de la nación o privada. Donde se establece que el estado se limita a regular y fiscalizar el sector minero y a facilitar el desarrollo de la actividad por parte del sector privado, y define claramente las reglas para la expedición del título minero y elimina la obligación de obtener licencia ambiental en la fase de exploración, entre otras consideraciones (20).

Así el Ministerio de Minas y Energía, y el Ministerio del Medio Ambiente establecieron que para adelantar labores de exploración de proyectos mineros, la principal referencia es la Guía minero ambiental, ya que se consideró que esta actividad no causaba impactos ambientales graves al medio ambiente y recursos naturales.

➤ Resolución 18-0861 de 2002.

Por medio de la cual se adoptan las guías minero ambiental y se establecen otras disposiciones. Esta guía se considera de consulta obligatoria y busca dar una orientación de carácter conceptual, metodológico y procedimental. Igualmente se aclara que al momento de requerirse el uso de recursos naturales por parte de la autoridad ambiental competente, se deben obtener previamente los permisos,

concesiones y demás autorizaciones por parte de la autoridad competente, lo cual aplica para aprovechamiento forestal, ocupación de cauces, lechos de corrientes o depósitos de agua, concesión de agua superficiales, vertimiento de residuos líquidos y emisiones atmosféricas (32).

Dentro de los requisitos ambientales para cumplir la normatividad relacionada con la solicitud y tramites de permisos, autorizaciones y concesiones es necesario conocer la demanda del recurso natural y el grado de intervención tanto para el aprovechamiento forestal, concesión de aguas superficiales, y vertimiento de residuos líquidos; para estos último se debe especificar la clase, calidad y cantidad de desagües, descripción general del sistema de tratamiento que se adoptara y estado final previsto para el vertimiento, así como la identificación de impactos ambientales, obras de prevención, mitigación y compensación.

Es así como toda persona natural o jurídica que generen impactos ambientales producto de la actividad minera, de acuerdo con los preceptos constitucionales anteriormente mencionados, el Estado tiene la obligación de exigir la reparación de los daños ambientales (Constitución Política de Colombia, Art. 80 inciso 2), lo cual debe hacer a través de varios mecanismos como la imposición de medidas u obligaciones de mitigación en la licencia ambiental y la exigencia de reparación de los daños ambientales, establecida junto con las sanciones administrativas de carácter ambiental que imponen las autoridades ambientales (33).

2.3. CONSIDERACIONES DEL CIANURO EN EL MARCO NORMATIVO AMBIENTAL

Dentro del problema de contaminación del agua, se considera a los ríos como los receptores naturales de aguas residuales y por ende de los contaminantes que estos tengan. Las cargas o concentraciones de contaminantes constituyen el

objeto de regulación por parte del Decreto 1594 de 1984, anteriormente mencionado, el cual establece la calidad del agua para los diferentes usos.

Es así como en el artículo 20 del Decreto 1594 de 1984, se considera el cianuro como sustancia de interés sanitario, y dentro de la norma se determina criterios de calidad del agua según su uso y valores límites permisibles de cianuro, como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2 Valores máximos permisibles de cianuro según su condición

Condición	Valor Máximo permisible (mg/L)	Decreto 1594/1984
Consumo humano y doméstico con tratamiento convencional	0,2 CN ⁻	Art 38
Consumo humano y doméstico con desinfección	0,2 CN ⁻	Art 39
Preservación de flora y fauna	0,05 CN ⁻	Art 45
Vertimientos	1,0 CN ⁻	Art 72

Así mismo la Resolución 2115 de 2007 en el artículo 5, establece las características químicas de sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, como son posibles elementos, compuestos químicos, mezclas de los mismos, diferentes a los plaguicidas y otras que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, entrando a la lista el cianuro libre y complejos fácilmente dissociables (WAD) con un valor máximo aceptable de 0,05 mg CN⁻/L (34).

3. TECNICAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS CONTAMINADOS CON CIANURO

Existen diversos procesos de destrucción o recuperación ya establecidos en la obtención de soluciones tratadas o lodos con bajos niveles de cianuro y compuestos relacionados. El proceso de tratamiento de cianuro es clasificado como un proceso basado en su destrucción, contrario a los procesos físicos que se basan en la recuperación de cianuro y la adsorción con carbón activado. En los procesos de destrucción, las reacciones químicas o biológicas son utilizadas para convertir el cianuro en otros compuestos menos tóxicos.

Aunque la selección de un proceso de tratamiento de cianuro apropiado implica la consideración de muchos factores, el número de procesos candidatos para una aplicación particular por lo general es reducido según la caracterización química de la solución o lodo a tratar, la cuantificación de los volúmenes a tratar, la configuración del medio ambiente y la revisión de la normatividad aplicable. La mayoría de los procesos de destrucción de cianuro operan en el principio de la conversión de cianuro en uno o más compuestos menos tóxicos. En la tabla 3 se presentan las principales características de las diferentes tecnologías de eliminación de cianuro que están reportadas.

Tabla 3 Principales características de las diversas tecnologías de eliminación del cianuro

Métodos de remoción	Ventajas	Desventajas	¿Requiere tratamiento adicional?	Remoción			
				CN libre	Tiocianato	Complejos metálico WAD	Complejos metálicos SAD
Oxidación biológica/biodegradación (35, 36)	Enfoque natural, está bien referenciada, utiliza las pilas como reactores reduciendo el volumen total de lavado, y posibilita llegar a las zonas de bajo flujo en las pilas con mayor eficacia. Es relativamente barato. La biomasa puede ser activada por aireación. Puede tratar cianuros sin la generación de residuos. No requiere de equipos de manipulación de productos químicos. El costo es fijo así se trabaje con grandes volúmenes de residuos. No genera subproductos tóxicos, por lo tanto es amigable con el medio ambiente.	La tecnología no está bien establecida. Requiere combinar la metalurgia, biología y la ingeniería de procesos. Tiende a ser específica según el sitio en donde se realice el tratamiento. Se dificulta el tratamiento de altas concentraciones.	No	Si	Si	Si	Si
Cloración alcalina (35, 37)	La tecnología está bien establecida El cianato resultante de la oxidación del cianuro (oxidación incompleta) es relativamente menos tóxico y de más fácil oxidación. Remueve metales mediante su precipitación a pH elevados.	Añade cationes/aniones indeseables al agua. El exceso de hipoclorito es tóxico. El cloro puede reaccionar como los compuestos orgánicos y formar trialometanos. Un mal manejo puede favorecer la formación de intermediarios tóxicos.	Si	Si	Si	Si	No
Peróxido de hidrógeno (35, 37)	El exceso de reactivo se descompone en agua y oxígeno. Relativamente simple para operar. No es tan reactivo con el tiocianato.	El reactivo es costoso. Requiere de una medición precisa de la dosis química.	Si	Si	No	Si	Algunos

Tabla 3. Principales características de las diversas tecnologías de eliminación del cianuro (Continuación)

Proceso INCO (SO ₂ /aire) (35, 37)	El reactivo es muy barato Para el tratamiento de soluciones acuosas y lodos residuales de minas de oro. Se puede utilizar en un amplio rango de pH	El ahorro que se genera por los reactivos es compensado con los pagos de licencias o regalías. Este proceso añade sulfatos al agua tratada. Si el precipitado de cianuro de hierro esta con cobre, toca deshacerse de este.	Poco	Si	Algunos	Si	Si
Ozonización (37, 38)	Es posible una regeneración del cianuro (recuperación)	Se produce amonio. Los reactivos y equipos son costosos.	Si	Si	Si	Si	No
Oxidación anódica (38)	Se puede tratar todos los baños de cianuro independientemente de la concentración	Requiere de un posterior tratamiento por diferentes métodos de oxidación	Si	Si	SI	SI	No
Electrodiálisis (37, 38)	Es eficiente en el tratamiento	Es costoso. Solo aplicable a cierto tipo de residuos	No	Si	Si	Si	Si
Osmosis en reversa (35)	Es eficiente en el tratamiento	Es costoso. Requiere de energía y presión externa. Es aplicable a cierto tipo de residuos.	No	SI	Si	Si	SI
Electroobtención (37, 38)	Se desempeña bien en soluciones concentradas. Útil en el procesamiento del oro.	Requiere de unas condiciones de control apropiadas. No se puede utilizar directamente para la remoción. La tecnología no está bien establecida. No actúa frente al tiocianato. Cianuro libre es liberado.	Si	No	No	Algunos	Algunos
Hidrolisis/destilación (39)	La metodología es simple	Requiere de una alta temperatura, presión y aire. El gas de cianuro hidrogeno generado es difícil de disponer	SI	Si	No	No	No
AVR (acidificación/volatilización y reneutralización) (37)	Reduce el consumo de energía e incrementa la volatilización	Consumo alto de ácido	Algunos	Si	Algunos	Si	Algunos

