

Cuerpo Académico Metalurgia, Materiales y Medio Ambiente
Documento Final

**ESTUDIO PARA LA EVALUACIÓN DE LA NORMA
OFICIAL MEXICANA NOM-155-SEMARNAT-2007**

Presentado a

Lic. Galo Galeana Herrera
Director General de Energía y Actividades Extractivas
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
SUBSECRETARÍA DE FOMENTO Y NORMATIVIDAD AMBIENTAL
Blvd. Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 4º Piso Ala "B"
Col. Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, México, D.F., C.P. 14210

Elaborado por:
Dr. Jesús Leobardo Valenzuela García (Responsable Técnico)

Colaboradores:
Dra. Diana María Meza Figueroa
Dr. Agustín Gómez Álvarez
Dr. Guillermo del Carmen Tiburcio Munive
Dr. Martín Antonio Encinas Romero

División de Ingeniería, Universidad de Sonora
Rosales y Luis Encinas s/n Centro Hermosillo, Sonora, C.P. 83000

Contacto:

Dr. Jesús Leobardo Valenzuela García
Correo electrónico: jvalen@iq.uson.mx
Número de Teléfono: 662 2592157

18 de Diciembre 2015

CONTENIDO

CONTENIDO	i
INDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	vii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general.....	3
Metodología de trabajo.....	3
CAPÍTULO II	5
GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ORO Y PLATA	5
La minería y la extracción de oro y plata.....	5
Proceso de lixiviación con cianuro.....	8
Lixiviación en tanque y en terreros.....	9
Uso del cianuro en la Industria Minera.....	11
Formas químicas de los compuestos del cianuro, transporte y almacenamiento.....	11
Química del cianuro, generación y tratamiento de residuos.....	12
Formas químicas del cianuro y sus afectaciones ambientales.....	14
Cianuro libre.....	14
Complejos de cianuro.....	15

Complejos débiles (WAD) y fuertes (SAD) de cianuro.....	16
Uso del cianuro.....	17
Técnicas utilizadas para neutralización y/o destrucción del cianuro.....	17
Métodos alternativos para lixiviación de oro y plata.....	21
Clorinación.....	21
Tiosulfato de amonio	22
Generalidades del tiosulfato y sus usos.....	22
CAPÍTULO III	24
EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA PUBLICACIÓN DE LA NORMA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE CONDICIONES PREVIAS A SU ENTRADA EN VIGOR (ESCENARIO BASE)	24
Operaciones mineras establecidas previas a la Norma Oficial Mexicana NOM-155 SEMARNAT-2007.....	26
<i>Pachuca–Real del Monte, Estado de Hidalgo</i>	<i>27</i>
<i>Mina La Colorada, Estado de Sonora.....</i>	<i>28</i>
<i>Mina Santa Gertrudis, Estado de Sonora</i>	<i>28</i>
<i>Mina Guanaceví, Estado de Durango.....</i>	<i>29</i>
<i>Mina Santa Elena, Estado de Sonora.....</i>	<i>29</i>
<i>Mina de Plata La Encantada, Estado de Coahuila</i>	<i>29</i>
<i>El Sauzal, Estado de Chihuahua</i>	<i>30</i>
<i>Mina Peñasquito, Estado de Zacatecas</i>	<i>31</i>
<i>Los Filos, Estado de Guerrero.....</i>	<i>31</i>
<i>Cerro de San Pedro, Estado de San Luis Potosí.....</i>	<i>32</i>
<i>Unidad Santa Francisca, Estado de Aguascalientes</i>	<i>32</i>
Situación Actual.....	34
Principales afectaciones ambientales relacionadas con los sistemas de	

lixiviación de oro y plata	35
Ejemplos de casos reales de afectaciones ambientales por problemas de inestabilidad de los sistemas de lixiviación, y por la disposición inadecuada del mineral lixiviado	37
Casos de afectaciones ambientales en el mundo	37
Casos de accidentes en México relacionados a operaciones metalúrgicas de lixiviación de oro y plata utilizando cianuro.....	42
CAPÍTULO IV.....	46
EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LA NORMA, CONSIDERANDO LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL Y NACIONAL SOBRE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y LA IDENTIFICACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS OPERATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN DE ORO Y PLATA.....	46
Latinoamérica.....	46
Norteamérica.....	47
Canadá	51
Europa	55
CAPÍTULO V.....	57
IDENTIFICACIÓN DE BUENAS Y MALAS PRÁCTICAS OPERATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN DE ORO Y PLATA.....	57
Peligrosidad del mineral lixiviado o gastado.....	57
Caracterización del sitio.....	57
Determinación de la magnitud de riesgos físicos y criterios del proyecto del patio	58
Criterios de obra	58
Criterios de construcción de taludes en un terrero de lixiviación	60
Recomendaciones de prácticas internacionales, para tomar como base en las instalaciones de las minas mexicanas y que se pudieran integrar en la	

NOM 155 SEMARNAT 2007	67
CAPÍTULO VI.....	69
RECOMENDACIONES DE MEJORA EN EL DISEÑO Y APLICACIÓN DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM 155 SEMARNAT 2007	69
Generalidades.....	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones de cianuro en plantas seleccionadas.....	7
Tabla 2. Análisis de soluciones estériles.....	15
Tabla 3. Cronología de principales incidentes ambientales relacionados a la minería desde 1998-2003.....	40
Tabla 4. Accidentes de cianuro en el mundo en años recientes.	41
Tabla 5. Fortalezas y debilidades de la Norma Oficial Mexicana	72
Tabla 6. Especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM 155 SEMARNAT 2007.....	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Proceso Lixiviación de Oro y Plata en Terreros, utilizando Cianuro.....	10
Figura 2. Presa de jales de la empresa Proyecto Magistral	43
Figura 3. Camión pipa volcada y adición de cal en el sitio del accidente	44
Figura 5. Corte transversal de una planilla de lixiviación	60
Figura 6. Construcción del talud de 30° con respecto a la Norma Internacional establecida, para evitar canalizaciones en caso de lluvias extremas...	61
Figura 7. Uso de liners doble capa. Se muestra la recuperación de áreas verdes.....	62
Figura 8. Uso de bandas transportadoras (stacker), para evitar daño por compactación en los liners por camiones pesados (yuckles).	62
Figura 9. Pileta de contingencias y pileta de soluciones del proceso, utilización de geomembranas de doble capa (liner).	63
Figura 10. Instalación de geomembranas para situaciones de lluvias extraordinarias.....	64
Figura 11. Protección de los patios de lixiviación en caso de contingencias por lluvias extremas.....	64
Figura 12. Efectos dañinos por carecer de protección de geomembranas adecuadas para lluvias extremas	65
Figura 13. Diseño no adecuado de geomembranas para contener los caudales excesivos	65
Figura 14. Recubrimientos adecuados con capas de arcillas y geomembrana	66
Figura 15. Recubrimientos de arcilla y geomembrana adecuados con respecto a la pendiente	67

