

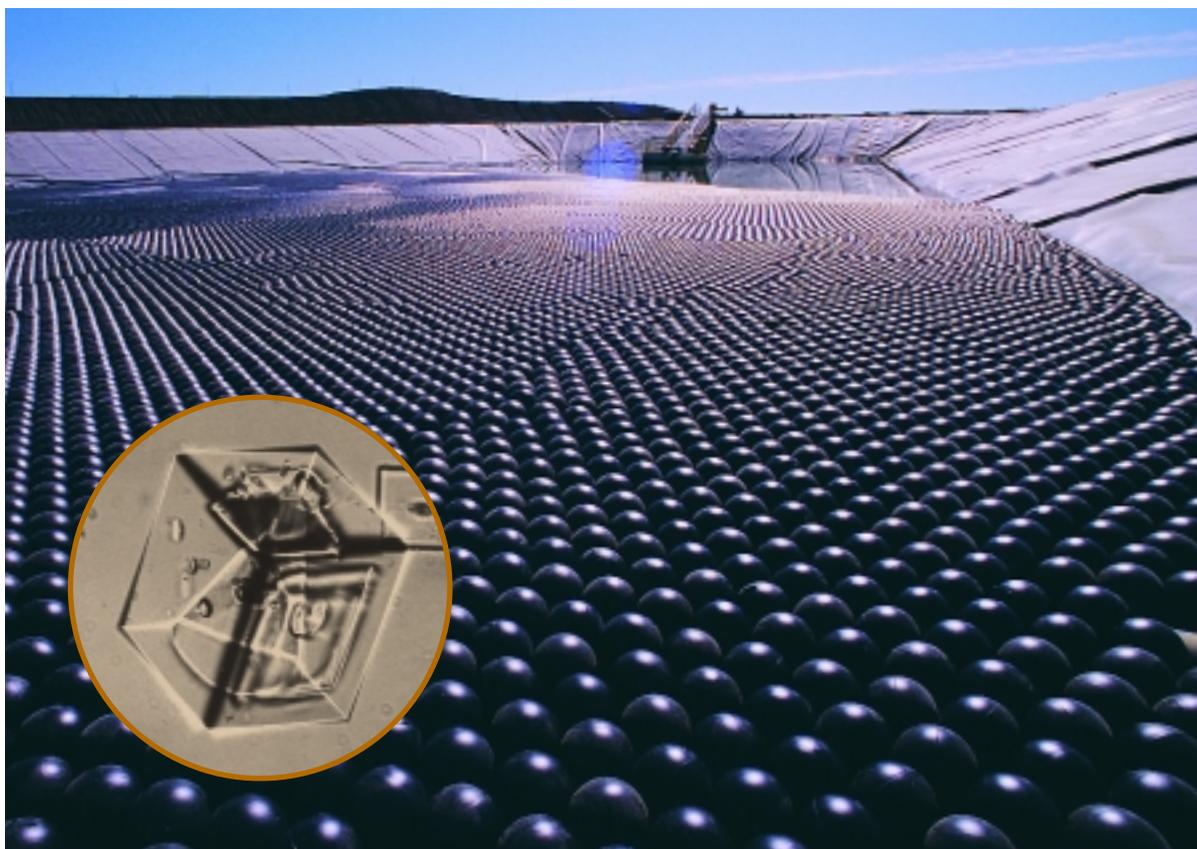
EL MANEJO DEL CIANURO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO

Traducido de la publicación en inglés titulada
The Management of Cyanide in Gold Extraction

Mark J. Logsdon, MSc

Karen Hagelstein, PhD, CIH

Terry I. Mudder, PhD



CONSEJO INTERNACIONAL DE
METALES Y MEDIO AMBIENTE

ICME

El Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente (International Council on Metals and the Environment — ICME) ha publicado el presente documento como parte de sus esfuerzos permanentes para proporcionar información sobre temas relacionados con la salud y el ambiente que afectan al sector de la minería y los metales. Los contenidos de las publicaciones de ICME abarcan desde información técnica y general hasta debates sobre políticas y asuntos normativos. Los temas analizados pueden resultar de interés no sólo para la industria, sino también para otras personas, entre ellas, los responsables de formular la política del sector, los encargados de redactar los reglamentos, los educadores y el público en general. Esperamos que las publicaciones de ICME ayuden a comprender temas a veces difíciles y complejos.

Aunque las opiniones expresadas pertenecen a los autores, ICME agradece las preguntas y los comentarios sobre las perspectivas y la información que contienen sus documentos. ICME también aprecia las sugerencias relacionadas con otros temas de importancia pública para incluirlos en futuras publicaciones.

Fundada en 1991, ICME es una organización no gubernamental que promueve el desarrollo y la implementación de políticas y prácticas ambientales y de salud en la producción, el uso, el reciclado y la eliminación de metales preciosos y no ferrosos. Además de sus publicaciones, el amplio programa de información de ICME incluye un sitio en la Web y un boletín trimestral de distribución mundial.

The International Council on Metals and the Environment

294 Albert Street, Suite 506

Ottawa, Ontario

CANADA K1P 6E6

Tel: (613) 235-4263

Fax: (613) 235-2865

e-mail: info@icme.com

www.icme.com

El Manejo del Cianuro en la Extracción de Oro, de Mark J. Logsdon, Karen Hagelstein y Terry I. Mudder. Traducido de la publicación en inglés titulada *The Management of Cyanide in Gold Extraction*. Traducción al español: Ana María Paonessa

Primera impresión de la publicación en español, Abril de 2001

ISBN 1-895720-35-4

Foto de tapa: *Las pelotas flotantes impiden que las aves aterricen sobre la superficie de un estanque de contención en la mina de oro Cortez, una joint-venture entre Placer Dome y Kennecott en Nevada, EE.UU. (cortesía de Placer Dome).*

Recuadro: *Cristales de cianuro de sodio en formación (cortesía de DuPont)*

EL MANEJO DEL CIANURO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO

Traducido de la publicación en inglés titulada
The Management of Cyanide in Gold Extraction

Mark J. Logsdon, MSc
Karen Hagelstein, PhD, CIH
Terry I. Mudder, PhD



CONSEJO INTERNACIONAL DE
METALES Y MEDIO AMBIENTE

ICME

ÍNDICE

Prefacio	iii
Resumen Ejecutivo	v
1. ¿Qué es el cianuro?	1
2. Presencia del cianuro en la naturaleza	3
3. Usos industriales del cianuro	5
4. Uso del cianuro en la producción de oro	7
5. Producción y manipulación del cianuro	11
6. El cianuro en soluciones	15
• Cianuro libre.	15
• Complejos de cianuro	16
• Complejos débiles y fuertes de cianuro.	18
• Análisis y monitoreo del cianuro	18
7. Atenuación de las concentraciones de cianuro en el ambiente	19
• Tratamiento y reutilización de soluciones de cianuro	19
8. Evaluación y manejo de los riesgos del cianuro	25
• Impactos del cianuro sobre la salud y el ambiente	26
Toxicidad y epidemiología del cianuro en seres humanos	27
Exposición de los trabajadores.	27
Toxicología e impactos ambientales	28
9. Manejo de los riesgos del cianuro en la industria minera	31
• Sistemas de gestión e investigación y desarrollo	31
• Manipulación del producto	32
• Conservación y reciclado	33
• Normativa y programas voluntarios dirigidos a la seguridad laboral y la salud pública	34
10. Información sobre los riesgos	35
11. Bibliografía	37

FIGURAS, TABLAS Y CUADROS

Figura 1	Porción de la producción mundial de cianuro utilizada en minería	5
Figura 2	Producción de oro.	7
Figura 3	Equilibrio de CN ⁻ /HCN con el pH	15
Figura 4	El ciclo del cianuro	20
Figura 5	Ejemplo de degradación del cianuro	21
Tabla 1	Concentraciones de cianuro en plantas seleccionadas	3
Tabla 2	Análisis de soluciones estériles	17
Tabla 3	Degradación natural del cianuro en depósitos de relaves	21
Cuadro 1	Historia del uso del cianuro en minería	10

Prefacio

La industria minera, en particular la industria minera del oro, ha estado utilizando el cianuro en sus procesos productivos durante muchas décadas. Aunque generalmente se piensa que el cianuro es una sustancia mortal, en realidad es una sustancia química ampliamente utilizada, esencial para el mundo moderno. La clave para su uso seguro es la implementación de sólidas prácticas de manejo.

Aunque la preocupación pública por el cianuro es válida y sin duda comprensible, gran parte de la reciente atención de la prensa y la reacción pública respecto del uso del cianuro en operaciones mineras ha surgido debido a la falta de comprensión sobre la naturaleza del cianuro y sus efectos sobre la salud y el ambiente. A pesar de que existe un cúmulo considerable de información técnica para quienes producen, transportan y utilizan el cianuro, hasta el momento no se ha brindado información que sea fácilmente comprensible para un público menos técnico. Con el propósito de remediar esta situación y tratar la preocupación pública por el uso del cianuro en la extracción de oro, el Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente (the International Council on Metals and the Environment — ICME) ha encargado el presente documento.

El Manejo del Cianuro en la Extracción de Oro ofrece un panorama general sobre los usos y riesgos de esta sustancia química, con especial énfasis en su uso para la recuperación de oro. La publicación comienza describiendo las propiedades del cianuro y sus usos generales en la industria, luego continúa tratando más específicamente el ciclo de vida del cianuro en el ambiente minero, su producción, uso en la extracción de minerales y su química general y ambiental. Después de presentar esta información, la publicación explica cómo los principios de evaluación de riesgos, el manejo de riesgos y la información de riesgos contribuyen al uso seguro del cianuro en la recuperación de oro.

Este trabajo ha sido preparado por reconocidos expertos y debería ser una referencia útil para toda persona que esté involucrada en la toma de decisiones relacionadas con la presencia de cianuro en las operaciones mineras, ya sea desde una perspectiva local o mundial. Esperamos que los funcionarios internacionales encargados de establecer normas, formular políticas, los líderes comunitarios y todos los lectores interesados, incluso quienes se dedican a la industria minera y metalúrgica, encuentren que este trabajo es a la vez equilibrado e informativo y puedan lograr una mayor comprensión de las características del cianuro y de su papel único en la recuperación de oro.

Gary Nash
Secretario General
ICME

Resumen Ejecutivo

El cianuro es la sustancia química elegida para la recuperación de oro.

El cianuro es uno de los pocos reactivos químicos que disuelven el oro en agua. Es una sustancia química industrial común que se consigue fácilmente a un precio razonablemente bajo. Por razones técnicas y económicas, el cianuro es la sustancia química elegida para la recuperación del oro del mineral. El cianuro ha sido utilizado en la extracción de metales desde 1887 y actualmente se le utiliza y maneja en forma segura en la recuperación de oro en todo el mundo. Las operaciones mineras para la extracción de oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio, típicamente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón).

La mayor parte del cianuro producido se utiliza como compuesto básico para la industria química.

El cianuro se produce en grandes cantidades (alrededor de 1.4 millón de toneladas por año) como uno de los pocos compuestos básicos que se utilizan principalmente para sintetizar una amplia gama de químicos orgánicos industriales, como el nylon y los acrílicos. La recuperación de oro utiliza aproximadamente el 18% de la producción mundial de cianuro.

El cianuro se produce naturalmente en diversos microorganismos, insectos y plantas.

El cianuro es una molécula de carbono y nitrógeno que ocurre naturalmente y existió en la tierra antes del comienzo de la vida y fue uno de los compuestos fundamentales en su evolución. En la naturaleza se encuentran presentes bajas concentraciones de cianuro, por ejemplo, en muchos insectos y plantas, entre las que se incluyen una amplia variedad de verduras, frutas y nueces, a las que brinda protección contra los depredadores. Además, el cianuro está presente en gran parte del ambiente diario al que estamos expuestos, por ejemplo, en la sal usada para derretir el hielo en los caminos y en los escapes de los automóviles. También es un estabilizante de la sal de mesa.

El cianuro no es persistente.

Una de las principales preocupaciones para la salud y el ambiente relacionados con los químicos sintéticos es que no se descomponen rápidamente y por lo tanto, pueden acumularse en la cadena alimenticia. Sin embargo, el cianuro se transforma en otras sustancias químicas menos tóxicas mediante procesos físicos, químicos y biológicos naturales. Dado que el cianuro se oxida cuando es expuesto al aire o a otros oxidantes, se descompone y no persiste. Aunque es un veneno mortal cuando es ingerido en una dosis suficientemente elevada, no causa problemas crónicos en la salud o en el ambiente cuando está presente en concentraciones bajas.

El cianuro se atenúa mediante procesos naturales.

Con el transcurso del tiempo, los procesos naturales, como la exposición a la luz del sol, pueden reducir la concentración de las formas tóxicas del cianuro en soluciones a valores muy bajos.