Tabla 3. Principales características de las diversas tecnologías de eliminación del cianuro (Continuación)

Flotación (38)	Separa complejos SAD por precipitación natural	Posibilidad en la descomposición y redisolución de precipitados	Mucho	Si	Poco	Mucho	Algunos
Precipitación de cianuro de hierro (38)	Ampliamente utilización como proceso de pulido. Utilizado de forma apropiada en la industria minera	Solo funciona con bajas concentraciones de cianuro. Es difícil mantener el pH. La eliminación del precipitado es un problema.		Mucho	Algunos	Si	Si
Carbón activado (38)	Es un método efectivo Utilizado como proceso de pulido	El costo es mayor. El carbón activado requiere de un buen tratamiento.	Poco	No	Algunos	Mucho	Si
Resina (38)	Es eficiente	Requiere de pretratamiento. Es difícil encontrar la resina adecuada.	Poco	Algunos	Algunos	Si	Si
Oxidación catalítica (38)	Efectiva en presencia de cobre y otros catalizadores	No es un proceso de tratamiento completo.	Si	Si	Si	Si	Algunos
Ácido peroxosulfúrico (Ácido de Caro) (37, 38)	Es útil en el sitio del tratamiento Utilizado en los lugares donde el proceso SO ₂ /aire no es efectivo	Difícil de manejar ya que se descompone fácilmente a oxígeno y ácido sulfúrico. No es aplicable a todos los tipos de sitios. De aplicación limitada.	Poco	Si	Si	Si	Algunos
Fotólisis (37, 38)	Proceso efectivo de eliminación completa	Requiere de alta energía Difícil de operar.	Si	Si	Si	Si	Si

3.1. BIORREMEDIACIÓN DE COMPUESTOS CIANURADOS

La biorremediación consiste en el aprovechamiento de la capacidad de ciertos grupos de microorganismos de utilizar compuestos cianurados como fuente de carbono y/o nitrógeno de manera que transformen estos compuestos tóxicos en sustancias inocuas. La biodegradación de cianuro en soluciones de relaves y en las aguas residuales de otros procesos, es una alternativa prominente a los procesos físicos y químicos tradicionales. El primer caso de biorremediación para la eliminación de cianuro a escala industrial se llevó a cabo en el siglo XX en Estados Unidos en la Mina de Oro de Homestake (40). A partir de este año, la biorremediación es considerada una alternativa económica y efectiva.

Los sistemas de tratamientos biológicos tienen muchas ventajas sobre los tratamientos físicos y químicos, entre esas están la capacidad de tratar las diferentes formas de cianuro, el amplio rango de microorganismos que pueden degradar el contaminante, su diseño simple y la facilidad de controlar el proceso operativo y su amabilidad con el medio, debido a que no provocan daños puesto que no se añaden sustancias químicas. Por otro lado, el tratamiento biológico ofrece la habilidad de una doble descontaminación por la degradación del cianuro con la consecuente denitrificación del amonio resultante, disminuyendo el impacto ambiental generado por las descargas (41). Sin embargo, los tratamientos biológicos pueden verse limitados por la susceptibilidad a las condiciones ambientales, por ejemplo la temperatura, que pueden afectar el rendimiento del proceso de degradación y así mismo la calidad de las descargas de efluentes. Otro factor que puede afectar su rendimiento son las altas concentraciones del contaminante, por lo que se hace necesario desarrollar estudios a escala piloto de los procesos de tratamiento, lo cual incurriría en más costos y retrasaría su aplicación *In situ* (41, 42).

Los procesos de biorremediación se fundamentan en la oxidación biológica que ciertas especies de microorganismos (bacterias, hongos y algas) llevan a cabo para degradar compuestos contaminantes como los de cianuro y amonio debido a su capacidad metabólica y enzimática que les permite incorporarlos a su metabolismo para el crecimiento celular, así como la capacidad de acumular algunos metales pesados. El proceso requiere de la adaptación gradual de los microorganismos a las altas concentraciones de cianuro libre, tiocianato, metales pesados y otros complejos presentes en las soluciones. El fundamento de la oxidación biológica es la consecución de una elevada tasa de conversión metabólica del cianuro a cianato, el cual posteriormente es hidrolizado para producir ión amonio e ion carbonato. Este ión amonio liberado es considerado como tóxico, y debe ser tratado por microorganismos que llevan a cabo reacciones de nitrificación para su eliminación. Y el tiocianato y cianuros metálicos también pueden ser eficazmente oxidados, para luego ser adsorbidos y/o precipitados por los microorganismos.

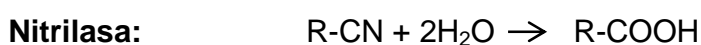
Es de resaltar que algunas de las reacciones descritas son alcanzadas a velocidades adecuadas por vía microbiológica y no pueden ser reproducidas en las mismas condiciones por vía química. Los efluentes tratados por oxidación biológica suelen poseer una calidad adecuada para la descarga directa de las soluciones de cianuro. Así la degradación biológica junto con la absorción de los compuestos tóxicos por la biomasa, son capaces de eliminar el 92% del cianuro total, un 99% de complejos WAD y un 95% de metales tóxicos, a costos competitivos respecto a otros métodos (6)

3.1.1. Vías de degradación de cianuro

Existen cuatro vías generales para la biodegradación de cianuro: hidrolítica, oxidativa, reductiva y de sustitución/transferencia.

➤ Reacciones hidrolíticas

Las reacciones hidrolíticas son catalizada por algunas enzimas, como la cianuro hidratasa, nitrilo hidratasa, cianidasa y nitrilasa. Estas enzimas degradan los compuestos de cianuro a través de las siguientes reacciones:



La actividad de la cianuro hidratasa es inducida por las bajas concentraciones de cianuro en muchos hongos que son patógenos para las plantas cianogénicas como *Stemphylium loti* y *Gloeocercospora sorghi*. Hongos como *Fusarium sp.* utilizan la cianuro hidratasa para degradar el cianuro a formiamida, seguido de una conversión a formiato por una amidasa. Este mecanismo de degradación se ha reportado también en bacterias como *Pseudomonas fluorescens*. La cianuro hidratasa y la cianidasa son enzimas que se reportan en bacterias y tienen similitud en cuanto a los aminoácidos y estructura a las nitrilasas y nitrilo hidratasas; estas últimas han sido reportadas en la degradación de cianuros orgánicos (43).

➤ Reacciones oxidativas

Las reacciones oxidativas para la biodegradación de cianuro resultan en la formación de amoníaco y dióxido de carbono. La cianuro monoxigenasa convierte el cianuro a cianato. El cianato es entonces catalizado por la cianasa formando de este modo el amoníaco y el dióxido de carbono. Las enzimas cianasas han sido identificadas en numerosas bacterias, hongos, plantas y animales. Una segunda vía oxidativa utiliza cianuro dioxigenasas para formar el amoníaco y el dióxido de carbono de manera directa.

Cianuro monoxigenasa: $\text{HCN} + \text{O}_2 + \text{H}^+ + \text{NAD(P)H} \rightarrow \text{HOCN} + \text{NAD(P)}^+ + \text{H}_2\text{O}$

Cianuro dioxigenasa: $\text{HCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + \text{NAD(P)H} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{NAD(P)}^+$

Varias especies de *Pseudomonas* son las responsables de la oxidación completa del cianuro a tiocianato. Bacterias como *Pseudomonas fluorescense* utilizan el cianuro como fuente de nitrógeno para su crecimiento formando amoníaco y dióxido de carbono mediante la cianuro monoxigenasa, con la formación de cianato como metabolito intermediario (43).

➤ **Reacciones reductivas**

Estas reacciones no son tan comunes y las enzimas responsables se encuentran en especies raras. Estas reacciones siguen un mecanismo de dos etapas y resultan en la formación de metano y amoníaco. Un ejemplo de estas especies es *Klebsiella oxytoca* que es capaz de formar estos compuestos mediante la degradación del cianuro.