RESUMEN

La Dirección General de Energía y Actividades Extractivas requiere evaluar si los criterios y procedimientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007 han sido eficientes y eficaces para disminuir las afectaciones ambientales de los sistemas de lixiviación, entre otros, por los impactos que se pueden generar por la pérdida de estabilidad física de dichos sistemas o por la falta de control de los minerales lixiviados.

Antes de 1990, se eludían los impactos ambientales causados por la minería superficial, minería a tajo abierto y la explotación subterránea, los cuales conllevaron a impactos ambientales asociados al procesamiento (beneficio de los metales) que se encuentran en los depósitos de desecho, terrero, jaleros, etc.

Antes que fuera obligatoria el cumplimiento ambiental de la Norma Oficial Mexicana NOM-155 SEMARNAT-2007 en minería, muchas empresas mineras por comodidades descargaban los jales en los sitios más cercanos a ríos, arroyos, etc., provocando resultados ambientales fatales, mismos que se asocian con las descargas abiertas de dichos jaleros. En el presente, ésta es una práctica rechazada y castigada por las autoridades ambientales.

Se realizó una consulta, análisis y síntesis de toda la información disponible sobre el tema en México y el extranjero, en bibliografía y fuentes de información gubernamentales y de compañías mineras.

Se obtuvo información de cinco minas con sistemas de lixiviación de oro y plata. Adicionalmente, se consideró la información de proyectos desarrollados por el grupo de trabajo en el tema. En base a esto, se discutió el escenario base y la efectividad de la Norma.

A partir de la publicación de la NOM-155-SEMARNAT-2007, las empresas mineras están obligadas a observar las especificaciones contenidas en la misma para mitigar los daños a la salud y al medio ambiente.

Se analizan casos de afectaciones ambientales en el mundo. De igual manera se analizan casos de accidentes en México relacionados a operaciones metalúrgicas de lixiviación de oro y plata utilizando cianuro.

Se describe un apartado de la química del cianuro, ya que actualmente es el principal reactivo lixivante, también se incluyen indicaciones del manejo, transporte, métodos de neutralización, destrucción y regeneración del cianuro. Referente a la química del cianuro, actualmente se tiene la cultura de impartición de cursos de capacitación para los nuevos empleados, personal de lixiviación, contratistas. Los cursos tratan sobre salud ambiental, buenas prácticas del cianuro y primeros auxilios.

La información documentada acerca de la experiencia internacional sobre la protección ambiental relacionada con la lixiviación con cianuro indica que los países utilizan criterios muy variables, inclusive dentro de los estados/provincias de cada país. Se incluye en este documento una identificación de buenas y malas prácticas operativas de los sistemas de lixiviación de oro y plata y su relación con las Especificaciones de Protección Ambiental descritas en la NOM-155-SEMARNAT-2007.

Se enlistan los principales cambios en la legislación de otros países, considerando principalmente aquellos que se implementaron en México a partir de la aplicación de la NOM-155- SEMARNAT-2007.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata por la técnica de cianuración a través de pilas o montones, constituye uno de los retos ambientales más relevantes de la sociedad moderna. Es el proceso más utilizado por la industria minera para el beneficio del oro y de la plata, tanto a nivel nacional como internacional. Aunque este proceso tiene una simplicidad operativa y es muy utilizado debido a su bajo costo de inversión en comparación con otros métodos, las afectaciones ambientales producidas por los patios de lixiviación deben disminuirse a partir de la gestión adecuada del manejo de cianuro como agente lixivante y la aplicación de medidas que eviten su filtración a cuerpos de agua así como el impacto a suelos. Para este fin, la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, tiene como objetivo establecer las especificaciones para la caracterización del mineral lixiviado y del sitio, así como los requisitos de protección ambiental para las etapas de preparación del sitio, construcción, operación, cierre y monitoreo de los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.

La Dirección General de Energía y Actividades Extractivas requiere evaluar si los criterios y procedimientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007 han sido eficientes y eficaces para disminuir las afectaciones ambientales de los sistemas de lixiviación, entre otros, por los impactos que se pueden generar por la pérdida de estabilidad física de dichos sistemas o por la falta de control de los minerales lixiviados. El tema resulta importante en el caso específico de la minería, pues su operación generalmente se lleva a cabo en zonas ecológicamente frágiles y que presentan una alta biodiversidad.

En apego a los Términos de Referencia “Estudio para la evaluación de la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007, que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata”, emitido en Septiembre de 2014, la evaluación contenida en el presente documento deberá incluir los siguientes criterios:

- El impacto de la publicación de la Norma debe realizarse a partir de un escenario base; dicho impacto debe medirse en términos del grado de modificación de las condiciones del entorno y tendencias de deterioro, como resultado de las especificaciones generales y particulares de la Norma. El impacto de un instrumento normativo está definido como el grado de modificación positiva o negativa y permanente de las condiciones que justificaron la expedición del documento.
- La evaluación debe medir la eficacia de la Norma, en términos del grado de modificación de las condiciones del entorno, como resultado de las disposiciones establecidas en la misma, así como si las acciones para el cierre son suficientes para la restauración del sitio.
- La efectividad de las medidas contenidas en la Norma, se deberá reflejar en el nivel de reducción y mitigación de afectaciones ambientales relacionadas con la modificación de procesos y reorientación de conductas de las empresas que utilicen este tipo de sistemas.
- La eficiencia deberá reflejar que el beneficio obtenido de la aplicación de la Norma es mayor a los costos de ejecución y vigilancia de su cumplimiento.