Los riesgos en la producción, uso y eliminación del cianuro pueden manejarse bien.

Las compañías responsables, tanto de la industria química como de la industria minera, emplean estrictos sistemas de manejo de riesgo para prevenir lesiones o daños causados por el uso del cianuro. El cianuro de las soluciones mineras se recoge, ya sea para ser reciclado o destruido, después de haber extraído el oro. El manejo de los riesgos asociados al uso del cianuro implica una ingeniería sólida, un monitoreo cuidadoso y buenas prácticas de manejo con el fin de evitar y mitigar los posibles escapes de cianuro al ambiente.

Comunicar la información sobre los riesgos del cianuro a los empleados y al público es esencial para lograr sólidas prácticas de manejo.

El destino ambiental del cianuro ha sido bien estudiado. El cianuro está altamente normado y el manejo de riesgo que implica está bien documentado. La comunicación de los riesgos brinda información sobre el cianuro tanto dentro de la planta operativa como externamente al público. La comunicación de la información al personal interno es el primer paso en la comunicación de la naturaleza y el alcance del riesgo para el público en general. También se deben coordinar con las autoridades apropiadas programas efectivos de comunicación y planificación para casos de emergencia.

SECCIÓN 1

¿Qué es el cianuro?

Cianuro es un término general que se aplica a un grupo de sustancias químicas que contienen carbono y nitrógeno. Los compuestos de cianuro contienen sustancias químicas (antropogénicas) que se encuentran presentes en la naturaleza o que han sido producidas por el hombre. Existen más de 2,000 fuentes naturales de cianuro, entre ellos, distintas especies de artrópodos, insectos, bacterias, algas, hongos y plantas superiores. Las principales formas de cianuro producidas por el hombre son el cianuro de hidrógeno gaseoso y el cianuro sólido de sodio y de potasio. Debido a sus propiedades únicas, el cianuro se utiliza en la fabricación de partes metálicas y en numerosos productos orgánicos comunes como los plásticos, las telas sintéticas, los fertilizantes, los herbicidas, los tintes y los productos farmacéuticos.

Existe una justificable preocupación pública por el uso del cianuro en ambientes industriales. El cianuro es una sustancia tóxica que puede ser letal si se la ingiere o se la inhala en cantidades suficientes. Esto también sucede con muchas otras sustancias químicas como la gasolina y los productos habituales para la limpieza del hogar. Al igual que miles de otras sustancias químicas que se utilizan en nuestros procesos industriales modernos; el conocimiento, los procedimientos adecuados de manipulación y una actitud responsable son fundamentales para el uso seguro y beneficioso del cianuro.

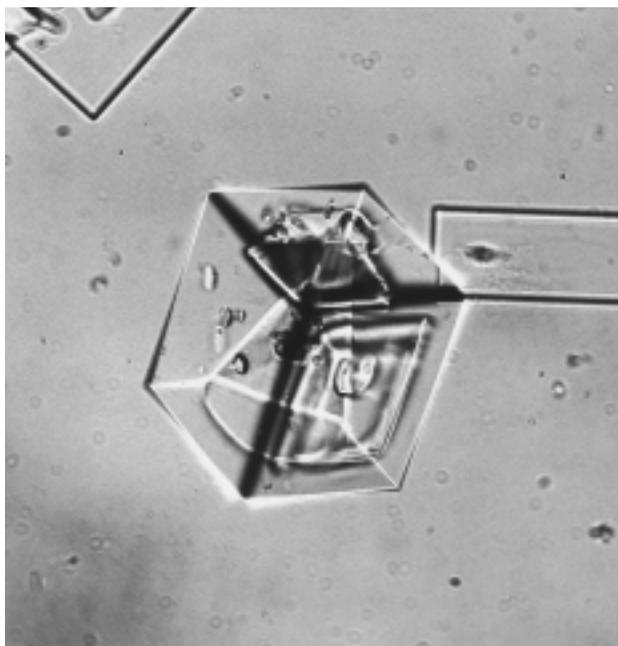


Foto: Cortesía de DuPont

Vista microscópica de los cristales de cianuro en formación.

La minería es una actividad industrial que utiliza una cantidad significativa de cianuro, aproximadamente un 20% de la producción total. Desde 1887, las soluciones de cianuro se han utilizado principalmente para extraer oro y plata de material mineral, que de otro modo no podrían extraerse eficazmente. Además, el cianuro se utiliza en concentraciones bajas como un reactivo de flotación para ayudar a recuperar metales base como el plomo, el cobre y el zinc.

SECCIÓN 2

Presencia del cianuro en la naturaleza

El carbono y el nitrógeno, los dos elementos que forman el cianuro, están presentes a nuestro alrededor. Juntos forman casi el 80% del aire que respiramos y ambos están presentes en las moléculas orgánicas que son la base de todas las formas de vida. El cianuro de hidrógeno se formó en las primeras etapas del desarrollo de nuestro planeta como precursor de los aminoácidos, a partir de los cuales evolucionó la vida sobre la tierra. El cianuro se forma naturalmente. Las plantas y los animales lo producen y utilizan como un mecanismo de protección que los convierte en una fuente alimenticia poco atractiva. Muchos organismos pueden adaptarse a la presencia del cianuro o eliminar su toxicidad.

Una fuente natural de cianuro de hidrógeno (HCN) es un compuesto similar al azúcar llamado amigdalina, que existe en muchas frutas, verduras, semillas y nueces, entre ellos los damascos, brotes de poroto, castañas de cajú, cerezas, castañas, maíz, judías, lentejas, nectarinas, duraznos, maníes, pecanas, pistachos, papas, soja y otras nueces. En el corazón de la almendra amarga hay aproximadamente 1 mg de HCN en forma de amigdalina. La Tabla 1 presenta datos sobre la cantidad de cianuro presente en diversos alimentos.

Tabla 1. Concentraciones de cianuro en plantas seleccionadas

Especies de plantas	Concentración (mg/kg)
Yuca (variedades dulces)	
hojas	377 - 500
raíces	138
raíces desecadas	46 - <100
puré	81
Punta de bambú	Máx. 8000
Poroto blanco (judía) (Birmania)	2,100
Almendra (Amarga)	280-2,500
Sorgo (planta joven, integral)	Máx. 2,500

Fuente: Extractado de Eisler, 1991

Los compuestos de cianuro se producen en miles de especies de plantas y en otras formas de vida. En algunas plantas, el cianuro está presente en concentraciones que podrían juzgarse como “peligrosas” si estuvieran asociadas a fuentes manufacturadas. Plantas tales como la alfalfa, el sorgo y la yuca son conocidas fuentes de envenenamiento por cianuro para el ganado y a los seres humanos.

Además de estas formas naturales del cianuro, los compuestos de cianuro también están presentes en fuentes antropogénicas de la vida diaria como los escapes de los automóviles, el humo del cigarrillo e incluso la sal de mesa y la sal usada para derretir el hielo de los caminos.

SECCIÓN 3

Usos industriales del cianuro

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

Anualmente se utiliza más de un millón de toneladas de cianuro, que representan alrededor del 80% de la producción total, en la producción de químicos orgánicos como el nitrilo, el nylon y los plásticos acrílicos. Otras aplicaciones industriales incluyen la galvanoplastia, el procesamiento de metales, el endurecimiento del acero, las aplicaciones fotográficas y la producción de goma sintética.

Los cianuros de hierro se utilizan con frecuencia como aditivo antiaglutinante en la sal usada para derretir el hielo en los caminos. El cianuro de hidrógeno gaseoso se ha utilizado ampliamente para exterminar a los roedores y depredadores grandes, y en la práctica hortícola, para controlar las plagas de insectos que han desarrollado resistencia a otros pesticidas.

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

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

FIGURA 1. Porción de la producción mundial de cianuro utilizada en minería



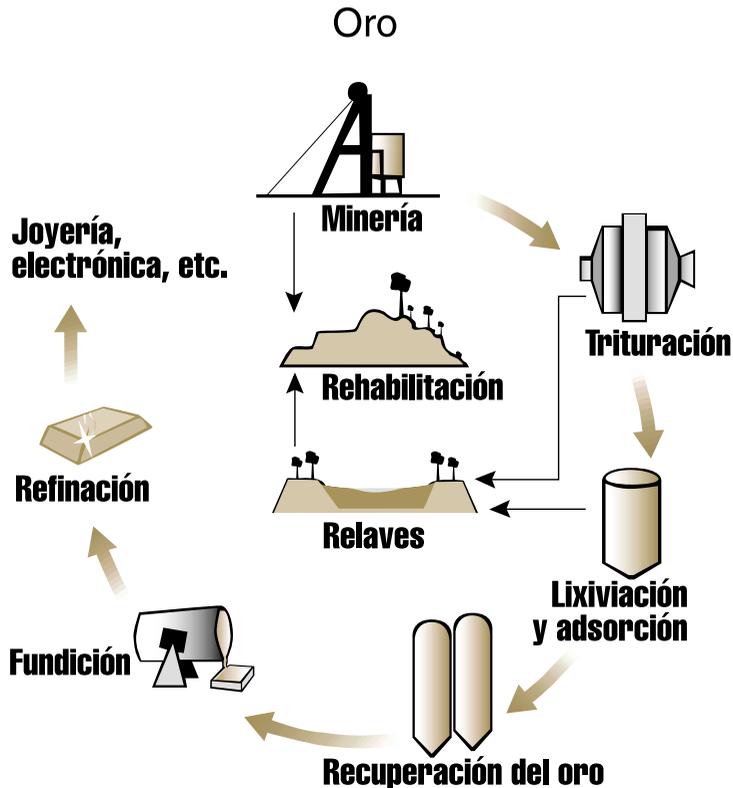
SECCIÓN 4

Uso del cianuro en la producción de oro

Una de las razones para el alto valor adjudicado al oro es su resistencia al ataque de la mayoría de los químicos. Una excepción es el cianuro o, más específicamente, una solución que contiene cianuro y que disuelve el metal precioso.

El cianuro se utiliza en minería para extraer oro (y plata) del mineral, en particular mineral de baja ley y mineral que no puede tratarse fácilmente mediante procesos físicos simples como la trituración y la separación por gravedad.

FIGURA 2. Producción de oro



Cortesía de WMC Limited

El proceso

El uso de soluciones a base de agua para extraer y recuperar metales como el oro se denomina hidrometalurgia. Las operaciones de minería del oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio (NaCN), típicamente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón). El proceso de disolución de metales se denomina lixiviación. El cianuro de sodio se disuelve en agua donde, en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina “solución cargada”.

Luego se agrega zinc o carbón activado a la solución cargada para recuperar el oro extrayéndolo de la solución. La solución residual o “estéril” (es decir, carente de oro) puede recircularse para extraer más oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos. En la Sección 7 se presentan los enfoques para el tratamiento de esta solución residual de cianuro.

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

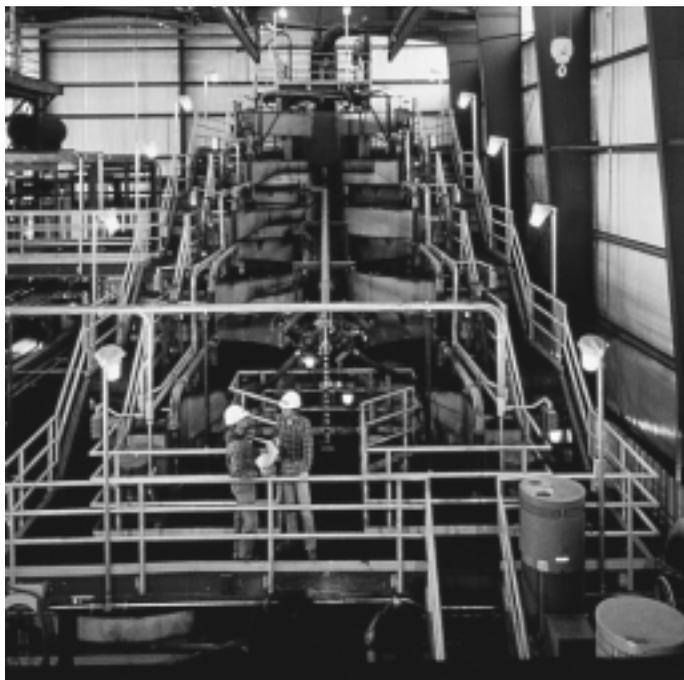


Foto: Cortesía de Minorco

Recuperación de oro de la solución de cianuro utilizando carbón activado (carbón vegetal).