➤ **Reacciones de sustitución y transferencia**

El cianuro puede ser convertido en β -cianoalanina o α -aminonitrilo mediante la enzima β -cianoalanina sintasa, seguido de una hidrólisis de los productos para liberar NH_3 y un ácido. Durante este proceso no es requerida una molécula de oxígeno y no se libera CO_2 . Una vía diferente resulta en la formación de tiocianato que es menos tóxico que los compuestos de cianuro. Este tiocianato producido a partir de la enzima sulfurotransferasa puede ser biodegradado por la vía del carbonilo o cianato. La biodegradación del tiocianato por la vía del carbonilo (en presencia de tiocianato hidrolasa) resulta en la formación del sulfuro carbonilo (COS). La biodegradación del tiocianato por la vía del cianato (en presencia de la enzima cianasa) resulta en la formación de sulfato y CO_2 . El amoníaco es producido en ambos casos. La enzima cianasa ha sido detectada en *Flavobacterium sp.* y *Escherichia coli*.

Hongos como *Trichoderma polysporum*, *Scytalidium* y *Penicillium* han sido reportados por su capacidad de degradar complejos de cianuro WAD y SAD. Se ha reportado la utilización de biomasa de *Cladosporium* en reactores aerobio para la degradación de complejos de cianuro SAD por medio de la transformación y bioadsorción de los mismos a través de la biomasa fúngica (43, 44). La desintoxicación de cianuro por algas se ha evaluado mediante la exposición de suspensiones cultivadas de *Arthrospira maxima*, *Chlorella sp*, y *Scenedesmus*, con una eficiencia del 99% en la eliminación de cianuro total, presentando ventajas frente a la descontaminaciones de efluentes en condiciones extremas de pH con alta eficiencia de remoción (43).

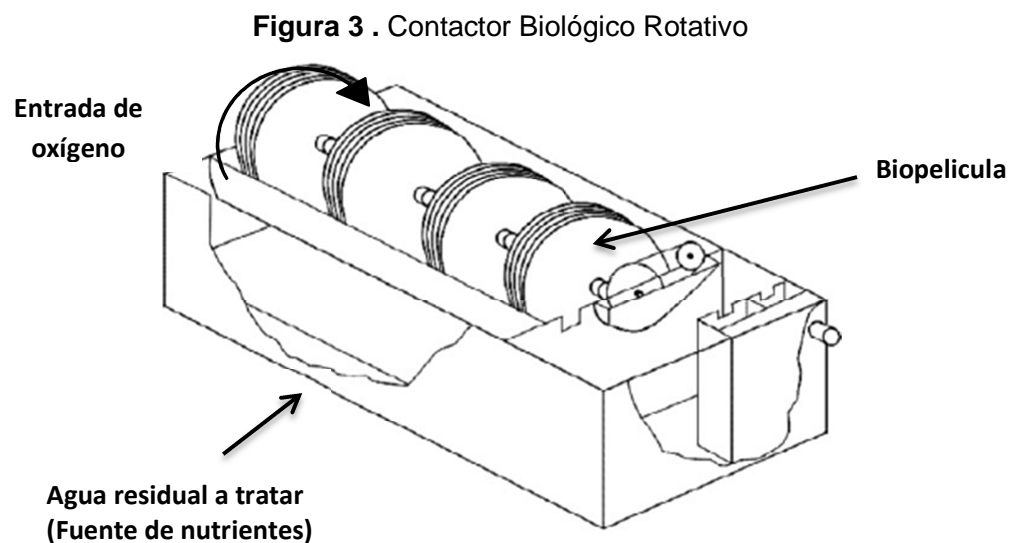
3.2. TECNICAS DE BIORREMEDIACIÓN APLICADAS

3.2.1. Atenuación Natural (AN)

La atenuación natural es una técnica de gran interés para las industrias mineras debido a su bajo costo en comparación con los procesos de oxidación química. Su aplicación en la degradación de diversas formas de cianuro y metales en soluciones de relaves ha sido utilizado durante mucho tiempo como el principal método para su eliminación. Las primeras instalaciones de almacenamiento de relaves diseñados específicamente para la eliminación de cianuro y compuestos relacionados a través de atenuación natural se diseñaron y construyeron en Canadá a hace unas dos décadas. Desde entonces, muchos investigadores han modelado este método de biorremediación en balsas de residuos y bajo diferentes condiciones climáticas (45).

Los procesos de atenuación natural reducen las concentraciones de cianuro a lo largo del tiempo, por medio de mecanismos de transformación como son, la volatilización de fases gaseosas, la oxidación, la adsorción en superficies minerales, las reacciones de hidrolisis, la biodegradación, y precipitación de

biológicos aerobios. Este sistema requiere un contacto íntimo entre la solución contaminada, la biomasa activa y el oxígeno, consiste en una serie de discos o placas estrechamente separadas unas de otras, las cuales se encuentran semisumergidas en el agua residual (aproximadamente el 40% de su superficie) girando mediante el accionamiento de un eje rotatorio dispuesto horizontalmente (1-2 rpm), de tal forma que en la superficie del disco se ve formando de manera gradual y natural una pequeña película de biomasa bacteriana, la cual se encuentra en contacto con el medio líquido y el oxígeno que le proporcionan los nutrientes y las condiciones necesarias para el crecimiento y la reproducción celular. De esta manera se logra la oxidación de compuestos como el cianuro, el cual es empleado como fuente de carbono por parte de los microorganismos (Figura 2) (46).



Fuente. Ordoñez P. y Betancur A. 2003

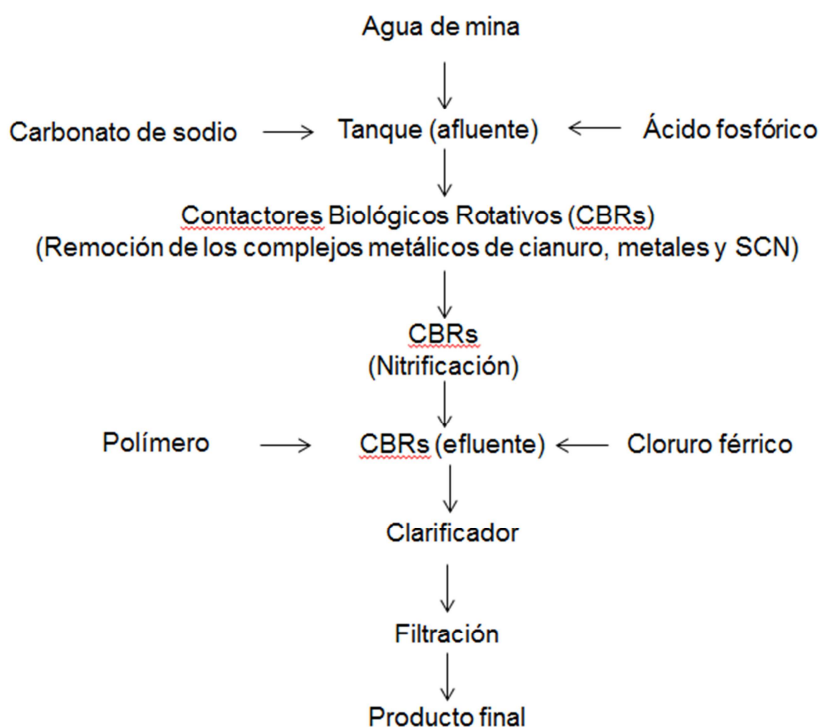
Dentro de los CBRs cabe distinguir entre Biodiscos y Biocilindros. En el primero de estos, el soporte para la fijación bacteriana está constituido por un conjunto de discos de material de plástico de 2 a 4 m de diámetro. Los discos se mantienen paralelos y a corta distancia entre ellos gracias a un eje central que pasa a través

de sus centros. Por otro lado, los biocilindros constituyen una modificación del sistema basado en biodiscos, en ellos el rotor es una jaula cilíndrica perforada, que alberga en su interior un relleno de material plástico, al que se fija la biomasa bacteriana.

Homestake Mining Company fue la empresa minera líder en el desarrollo e implementación de sistemas de tratamiento biológico para la destrucción del cianuro. La primera aplicación se desarrolló en la mina de oro de Homestake en Lead, Dakota del Sur en Estados Unidos en donde se utilizó 48 contactores biológicos rotativos (CBRs) para la degradación de tiocianato, cianuro, amoníaco y metales con un porcentaje de reducción del 95 - 98% Este proceso fue desarrollado para tratar 21.000 m³/día de agua residual resultante de la mina.