En base a lo anterior, el presente documento se divide de manera general en las siguientes secciones:

1. Generalidades sobre los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata, incluyendo la química del cianuro y sus posibles afectaciones ambientales, así como una investigación sobre los métodos alternativos para la lixiviación de oro y plata.
2. Evaluación del impacto de la publicación de la Norma a partir del análisis de

condiciones previas a su entrada en vigor (Escenario base).

3. Evaluación de la eficacia de la Norma, considerando la experiencia a nivel nacional e internacional sobre la protección ambiental y la identificación de buenas prácticas operativas para los sistemas de lixiviación de oro y plata, usando cianuro.
4. Evaluación de la eficiencia de la Norma considerando la experiencia de cinco minas en México y recomendaciones generales.

Objetivo general

Evaluar la efectividad de la NOM-155-SEMARNAT-2007 como un instrumento normativo expedido por la Dirección General de Energía y Actividades Extractivas de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Metodología de trabajo

- Se realizó una consulta, análisis y síntesis de toda la información disponible sobre el tema en México y el extranjero, en bibliografía y fuentes de información gubernamentales y de compañías mineras.
- Se obtuvo información de cinco minas con sistemas de lixiviación de oro y plata. Adicionalmente, se consideró la información de proyectos desarrollados por el grupo de trabajo en el tema. En base a esto, se discutió el escenario base y la efectividad de la Norma. De acuerdo a la información proporcionada por la Cámara Minera de México y la producción de las empresas ubicadas en el territorio nacional, los principales estados productores de oro y plata son Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Guerrero, Durango y Guanajuato. Las principales operaciones de lixiviación en montones o terreros están localizadas en Sonora, Chihuahua y Guerrero, de ahí que se hayan seleccionado 5 operaciones minero – metalúrgicas que utilizan este tipo de proceso para verificar la aplicabilidad de la NOM 155 SEMARNAT 2007.

- Se realizaron encuestas para conocer la experiencia de las empresas con la Norma y evaluar su eficiencia. Se anexa al final de este documento, el formato utilizado.
- Se realizaron sesiones de análisis de información y discusión de datos.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ORO Y PLATA

La minería y la extracción de oro y plata

La creciente demanda de minerales, en estrecha proporción al crecimiento poblacional y a la mejora de calidad de vida, ha hecho que de la explotación de yacimientos de alta ley, poca profundidad y en bajo volumen se haya pasado a la explotación de yacimientos de baja ley, algunos a grandes profundidades y otros con inmensos volúmenes de material movido cada día. La disponibilidad de recursos de alta calidad, unido a unas condiciones de mercado fuera del control de las compañías mineras, ha dado como resultado un sector caracterizado por un limitado nivel de innovación tecnológica. Las estrategias de estas empresas se ha centrado en el descubrimiento y adquisición de depósitos de gran volumen y de ser posible superficiales.

Los recursos minerales raramente se encuentran en concentraciones lo suficientemente importantes en contenido de valores metálicos, como para ser objeto de una metalurgia directa. Los minerales se encuentran en forma combinada con oxígeno (óxidos), azufre (sulfuros) y otros elementos (cloruros, arseniatos, fosfatos, etc.).

Dependiendo de la mineralogía del proceso, la ganga puede presentarse como roca (escombrera), como desechos de la planta de beneficio (lodos o jales), como desperdicio de fundiciones (escorias), o como otros productos secundarios (polvos, decantados de plantas de tratamiento de aguas, pilas de mineral gastado de lixiviación, etc.). Estos materiales sólidos contienen ciertas

cantidades del mineral procesado así como muchos otros de los considerados como no económicos, debido principalmente a ineficiencias en el proceso, limitaciones tecnológicas o factores mineralógicos. La explotación de grandes volúmenes en la búsqueda constante de la reducción de costos, da lugar a la generación de gran cantidad de residuos que tienen que ser dispuestos en áreas próximas a las minas y que pueden generar problemas ambientales: ejemplo drenaje ácido, emisión de polvos, modificaciones hidrográficas, generación de sitios de riesgo geotécnico, entre otros.

El creciente interés de la población hacia el medio ambiente ha dado lugar a que las regulaciones sean cada vez más estrictas, tomándose acuerdos que han causado conflictos en la utilización del suelo para actividades mineras. Si antes se mencionaban miles de toneladas en las escombreras de desechos mineros, hoy se hablan de cientos de millones, de tal manera que el impacto ambiental actual de dichas escombreras es muy diferente a las antiguas. Esta preocupación ambiental ha causado un impresionante crecimiento tecnológico en la industria de los minerales, abarcando desde la conceptualización del problema hasta la modificación de algunos procesos operativos. Estos cambios han llevado a las compañías mineras a procurar que sus operaciones minero-metalúrgicas resulten menos impactantes hacia el medio ambiente. La capacidad del medio ambiente para mantener la actividad minera está limitada en dos aspectos: la disminución y eventual agotamiento de un recurso finito (yacimientos) y a través del impacto negativo en los ambientes biofísicos y sociales, causado por el propio proceso de extracción.

La minería es una actividad industrial que utiliza una cantidad significativa de cianuro, aproximadamente el 19% de la producción mundial. Desde 1887, el proceso de cianuración ha sido el más utilizado en la extracción de oro y de plata. Adicionalmente, 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.

El cianuro es un término general que se aplica a un grupo de sustancias químicas

que contienen carbono y nitrógeno. Existen más de 2000 fuentes naturales de cianuro, entre las que se incluyen especies de insectos, bacterias, algas, hongos y algunas plantas. Las formas de cianuro producidas por el hombre son el cianuro de hidrógeno gaseoso y el cianuro sólido de sodio y potasio (estos últimos utilizados en la industria minera). La principal preocupación ambiental por el uso del cianuro radica en su elevada toxicidad, ya que si se ingiere o inhala en cantidades suficientes, este puede ser letal.