La lixiviación en tanque es el método convencional por el cual el mineral aurífero se tritura y se muele hasta reducirlo a menos de un milímetro de diámetro. En algunos casos se puede recuperar parte del oro de este material finamente molido como partículas discretas de oro mediante técnicas de separación por gravedad. En la mayoría de los casos, el mineral finamente molido se lixivia directamente en tanques para disolver el oro en una solución de cianuro. Cuando el oro se recupera en una planta convencional de lixiviación en tanque, la solución estéril se recogerá junto con los residuos sólidos (relaves)

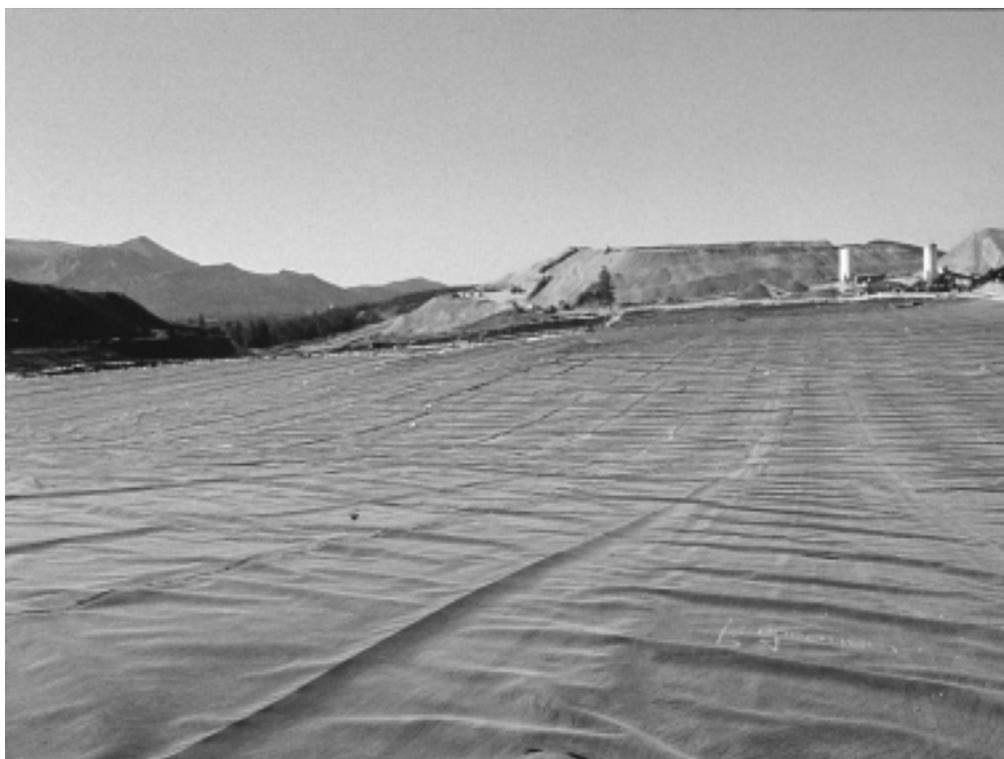


Foto: Cortesía de Minorco

Construcción de una plataforma de lixiviación en Pikes Peak, Colorado, Estados Unidos.

en un sistema de depósitos de relaves. Allí, parte de la solución permanecerá dentro de los poros de los relaves sedimentadas y parte se decantará y se recogerá en un estanque encima de los relaves, desde donde se la recicla y se la envía nuevamente a la planta. En la mayoría de las plantas, debido a la acumulación de impurezas, algunas de las soluciones que contienen cianuro deben ser bombeadas a un sistema de tratamiento para su eliminación (véase la Sección 7).

Los recientes avances técnicos permiten la lixiviación en pila de algunos minerales auríferos. Con este método, el mineral se tritura y se reduce a unos pocos centímetros de diámetro y se lo coloca en grandes pilas o montones. Una solución de cianuro se hace pasar lentamente a través de estas pilas para disolver el oro. Cuando se utiliza la tecnología de lixiviación en pila para extraer oro, la solución estéril se recoge en un estanque que generalmente se recarga con cianuro y se recicla de regreso al sistema de lixiviación.

La industria moderna del oro utiliza el cianuro casi exclusivamente como agente lixivador del oro. Se han utilizado otros agentes complejantes como la tiourea, los cloruros y otros haluros para extraer oro del mineral, pero generalmente no son rentables y presentan problemas particulares para el ambiente y la salud. Los complejos de cianuro son más estables y eficaces y no necesitan otras sustancias químicas agresivas para realizar la recuperación del oro. El cianuro ha sido utilizado en minería desde hace más de un siglo (*véase el cuadro*). Un vieja técnica para la recuperación del oro, que ha dejado de utilizarse en las modernas plantas de extracción de oro, es la amalgama con mercurio líquido. En algunos países en desarrollo, los mineros artesanales siguen utilizando el mercurio líquido para complejar el oro proveniente de pequeñas explotaciones mineras. Sin embargo, se ha desalentado esta práctica debido a que el deficiente manejo del mercurio líquido y del vapor que surge al volatizar el mercurio provoca serios problemas de salud a los mineros artesanales.

Cuadro 1. Historia del uso del cianuro en minería

Aunque las preocupaciones ambientales por el uso del cianuro en minería se han hecho más públicas sólo en los últimos años, realmente existe una larga historia sobre el uso del cianuro en procesos metalúrgicos y otros procesos en todo el mundo. Dippel y Diesbach descubrieron el “azul de Prusia” (ferrocianuro de hierro) en 1704. El primer trabajo bien documentado fueron los estudios de Scheele sobre la solubilidad del oro en soluciones de cianuro que datan de 1783 en Suecia. La química oro-cianuro se estudió activamente a mediados del siglo XIX en Inglaterra (Faraday), Alemania (Elsner) y Rusia (Elkington y Bagration). Alrededor de 1840, Elkington obtuvo una patente por el uso de soluciones de cianuro de potasio para galvanoplastiar oro y plata. Elsner lideró la evaluación del papel del oxígeno en la disolución del oro mediante soluciones de cianuro. La “Ecuación de Elsner”, que describe la extracción del oro del mineral mediante el cianuro, se conoció en 1846.

Las patentes formalizadas por McArthur y los hermanos Forrest en 1887 y 1888 efectivamente establecieron el proceso vigente de cianuración, el uso de la disolución del cianuro y la precipitación por medio del zinc. Sin embargo, existían patentes anteriores en los Estados Unidos relacionadas con la lixiviación con cianuro (Rae en 1869) y la recuperación a partir de soluciones cloradas utilizando carbón vegetal (Davis en 1880). La primera planta de cianuración a escala comercial comenzó a funcionar en la Mina Crown en Nueva Zelanda en 1889, y hacia 1904 los procesos de cianuración también estaban en marcha en Sudáfrica, Australia, Estados Unidos, México y Francia. Por consiguiente, a comienzos de siglo, el uso del cianuro para extraer oro de mineral de baja ley ya era una tecnología metalúrgica plenamente establecida.

SECCIÓN 5

Producción y manipulación del cianuro

El cianuro se produce industrialmente de dos maneras: como subproducto de la fabricación de fibras acrílicas y de ciertos plásticos o mediante la combinación de gas natural y amoníaco a altas temperaturas y presiones para producir cianuro de hidrógeno (HCN) gaseoso. Posteriormente, el cianuro de hidrógeno gaseoso se puede combinar con hidróxido de sodio (NaOH) para producir cianuro de sodio (NaCN) y agua (H₂O). Luego se elimina el agua mediante secado y filtrado y el cianuro de sodio se convierte en briquetas blancas y sólidas de aproximadamente 10 centímetros cuadrados.

Las briquetas sólidas de cianuro de sodio se mantienen a temperatura y humedad controladas. En el lugar de fabricación, las briquetas se colocan en contenedores rotulados y sellados para protegerlas y que no se aplasten y humedezcan. Los contenedores pueden ser cajas desechables de “triply” con revestimientos no retornables, cilindros de acero no retornables o recipientes de acero reutilizables. En algunas circunstancias, las briquetas se disuelven y la solución de cianuro se transporta en forma líquida en camiones tanque especialmente diseñados.

Todos los embarques de cianuro de sodio se acompañan de las Hojas de Seguridad (MSDS) donde figuran los datos químicos y de toxicidad del cianuro de sodio, instrucciones en caso de accidentes, número de teléfono para solicitar ayuda en casos de emergencia e información adicional del fabricante. Cuando el material sale de la planta productora se realiza el inventario de todos los embarques y dicho inventario se controla contra los registros de entrega para asegurar una adecuada vigilancia en todo momento.

En el mundo hay tres productores primarios de cianuro sólido, líquido y gaseoso: Dupont, en los Estados Unidos, ICI, en Inglaterra y Degussa Corporation, en Alemania. La producción anual mundial es de aproximadamente 1.4 millón de toneladas de HCN.¹ Tal como se mencionó anteriormente, el 20% de la producción total de HCN se usa para producir cianuro de sodio (NaCN) y el 80% restante se usa en numerosas actividades industriales, por ejemplo, en la producción de químicos. FMC Corporation también produce cianuro de sodio en los Estados Unidos.

¹ Cantidades de 1996. El uso en minería se ha mantenido esencialmente constante durante la última década.



Foto: Cortesía de DuPont

Depósito de tambores que contienen cianuro de sodio.

Los tres productores primarios son importantes fabricantes internacionales de productos químicos que comprenden la responsabilidad que tienen respecto de sus productos. Por ejemplo, las políticas formales de estas empresas aseguran la venta de cianuro sólo a compañías que tengan la capacidad y el compromiso de proteger a los trabajadores, al público y el ambiente. Los fabricantes contratan únicamente a transportistas seleccionados que tengan registros de seguridad en el transporte compatibles con las normas internas de los fabricantes. Éstos, a su vez, tienen entre su personal a especialistas en seguridad y transporte que trabajan junto con los compradores y otras partes involucradas, en las áreas de capacitación, diseño de plantas y medidas de seguridad conexas.

Las compañías mineras almacenan cianuro de sodio en áreas seguras que se mantienen secas, frías, oscuras y ventiladas. En el área de almacenamiento, los paquetes de

cianuro se colocan sobre cajas paleta en sus contenedores originales encima de pisos impermeables, generalmente de concreto, con adecuada contención para el caso improbable de derrame. Sin tener en cuenta su tipo, los contenedores vacíos se lavan y el agua de enjuague se utiliza en la planta de recuperación de oro del emplazamiento (para aprovechar las pequeñas cantidades de cianuro que podría contener) o se procesa mediante el sistema de tratamiento de efluentes residuales antes de descargarla al ambiente en condiciones controladas y permitidas.

Las compañías mineras mantienen programas especiales de capacitación para todos los empleados que trabajan con el cianuro o cerca de él. También tienen planes de seguridad y manipulación de materiales que han sido preparados por higienistas industriales calificados y supervisados por funcionarios de seguridad del proyecto. Estos planes de salud y seguridad asignan responsabilidades a los empleados y controlan el manejo y el uso del cianuro de sodio desde su llegada al emplazamiento de la mina y durante todo el proceso metalúrgico. Monitores de gas de

área, adecuada vestimenta protectora, aparatos respiratorios autónomos y puestos de primeros auxilios equipados con lavajos y duchas son utilizados en las operaciones de manipulación de cianuro en las minas. Los programas de higiene industrial de las compañías incluyen capacitación anual, acceso a todas las Hojas de Seguridad y monitoreo del aire para garantizar la seguridad de los trabajadores, así como procedimientos para documentar toda la información sobre salud y seguridad y los incidentes en las minas.

Los programas modernos de higiene industrial en las operaciones mineras del oro han sido eficaces para reducir al mínimo el envenenamiento accidental con cianuro en los emplazamientos mineros. En efecto, una búsqueda en los registros de accidentes industriales en Australia, Canadá, Nueva Zelanda y los Estados Unidos ha revelado sólo dos muertes accidentales en las que estuvo involucrado el cianuro en minas de oro durante los últimos 100 años, el primero de los cuales no estuvo directamente relacionado con la



Foto: Cortesía de Degussa Corporation

Los productores de cianuro brindan a asistencia y capacitación en seguridad in situ a las minas de oro.

recuperación de oro y el segundo tuvo lugar cuando una persona entró a un espacio cerrado, un error fatal.²

² Ambos accidentes se encontraron en la base de datos de 107 años de accidentes fatales del Ministerio de Trabajo de Ontario. En 1952, un herrero en las Minas de Oro MacLeod-Cockshutt murió debido a envenenamiento con cianuro luego de una explosión de cianuro fundido; él había estado preparando un baño de cianuro de sodio fundido para carbo cementar una llave inglesa. En 1961, un trabajador en el Molino de las Minas Hallnor murió por envenenamiento con gas cianhídrico después de trepar a un tanque agitador para recuperar cianuro en escamas que había arrojado inadvertidamente dentro del tanque.