Durante casi dos décadas las instalaciones han estado en operación continua tratando las soluciones presentes en los grandes tanques de relaves. De la misma manera, como parte del cierre permanente de la mina, esta empresa implemento un sistema de crecimiento suspendido con diferentes etapas de tratamiento aerobio y anaerobio para la eliminación de varios cientos miligramos/litro de tiocianato residual, amoníaco y nitrato contenidos en los estanques de soluciones de relaves (36). En la figura 4 se presenta un diagrama del proceso de tratamiento en la mina de Homestake (39).

Figura 4 Proceso de tratamiento desarrollado en la mina de Homestake

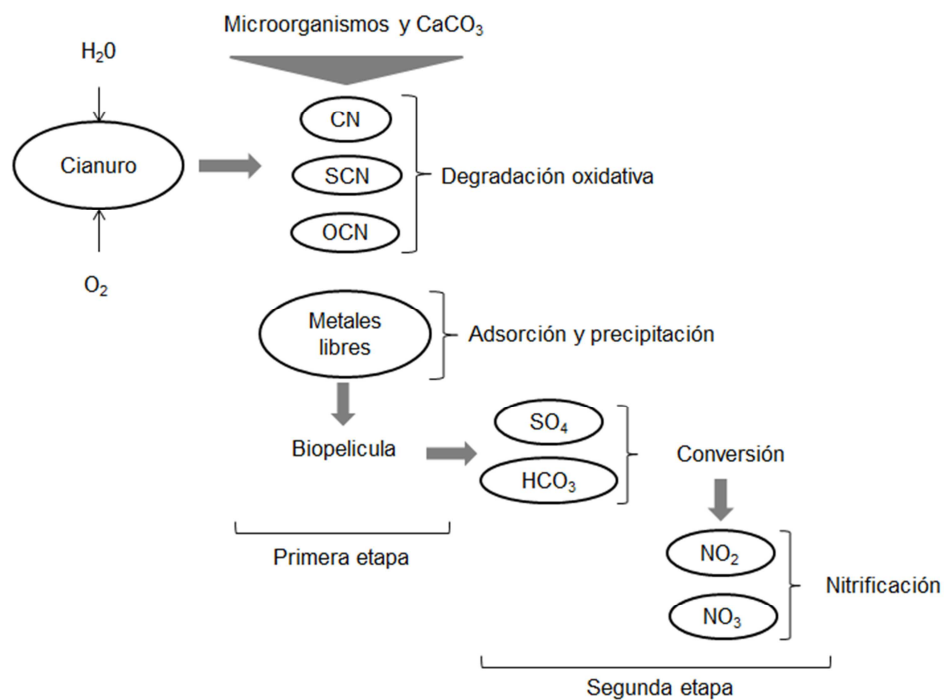


Fuente. Akcil A. 2003

En cada una de las etapas del proceso, las bacterias convierten el cianuro libre y los complejos metálicos de cianuro en bicarbonato y amonio, mientras que los metales liberados son adsorbidos ya sea dentro de la biopelícula o son precipitados de la solución. La facilidad con que los complejos metálicos de cianuro son degradados generalmente depende de su estabilidad química siendo el cianuro de hierro el más difícil de degradar, seguido de los complejos de Zn, Ni y Cu, y por último el cianuro libre que es el más fácil de degradación. En la primera etapa del tratamiento biológico en la mina de Homestake, se realizó una oxidación del cianuro y tiocianato, seguido de una absorción y precipitación de los metales libres. De la degradación del cianuro y el tiocianato se obtiene una combinación de amoníaco, carbonato y sulfatos. En la segunda etapa, este amonio es convertido a nitrato a través de un proceso convencional de nitrificación usando el nitrato como intermediario. El proceso de oxidación del cianuro, tiocianato y amonio es

llevado a cabo por especies de *Pseudomonas*, en la figura 5 se presenta un esquema del proceso de biotratamiento aerobio llevado a cabo por bacterias (39).

Figura 5 Proceso de biotratamiento aerobio llevado a cabo por bacterias



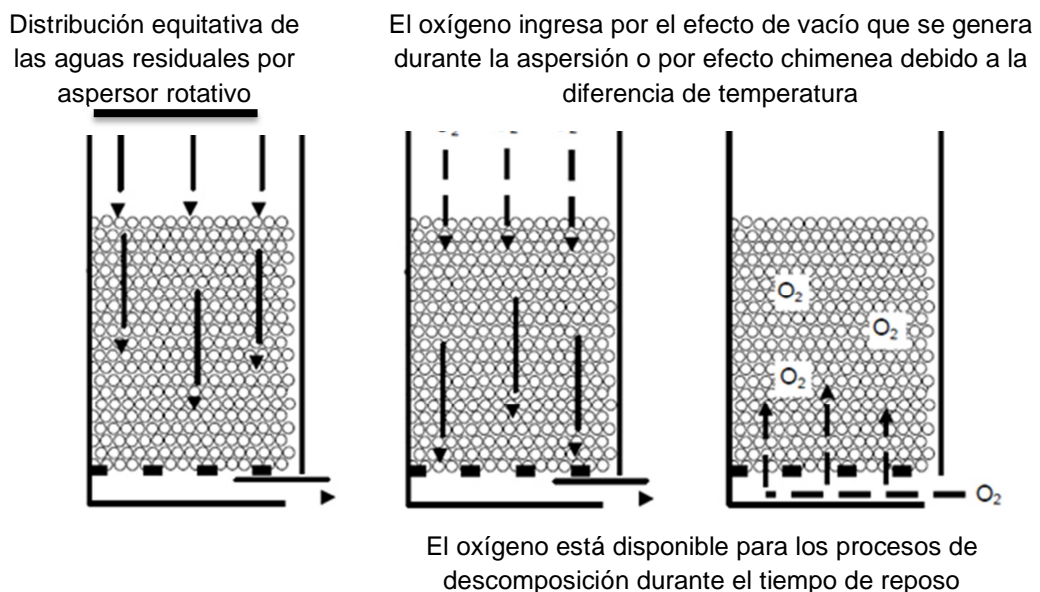
Fuente. Akcil. 2003

3.2.3. Filtros percolados

El filtro percolador es uno de los bioreactores de película fija más comúnmente utilizados en donde los microorganismos se caracterizan por unirse a un sustrato sólido hasta al alcanzar concentraciones de biomasa relativamente altas. El uso del filtro percolado es adecuado para el tratamiento de aguas residuales con variaciones en sus cargas orgánica e hidráulica. Además, este sistema es simple, fácil de operar y no requiere de mucha energía. En este tipo de bioreactor es posible retener los microorganismos que tienen una tasa de crecimiento lenta y los cuales son los responsables de la degradación del cianuro. El sustrato sólido ideal es un material que tiene una alta área de superficie por unidad de volumen, de

bajo costo, alta durabilidad y de difícil obstrucción. Dentro de los medios comúnmente utilizados están las piedras, el material cerámico, la hulla y los medios plásticos; este último se caracteriza por su baja densidad aparente y ofrece un área de superficie óptima con más espacios vacíos que cualquier otro filtro. Los cambios en la calidad y cantidad de las aguas residuales pueden ser manejados mediante el ajuste de la tasa de recirculación, proceso mediante el cual se promueve un mejor contacto entre el medio a tratar y el material del filtro, ayudando a diluir el agua residual de modo que se reduzca la DBO y aumente la concentración del oxígeno disuelto para el proceso de biodegradación (47). En la figura 6 se presenta el principio del funcionamiento del sistema de filtros percoladores.

Figura 6 Funcionamiento del sistema de filtros percolados



Fuente. Sasse L. 1998

3.2.4. Sistemas tipo humedal

Actualmente se consideran como tecnologías pasivas empleadas para el tratamiento de aguas de mina, debido a sus atractivos económicos y

medioambientales, con ventajas frente a la reducción de contaminantes concretos como el hierro y otros metales. Dentro de los sistemas tipo humedal, se ha evaluado tanto el uso de humedales artificiales como naturales, estos últimos presentan un uso restrictivo al tener que mantener dentro de unos límites ambientales ciertos parámetros hidrológicos y de carga química que evitan el deterioro de los humedales; en contraste con los artificiales los cuales pueden ser manipulados y diseñados para admitir altas proporciones de cargas hidráulicas y químicas, y a su vez permiten optimizar la eficiencia por unidad de área (49) .