La fuente natural del cianuro de hidrógeno (HCN) es un compuesto similar al azúcar llamado amigdalina, existente en frutas, semillas, nueces y vegetales¹. Los tiocianatos son un grupo de compuestos formados de una combinación de azufre, carbono y nitrógeno. Los tiocianatos se encuentran en varios alimentos y plantas, son producidos por la reacción del cianuro libre con azufre. Esta reacción puede ocurrir en el ambiente, por ejemplo, en arroyos de desechos industriales que contienen cianuro. Los tiocianatos en el suelo provienen de la aplicación directa de herbicidas, plaguicidas y rodenticidas². La Tabla 1 presenta datos sobre la concentración de cianuro en varios alimentos.

Tabla 1. Concentraciones de cianuro en plantas seleccionadas³

Especies de plantas	Concentración (mg/kg)
Almendra amarga	280-2,500
Sorgo (planta joven, integral)	Máximo 2,500
Punta de bambú	Máximo 8,000
Raíces de yuca	138

¹ Cerezas, maíz, lentejas, nectarinas, duraznos, pistachos, papas, soya, almendras.

² http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs8.html; Cho et al., 2013. Determination of cyanogenic compounds in edible plants by Ion Chromatography. *Toxicol Res.* 29(2): 143-147.

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).

Anualmente se utiliza más de un millón de toneladas de cianuro en la producción de nitrilo, nylon y plásticos acrílicos, lo que representa un 80% de la producción mundial. 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 caminos cubiertos con hielo. El cianuro de hidrógeno gaseoso se ha utilizado ampliamente para exterminar a los roedores y en la práctica hortícola, para controlar plagas resistentes a plaguicidas comunes. El 20% restante de la producción de cianuro se utiliza para fabricar cianuro de sodio en forma sólida para la recuperación de oro y plata en la industria minera. 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 los metales preciosos.

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

Proceso de lixiviación con cianuro

El uso de soluciones a base de agua para extraer y recuperar metales como el oro y la plata se denomina hidrometalurgia. Estas operaciones utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio (NaCN), típicamente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (equivalente a 100 y 500 partes por millón, respectivamente). 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 y la plata contenidos en el mineral. La solución resultante que contiene oro y plata se denomina “solución rica o cargada”. Luego se agrega zinc (Proceso de precipitación Merrill-Crowe) o adsorción carbón activado a la solución cargada para recuperar el oro y la plata.

La solución residual o “estéril” (es decir, carente de valores de oro y plata) puede recircularse para extraer más valores metálicos o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos.

Lixiviación en tanque y en terreros

Existen dos sistemas generales para la lixiviación del oro y la plata de un mineral mediante el cianuro:

- Lixiviación en tanque
- Lixiviación en terreros (percolación)

La lixiviación en tanque es el método convencional por el cual el mineral se tritura y se muele hasta reducirlo a menos de un milímetro de diámetro. En algunos casos se puede recuperar parte del oro y la plata de este material finamente molido como partículas discretas 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 y la plata en una solución de cianuro. Cuando estos metales se recuperan en una planta convencional de lixiviación en tanque, la solución estéril se recogerá junto con los residuos sólidos en un sistema de depósitos de relaves (jales). En esta etapa, parte de la solución permanecerá dentro de los jales, y se almacenará en un estanque, desde donde se le recicla y se envía nuevamente a la planta. En la mayoría de las plantas metalúrgicas, debido a la acumulación de impurezas, algunas de las soluciones que contienen cianuro deben ser bombeadas a un sistema de tratamiento.

La lixiviación en terreros es el método más utilizado actualmente, debido al menor costo del proceso y manejo de grandes volúmenes lo que permite la explotación de depósitos minerales de menor ley. Con este método, el mineral se tritura y se reduce de 1 a 2 centímetros de diámetro y se coloca en grandes planillas o montones. Una solución de cianuro se hace pasar lentamente a través de estas planillas para disolver el oro y la plata, la solución estéril se recoge en un estanque, donde se acondiciona la concentración de cianuro y el pH, para utilizarse de

nuevo en el sistema de lixiviación. Un diagrama de este proceso se muestra en la siguiente figura:

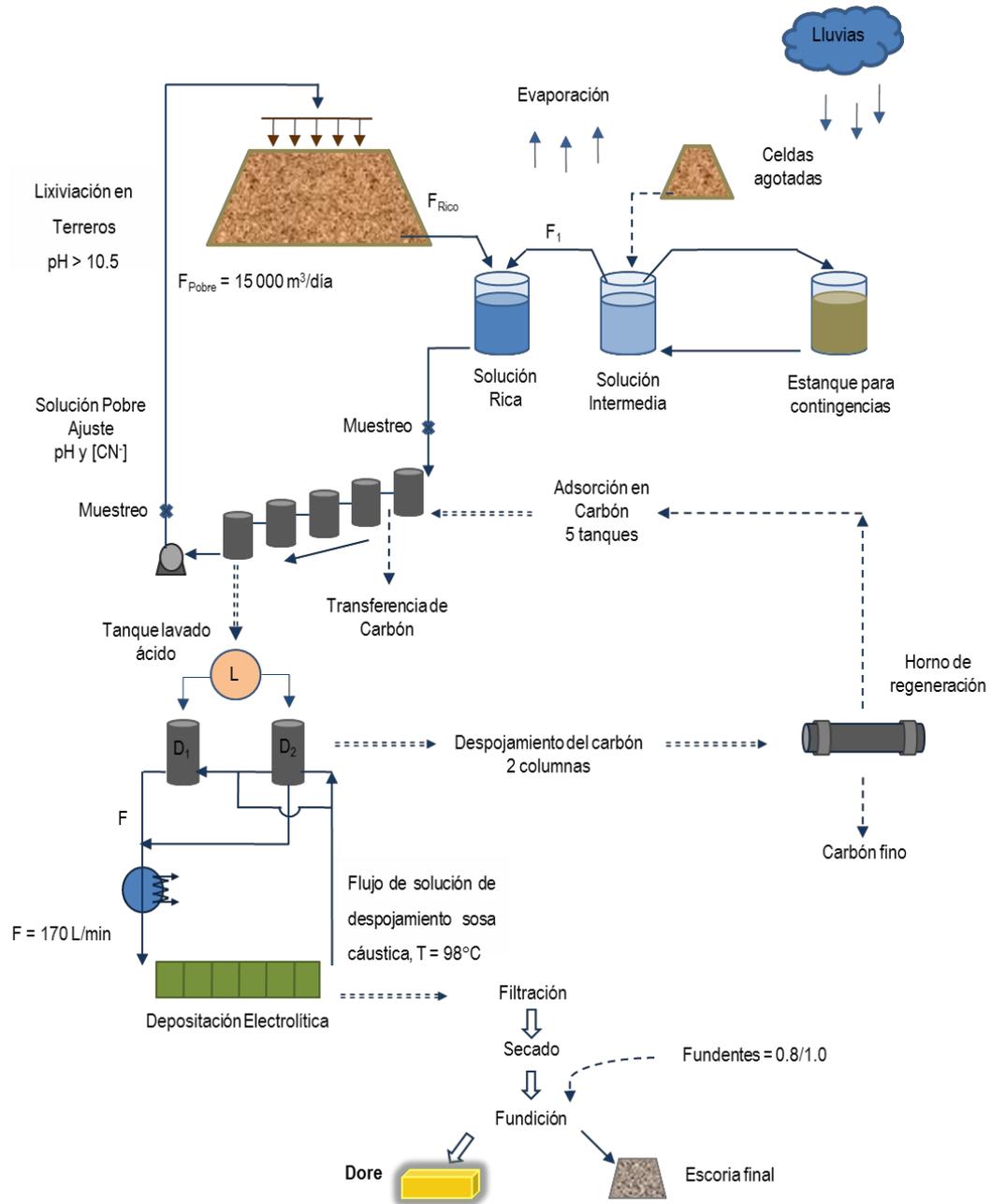


Figura 1. Diagrama de Proceso Lixiviación de Oro y Plata en Terreros, utilizando Cianuro.

Uso del cianuro en la Industria Minera

La industria moderna utiliza el cianuro casi exclusivamente como agente lixiviante del oro y la plata, lo que ha dejado al uso del mercurio en desuso por la industria minera a gran escala, debido a su elevada toxicidad e impacto ambiental. Se han utilizado agentes como la tiourea, tiosulfato y haluros, entre otros reactivos alternos para extraer el oro generalmente no han resultado rentables. Los complejos de cianuro, al ser más estables y eficaces no necesitan de otras sustancias químicas agresivas para recuperar el oro y la plata.

Formas químicas de los compuestos del cianuro, transporte y almacenamiento

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^4) gaseoso. Posteriormente, el cianuro de hidrógeno gaseoso se puede combinar con hidróxido de sodio (NaOH) para producir cianuro de sodio (NaCN) y agua (H_2O). Luego se elimina el agua mediante secado y filtrado y el cianuro de sodio se convierte en briquetas blancas y sólidas. 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 etiquetados y sellados para evitar que se humedezcan. En algunas circunstancias, las briquetas se disuelven y la solución de cianuro se transporta en forma líquida en camiones tanque especialmente diseñados.

Durante el traslado del cianuro, este debe ir acompañado de Hojas de Seguridad (MSDS) donde figuran los datos químicos y su toxicidad, instrucciones en caso de accidentes, número de teléfono para solicitar ayuda en casos de emergencia y datos del fabricante. Cuando el material sale de la planta productora se realiza un

⁴ Ácido cianhídrico, compuesto químico de cianuro libre cuyo equilibrio químico respecto a ion cianuro (CN^-) depende del pH del sistema.

inventario de embarques y dicho inventario debe cotejarse con los registros de entrega.

A nivel mundial existen tres productores primarios de cianuro sólido, líquido y gaseoso: Dupont, en Estados Unidos; ICI, en Inglaterra; y Degussa Corporation, en Alemania. La producción anual mundial es de aproximadamente 1.4 millón de toneladas de HCN, de la cual el 20% se destina a la actividad minera y el 80% restante se usa en actividades industriales (producción de químicos).

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 en sus contenedores originales, denominados “cajas paleta”, dispuestos sobre pisos impermeables, generalmente de concreto, con adecuada contención en caso de derrame. Los contenedores vacíos se lavan y el agua de enjuague se utiliza en la planta de recuperación de oro y plata o se procesa mediante el sistema de tratamiento de efluentes residuales.

Los efluentes residuales de los procesos hidrometalúrgicos pueden contener tres tipos principales de compuestos de cianuro: cianuro libre, cianuro débilmente complejo y cianuro fuertemente complejo. Los tres compuestos de cianuro constituyen el cianuro total. La química de estos tres tipos de cianuro determina su comportamiento en el medio ambiente.

Química del cianuro, generación y tratamiento de residuos

El proceso vigente de la cianuración fue patentado por McArthur y los hermanos Forrest en 1887 y 1888. 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 inicios del siglo XX, el uso de cianuro para extraer oro y plata ya era una tecnología metalúrgica plenamente establecida. La extracción de oro utilizando cianuro se lleva a cabo de acuerdo a la

siguiente reacción:



Durante el proceso de cianuración se produce una gran variedad de residuos con cierto grado de peligrosidad, por su toxicidad para la biota⁵. El cianuro puede dividirse en varias clasificaciones por lo que es fundamental definir la clase de cianuro que se va a eliminar, por ejemplo: cianuro libre, cianuro disociable en ácido débil (WAD) y cianuro total⁶. Comúnmente, se llama cianuro al cianuro de hidrógeno (HCN) y a sus sales, cianuro de sodio (NaCN) o cianuro de potasio (KCN), y no solo al compuesto base cianuro que da origen a la denominación⁷. El ácido cianhídrico (HCN) es la forma más tóxica del cianuro, porque es inestable y altamente volátil. La vida media del HCN en la atmósfera es de 1 a 3 años. La mayor parte del cianuro en el agua superficial formará HCN y se evaporará.

⁵Una molécula de cianuro es fácilmente capaz de unirse con otro átomo o compuesto, el tipo de átomo o compuesto al que la molécula de cianuro se une, determina las propiedades y toxicidad del producto resultante.