SECCIÓN 6

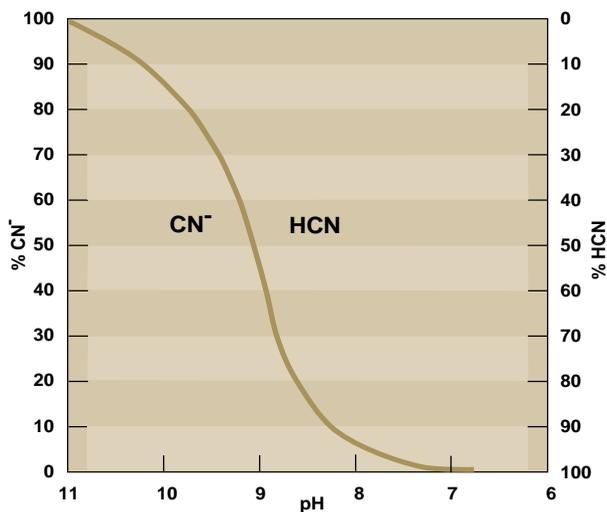
El cianuro en soluciones

Después de haber extraído el oro por medio de procesos hidrometalúrgicos, pueden estar presentes tres tipos principales de compuestos de cianuro en los efluentes residuales o en las soluciones de los procesos: cianuro libre, cianuro débilmente complejo y cianuro fuertemente complejo. Juntos, los tres compuestos de cianuro constituyen el “cianuro total”. Al conocer la química de estos tres tipos de cianuro se puede comprender su comportamiento respecto de la seguridad y el ambiente.

Cianuro libre

“Cianuro libre” es el término utilizado para describir tanto el ion de cianuro (CN^-) que se disuelve en el agua del proceso como cualquier cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución. Las briquetas sólidas de cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el ion de sodio y el anión de cianuro (CN^-). El anión de cianuro se combina luego con el ion de hidrógeno para formar HCN molecular. La concentración del ion de hidrógeno en el agua del proceso se expresa mediante el conocido parámetro pH.³ Casi todo el cianuro libre está presente como HCN cuando hay abundantes iones de hidrógeno presentes, es decir, a un valor de pH de 8 o menos. Este HCN, entonces, puede volatilizarse y dispersarse en el aire. Cuando el pH es superior a 10.5, hay pocos iones de hidrógeno presentes y casi todo el cianuro libre está presente como CN^- . En condiciones normales de temperatura y presión, las concentraciones de HCN y CN^- son iguales a un valor de pH de aproximadamente 9.4.

Figura 3. Equilibrio de CN^- /HCN con el pH



Fuente: Scott, J. S. y J. C. Ingles, 1981.

³ Cuando el pH de una solución es 7, se dice que la solución es neutra. Se dice que las soluciones cuyo pH es inferior a 7 son ácidas, mientras que aquellas cuyo pH es superior a 7 son alcalinas.

Estas formas de cianuro libre son importantes porque se consideran como los cianuros más tóxicos. Sin embargo, también son las formas que se eliminan más fácilmente de las soluciones mediante elaborados procesos de tratamiento y mecanismos naturales de atenuación. Los procesos biológicos, químicos y físicos que afectan a las concentraciones de cianuro en el agua, el suelo y el aire han sido extensamente estudiados durante las dos décadas pasadas, de modo que su comportamiento en el ambiente es bien conocido.

Una de las reacciones más importantes que afectan a la concentración de cianuro libre es la volatilización de HCN, que, al igual que la mayoría de los gases, se separa del agua y escapa al aire. El cianuro libre no es persistente en la mayoría de las aguas superficiales porque el pH de dichas aguas generalmente es de 8, de modo que el HCN se volatiliza y dispersa. La volatilidad del cianuro de hidrógeno y su posterior transformación en compuestos benignos en el aire son importantes porque actúan como un mecanismo natural que controla las concentraciones de cianuro libre en los efluentes residuales y de los procesos en las minas.

Los procesos naturales pueden reducir por sí solos a valores muy bajos la concentración de cianuro libre de las soluciones en lugares al aire libre en las instalaciones de producción de oro, tales como estanques para procesamiento y depósitos de relaves, a menudo a niveles por debajo de lo establecido en los reglamentos o incluso por debajo de los límites de detección.

Sin embargo, en la planta de extracción de oro, los operadores mantienen el pH de la solución a valores cercanos a 10.5 con el fin de impedir la volatilización. Esto preserva el cianuro en el sistema de extracción de oro, donde es necesario y, al mismo tiempo, limita el riesgo de inhalación por parte de los trabajadores de altas concentraciones de HCN gaseoso en un espacio cerrado.



Foto: Cortesía de Barrick Gold Corporation

Centro de control de una planta de recuperación de oro (cianuración).

Complejos de cianuro

Aunque las soluciones que contienen cianuro se utilizan en minería porque reaccionan con el oro, también reaccionan con otros metales. El mineral aurífero casi siempre contiene otros metales, entre ellos hierro, cobre, zinc, níquel y plata, así como otros elementos, como el arsénico. En la mayoría de los cuerpos mineralizados, las concentraciones de otros metales típicamente son mayores que la concentración de oro en varios órdenes de magnitud. Por ejemplo, un mineral aurífero de baja ley apropiado para lixiviación con cianuro podría contener 0.5 a 1

TABLA 2. Análisis de soluciones estériles⁴

	RANGO DE CONCENTRACIÓN Miligramos por litro (mg/L)⁵
Cianuro total	50-2,000
Arsénico	0-115
Cobre	0.1-300
Hierro	0.1-100
Plomo	0-0.1
Molibdeno	0-4.7
Níquel	0.3-35
Zinc	13-740

gramo de oro por tonelada (0.5 a 1 parte por millón [ppm] de oro); por el contrario, la concentración de hierro de las rocas cristalinas promedio es de aproximadamente 3.5% (35,000 ppm). Los metales como el cobre, el zinc y el níquel pueden estar presentes en concentraciones que varían entre decenas y miles de partes por millón. La Tabla 2 muestra que pueden disolverse cantidades significativas de otros metales cuando el mineral que los contiene se lixivia con soluciones de cianuro.

Los análisis químicos de las soluciones utilizadas en los procesos y de los efluentes residuales derivados 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. Cuando los elementos químicos se combinan en una solución para formar especies solubles, los químicos se refieren a ellas como “complejos”. Existe una amplia gama de interacciones químicas y físicas entre los componentes de los complejos. Algunos complejos son muy estables, mientras que otros se destruyen fácilmente. Los químicos analíticos pueden definir la estabilidad relativa de los complejos de cianuro de diferentes metales con gran precisión. La evaluación de la cantidad y los tipos de cianuro es importante para todos los aspectos del uso del cianuro. Es particularmente importante poder distinguir tanto con exactitud como con precisión entre los distintos compuestos de cianuro para asegurar la elección de una metodología eficaz de detoxificación.

4 Scott, J. S., *Status of Gold Mill Waste Effluent Treatment*, Informe para CANMET, Recursos Naturales Canadá, Marzo de 1993.

5 En estudios ambientales, las concentraciones de cianuros y otros solutos en soluciones generalmente se presentan en términos de masa por unidad de volumen, o algunas veces como la unidad adimensional de “parte por millón” (ppm). Las concentraciones en miligramos por litro (mg.L⁻¹) son las mismas que las concentraciones en gramos por metro cúbico (g.m⁻³), y ambas son esencialmente idénticas a las concentraciones en ppm (debido a que la densidad de las soluciones generalmente está muy cerca de 1 kilogramo por litro [kg.L⁻¹]).

Complejos débiles y fuertes de cianuro

Convencionalmente, los químicos en cianuro distinguen entre los complejos “débiles” y “fuertes” de cianuro. Los complejos débiles de cianuro, con frecuencia denominados cianuros “disociables en ácidos débiles” o cianuros DAD (WAD), pueden disociarse en solución y producir concentraciones ambientalmente significativas de cianuro libre. Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El grado al cual se disocian estos complejos depende en gran medida del pH de la solución.

Por otra parte, los complejos fuertes de cianuro se degradan mucho más lentamente que el cianuro DAD en condiciones químicas y físicas normales. Los complejos de cianuro con oro, cobalto y hierro son fuertes y estables en solución. Esta estabilidad del complejo oro-cianuro es un factor clave en el uso del cianuro para la extracción del oro del mineral. Una vez que el oro entra a la solución ligado al cianuro, permanece complejado con el cianuro hasta que las condiciones del proceso se cambian con el fin de removerlo de la solución. El cobalto está presente únicamente en trazas, pero el hierro está virtualmente presente en todos los materiales geológicos. Para la mayoría de las situaciones mineras, los complejos fuertes de cianuro son predominantemente cianuros de hierro.

La velocidad a la cual los complejos se disocian y liberan cianuro libre en la solución depende de varios factores, entre ellos, la concentración inicial del complejo de cianuro, la temperatura, el pH de la solución y la intensidad de la luz, especialmente de la radiación ultravioleta.

Análisis y monitoreo del cianuro

El cianuro generalmente se mide mediante uno de los siguientes métodos analíticos: análisis de cianuro total o análisis de cianuro DAD (disociable en ácidos débiles). El primero se utiliza para determinar el cianuro total en soluciones, incluso el cianuro libre y los cianuros ligados a metales, como los cianuros de hierro no tóxicos y más estables. El procedimiento analítico para determinar el cianuro DAD se utiliza para las formas libres y complejadas de cianuro, excepto para el cianuro de hierro. Un método más antiguo pero que todavía se emplea en lugar del análisis de cianuro DAD es el denominado “cianuro dócil a la cloración”.

Los análisis de cianuro son necesarios para controlar las operaciones, evaluar la toxicidad y el cumplimiento normativo, así como para informar al público sobre la manipulación de materiales peligrosos. Monitorear el cianuro durante y después la recuperación del oro es esencial para la buena práctica operativa y la protección de la salud y el ambiente. Con el fin de asegurar la calidad de la información disponible y tomar decisiones, son necesarios rigurosos protocolos de muestreo y procedimientos analíticos. Esto exige una estricta planificación y un desempeño excelente por parte del personal entrenado para trabajar con sistemas bien diseñados y bien administrados.

SECCIÓN 7

Atenuación de las concentraciones de cianuro en el ambiente

Tal como se explicó en la Sección 4, una vez que se ha recuperado el oro, la solución queda desprovista de oro pero sigue conteniendo cianuro. El proceso que disminuye la concentración de cianuro en solución, ya sea en el ambiente natural o en instalaciones creadas a tal fin, se denomina “atenuación”. La volatilización de HCN, que reduce la concentración de cianuro libre en solución, es el principal proceso de atenuación natural. La Figura 4 muestra una representación esquemática de las relaciones entre las formas del cianuro y los procesos que las controlan.

Durante las dos décadas pasadas, las industrias química y minera lograron grandes avances en la manipulación de soluciones residuales de cianuro para que no perjudiquen a la salud pública ni al ambiente. Se utilizan dos tecnologías, con frecuencia en forma combinada: tratamiento y reciclado.

Tratamiento y reutilización de soluciones de cianuro

Tratamiento: Se emplean cuatro formas generales de tratamiento de la solución de cianuro:

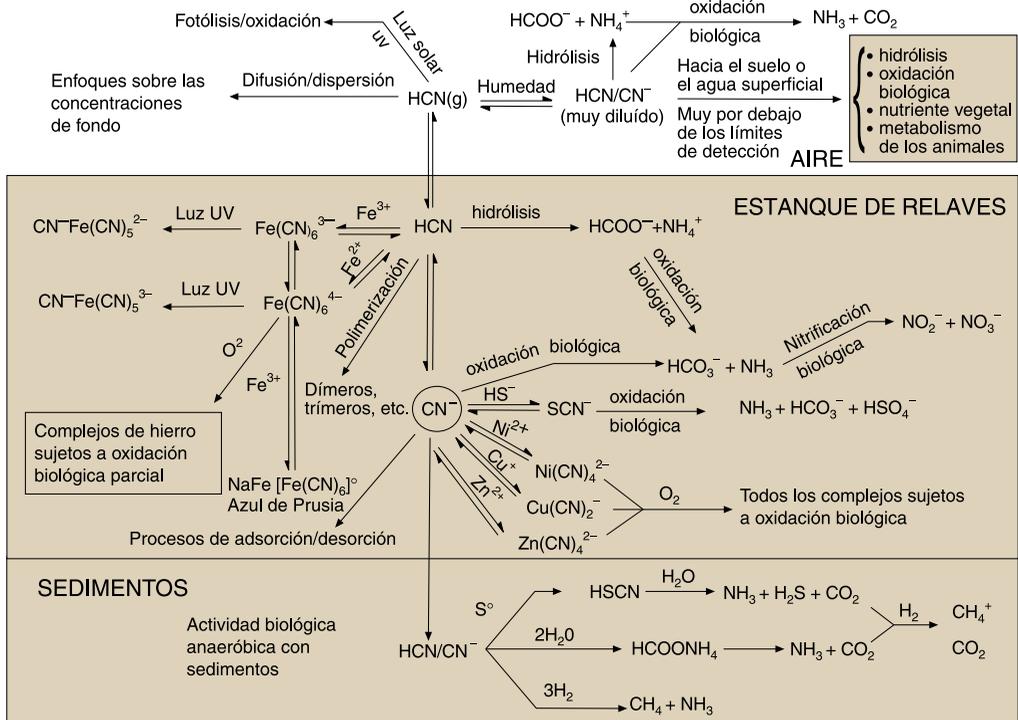
- Degradación natural
- Oxidación química
- Precipitación
- Biodegradación

Además, existen varias tecnologías que permiten la reutilización del cianuro mediante el reciclado.