Es así como un humedal artificial generalmente se compone de una balsa de sedimentación, siendo un elemento primario en todo sistema pasivo, debido a su simplicidad y potencial para acumular el agua a tratar, regular el caudal y disminuir la turbidez de los líquidos a tratar, lo cual prolongar la vida útil del sistema. Su objetivo es que materiales de naturaleza inerte como suelo, arcillas, entre otros, se sedimenten en la balsa con un tiempo de residencia que puede variar entre 3-4 horas. El tratamiento pasivo en un sistema de tipo humedal se puede clasificar según las condiciones como circula el agua a través de los humedales, superficialmente (por encima del sustrato) o de forma subterránea (a través del sustrato), lo cual se determina la saturación del sustrato y acumulación de materia orgánica en el sistema (6, 50)

➤ **Humedales superficiales**

En estos humedales el agua a tratar es expuesta superficialmente a la atmosfera y circula a través de los tallos de las plantas. Es una tecnología que permite eliminar complejo de cianuro WAD y SAD y otros metales presentes en aguas de mina con característica alcalina. Donde se llevan a cabo procesos de oxidación e hidrolisis, junto con procesos de sedimentación. El resultado de las reacciones es un aumento de la acidez, por lo que este tipo de sistemas solamente es apto para soluciones alcalinas, si se quiere tratar soluciones en condición de acidez es necesario realizar procesos previos de neutralización. Un humedal superficial

consiste en una celda rellena de algún sustrato que por lo general es inorgánico, aunque puede ser de otro tipo, sobre el cual se plantan especies vegetales que son resistentes a las condiciones de las soluciones de cianuro, las cuales tiene un papel activo en el proceso depurador (49, 51)

➤ **Humedales subsuperficial**

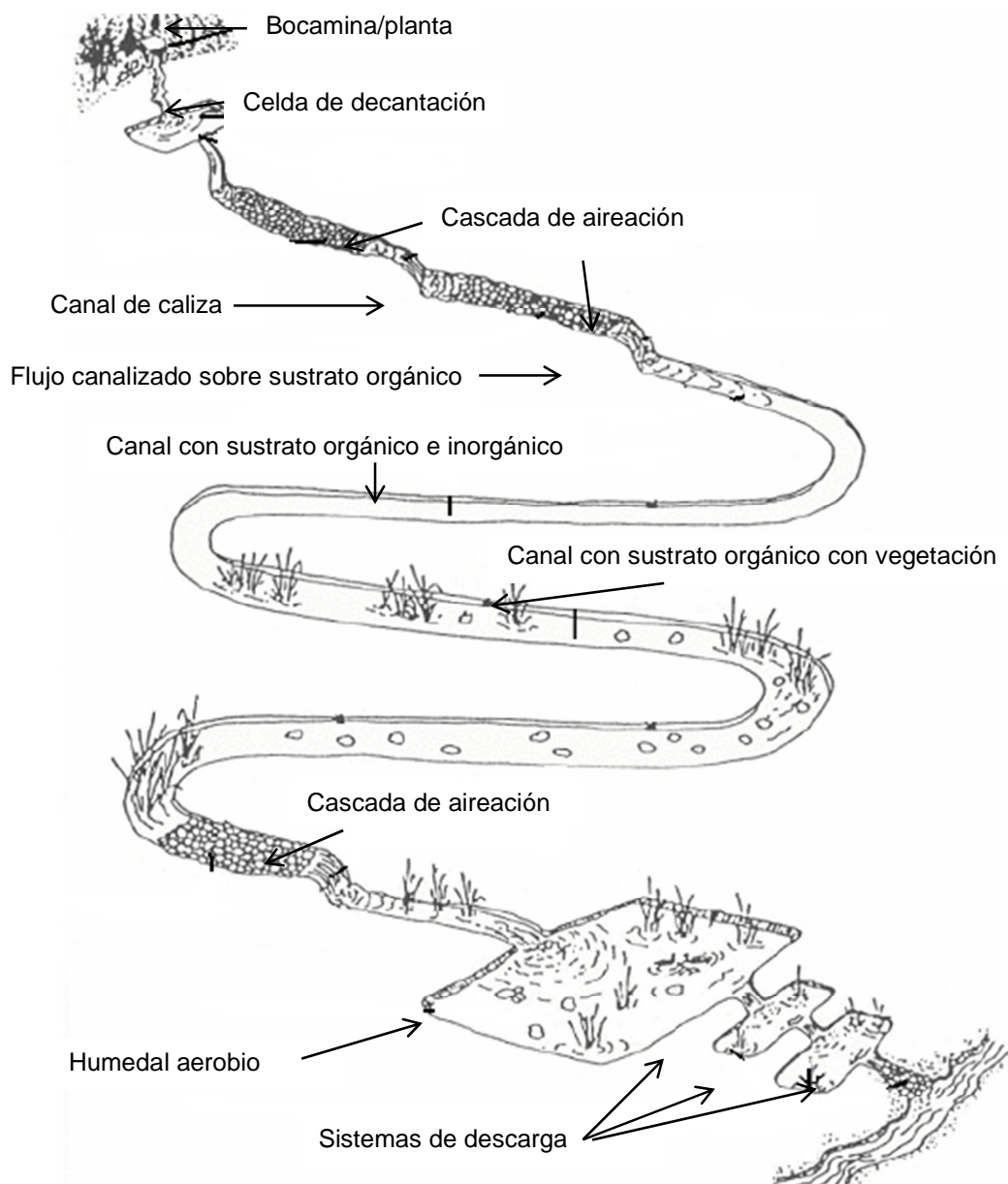
En estos humedales el agua a tratar circula exclusivamente a través de un material granular (arena, gravilla, grava), de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación. Surge como una mejora a los sistema de humedales superficiales para contra restar los efectos de la disminución del pH por la hidrólisis de algunos metales, usando sustratos que sirven de soporte para el crecimiento vegetal, y favorecer la formación de biopelícula bacteriana lo cual a su vez favorece la actividad de los microorganismos responsable de la reducción de sulfatos y eliminación de otros elementos como Fe, Zn y Al de las soluciones de cianuro a tratar (51). En este tipo de humedal la saturación del sustrato y la interfase sustrato-solución son clave para los procesos de eliminación del contaminante, ya que allí es donde entra en contacto la solución oxigenada a tratar y la solución que satura el sustrato. Otro factor a tener en cuenta en el sistema son las raíces de especies vegetales como *Typha* o *Phragmites* que mantienen condiciones locales ligeramente oxidantes en la interfase inhibiendo de esta forma la actividad de bacterias anaerobias, pero proporcionando nutrientes necesarios para las bacterias sulfato-reductoras (49).

En ambos sistemas la vegetación tiene un papel fundamental en la utilización de los humedales para el tratamiento de aguas contaminadas, debido a la transferencia de oxígeno a través de las raíces de las plantas, las cuales a su vez proporcionan el medio para el desarrollo de microorganismos, que en conjunto permiten estabilizar los sustratos utilizados; además son las mismas especies vegetales las que proporcionan las condiciones favorables para la sedimentación

de metales, controlan el flujo lento de las soluciones a través del sistema, lo cual permite la eliminación de complejos de cianuro y metales ya se mediante reacciones químicas, biológicas, o absorción de los mismos. Algunas de las plantas utilizadas para la implementación de humedales artificiales son *Phragmites australis* (carrizo), *Scirpus lacustris* (junco de laguna), variedades de *Typha* (espadaña), se han reportado otro tipo de plantas como el *Sorghum bicolor* (Sorgo) por su capacidad de degradar cianuro en aguas con concentraciones de cianuro total alrededor de 125 mg/L y capacidad de bioacumular el oro ofreciendo nuevas alternativas para la minería (39, 52)

A pesar de que estos sistemas son capaces de mejorar de forma notable la calidad del agua y se reportan eficiencias entre el 40% y el 100% en la eliminación de metales, esta se ve limitada durante largos periodos de tiempo, ya que el sustrato va perdiendo capacidad de adsorción y su tolerancia a valores extremos de pH se va reduciendo. Además, no resulta efectivo para altas concentración de cargas contaminantes y su rendimiento es altamente dependiente de las condiciones climáticas (41). En la figura 7 se presenta un esquema de sistema pasivo tipo humedal propuesto por Smith y Mudder (1991) (49).

Figura 7 Esquema propuesto por Smith y Mudder (1991) para un tratamiento de residuos de cianuración mediante sistema pasivo.