⁶ Botz, M.M., 2001. Overview of cyanide treatment methods. Mining Environmental Management, Mining Journal Ltd., London, UK. pp. 28-30.

⁷ Ramírez, A.V. 2010. Toxicidad del cianuro. Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. An.Fac.Med. 71(1), pp. 54-61.

Formas químicas del cianuro y sus afectaciones ambientales

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 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 parámetro pH⁸. Casi todo el cianuro libre está presente como HCN cuando hay abundantes iones de hidrógeno, es decir, a valores de pH de 8 y menos. Este HCN en estos casos 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. Estas formas de cianuro 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 procesos de tratamiento y mecanismos de atenuación.

En la naturaleza, una de 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 es generalmente de 8, de tal forma que el HCN se volatiliza y dispersa. Sin embargo, esto no sucede en cuerpos de agua con valores de pH menores a 8.

⁸ pH indica la concentración de iones hidrógeno, $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$

Complejos de cianuro

Las soluciones de cianuro además de reaccionar con el oro y la plata, también reaccionan con otros metales. El mineral casi siempre contiene otros metales como el hierro, cobre, zinc, níquel, 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 la lixiviación con cianuro puede contener de 0.5 a 1 gramo de oro por tonelada (1 ppm), y la concentración de hierro de las rocas puede ser en promedio de 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, por lo que es necesario llevar un control periódico de las emisiones de metales asociados a la mena. La Tabla 2 muestra concentraciones promedio de metales cuando el mineral que los contiene se lixivia con soluciones de cianuro.

Tabla 2. Análisis de soluciones estériles⁹

	Concentración (mg/L)
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

⁹ Scott, J.S., 1993. Status of Gold Mill Waste Effluent Treatment, Informe para CANMET, Recursos Naturales Canadá.

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, se denominan “complejos”. Algunos complejos son muy estables, mientras que otros se destruyen fácilmente; sin embargo, es posible definir la estabilidad relativa de estos complejos de cianuro para elegir metodologías eficaces de detoxificación.

Complejos débiles (WAD) y fuertes (SAD) de cianuro

Los complejos de cianuro se dividen en “débiles” y “fuertes”. Los complejos débiles de cianuro con frecuencia denominados cianuros disociables en ácidos débiles o cianuros WAD, pueden disociarse en solución y producir concentraciones significativas de cianuro libre hacia el medio ambiente. 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.

Los complejos fuertes de cianuro se degradan mucho más lentamente que el cianuro WAD 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 de este reactivo para la extracción del oro del mineral. Una vez que el oro entra a la solución ligado al cianuro, permanece complejo con éste, hasta que las condiciones del proceso se cambian con el fin de removerlo de la solución. Para la mayoría de las operaciones 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, en especial de la radiación ultravioleta.

Uso del cianuro

El cianuro tiene la facilidad de combinarse con otras sustancias y es un reactivo que se consigue fácilmente a un precio razonablemente bajo y fácil de manejar¹⁰. La importancia del cianuro en la minería es que es uno de los pocos reactivos químicos que disuelven plata y oro en solución acuosa; sin embargo, el cianuro tiene amplias aplicaciones en la industria de pegamentos y plásticos, solventes, herbicidas, plaguicidas y fertilizantes.

Técnicas utilizadas para neutralización y/o destrucción del cianuro

La mayoría de los tratamientos de cianuro operan con el principio de convertir el cianuro a compuestos menos tóxicos a través de una reacción. Las técnicas más comunes son:

Recuperación del cianuro: Conocida como AVR (Acidificación-Volatilización-Re-neutralización), consiste en la adición de ácido sulfúrico para convertir el cianuro libre y algunos compuestos de cianuro WAD en ácido cianhídrico. A un $\text{pH} < 8$ el cianuro es convertido a HCN y entonces es separado de la solución con una corriente de aire, éste se absorbe en una solución alcalina de hidróxido de sodio produciendo NaCN. Este proceso ha sido utilizado en alrededor de diez sitios en el mundo. Las recuperaciones de cianuro van desde un 70% a más del 95% en los lodos y soluciones.

Atenuación natural: Se ha observado en presas de jales de procesos de molienda y lixiviación de minerales, que la concentración de cianuro disminuye significativamente conforme el tiempo de almacenamiento se incrementa. Dicha diferencia es más notable cuando la temperatura aumenta. La atenuación natural consiste en la volatilización natural del cianuro, pero también son importantes la oxidación, hidrólisis, fotólisis y la precipitación. La atenuación natural ocurre cuando todas las soluciones o jales con cianuro son expuestas a la atmósfera.

Biodegradación: La degradación biológica del cianuro aprovecha la capacidad de

¹⁰ Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. Informe quincenal 54. 2007.

ciertos microorganismos (principalmente bacterias), que utilizan compuestos cianurados como fuente de carbono y nitrógeno convirtiendo el compuesto tóxico en sustancias inocuas¹¹. El proceso utiliza reactores biológicos rotatorios donde películas de bacterias se encuentran adheridas a discos giratorios que rotan de manera lenta para permitir el adecuado contacto, y degradación de cianuro, entre el microorganismo y el efluente cianurado. Los factores ambientales más críticos para una buena eficiencia del tratamiento incluyen pH, temperatura, niveles de oxígeno y la disponibilidad de nutrientes. La aplicación principal de este proceso es para flujos continuos con temperaturas mayores de los 10 °C¹².

Precipitación: La precipitación de cianuro se lleva a cabo mediante la adición de hierro, el cianuro libre WAD y total reaccionarán con el hierro para formar una gran variedad de compuestos solubles e insolubles. La aplicación de este proceso es limitada, es para situaciones donde las reacciones de precipitación pueden ser controladas y los sólidos precipitados puedan separarse y ser eliminados. El proceso es eficiente y si se efectúa en un pH de aproximadamente 5.0 a 6.0 y el hierro se agrega como sulfato ferroso.