Degradación natural: El principal mecanismo de degradación natural es la volatilización con posteriores transformaciones atmosféricas a sustancias químicas menos tóxicas. Otros factores como la oxidación biológica, la precipitación y los efectos de la luz solar también contribuyen a la degradación del cianuro.

Las especies de cianuro pueden ser adsorbidas sobre las superficies de los minerales o del desecho de carbono orgánico en los suelos del terraplén de un estanque, en un recubrimiento de arcilla o a lo largo de una vía de agua subterránea. En los suelos, las bacterias asimilan el cianuro mediante diversas reacciones aeróbicas y anaeróbicas. En algunos casos, la combinación de estos procesos de degradación natural son suficientes

FIGURA 4. El ciclo del cianuro



Fuente: Smith y Mudder, 1991.

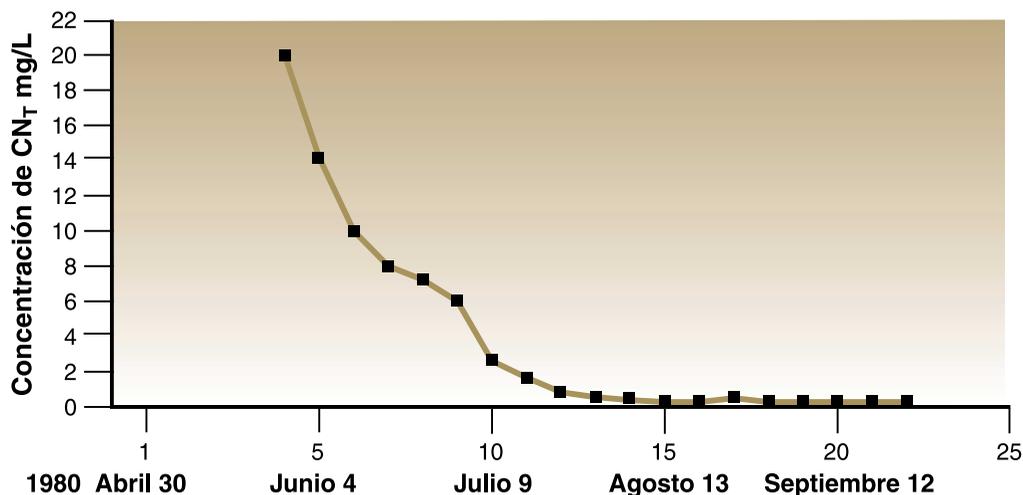
Cortesía de Medio Ambiente Australia.

para satisfacer los requisitos que reglamentan la descarga de soluciones que contienen cianuro.

En los depósitos de relaves, la gran superficie permite la descomposición del cianuro DAD. La Figura 5 ilustra una situación típica en la cual la mitad del cianuro total (CNT) se degradó naturalmente en menos de tres semanas a partir de la concentración inicial de 20 miligramos por litro. El CNT desapareció casi completamente en aproximadamente 100 días.

Las velocidades reales de degradación deben determinarse mediante ensayos basados en la especificidad del emplazamiento y empleando condiciones que imiten, tanto como sea posible, los tipos de soluciones y los procesos naturales que probablemente ocurran en ese lugar.

FIGURA 5. Ejemplo de degradación del cianuro



Fuente: Adaptado de Schmidt et al., 1981.

La Tabla 3 compila datos de los sistemas de degradación natural en diversas minas de oro en todo el mundo. Los valores de esta tabla demuestran la capacidad de la degradación natural para reducir la concentración de cianuro en las soluciones.

Los procesos de **oxidación química** para el tratamiento del cianuro incluyen el proceso con SO₂/Aire (desarrollado por la compañía minera canadiense INCO) y el proceso de tratamiento con H₂O₂ (peróxido de hidrógeno) (iniciado por Degussa). Una alternativa

TABLA 3. Degradación natural del cianuro en depósitos de relaves

MINA	CN que ingresa al sistema de relaves (mg.L ⁻¹)	CN que egresa del sistema de relaves (mg.L ⁻¹)
Lupin, NWT, Canadá (a)	184	0.17
Holt McDermott, Ontario, Canadá (a)	74.8	0.02
Cannon, Washington, EE.UU. (b)	284	<0.05
Ridgeway, Carolina del Sur, EE.UU. (c)	480	0.09
Golden Cross, Nueva Zelanda (d)	6.8 (CN DAD)	0.33 (CN DAD)

Fuentes: a) Scott, 1993; b) Smith et al., 1985; c) Smith, 1987; d) Smith, 1994

de oxidación química más antigua, el Proceso de Cloración Alcalina, se utiliza rara vez en la industria minera en la actualidad.

En el proceso con SO_2 /Aire, el cianuro libre y el cianuro DAD se oxidan y el cianuro de hierro se precipita como un sólido insoluble. El proceso puede aplicarse a soluciones o a lodos y la reacción es rápida. Las posibles limitaciones son la necesidad de obtener una licencia para utilizar el proceso, el costo de construcción de una planta procesadora, la necesidad de realizar ensayos empíricos para optimizar el sistema y la incapacidad del proceso para oxidar subproductos intermedios del cianuro.

El peróxido de hidrógeno, un potente oxidante, oxida el cianuro libre y el cianuro DAD y los convierte en amonio y carbonato. Los cianuros de hierro no se oxidan mediante el peróxido, pero precipitan como sólidos insolubles y estables. Algunas veces es necesario añadir sustancias químicas para controlar la concentración de cobre en las soluciones con el fin de cumplir con las normas ambientales. El sistema con peróxido no se adapta bien al tratamiento de lodos debido a los irregulares requerimientos de peróxido de hidrógeno cuando hay sólidos presentes.

Ambos métodos de oxidación química son capaces de producir concentraciones residuales de cianuro que pueden satisfacer exigentes normas de descarga. Ambos procesos exigen la realización de pruebas en muestras representativas de materiales específicos al sitio antes del diseño final de la planta. El ácido de Caro, que combina ácido sulfúrico con peróxido de hidrógeno para formar H_2SO_5 , también se emplea como agente oxidante para descomponer el cianuro en solución.

La **precipitación** de cianuros estables se puede obtener mediante el agregado deliberado de complejantes tales como el hierro. Esto reduce la concentración de cianuro libre y también es eficaz para controlar los elevados niveles de otros metales que pueden estar presentes. Los cianuros de hierro pueden reaccionar con otras sustancias químicas en solución y producir precipitados sólidos, que pueden contener una docena de sales insolubles de cianuro, removiendo de esta manera el cianuro de la solución. Parte del cianuro de las soluciones de los procesos reaccionará con otros componentes químicos que se encuentren dentro del sistema y formarán concentraciones mucho menos tóxicas de compuestos tales como el amoníaco, el nitrato y el dióxido de carbono.

La **biodegradación** del cianuro es la base de los sistemas de tratamiento de los efluentes residuales industriales, como los utilizados por Homestake Mining Company en los Estados Unidos e ICI Bioproducts en el Reino Unido. Durante más de una década, se ha empleado un proceso biológico para tratar el cianuro en la Mina Homestake en Lead, Dakota del Sur, con el fin de satisfacer los criterios ambientales de descarga. Las condiciones aeróbicas son mucho más favorables para la degradación del cianuro que las condiciones anaeróbicas, aunque los organismos anaeróbicos pueden ser eficaces para tratar el cianuro en concentraciones de hasta varios miligramos por litro. Se han creado

tanto sistemas activos como sistemas pasivos de tratamiento biológico; estos sistemas remueven el cianuro empleando microorganismos aeróbicos o anaeróbicos.

En Homestake, la solución estéril del molino aurífero se canaliza a través de recipientes para reacciones que contienen bacterias. Las bacterias utilizan el oxígeno del aire para descomponer los compuestos de cianuro en nitratos, bicarbonatos y sulfatos. Este proceso microbiano es capaz de oxidar los complejos de cianuro metálico, los iones metálicos de las especies de cianuro DAD y los subproductos intermedios de la oxidación del cianuro.

Las ventajas del proceso de tratamiento biológico son su diseño simple y el control del proceso operativo, los bajos costos de las sustancias químicas y la capacidad para tratar todas las formas del cianuro y sus subproductos. Las posibles limitaciones de los sistemas de tratamiento biológico son su reducido rendimiento con temperaturas frías y con concentraciones muy altas de cianuro.

Reciclado: Aunque las tecnologías para el manejo del cianuro se han centrado en la destrucción del cianuro en sistemas de paso único, es posible recuperar y reutilizar el cianuro, y de este modo reducir al mínimo la cantidad total de cianuro utilizado y disminuir los costos operativos para algunas minas. El reciclado reduce las concentraciones de cianuro en las soluciones residuales y disminuye el costo de la destrucción del cianuro.

La recuperación y el reciclado de cianuro se utilizan desde la década de 1930, especialmente en Flin Flon (Manitoba, Canadá), Pachuca (Hidalgo, México) y Golconda Minerals (Tasmania, Australia). El proceso básico abarca tres pasos: control de pH, volatilización en condiciones muy controladas y captura del cianuro que se ha liberado. Los recientes avances de la ingeniería han convertido este proceso en una posibilidad mucho más atractiva que en el pasado y la recuperación del cianuro ha sido adaptada en la última década al tratamiento de lodos en un proceso comercial patentado denominado Cyanisorb. El proceso se está aplicando en la Mina Golden Cross (Waikato, Nueva Zelanda) y en la Mina Delamar Silver (Idaho, EE.UU.). Recientemente se han abierto dos plantas más de Cyanisorb en Brasil y Argentina.

Las investigaciones sobre la recuperación del cianuro continúa. Una de ellas es la prueba de un tratamiento que separa los complejos de cianuro de las soluciones y los absorbe en perlas de resina de poliestireno denominadas Vitrokele (el proceso Cyanosave). La modificación de este proceso puede aplicarse a las soluciones o a los lodos y se puede recuperar tanto el cianuro como los metales. El cianuro recuperado se recicla luego para utilizarlo en la planta de recuperación de oro. Aunque ha habido pruebas exitosas del proceso en minas de Canadá, Australia y los Estados Unidos, todavía no existe ninguna planta comercial y la investigación continúa.

SECCIÓN 8

Evaluación y manejo de los riesgos del cianuro

El enfoque integral para tratar los riesgos se compone de tres actividades clave que ocasionalmente se superponen: la evaluación de riesgos, el manejo de riesgos y la información de riesgos. Las tres actividades se describirán en ésta y en las siguientes secciones, comenzando con la evaluación de riesgos.

Como ya se mencionó, es bien conocido el hecho de que el cianuro de sodio y algunos de sus derivados son venenosos y que los compuestos de cianuro se clasifican como peligrosos. Sin duda, la sociedad moderna utiliza de manera segura muchas sustancias que son potencialmente peligrosas gracias a la capacidad de evaluar y manejar los riesgos asociados. Desde la década de 1970, la evaluación de los riesgos asociados a los procesos y materiales peligrosos mediante un proceso sistemático de “evaluación de riesgos” se ha convertido en una práctica común. Muchos de los conceptos de evaluación de riesgos surgieron de métodos más generales desarrollados por la industria de seguros. Dichos métodos tienen su base teórica en las probabilidades y las estadísticas matemáticas. Uno de los conceptos clave que se ha extendido a la evaluación de riesgos ambientales es la definición fundamental del riesgo como la probabilidad de una consecuencia definida.

La **evaluación del riesgo** consta de cuatro partes:

1. Identificación del peligro: Se la define como la determinación de la capacidad inherente o potencial de los agentes químicos, físicos y biológicos para causar efectos adversos a los seres humanos y al ambiente. Los peligros físicos incluyen la combustión, la explosividad, la inflamabilidad y la corrosividad. Los peligros para la salud se clasifican en: agudos (por ejemplo, irritación de la piel y los ojos, efectos letales, asfixia) o crónicos (por ejemplo, carcinogenicidad, sensibilización, efectos sobre el sistema reproductivo, efectos sobre el sistema nervioso, efectos sobre los órganos). Entre los peligros ecológicos se encuentran la mortalidad (agudos) y la reducción en el crecimiento y la reproducción (crónicos) en las especies representativas.