Fuente. Álvarez R. 2005

Algunos casos como el de la mina Star Lake y Jolu, Canada, se reporta la aplicación de tratamientos pasivos tipo humedal natural para la descontaminación

de soluciones de cianuro con concentraciones iniciales de 100 y 200 mg/L de cianuro total, utilizando como sustrato suelo natural autóctono y sistema de riego por aspersión de la solución de cianuro favoreciendo la volatilización del cianuro libre, con lo cual se alcanzaron niveles de eliminación superiores al 95% y concentraciones finales en el efluente de 0,01 mg/L de cianuro total. En la universidad de Oviedo, España, se estudió la implementación de un sistema pasivo a escala piloto tipo humedal para eliminar los niveles de cianuro disuelto en los efluentes de procesos de cianuración, donde se lograron reducir las concentraciones de cianuro total al orden de 0,17 mg/L/m² y la eliminación por el orden del 80% para complejos de cianuro presentes en la solución, así como iones nitrato y nitrito; se corroboró que las condiciones aerobias son más efectivas que las anaerobias en la descontaminación de soluciones de cianuro, debido a que se favorece principalmente la oxidación del cianuro a cianato, y se recomienda el uso de sustratos de naturaleza arenosa-arcillosa para la construcción de humedales artificiales al absorber en una mayor proporción compuestos de cianuro y otros metales (49, 53).

4. COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE BIORREMDIACIÓN

La biorremediación constituye una alternativa real que puede ser desarrollada paralelamente con los procesos de beneficio del oro con buenos resultados, sin embargo solo constituye una alternativa más para mitigar y reducir los contaminantes y sus efectos en el ambiente, con algunas ventajas claras a nivel económico y facilidad de implementación respecto al desarrollo y aplicación muchas otras tecnologías.

La adecuada evaluación y selección de las posibles técnicas de biorremediación a implementar se debe hacer con base en una serie de criterios que permitan proteger la salud, el medio ambiente y cumplir con la legislación. Algunos de los criterios más importantes a evaluar en una etapa inicial son, diagnóstico preciso de la naturaleza de contaminante, transformaciones del mismos en el proceso productivo, concentraciones iniciales presentes en el efluente líquido, caudal del efluente a tratar, dimensión de la contaminación y calidad del efluente a obtener.

Así mismo es importante evaluar para efectos de implementación de la tecnología facilidad de operación, costos de inversión y operación, factibilidad y eficiencia de la técnica, limitaciones de la técnica, y otras necesidades o recursos, así como residuos generados del proceso de tratamiento. En la tabla 4 se presenta un comparativo de las técnicas estudiadas.

Tabla 4 Comparativo de las técnicas de biorremediación estudiadas

Porcentajes de remoción	Contaminante tratado	Capacidad de tratamiento	Costos (Instalación-mantenimiento-operación)	Energía requerida	Residuos generados	Limitaciones y desventajas	Procesos adicionales
<p>Eficiencias del 70 al 90%</p> <p>*Periodos de aproximadamente 170 días.</p>	<p>Cianuro libre</p> <p>Complejos WAD y SAD</p>	<p>Mayor</p>	<p>No se requiere inversión</p>	<p>No requiere energía externa.</p> <p>*Radiación solar (UV) para los procesos de volatilización</p>	<p>Gases y sedimentos</p>	<p>Degradación lenta. Dependiente de condiciones climáticas: aireación de la zona, radiaciones solares y temperatura. Factores que determinan las reacciones son: formas de cianuro, concentraciones del contaminante, pH de la solución, presencia de microorganismos degradadores</p> <p>Dependiente del área y profundidad de los tanques</p>	<p>Ninguno</p>
<p>Eficiencia del 80 al 95%</p>	<p>Cianuro libre</p> <p>Complejos WAD y SAD</p> <p>Nitratos y nitritos</p>	<p>Dependiente del área</p> <p>*Tiempo de retención hidráulica de varios días (15 días aprox.)</p>	<p>Costos en la adquisición de terrenos para su construcción</p> <p>Escaso uso de equipo mecánico</p> <p>Viabilidad económica depende en gran mayoría del costo del material granular o sustrato filtrante a utilizar, tipo de impermeabilización.</p> <p>Bajos costos de obra civil, operación y mantenimiento.</p>	<p>Uso de menor energía a comparación de los convencionales</p> <p>Casi nulo, aguas circulan por gravedad</p>	<p>Generación de lodos pero en menor proporción (sólidos se mineralizan)</p> <p>Material vegetal retirado</p>	<p>Inconvenientes de saturación del sustrato filtrante por el manejo a largos periodos de tiempo</p> <p>Baja tolerancia a valores de pH extremos</p> <p>Altamente dependiente de condiciones climáticas de la zona</p> <p>Extensiones de terreno considerables</p> <p>Requiere de tiempo para su construcción e implementación</p> <p>Pocas posibilidad de control ante modificaciones de las condiciones operativas</p>	<p>Elementos primarios (Balsa de sedimentación, canales)</p> <p>Procesos de neutralización (solución acida)</p>

Tabla 4. Comparativo de las técnicas de biorremediación estudiadas (Continuación)

<p>Contactores Biológicos Rotativos (CBRs)</p>	<p>Eficiencia del 95 al 98%</p>	<p>Cianuro libre Complejos WAD y SAD Nitratos y nitritos</p> <p>Ya que es posible tener en cada etapa un cultivo biológico diferente, se cuenta con un grado adicional de flexibilidad en el proceso.</p>	<p>Se reportan un tratamiento de 21.000 m³/día de agua resultante de la mina (Homestake)</p>	<p>Los mayores costos radican en su mantenimiento e infraestructura.</p> <p>La biomasa presenta en general buenas características de sedimentación con lo que se disminuye el costo de la clarificación.</p>	<p>Se requiere energía para la rotación de los discos</p> <p>No se requiere energía para los procesos de bombeo, aireación o agitación</p>	<p>Usando una configuración de sistemas anaerobios–aerobio, la producción de lodos es reducida comparado con un sistema convencional.</p>	<p>Dependiente de condiciones climáticas como temperatura y otros factores como concentraciones de cianuro en mg/L</p> <p>Rigurosa mantenimiento de los sólidos producidos, que pueden bloquear el paso del aire generando condiciones anaerobias</p>	<p>Requiere de la adición de elementos traza, para que no se vea limitada la degradación biológica</p>
<p>Filtros percolados</p>	<p>Eficiencia del 98%</p>	<p>Cianuro libre Complejos WAD y SAD Nitratos y nitritos</p>	<p>Puede tratar entre 25 y 100 galones por día. Por lo general se diseñan para tratar 50 galones.</p>	<p>Altos costos en la obra civil, por medios de soporte y boquillas de reparto de agua</p> <p>Se requiere de una operación y un mantenimiento adecuado para que funcione bien. Los mayores costos radican en su mantenimiento.</p>	<p>Tiene mejor rendimiento energético que los procesos de biodiscos.</p>	<p>Se requiere de un lavado para reducir la cantidad de material biológico el cual puede bloquear en la salida del filtro.</p> <p>Requiere manejo de los lodos</p>	<p>Dependiente de condiciones climáticas como temperatura y otros factores como concentraciones de cianuro en mg/L</p> <p>Rigurosa mantenimiento de los sólidos producidos, que pueden bloquear el paso del aire generando condiciones anaerobias</p>	<p>Disposición y mantenimiento de lodos</p>

5. CONCLUSIONES

La tecnología pasiva de los sistemas tipo humedal constituye una buena alternativa debido a sus bajos costos de construcción, simplicidad en su operación y buenos resultados en la descontaminación de efluentes generados por la industria aurífera. Esta tecnología solo requiere un mantenimiento simple, pero relativamente frecuente (aproximadamente una vez cada dos semanas), tiempo en el que también es necesario retirar los lodos depositados en las celdas de sedimentación y las placas de calcita que se forman a modo de “costra” en los sistemas de distribución de caudal que pueden impedir que el sistema desarrolle su funcionamiento con normalidad.

A pesar de que los métodos activos han dado buenos resultados en el tratamiento de estos efluentes, se debe considerar que requieren de una buena inversión la cual no puede ser contemplada por cualquiera, y más en nuestro país en donde la mayoría de la actividad minera se desarrolla a pequeña escala.

Es importante que el empresario minero asuma la responsabilidad de la minería como una gran empresa que requiere inversión económica, social y ambiental, con el fin de lograr una mayor productividad sostenible, condiciones sociales que permitan el desarrollo de los municipios que dependen de esta actividad; y con ayuda de las entidades gubernamentales y no gubernamentales se inviertan recursos que permitan implementar en primera instancia buenas prácticas ambientales en la industria minera, implementación de sistemas de producción más limpia, conversión de tecnologías, entre otras, y en segunda instancia desarrollo e implementación de tecnologías que permitan estudiar y mitigar los impactos ambientales causados por los procesos de extracción y beneficio del oro.