Oxidación química: Es una de las técnicas más usadas para la destrucción del cianuro. En la actualidad se utiliza la cloración alcalina (Cl_2), óxido de azufre/aire (SO_2 /aire) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), siendo capaces de satisfacer exigentes normas de descarga. Dichos procesos exigen la realización de pruebas en muestras representativas de materiales específicos *in situ* antes del diseño final¹³

Cloración alcalina: Consiste en la reacción en dos pasos para la destrucción del cianuro, el primer paso del cianuro es convertirlo a cloruro de cianógeno (CNCl) y en el segundo paso el CNCl es hidrolizado a cianatos. La reacción se efectúa a un pH >10 para asegurar que el CNCl es completamente hidrolizado a cianato. En la

¹¹ El mecanismo de algunos hongos y bacterias es asimilar el cianuro y usarlo como fuente de nitrógeno y/o carbono, teniendo como intermediario al amonio (NH_3) [Guerrero, J., Cianuro: Toxicidad y destrucción biológica. Revista El Ingeniero en Minas, Año X-Número 35, pp. 22-25. 2007.

¹² Botz, M.M. "Overview of Cyanide Treatment Methods", Mining Environmental Management, Mining Journal Ltd., London, UK, pp. 28-30, 2001.

¹³ Logsdon, MJ, Hagelstein, K, Mudder, T.I., "El manejo del cianuro en la extracción de oro" Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente. Pp. 47.2001.

presencia de un exceso leve de cloro, el cianato se hidroliza para producir amoníaco en una reacción tipo catalítica. Si hay cloro en exceso disponible la reacción continúa a través del punto de ruptura de la cloración, en donde el amoníaco es completamente oxidado a gas nitrógeno. La principal aplicación del proceso es para soluciones en vez de pulpas debido al alto consumo del reactivo. Es efectivo para la destrucción de cianuro libre y WAD en solución. Las desventajas son los costos del reactivo que pueden ser muy altos, debe controlarse el pH de la solución para evitar la formación de cloruro cianógeno, a condiciones ambientales no se eliminan los complejos de hierro-cianuro, deben de removerse los productos de la cloración alcalina, como cloro libre y cloraminas ya que son tóxicos para la vida acuática. Para límites muy bajos deben de removerse los complejos de hierro-cianuro y metales con un tratamiento adicional de amonio. No se recupera el cianuro si hay concentración importante de sulfuros reducidos o hierro, por lo que el cianuro no se destruirá fácilmente y el consumo de reactivos será excesivo.

Proceso Inco: Este proceso tiene dos versiones: (i) el primero desarrollado por Heath Steel Mines Ltd y la patente asignada a Noranda Incorporated. El proceso Noranda utiliza el SO_2 puro o líquido de calidad industrial, el cual es añadido en la solución o pulpa para bajar el pH hasta un intervalo de 7 a 9. Posteriormente se añade una solución de sulfato de cobre en proporción adecuada para generar un efluente que contenga la concentración de cianuro deseada¹⁴. (ii) el segundo es el proceso de dióxido de azufre y aire, y fue desarrollado por INCO Limited en 1980. El método utiliza SO_2 y aire en presencia de cobre soluble como catalizador para oxidar el cianuro a cianato (OCN^-), compuesto menos tóxico. La principal aplicación es en pulpa de jales, pero también es efectivo para el tratamiento de soluciones para la oxidación de cianuro libre y WAD. El cianuro de hierro es removido en el proceso a través de la precipitación de compuestos insolubles de cianuro de cobre-hierro. Las ventajas del método son su efectividad para el tratamiento de pulpas, soluciones clarificadas y decantadas, así como de soluciones

¹⁴ Mudder, I.T., Botz, MM., Smith, A. "Chemistry and treatment of cyanidation wastes", Second Edition, Mining Journal Books LTD London. 2001.

de lavado de terreros de lixiviación. También es adecuado para tratamientos por lotes o continuos, donde se eliminan todas las formas de cianuro incluyendo los complejos de cianuro de hierro. Los costos de inversión y operación son similares o menores que la de otros tratamientos químicos, se forman compuestos intermedios no tóxicos, y puede reducirse el cianuro total a menos de 1 ppm y se eliminan los metales pesados por precipitación. Las desventajas son que los costos de los reactivos y consumos pueden ser elevados, además de que es posible que se produzcan cantidades no deseables de sulfato de calcio y sólidos totales disueltos. Asimismo, se requiere pagar una tarifa por el uso de la patente, así como de un tratamiento adicional para destruir el cianuro total, tiocianato, metales y amonía y cumplir con la normatividad. La efectividad del tratamiento depende de la composición de la pulpa, requiere de un control estricto de variables del proceso y no se tienen datos toxicológicos de los efluentes generados por el tratamiento¹⁵.

Peróxido de Hidrógeno: Se han desarrollado dos procesos que utilizan el peróxido de hidrógeno para la destrucción oxidante del cianuro libre y complejos de cianuro. (i) El primer proceso es conocido como proceso Kastone, fue originalmente propuesto por Dupont, 1974 y por Mather y Dvries, 1981. Este consiste en utilizar una solución de H₂O₂ ¹⁶ al 41% como unos pocos mg/L de formaldehído y cobre¹⁷. (ii) El segundo proceso fue desarrollado por Degussa Corporation, empleando una solución de H₂O₂ y sulfato de cobre en varias concentraciones, aunque es común no emplear las sales de cobre, debido a la presencia de este metal dentro de los minerales tratados. Este proceso es similar al proceso INCO. Las ventajas de este método es que los costos de inversión son menores, con diseño y operación simples, pueden eliminarse todas las formas de cianuro incluyendo los complejos de hierro, se reducen los metales pesados por precipitación, operación por lotes o continua, aplicable a pulpas, soluciones clarificadas y de lavado de terreros, no se requiere un monitoreo preciso del pH, mínimos requisitos de automatización, no

¹⁵ Aguayo Salinas, S., Encinas Romero, M. "Tratamientos de residuos y jales de proceso de cianuración" Colección de Textos Académicos, Editorial UniSon. 2004.

¹⁶ El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se conoce como agua oxigenada y es un líquido incoloro a temperatura ambiente, con sabor amargo, inestable y que se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor.