La identificación de los peligros es únicamente el primer paso en la evaluación de los riesgos. No es una base apropiada sobre la cual se pueda tomar una decisión respecto del manejo de riesgos. Sin embargo, la identificación de los peligros es un paso crítico que generalmente se da antes de introducir las sustancias químicas y los productos en el

mercado. En el caso de la salud humana y el ambiente, se utilizan los resultados de las pruebas de toxicidad/ecotoxicidad y los datos epidemiológicos con el propósito de determinar el peligro.

2. Evaluación de dosis-respuesta: Es la determinación de la relación entre la magnitud de una dosis administrada, aplicada o interna y una respuesta biológica específica. La dosis es la cantidad total de una sustancia administrada a un organismo o ingerida, inhalada o absorbida por él en condiciones estandarizadas de laboratorio utilizadas para pruebas de toxicología. Los puntos de equivalencia de la toxicidad (o respuesta a la dosis) pueden expresarse como la incidencia medida u observada, la respuesta porcentual en grupos de sujetos (o población) o la probabilidad de que ocurra una respuesta en una población.

3. Evaluación de la exposición: Es la evaluación de las vías por las cuales el peligro puede ponerse en contacto con un receptor sensible. El receptor puede ser una única persona, una población real o hipotética o un conjunto de receptores ecológicos como peces o aves silvestres. La evaluación de la exposición determina cómo y en qué circunstancias el receptor puede estar expuesto al peligro. También puede determinar las cantidades de la sustancia peligrosa y el tiempo de exposición.

4. Caracterización del riesgo: Resume la información proveniente de la identificación del peligro, la evaluación de la dosis-respuesta y la evaluación de la exposición en una conclusión general sobre el riesgo en una forma que sea útil a quienes toman decisiones, los legisladores, la prensa y los miembros del público. La caracterización del riesgo suministra una descripción cuantitativa o cualitativa de los peligros potenciales de una exposición en particular. La caracterización cuantitativa del riesgo brinda una estimación numérica de la magnitud del riesgo que representa una sustancia para los seres humanos o para el ambiente. Este riesgo puede expresarse como un riesgo individual o un riesgo para la población. La caracterización cualitativa del riesgo describe, en forma narrativa, el efecto o los efectos adversos asociados con la exposición a un agente y proporciona alguna medida de las evidencias de dicha asociación.⁶

Impactos del cianuro sobre la salud y el ambiente

Las evaluaciones completas del riesgo exigen especificaciones detalladas de las condiciones inherentes al sitio. En el caso del cianuro, su uso varía tanto que el riesgo puede evaluarse significativamente sólo si se consideran los procedimientos operativos inherentes a un sitio en particular. No obstante, es posible describir los peligros que representa el cianuro y las posibles exposiciones.

6 De George M. Gray, Jeffery, W. G. y Marchant, G. E., *Risk Assessment and Risk Management of Non-Ferrous Metals: Realizing the Benefits and Managing the Risks*, International Council on Metals and the Environment, 1997.

Toxicidad y Epidemiología del Cianuro en Seres Humanos

El cianuro es un veneno de acción rápida capaz de matar a una persona en cuestión de minutos si está expuesta a una dosis suficientemente elevada. Los seres humanos pueden estar expuestos al cianuro mediante inhalación, ingestión o absorción a través de la piel. El cianuro impide a las células utilizar el oxígeno, lo cual causa hipoxia de los tejidos y “cianosis” (decoloración azulada de la piel). El sistema respiratorio deja de nutrir a las células con oxígeno, un estado que, si no se trata, causa respiración rápida y profunda seguida por convulsiones, pérdida del conocimiento y asfixia. El antídoto más común es el nitrito de amilo, que puede administrarse en forma oral o por inyección.

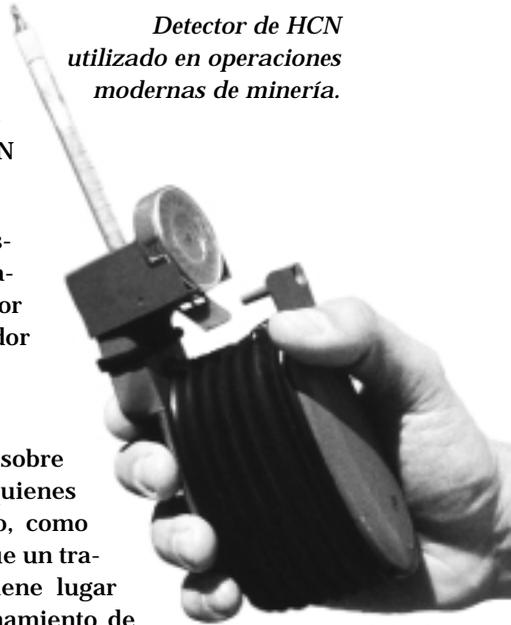
Aunque hay muchas fuentes diarias de exposición al cianuro (escapes de los automóviles, humo de tabaco, incendios), el cianuro no se acumula en los tejidos porque el cuerpo transforma esas pequeñas cantidades en un compuesto menos tóxico llamado tiocianato, que luego se excreta. No es conocido que el cianuro cause cáncer o defectos congénitos o que pueda afectar adversamente la reproducción.

La forma más tóxica del cianuro es el HCN gaseoso. La Conferencia Norteamericana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) establece el límite de umbral tope de HCN en 4.7 ppm.⁷ En concentraciones de 20 a 40 ppm de HCN en el aire, se puede observar cierto malestar respiratorio después de varias horas. La muerte ocurre en pocos minutos con concentraciones de HCN por encima de aproximadamente 250 ppm en el aire.

Para el cianuro libre, la dosis letal en humanos por ingestión o inhalación varía entre 50 y 200 mg (1 a 3 mg de cianuro libre por kg. de masa corporal). La dosis letal por absorción dérmica es considerablemente mayor, alrededor de 100 mg por kg. de peso corporal.

Exposición de los Trabajadores

Las evaluaciones de riesgos incluyen no sólo los impactos sobre la población en general, sino también los impactos sobre quienes tienen mayor probabilidad de estar expuestos al peligro, como quienes trabajan en un sitio específico. La posibilidad de que un trabajador entre en contacto con cianuro en las minas tiene lugar durante la recepción, descarga, manipulación y almacenamiento de briquetas sólidas de cianuro de sodio.



*Detector de HCN
utilizado en operaciones
modernas de minería.*

Foto: Cortesía de DuPont

⁷ Valores Límite de Umbral e Índices de Exposición Biológica de 1998 - Valores límite de Umbral para las sustancias químicas y los agentes físicos, publicado por la ACGIH.

Si el proceso de cianuración se mantiene en un alto nivel de alcalinidad (pH de 10.5 o superior), casi todo el cianuro libre está presente como CN⁻ en las soluciones del proceso. En tales condiciones, la volatilidad del cianuro de hidrógeno (HCN) de las soluciones es bajo, de manera que el riesgo de inhalación para los trabajadores es manejable.⁸

Los trabajadores deben usar protección respiratoria contra los posibles peligros a través del aire. La capacitación para la colocación, uso y prueba de dicho equipo se incorpora a los procedimientos de la compañía relacionados con la salud y la seguridad. La mayoría de las modernas operaciones mineras tienen detectores o monitores de HCN gaseoso que hacen sonar alarmas en áreas cerradas donde pueda haber HCN gaseoso. La mayoría de los seres humanos pueden detectar el olor del cianuro de hidrógeno gaseoso (olor a almendra amarga) en concentraciones inferiores a las que pueden resultar peligrosas para su salud.

Toxicología e Impactos Ambientales

Los materiales peligrosos afectan no sólo a los seres humanos, sino también a los receptores ecológicos. En los ambientes mineros, hay tres grupos importantes de receptores ecológicos o ambientales: los mamíferos, los reptiles y los anfibios; las aves (especialmente las aves silvestres migratorias); y los peces y otros integrantes de la vida acuática.

Existen pocos informes sobre impactos adversos importantes sobre los animales causados por el cianuro en emplazamientos mineros. El cianuro de sodio y las soluciones que contienen cianuro se manejan en áreas restringidas de los emplazamientos mineros. El acceso de los animales que caminan o se arrastran está limitado por paredes, plataformas de hormigón, bermas y vallas, y al mismo tiempo, la presencia de personas alrededor de las instalaciones mineras también disuade a los animales de acercarse. Evaluaciones del gobierno en los Estados Unidos demostró que los diseños de contención estándar y un buen control de ingeniería han mitigado eficazmente los riesgos para los mamíferos, los reptiles y los anfibios.⁹

La principal preocupación respecto de las aves silvestre siempre ha sido la exposición al cianuro en estanques abiertos, especialmente para las aves migratorias que pasan a través de regiones relativamente áridas como el oeste de los Estados Unidos, donde el uso del cianuro en minería se ha hecho bastante común. Sin embargo, se debe observar que la mortalidad de las aves en Nevada debido a la exposición a soluciones de cianuro se ha reducido notablemente de aproximadamente 1,300 en 1990 a 220 en 1995, o sea, una dis-

8 La ingestión de la solución del proceso por parte de los trabajadores (quienes están entrenados e informados sobre los temas de seguridad) no se considera una vía creíble de exposición, debido a la improbabilidad de que alguien beba tal solución.

9 Oficina Contable General (GAO), 1991.

minución del 83%. Esta mejora se debe en gran parte a la limitación a menos de 50 ppm en la concentración de cianuro DAD en estanques descubiertos. Esta concentración de cianuro DAD no es agudamente tóxica para los patos, que han demostrado ser muy sensibles al cianuro en comparación con otras aves y vida silvestres.

Como resultado de normas eficaces y las buenas prácticas de manejo en la actividad minera, se han dado pasos específicos para limitar aún más las concentraciones de cianuro y la exposición a las aves silvestres en estanques abiertos. La colocación de redes ha resultado útil para cubrir pequeños estanques donde se realiza el proceso, pero la colocación de redes en depósitos de relaves de gran escala está limitada por el peso de las redes, especialmente cuando se acumula nieve o hielo en climas fríos y debido a que los animales silvestres quedan atrapados accidentalmente en ellas. Sin embargo, en la actualidad se siguen colocando redes para cubrir estanques en los que se deben mantener concentraciones máximas con fines metalúrgicos. Otros métodos para mantener a las aves lejos de las soluciones de cianuro de los estanques son el uso de cañones de aire,



Foto: Cortesía de Placer Dome

“Pelotas flotantes para pájaros” cubren la superficie de un estanque de contención de soluciones en la mina de oro Cortez, una joint-venture entre Placer Dome y Kennecott en Nevada, Estados Unidos.

dispositivos que producen ruido, pelotas plásticas u otros dispositivos flotantes que se utilizan en forma creciente para cubrir toda la superficie de los pequeños estanques de procesamiento. Este último método también ayuda a reducir la pérdida de cianuro libre debido a la volatilización.

Peces jóvenes de agua fría, como los salmónidos, parecen ser una de las especies acuáticas más sensibles al cianuro. Los insectos acuáticos como las moscas piedra, las frigáneas, las moscas de mayo o cachipollas y los escarabajos, generalmente son menos sensibles a la sustancia. Son las formas débiles disociables ácidas del cianuro las que se consideran como las más “significativas toxicológicamente”. Estudios de laboratorio y de campo han demostrado que incluso las especies acuáticas, como la trucha, pueden tolerar bajos niveles de cianuro DAD. Muchos permisos de descarga y estándares normativos se basan en el cianuro DAD. Además, se han promulgado estándares para sitios específicos para el cianuro DAD utilizado en operaciones mineras en jurisdicciones como los Estados Unidos y Nueva Zelanda.

SECCIÓN 9

Manejo de los riesgos del cianuro en la industria minera

Existen cuatro principales escenarios de riesgos que deben ser encarados mediante planes específicos para cada sitio:

- Exposición de seres humanos o receptores ecológicos al cianuro derramado durante un accidente de transporte.
- Exposición de los trabajadores, especialmente al cianuro de hidrógeno gaseoso en lugares cerrados.
- Exposición de seres humanos por escapes de cianuro en solución al agua superficial o subterránea que puede ser ingerida.
- Exposición de receptores ecológicos, como aves o peces, a soluciones que contienen cianuro.

Los reglamentos para el transporte y los minuciosos programas de seguridad limitan los riesgos asociados al primer escenario. Con respecto al segundo, aunque en el pasado han ocurrido impactos adversos causados por escapes de las soluciones de los procesos, existen procedimientos científicos y de ingeniería para permitir la operación segura y confiable de los procesos de cianuración. Cuando se fijan normas específicas para cada sitio en relación con el tercero y cuarto escenarios dentro del marco normativo para la calidad del agua, se puede proteger eficazmente la salud humana y ambiental.