El tipo y la intensidad de los impactos ambientales de la minería aurífera, así como las medidas de mitigación y/o remediación adoptadas varían en función del grado de organización y tecnificación de la explotación minera. Donde las grandes empresas deben adquirir el compromiso de implementar sistemas de tratamiento activos o pasivos a sus efluentes líquidos, acompañado de técnicas de producción más limpia que permitan prevenir los impactos ambientales; y así mismo las autoridades ambientales deben asumir la responsabilidad de regular estos procesos, y junto a la academia pronunciarse sobre las formas para llevar a cabo procesos de producción minera sostenible que contribuya al desarrollo regional del país.

A pesar de la abundancia de normas y organismos de carácter ambiental, se considera que existe una falta de capacidad administrativa y técnica por parte de las entidades ambientales y mineras para exigir y controlar el cumplimiento de la normatividad ambiental, así como el establecimiento de procedimientos ágiles y seguros para otorgar licencias y permisos ambientales a los proyectos mineros.

Es necesario el desarrollo de un proyecto de ley minera claro y responsable que impulse a las entidades mineras y ambientales a dedicar esfuerzos y recursos para incorporar la gestión ambiental en la actividad minera del país, como herramienta política que a su vez permita la formalización y mejores condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales para el aprovechamiento de los recursos naturales.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARSDEN, John y HOUSE, Iain. The chemistry of gold extraction. 2 ed. Englewood: Society for Mining Metallurgy & Exploration, 2006. 651 p.
2. MAYR, Juan, *et al.* Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente. Bogotá D.C.: 2002.
3. LOTTERMOSER, Bernd. Cyanidation wastes of gold-silver ores. En: Mines Wastes. 3 ed. Australia, Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 183-199.
4. LOGSDON, Mark; HAGELSTEIN, Karen y MUDDER, Terry. El Manejo del cianuro en la extracción de oro. 1 ed. Canada: Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente, 2001. 37 p.
5. DONATO, D., *et al.* A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife. En: Environment International. 2007. vol. 33. p. 974-84.
6. KUYUCAK, N. y AKCIL, A. Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. En: Minerals Engineering Journal. 2013. vol. 50. p. 13-29.
7. MUDDER, T., *et al.* The biopass system phase I: laboratory evaluation. En: The cyanide monograph. 2 ed. London: Mining Journal Books. London, 1995. p. 420-40.

8. RAMIREZ, A. Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. En: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. 2010. vol. 71, no. 1. p. 54-61.
9. DECLARACIÓN DE LA CONFERENCIA DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE HUMANO. Estocolmo. Organización de las Naciones Unidas (ONU). 1972.
10. DECLARACIÓN DE RIO DE JANEIRO. Rio de Janeiro. Organización de las Naciones Unidas (ONU). 1992.
11. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 99 (22, diciembre, 1993). Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario oficial 41146. Bogotá D.C., 1993.
12. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 2820 (05, agosto, 2010). Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Bogotá D.C., 2010.
13. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 2811 (18, diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C., 1974.
14. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 9 (24, enero, 1979). Por el cual se dictan medidas sanitarias. Diario Oficial. Bogotá D.C., 1979.
15. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1594 (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así

como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial 36700. Bogotá D.C., 1984.

16. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 2655 (23, diciembre, 1988). Por el cual se expide el Código de Minas. Diario Oficial 38626. Bogotá D.C., 1988

17. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 948 (05, junio, 1995). Por el cual se reglamentan, parcialmente la Ley **23** de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 75 del Decreto-Ley **2811** de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley **9** de 1979; y la Ley **99** de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. Diario Oficial 41876. Bogotá D.C., 1995.

18. COLOMBIA. ALCALDIA DE BOGOTÁ D.C. Decreto 501 (22, mayo, 1998). Por el cual se adiciona el artículo **5º** del Decreto 748 de 1995. Bogotá D.C., 1998.

19. COLOMBIA. CORTE CONSTITUCIONAL. Sentencia C-702 de 1999. Bogotá D.C., 1999.

20. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 685 (15, agosto, 2001) Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 45273. Bogotá D.C., 2001.

21. COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 1728 (06, Agosto, 2002). Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre la Licencia Ambiental. Diario Oficial 44893. Bogotá D.C., 2002.

22. COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 1729 (06, agosto, 2002). Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 44893. Bogotá D.C., 2002.
23. COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 1993 (06, septiembre, 2002). Por el cual se establece el Sistema de Información Minero Colombiano "SIMCO". Bogotá D.C., 2002.
24. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3100 (30, octubre, 2003). Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Diario Oficial 45357. Bogotá D.C., 2003
25. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 45862. Bogotá D.C., 2005.
26. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1333 (21, julio, 2009). Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47417. Bogotá D.C., 2009.
27. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 2372 (01, junio, 2010). Por el cual se reglamenta el Decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las

categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C., 2010.

28. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 (25, octubre, 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47837. Bogotá D.C., 2010.

29. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4728 (23, diciembre, 2010). Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010. Diario Oficial 47932. Bogotá D.C., 2010.

30. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1382 (09, febrero, 2010). Por el cual se modifica la Ley 685 de 2001 Código de Minas. Diario Oficial 47618. Bogotá D.C., 2010.

31. COLOMBIA. CORTE CONSTITUCIONAL. Sentencia 366 de 2011. Bogotá D.C., 2011.

32. COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Resolución 18-0861 (20, agosto, 2002). Por medio de la cual se adoptan las guías minero ambientales y se establecen otras disposiciones. Bogotá D.C., 2002.

33. GUIZA, Leonardo. Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia. En: Opinión Jurídica. 2011. p. 123-40.

34. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Bogotá D.C., 2007.
35. PATIL, Y.B. y PAKNIKAR, K.M. Development of a process for biodegradation of metal cyanides from waste waters. En: Process Biochemistry. 2000. vol 35. p. 1139-1151.
36. AKCIL, A. y MUDDER, T. Microbial destruction of cyanide wastes in gold mining: process review. En: Biotechnology Letters. 2003. vol. 25. p 445-450.
37. USEPA. Capsule Report: Managing Cyanide in Metal Finishing Office of Research and Development. Washington, National Risk Management Research Laboratory, 2000.
38. YOUNGER, C.A. y JORDAN, T.S. Cyanide remediation: current and past technologies. En: 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research. Montana. 1995.
39. AKCIL, Ata. Destruction of cyanide in gold mill effluents: biological versus chemical treatments. En: Biotechnology Advances. 2003. vol. 21, no. 6. p. 501-511.
40. WHITLOCK, J. y MUDDER, T. The homestake wastewater treatment process. Part I: design and startup of a full scale facility. En: TERRY, M. y BOTZ, M. The Cyanide Monograph. 2 ed. London, Mining Journal Books Limited, 1998.

41. BAXTER, J. y CUMMINGS, P. The current and future applications of microorganism in the bioremediation of cyanide contamination. En: Antonie van Leeuwenhoek. 2006. vol. 90. p. 1-17.
42. MOSHER, J.B. y FIGUEROA, L. Biological oxidation of cyanide: A viable treatment option for the minerals processing industry?. En: Minerals Engineering Journal. 1996. vol. 9. p. 573-581.
43. DASH, R.; GAUR, A. y BALOMAJUNDER, C. Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatment. En: Journal of Hazardous Materials. 2009. vol. 163. p. 1-11.
44. MEDINA, Susan, *et al.* Degradación Tiocianato por Hongos Aislados de Ambientes Mineros y Evaluación de su Capacidad Degradativa. En: Revista Peruana de Biología. 2012. vol. 19, no. 1. p. 81-88.
45. BOTZ, M. y MUDDER, T. Mine water treatment with activated carbon. En: The Cyanide Monograph. 2 ed. London, Mining Journal Books, 2000. p. 504-511.
46. ORDOÑEZ, P. y BETANCUR, A. Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor de biodiscos. Tesis de pregrado. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 2003.
47. EVANGELHO, M, *et al.* A trickling filter application for the treatment of a gold milling effluent. En: International Journal of Mineral Processing. 2001. vol. 62. p. 279-292.
48. SASSE, L. DEWATS Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries. Delhi, BORDA, 1998.

49. ÁLVAREZ, R. Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro. Tesis de doctorado. Oviedo. Universidad de Oviedo. 2005.
50. KCOMT, C. y AMEZAGA, J. Remediación pasiva In Situ de drenaje minero/industrial. Comisión Europea, Ermisa, 2006. p. 26.
51. CENTA. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Monográfico Agua en Centro América. España, Ideasmares. 2008. p. 12-260.
52. MORENO, R. y JIMÉNEZ, J. Mejoramiento del actual tratamiento activo y propuesta de un método pasivo para el manejo de drenajes ácidos en el distrito minero auroargentífero Vetas-California (Santander). Tesis de Especialización. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2012.
53. FERNÁNDEZ, B. Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina. Tesis de Doctorado. Oviedo. Universidad de Oviedo. 2007.

BIBLIOGRAFÍA

AKCIL, A. y MUDDER, T. Microbial destruction of cyanide wastes in gold mining: process review. En: Biotechnology Letters. 2003. vol. 25. p 445-450.

AKCIL, Ata. Destruction of cyanide in gold mill effluents: biological versus chemical treatments. En: Biotechnology Advances. 2003. vol. 21, no. 6. p. 501-511.

ÁLVAREZ, R. Aplicación de sistemas pasivos para el tratamiento de soluciones residuales de procesos de cianuración en minería de oro. Tesis de doctorado. Oviedo. Universidad de Oviedo. 2005.

BAXTER, J. y CUMMINGS, P. The current and future applications of microorganism in the bioremediation of cyanide contamination. En: Antonie van Leeuwenhoek. 2006. vol. 90. p. 1-17.

BOTZ, M. y MUDDER, T. Mine water treatment with activated carbon. En: The Cyanide Monograph. 2 ed. London, Mining Journal Books, 2000. p. 504-511.

CENTA. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Monográfico Agua en Centro América. España, Ideasmares. 2008. p. 12-260.

COLOMBIA. ALCALDIA DE BOGOTÁ D.C. Decreto 501 (22, mayo, 1998). Por el cual se adiciona el artículo **5º** del Decreto 748 de 1995. Bogotá D.C., 1998.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 948 (05, junio, 1995). Por el cual se reglamentan, parcialmente la Ley **23** de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 75 del Decreto-Ley **2811** de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley **9** de 1979; y la Ley **99** de 1993, en relación con la prevención y control de la

contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire. Diario Oficial 41876. Bogotá D.C., 1995.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1594 (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Diario Oficial 36700. Bogotá D.C., 1984.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 2811 (18, diciembre, 1974). Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá D.C., 1974.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 2655 (23, diciembre, 1988). Por el cual se expide el Código de Minas. Diario Oficial 38626. Bogotá D.C., 1988

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 9 (24, enero, 1979). Por el cual se dictan medidas sanitarias. Diario Oficial. Bogotá D.C., 1979.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 99 (22, diciembre, 1993). Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Diario oficial 41146. Bogotá D.C., 1993.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 685 (15, agosto, 2001) Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 45273. Bogotá D.C., 2001.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1333 (21, julio, 2009). Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47417. Bogotá D.C., 2009.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1382 (09, febrero, 2010). Por el cual se modifica la Ley 685 de 2001 Código de Minas. Diario Oficial 47618. Bogotá D.C., 2010.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Resolución 18-0861 (20, agosto, 2002). Por medio de la cual se adoptan las guías minero ambientales y se establecen otras disposiciones. Bogotá D.C., 2002.

COLOMBIA. CORTE CONSTITUCIONAL. Sentencia 366 de 2011. Bogotá D.C., 2011.

COLOMBIA. CORTE CONSTITUCIONAL. Sentencia C-702 de 1999. Bogotá D.C., 1999.

COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 1728 (06, Agosto, 2002). Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre la Licencia Ambiental. Diario Oficial 44893. Bogotá D.C., 2002.

COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Decreto 1729 (06, agosto, 2002). Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 44893. Bogotá D.C., 2002.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 838 (23, marzo, 2005). Por el cual se modifica el

Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 45862. Bogotá D.C., 2005.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 2372 (01, junio, 2010). Por el cual se reglamenta el Decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C., 2010.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 2820 (05, agosto, 2010). Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. Bogotá D.C., 2010.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3100 (30, octubre, 2003). Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Diario Oficial 45357. Bogotá D.C., 2003

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3930 (25, octubre, 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47837. Bogotá D.C., 2010.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 4728 (23, diciembre, 2010). Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010. Diario Oficial 47932. Bogotá D.C., 2010.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2115 (22, junio, 2007). Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Bogotá D.C., 2007.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 1993 (06, septiembre, 2002). Por el cual se establece el Sistema de Información Minero Colombiano "SIMCO". Bogotá D.C., 2002.

DASH, R.; GAUR, A. y BALOMAJUNDER, C. Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatment. En: Journal of Hazardous Materials. 2009. vol. 163. p. 1-11.

DECLARACIÓN DE LA CONFERENCIA DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE HUMANO. Estocolmo. Organización de las Naciones Unidas (ONU). 1972.

DECLARACIÓN DE RIO DE JANEIRO. Rio de Janeiro. Organización de las Naciones Unidas (ONU). 1992.

DONATO, D., *et al.* A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife. En: Environment International. 2007. vol. 33. p. 974-84.

EVANGELHO, M, *et al.* A trickling filter application for the treatment of a gold milling effluent. En: International Journal of Mineral Processing. 2001. vol. 62. p. 279-292.

FERNÁNDEZ, B. Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina. Tesis de Doctorado. Oviedo. Universidad de Oviedo. 2007.

GUIZA, Leonardo. Perspectiva jurídica de los impactos ambientales sobre los recursos hídricos provocados por la minería en Colombia. En: Opinión Jurídica. 2011. p. 123-40.

KUYUCAK, N. y AKCIL, A. Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. En: Minerals Engineering Journal. 2013. vol. 50. p. 13-29.

KCOMT, C. y AMEZAGA, J. Remediación pasiva In Situ de drenaje minero/industrial. Comisión Europea, Ermisa, 2006. p. 26.

LOGSDON, Mark; HAGELSTEIN, Karen y MUDDER, Terry. El Manejo del cianuro en la extracción de oro. 1 ed. Canada: Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente, 2001. 37 p.

LOTTERMOSER, Bernd. Cyanidation wastes of gold-silver ores. En: Mines Wastes. 3 ed. Australia, Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 183-199.

MARSDEN, John y HOUSE, Iain. The chemistry of gold extraction. 2 ed. Englewood: Society for Mining Metallurgy & Exploration, 2006. 651 p.

MAYR, Juan, *et al.* Diagnóstico y proyecciones de la gestión minero ambiental para las regiones auríferas de Colombia. Ministerio de Medio Ambiente. Bogotá D.C.: 2002.

MEDINA, Susan, *et al.* Degradación Tiocianato por Hongos Aislados de Ambientes Mineros y Evaluación de su Capacidad Degradativa. En: Revista Peruana de Biología. 2012. vol. 19, no. 1. p. 81-88.

MORENO, R. y JIMÉNEZ, J. Mejoramiento del actual tratamiento activo y propuesta de un método pasivo para el manejo de drenajes ácidos en el distrito minero auroargentífero Vetas-California (Santander). Tesis de Especialización. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2012.

MOSHER, J.B. y FIGUEROA, L. Biological oxidation of cyanide: A viable treatment option for the minerals processing industry?. En: Minerals Engineering Journal. 1996. vol. 9. p. 573-581.

MUDDER, T., *et al.* The biopass system phase I: laboratory evaluation. En: The cyanide monograph. 2 ed. London: Mining Journal Books. London, 1995. p. 420-40.

ORDOÑEZ, P. y BETANCUR, A. Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor de biodiscos. Tesis de pregrado. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 2003.

PATIL, Y.B. y PAKNIKAR, K.M. Development of a process for biodegradation of metal cyanides from waste waters. En: Process Biochemistry. 2000. vol 35. p. 1139-1151.

RAMIREZ, A. Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. En: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. 2010. vol. 71, no. 1. p. 54-61.

SASSE, L. DEWATS Decentralised Wastewater Treatment in Developing Countries. Delhi, BORDA, 1998.

USEPA. Capsule Report: Managing Cyanide in Metal Finishig Office of Research and Development. Washington, National Risk Managemente Research Laboratory, 2000.

WHITLOCK, J. y MUDDER, T. The homestake wastewater treatment processo. Part I: design and startup of a full scale facility. En: TERRY, M. y BOTZ, M. The Cyanide Monograph. 2 ed. London, Mining Journal Books Limited, 1998.

YOUNGER, C.A. y JORDAN, T.S. Cyanide remediation: current and past technologies. En: 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research. Montana. 1995.