Sistemas de gestión e investigación y desarrollo

La industria minera actualmente entiende que el manejo de los riesgos en todos sus aspectos - desde la salud y la seguridad hasta las prudentes operaciones financieras - es parte integral de la gestión de una compañía y un factor crítico para el éxito de una empresa industrial o comercial. Las modernas compañías mineras aplican el concepto generalizado de “sistemas de gestión” a sus programas en los que está involucrado el cianuro. Cada vez más, esta metodología se ve como parte de una buena administración en minería, así como en otras actividades industriales. Los sistemas de gestión eficaces abarcan cuatro pasos formales:

1. Planificación: Se redactan planes para detallar los procedimientos adecuados de manipulación y la respuesta en caso de accidentes en relación al transporte y recepción de cianuro, almacenamiento, preparación de soluciones, procesos metalúrgicos y manejo de residuos. Dichos planes incluyen procedimientos sobre derrames y contención en las operaciones mineras, así como procedimientos sobre salud y seguridad para proteger a los empleados de los posibles peligros del cianuro.

2. Ejecución: Para que un programa sea eficaz, debe haber un compromiso para ejecutar en forma automática y continua en cada operación, los planes redactados. Además, las responsabilidades de cada uno de los empleados en cuanto a la ejecución y documentación de las acciones exigidas por los planes, debe ser explicada en detalle y claramente definida.

3. Revisión y documentación: Parte de la responsabilidad de la gerencia es auditar el desempeño operativo como rutina. La responsabilidad por la revisión y documentación del desempeño operativo normalmente se adjudica a personas que no son parte de la operación de línea y que reportan a los funcionarios de nivel superior de la empresa. Esto asegura una evaluación independiente del desempeño del sistema. También asegura que el nivel apropiado de la gerencia de la compañía esté informada sobre el desempeño operativo. Por lo tanto, la autoridad de la empresa podrá revisar y manejar eficazmente los posibles riesgos mediante la implementación de políticas y programas aplicables a múltiples lugares.

4. Toma de acciones correctivas, si fuese necesario: Los programas de manejo de riesgos pueden tener deficiencias que luego se tornan evidentes en las operaciones y procesos diarios. Cuando se identifican estas deficiencias en el proceso de revisión, se debe dar prioridad a la toma de las acciones correctivas apropiadas y se deben revisar y documentar los efectos de esas acciones en las auditorías posteriores.

Manipulación del producto

El aspecto más importante de un sistema bien administrado es comprender que la gente que está en contacto con el cianuro debe asumir la responsabilidad por su utilización segura.

Los productores de cianuro auditan a los compradores y a los sistemas de transporte. También diseñan embalajes



Foto: Cortesía de Degussa Corporation

Los productores de cianuro brindan capacitación para el manejo seguro del cianuro de sodio con el fin de asegurar su transporte y manipulación sin riesgos.

especiales para el transporte del cianuro. Los tres principales productores de cianuro industrial, Degussa, Dupont e ICI, se han comprometido con los principios de Cuidado Responsable®.¹⁰ Los transportistas por camión, ferrocarril y barcas examinan a sus empleados, hacen un cuidadoso inventario de los paquetes, y establecen y mantienen sistemas de carga y descarga. Los productos se manipulan y transportan de acuerdo con protocolos establecidos por las respectivas industrias y en cumplimiento de normativas nacionales e internacionales.

Las compañías mineras establecen sistemas de control de inventario, mantienen la capacitación de los trabajadores y los programas de higiene industrial, y, al mismo tiempo, crean y mantienen sistemas relativos a las soluciones de los procesos y al manejo de residuos específicamente diseñados para mitigar y evitar la exposición al cianuro.

Para lograr el éxito, se deben integrar todos los componentes del manejo de riesgos de manipulación de productos, sobre la base de cada proyecto específico.



Foto: Cortesía de FMC Corporation

El aspecto más importante de un sistema bien manejado es comprender que las personas que están en contacto con el cianuro deben asumir la responsabilidad por su uso seguro.

Conservación y reciclado

Otro componente de buena manipulación de los productos con cianuro es el concepto general de reducción de residuos. Al reducir la cantidad de cianuro físicamente presente

¹⁰ Cuidado Responsable®, iniciado en 1985 por la Asociación Canadiense de Productores de Sustancias Químicas (CCPA), es una nueva ética para el manejo seguro y ambientalmente sano de las sustancias químicas durante todo su ciclo de vida, que se ha divulgado a más de 40 países en todo el mundo. Conforme a este enfoque, el CEO o el ejecutivo de mayor nivel de cada miembro de CCPA y de la mayoría de las asociaciones químicas de todo el mundo, deben implementar los principios guía y los códigos de procedimiento de Cuidado Responsable(dentro de los 3 años a partir del momento en que se une a la asociación, y debe acordar someterse a la verificación pública. Las expectativas de los miembros y asociados de Cuidado Responsable® van más allá de la implementación exigida de los 151 procedimientos de manejo establecidos en tres códigos de procedimiento e incluyen una red de CEOs por medio de grupos de liderazgo, aportes públicos a través de un panel consultor nacional, ayuda mutua mediante la aplicación de prácticas compartidas, presión de los pares conforme a un proceso de cumplimiento y la comunicación pública de las medidas para mejorar el desempeño operativo.

en un emplazamiento minero, las posibles vías de exposición se reducen inevitablemente y, por consiguiente, también el riesgo total. Cuanto la cantidad de cianuro utilizada en una operación se mantiene al nivel mínimo necesario para alcanzar las metas de producción, se reducen tanto los costos como los riesgos. Este objetivo exige enfoques, como la ingeniería de valor, que ayuden a conservar la cantidad total de cianuro utilizado y consumido en un proceso de minería. El advenimiento de procesos de reciclado del cianuro brinda alternativas a los proyectos mineros con el fin de conservar la cantidad total de cianuro requerida.

Normativa y programas voluntarios dirigidos a la seguridad laboral y la salud pública

Las normas, con frecuencia impuestas por los gobiernos, intentan hacer cumplir el manejo de riesgos. Algunos ejemplos de normativas durante el ciclo de vida del cianuro son: (a) establecer estándares de empaque y transporte; (b) fijar estándares de higiene industrial para las concentraciones de cianuro en el aire y la seguridad de los trabajadores; y (c) establecer limitaciones a la descarga de efluentes en aguas superficiales y subterráneas. Los gobiernos han utilizado los resultados de investigación y desarrollo y un proceso de política pública para establecer procedimientos y normas que protejan la seguridad de los trabajadores, la salud pública y el ambiente.

En la Sección 6 se dieron algunos ejemplos de estándares normativos para el manejo del cianuro con el fin de proteger la salud humana y el ambiente. Por ejemplo, la forma más tóxica del cianuro, el cianuro de hidrógeno gaseoso, está regulado por estándares de higiene industrial, como los estándares ACGIH de 4.7 ppm para el aire.

En el ámbito mundial, el límite de cianuro total para la protección de la salud humana se fija generalmente cerca del estándar de 0.2 mg.L-1 para el agua potable, propuesta por la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos. También, un incipiente consenso internacional, basado en datos técnicos, determina que las concentraciones de cianuro DAD en estanques abiertos debería mantenerse en concentraciones inferiores a 50 mg.L-1 con el fin de proteger a las aves migratorias y a otras aves silvestres contra un impacto adverso.

Pero el manejo de los riesgos y su cumplimiento no son impuestos por los gobiernos solamente ni deberían serlo. Los programas voluntarios pueden tener el mismo efecto que las normas sin el estigma de la coerción legal. Por ejemplo, los principales productores de compuestos de cianuro han tomado la decisión interna de tratar únicamente con usuarios finales y compañías de transporte que tengan registros comprobados de desempeño seguro. Aunque los métodos aplicados por cada productor puedan diferir, todos tienen el mismo resultado al usar mecanismos de mercado que exigen criterios específicos de cumplimiento para proteger al público en general de los peligros del cianuro.

SECCIÓN 10

Información sobre los riesgos

La información o comunicación sobre riesgos es un componente clave en cualquier programa integral para tratar adecuadamente los riesgos relacionados con el cianuro en el ambiente minero. La comunicación debe efectuarse tanto dentro de la planta operativa como externamente al público.

La educación y la capacitación interna de los gerentes y los trabajadores en un emplazamiento minero son críticas. Los empleados de una mina o de cualquier otra instalación industrial también son miembros del público que vive cerca del emplazamiento. Ellos y sus familias, amigos y vecinos tienen muchas de las mismas preocupaciones por el uso seguro del cianuro y por la protección del ambiente que cualquier otra persona



Foto: Cortesía de Placer Dome

Mina de McWatters Mining, situada en Val d'Or, Quebec, Canadá.

que viva en las cercanías. Por lo tanto, la comunicación apropiada de toda la información relacionada con el cianuro al personal interno es el primer paso en la comunicación al público en general de la naturaleza y el alcance del riesgo.

Más allá de cumplir con los requisitos formales y normativos, la comunicación real sobre los riesgos implica la información y la participación del público. Además de coordinar los programas de planificación de emergencias con las autoridades locales pertinentes, significa facilitar el acceso a datos sobre los tipos y las cantidades de compuestos de cianuro en los procesos operativos de la mina y el inventario, así como los datos de monitoreo. Una comunicación pública eficaz también es bidireccional, ya que alienta a expresar las preocupaciones públicas y ocuparse de ellas.

Las prácticas de administración de la mina respecto al cianuro deben hacerse públicas e implementarse a través de programas que sean explicados a los miembros de las comunidades locales por aquellos representantes de la compañía que sean eficaces comunicadores. Al mismo tiempo, los programas de relaciones positivas con la comunidad pueden aportar tanto sustancia como forma, y servir para demostrar a la población en general que el cianuro y otros peligros se están manejando sin riesgos para la comunidad. En la actualidad, un número creciente de compañías mineras de todo el mundo ha adoptado este enfoque y de este modo ha abierto las líneas de comunicación con las comunidades locales para el mayor beneficio de todas las partes involucradas.

SECCIÓN 11

Bibliografía

- ASTM, 1985. *Annual Book of Standards* [Libro Anual de Normas]. Sección D2036, Método C, Cianuros Disociables en Ácidos Débiles, p. 121.
- Ballantyne, B. y T. Marrs, 1987. *Clinical and Experimental Toxicology of Cyanides* [Toxicología Clínica y Experimental de los Cianuros]. Wright Publishers, Bristol, Reino Unido.
- Bureau of the Census, 1992. *The American Almanac for 1992-1993* [Anuario Norteamericano 1992-1993]. 112ª Ed. Economics and Statistics Administration, Bureau of the Census, Reference Press Publishers, Austin, Texas, EE.UU., Septiembre.
- Clesceri, L. S., A. E. Greenberg y R. R. Trussell (Editores), 1989. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [Métodos Estándar para el Análisis del Agua y de los Efluentes Residuales]. 117ª Ed., Parte 4500-CN, Sección I, Weak and Dissociable Cyanide [Cianuro Débil y Disociable], pp. 4-38, APHA-AWWA-WPCF.
- Edelman, L., y Walline, R., 1983. "Developing a Cooperative Approach to Environmental Regulation" [Desarrollo de un Enfoque Cooperativo respecto de la Reglamentación Ambiental]. *Natural Resources Lawyer*, XVI(3).
- Eisler, R., 1991. "Cyanide Hazards to Fish, Wildlife and Invertebrates: A Synoptic Review" [Peligros del cianuro para los peces, la vida silvestre y los invertebrados: Una revisión sinóptica]. U.S. Fish and Wildlife Service *Biological Reports* [Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, *Informes Biológicos*] 85(1.23).
- Environment Australia, 1998. *Cyanide Management* [Manejo del Cianuro], un folleto de la serie sobre "El Mejor Procedimiento en el Manejo Ambiental en Minería." Confederación de Australia.
- General Accounting Office (GAO), 1991. "Increased Attention Being Given to Cyanide Operations [Mayor atención prestada a las operaciones con cianuro], un informe al Presidente del Subcomité de Minería y Recursos Naturales, Junio.
- Glynn, P., 1983. "Cyanide Behavior in Groundwater Environments" [Comportamiento del cianuro en ambientes de aguas subterráneas], sin publicar, Disertación para la licenciatura. Groundwater Research Institute, University of Waterloo, Canadá.
- Gold Institute, 1996. "Cyanide" [Cianuro]. En *Gold Issues Briefing Book* [Libro informativo sobre temas relacionados con el oro], Capítulo 4, pp. 1-12.

Griffiths, A.W. y G. Vickell, 1989. *Treatment of Gold Effluents with H₂O₂, Operating Experience and Costs* [Tratamiento de efluentes auríferos con H₂O₂, experiencia operativa y costos]. Actas de la 21ª Conferencia Canadiense sobre Procesamiento de Minerales, Ottawa, Ontario, Canadá.

Habashi, F., 1987. "One Hundred Years of Cyanidation" [Cien años de cianuración]. *C.I.M. Bulletin*, 80: 108–114.

T.W. Higgs & Associates, 1992. *Technical Guide for Environmental Management of Cyanide in Mining* [Guía técnica para el manejo ambiental del cianuro en minería]. Preparado para la Mining Association of British Columbia, Canadá, Julio.

Kilborn, Inc., 1991. *Best Available Pollution Control Technology* [La mejor tecnología disponible para el control de la contaminación]. Preparado para el Ontario Ministry of the Environment, Metal Mining Sector, Diciembre.

Lehninger, A., 1970. *Biochemistry* [Bioquímica]. Worth Publishers, Nueva York, NY, EE.UU.

Logsdon, M. J. y T. I. Mudder, 1994. "Geochemistry of Spent Ore and Water Treatment Issues [Geoquímica de la mena agotada y temas de tratamiento de aguas]. *Proceedings of the Tailings and Mine Waste 1995 Meeting and Summitville Forum* [Actas de la reunión y foro de Summitville sobre los relaves y residuos mineros, 1995]. Ft. Collins, Colorado, EE.UU., Enero de 1995.

Marsden, J. y I. House, 1992. *The Chemistry of Gold Extraction* [Química de la extracción de oro]. Ellis Howood Publishers, Nueva York, NY, EE.UU.

McNulty, T., 1989. "A Metallurgical History of Gold" [Historia metalúrgica del oro]. American Mining Contress, 20 de septiembre de 1989. San Francisco, California, EE.UU.

Mining Environmental Management Magazine [Revista sobre el Manejo Ambiental en Minería], 1995. Edición especial sobre el cianuro. Junio de 1995.

Mudder, T. I. (Editor), 1998. *The Cyanide Monograph* [Monografía sobre el cianuro]. Mining Journal Books, The Mining Journal Ltd., Londres, Reino Unido.

Mudder, T. I. y A. Goldstone, 1989. "The Recovery of Cyanide from Slurries" [Recuperación de cianuro de lodos]. En *Randol Conference, Gold and Silver Recovery Innovations Phase IV Workshop* [Conferencia Randol, Innovaciones en la Recuperación de Oro y Plata], Taller Fase IV, Sacramento, California, EE.UU., Noviembre.

Mudder, T. I., y A. C. S. Smith, 1994. "An Environmental Perspective on Cyanide" [Una perspectiva ambiental del cianuro]. *Mining World News*, 6(9), Octubre.

Gobierno de Queensland, 1990. *Guidelines on Prevention of Water Pollution from Cyanide Use in Gold Ore Processing* [Guías para la prevención de la contaminación del agua por el uso de cianuro en el procesamiento de menas de oro]. Department of Environment and Heritage, Department of Resource Industries, Water Resources Commission, Enero.

Schmidt, J. W., L. Simovic y E. Shannon, 1981. *Development Studies for Suitable Technologies for the Removal of Cyanide and Heavy Metals from Gold Milling Effluents* [Desarrollos de tecnologías adecuadas para la remoción de cianuro y metales pesados de los efluentes de la molienda de oro]. Actas de la 36ª Conferencia sobre Residuos Industriales, Purdue University, Lafayette, Indiana, EE.UU., pp. 831-849.

Scott, J. S., 1993. *Status of Gold Mill Waste Effluent Treatment* [Estado del tratamiento de efluentes residuales de molinos de oro]. Preparado para CANMET.

Scott, J. S. y J. Ingles, 1987. *State of the Art Processes for the Treatment of Gold Mill Effluents* [Tecnología de punta en los procesos para el tratamiento de los efluentes de molinos de oro]. Mining, Mineral and Metallurgical Process Division, Industrial Programs Branch, Environment Canada, Ottawa, Ontario, Canadá, Marzo.

Scott, J. S. y J. Ingles, 1981. "Removal of Cyanide from Gold Millings Effluents" [Remoción del cianuro de los efluentes de molinos de oro]. *Canadian Mineral Processors Thirteenth Annual Meeting* [Procesadores Canadienses de Minerales, 13ª Reunión Anual], Ottawa, Ontario, Canadá, Enero 20-22, pp. 380-418.

Simovic, L. y W. J. Snodgrass, 1989. *Tailings Pond Design for Cyanide Control at Gold Mills Using Natural Degradation* [Diseño de un estanque de relaves para el control de cianuro en molinos de oro empleando la degradación natural]. Actas del Seminario sobre el Tratamiento de Efluentes de Minas de Oro, Medio Ambiente Canadá, Mississauga, Ontario, Canadá, Marzo 22-23, pp. 57-81.

Smith, A. C. S., 1994. "The Geochemistry of Cyanide in Mill" [La geoquímica del cianuro en los relaves de molinos]. En J. L. Jambor y D. W. Blowes (Editores), *The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes* [Geoquímica ambiental de residuos de minas con sulfuros]. Manual de un Curso Breve de la Asociación Mineralógica de Canadá, Vol. 22, pp. 293-332.

Smith, A. C. S., 1987. Testimonio para el Departamento de Salud y Control Ambiental, Carolina del Sur, Permiso No. SC 0041378, Audiencia de Apelación, Columbia, Carolina del Sur, EE.UU., Diciembre.

Smith, A. C. S., A. Dehrman y R. Pullen, 1985. "The Effects of Cyanide-bearing Gold Tailings Disposal to Water Quality in Witwatersrand, South Africa [Los efectos de la eliminación de relaves de oro que contienen cianuro en la calidad del agua en Witwatersrand, Sudáfrica]. En D. Van Zyl (Editor), *Cyanide and the Environment* [Cianuro y Medio Ambiente]. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EE.UU., pp. 221-229.

Smith, A. C. S., D. Moore y J. Caldwell, 1985. "Prediction of Groundwater Impact of Tailings Disposal" [Predicción del impacto de la eliminación de relaves en el agua subterránea]. *Proceedings of 2nd Annual Can/Am Conference on Hydrology* [Actas de la Segunda Conferencia Anual Canadiense / Norteamericana sobre Hidrogeología]. Banff, Alberta, Canadá.

Smith, A. C. S. y T. I. Mudder, 1991. *The Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes* [Química y tratamiento de residuos de la cianuración], Mining Journal Books, Londres, Reino Unido.

Stanley, G. G., 1987. *The Extractive Metallurgy of Gold in South Africa* [La metalurgia extractiva del oro en Sudáfrica]. South African Institute of Mining and Metallurgy, Monografía M7.

The Handbook of Chlorination [Manual sobre cloración], 1986. Van Nostrand Reinhold, Nueva York, NY, EE.UU.

US EPA, 1985. "Basis for Listing Hazardous Waste" [Base para enumerar residuos peligrosos]. 40 CFR 261, Apéndice VII. US EPA, 1985.

US EPA, 1981. "An Exposure and Risk Assessment for Cyanide" [Exposición y evaluación de los riesgos del cianuro]. Office of Water, EPA-440/4-85-008, Washington, DC, EE.UU., Diciembre.

U.S. Fish and Wildlife Service, 1991. "Cyanide Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review" [Peligros del cianuro para los peces, la vida silvestre y los invertebrados: Una revisión sinóptica]. *Biological Report 85 (1.23) Contaminant Hazard Review Report* [Informe Biológico 85 (1.23). Informe sobre los Análisis de los Peligros de los Contaminantes 223], Diciembre.

Ulman's Encyclopedia of Industrial Chemistry [Enciclopedia de Química Industrial de Ulman], 1987. Vol. A8, Quinta Edición. VCH Publishers, Nueva York, NY, EE.UU.

Unifield Engineering, Inc., Coeur d'Alene Mines Corp., TIMES Ltd., y Coeur Gold N.Z. Ltd., 1994. "Recovery of Cyanide from Mills Tailings [Recuperación del cianuro de los relaves de molinos]. *Proceedings, 100 th Annual Northwest Mining Association Conference* [Actas de la 100ª Conferencia Anual de la Asociación de Minería del Noroeste]. Spokane, Washington, EE.UU.

Western Australia, Department of Minerals and Energy, 1992. *Cyanide Management Guideline* [Guía para el manejo del cianuro]. Mining Engineering Division, Julio.

Whitlock, J. L. y T. I. Mudder, 1986. "The Homestake Wastewater Treatment Process: Biological Removal of Toxic Parameters from Cyanidation Wastewaters and Bio Assay Effluent Evaluation [El proceso de tratamiento de efluentes residuales de Homestake: remoción biológica de parámetros tóxicos de los efluentes residuales de la cianuración y evaluación de efluentes de bioensayos]. En R. W. Lawrence (Editor) *Fundamental and Applied Biohydrometallurgy* [Biohidrometalurgia fundamental y aplicada], pp. 327-339.

Sobre los autores

Mark J. Logsdon, AB, MSc

Mark J. Logsdon es actualmente el Presidente y Principal Geoquímico de Geochimica, Inc., una firma consultora situada en Ojai, California, Estados Unidos de Norteamérica. Obtuvo una Licenciatura con Honores en Geología de la Universidad de Princeton, así como una Maestría en Geología de la Universidad de Nueva México. El Sr. Logsdon se especializa en hidrogeoquímica y geoquímica ambiental, especialmente relacionada con el manejo de residuos. Además de su experiencia como consultor, los 30 años de carrera del Sr. Logsdon han abarcado tareas de investigación e instrucción académica, así como experiencia gubernamental, particularmente en la Comisión de Reglamentación Nuclear de los Estados Unidos y la Oficina de Minas y Recursos Minerales de Nueva México. Sus conocimientos y experiencia incluyen el diseño e implementación de investigaciones multidisciplinarias sobre la ciencia de la tierra, que involucra caracterización de los residuos, geoquímica e hidrología. Los proyectos geoquímicos incluyen estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos del drenaje ácido de las minas, hidrogeoquímica del cianuro en emplazamientos mineros e investigaciones in situ sobre la calidad del agua.

Karen Hagelstein, BS, MS, PhD, CIH

Karen Hagelstein es Socia y Científica Senior sobre Medio Ambiente en Times Limited, una firma de ingeniería y ciencia ambiental situada en Bozeman, Montana, Estados Unidos de Norteamérica, especializada en ingeniería del agua y de los efluentes residuales, toxicología acuática y evaluación de la salud humana. La Dra. Hagelstein es una Higienista Industrial Habilitada y recibió su Licenciatura de la Universidad de Dakota del Sur, su Maestría en Fisiología y Biofísica de la Universidad de Iowa y su Doctorado en Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Iowa. Durante su carrera de más de 15 años, la Dra. Hagelstein ha ocupado puestos como Científica Ambiental Senior, Ingeniera Ambiental y Funcionaria de Salud y Seguridad en diversas firmas consultoras. También se desempeñó durante seis años como Profesora Asociada en la Escuela de Minas y Tecnología de Dakota del Sur. Los proyectos relacionados con la minería emprendidos en Times Limited abarcan la revisión y el resumen de los datos y riesgos de toxicidad para los humanos por exposiciones ambientales peligrosas, la elaboración de modelos de dispersión del aire para calcular las concentraciones de contaminantes y el resumen de datos de monitoreo biológico y químico de la calidad del agua.

Terry I. Mudder, BS, MS, PhD

El Dr. Terry I. Mudder es copropietario de Times Limited. Obtuvo una Licenciatura y una Maestría en química orgánica y analítica, y un Doctorado en ingeniería y ciencia ambiental. El Dr. Mudder tiene 20 años de experiencia en la investigación de la química, el análisis, el destino, la toxicidad acuática y la eliminación de residuos que contienen cianuro. Se ha desempeñado como profesor adjunto, asesor de tesis y profesor invitado en universidades de todo el mundo. Ha trabajado en más de 100 proyectos relacionados con la minería de metales preciosos y no ferrosos en los seis continentes y ha escrito más de tres docenas de artículos técnicos. Ha dado numerosas conferencias y ha participado en cursos cortos y talleres relacionados con el cianuro. Es coautor de varios folletos y libros, entre ellos, *The Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes* (Química y Tratamiento de los Residuos de la Cianuración) y *The Cyanide Monograph* (Monografía sobre el Cianuro), ambos publicados por Mining Journal Books. Ha jugado un papel decisivo en el desarrollo y la aplicación de muchos de los procesos químicos, físicos y biológicos para el tratamiento del cianuro y los metales, por los cuales ha recibido premios nacionales e internacionales y ha obtenido patentes en todo el mundo. Ha brindado asistencia técnica al Ministerio de Medio Ambiente de Columbia Británica, Medio Ambiente Australia, el Servicio Peruano para la Protección Ambiental, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, los organismos reguladores de los Estados Unidos, así como a varias organizaciones industriales.