¹⁷ Linares Gutiérrez, NM. "Manejo ambiental de residuos de cianuración de oro en el Laboratorio Metalúrgico de la Facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann". Tesis de Maestría en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible. 2008.

genera cantidades grandes de lodos residuales. Las desventajas es que los consumos y costos de reactivos pueden ser muy altos, no se elimina el amonio y tiocianato, puede requerirse un tratamiento adicional si el efluente obtenido no cumple con las normas ambientales y no se recupera el cianuro.

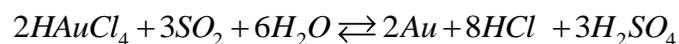
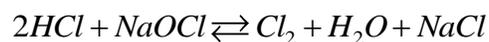
Métodos alternativos para lixiviación de oro y plata

Con la reaparición e incremento en el precio de metales preciosos y el cuidado al medio ambiente ha surgido un gran interés en desarrollar nuevos reactivos lixiviantes para la disolución de oro y plata.

Existen varios métodos de extracción del oro que son poco agresivos con el medio ambiente y fáciles de ejecutar en una minería artesanal, entre los que destacan la cloración y el uso del tiosulfato.

Clorinación

El método de clorinación se basa en la reacción del ácido clorhídrico y el hipoclorito sódico para producir cloro gas (Mahlatsi, 2006). A su vez, el cloro producido reacciona con los metales presentes en las muestras, y en especial con el oro, para generar una solución clorada. El proceso finaliza con la precipitación, mediante el metabisulfito sódico, el cual reacciona con el agua en condiciones aeróbicas, generando bióxido de azufre, que es el agente precipitador, destruyendo el enlace de la solución clorada, reduciendo el oro.



Se debe controlar el potencial de oxidación (Eh) durante la reacción del ácido

clorhídrico y el hipoclorito sódico mediante el potencial redox, y este debe indicar durante todo el proceso un valor de Eh <1000 mV.¹⁸

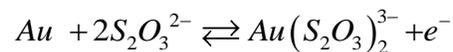
Tiosulfato de amonio

Dentro de los lixiviantes alternativos al cianuro se encuentra el tiosulfato de amonio, el cual presenta un comportamiento muy favorable para minerales que contienen cobre y cierta cantidad de materias carbonaceas, además de ser una alternativa no contaminante en comparación con la alta toxicidad del cianuro.

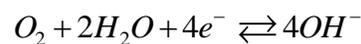
En la década de 1980 al 2000 se utilizó en la recuperación de plata complejada con tiosulfatos proveniente de tales soluciones remanentes de los procesos de fotografía y radiografía. La disolución de oro en una solución de tiosulfato de amonio es una reacción que puede ser catalizada directamente por la presencia de ión cúprico.

Reacciones de lixiviación de oro con tiosulfato (proceso electroquímico).

Oxidación del oro:



Requiere un oxidante, ejemplo Reducción de oxígeno disuelto:



Reacción completa:



Generalidades del tiosulfato y sus usos

Propiedades físicas: se presenta en forma de cristales tabulares anhidros, incoloros, perteneciendo al sistema monoclinico. Es muy soluble en agua, ligeramente soluble en acetona e insoluble en éter y alcohol. Su estabilidad se

¹⁸ Marsden, J. y House, I., *The Chemistry of Gold extraction*, 2nd Edition, 185-188, SME 2006

incremento considerablemente en una atmósfera conteniendo amoníaco.

Propiedades químicas: el ion tiosulfato $S_2O_3^{2-}$ es el anión del ácido tiosulfúrico $H_2S_2O_3$. Este ácido es aún más inestable que el ácido sulfuroso y al separarlo en estado libre se descompone formando S y SO_2 . Entre los tiosulfatos que son solubles en agua, están los de los metales alcalinos, el de amonio, así como el de estroncio, zinc, cadmio, níquel, cobalto, manganeso, entre otros. Los demás tiosulfatos son poco solubles. La reacción de las soluciones acuosas de los tiosulfatos de los metales alcalinos es prácticamente neutra, ya que el $H_2S_2O_3$ es un ácido bastante fuerte pero inestable. Soluciones concentradas de tiosulfato de amonio se descomponen lentamente a temperaturas superiores a $50^\circ C$ con formación de azufre y sulfato.

Usos: Su principal uso es en la fotografía. Reacciona considerablemente más rápido que el tiosulfato de sodio en los baños fijadores. Además posee otras ventajas: las soluciones fijadoras pueden ser usadas alrededor de dos veces más que las correspondientes soluciones de sodio; requiriéndose además un periodo de lavado más corto y la recuperación de la plata de las soluciones descartadas es más sencilla, ya que las sales de amonio pueden ser volatilizadas mediante calentamiento. Se utiliza también en la agricultura como un mejorador de suelos (fertilizante), en la industria minera se usa para la extracción de minerales de oro y plata, ya que posee un poder complejante en estos metales y sus compuestos.

CAPÍTULO III

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA PUBLICACIÓN DE LA NORMA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE CONDICIONES PREVIAS A SU ENTRADA EN VIGOR (ESCENARIO BASE)

En los años ochenta no estaban muy definidos los estudios de impacto ambiental, de parte de los titulares de las concesiones mineras y de plantas de beneficio; como se enumera en el artículo 78 de la Ley Minera publicada en el Registro oficial 511 del 20/01/2009 que dice: los dueños de concesiones mineras y plantas de beneficio, fundición y refinación previamente a la inicialización de la actividad minera en todas sus fases lo que se estableció fue efectuar y presentar estudios de impacto ambiental en la fase de exploración inicial, estudio de impacto definitivo, planes de manejo ambiental y sociales, derivados de sus actividades de estudio que aprobaría la Secretaria del Medio Ambiente con expedición de la licencia ambiental.

Antes de 1990, se eludían los impactos ambientales causados por la minería superficial, minería a tajo abierto y la explotación subterránea, los cuales conllevaron a impactos ambientales asociados al procesamiento (beneficio de los metales) que se encuentran en los depósitos de desecho, terrero, jaleros, etc.

Las operaciones mineras de la década de los ochenta a los noventa fueron cerradas por los bajos precios del oro y procesos metalúrgicos no competitivos, las leyes de oro oscilaban entre 1.5 a 3 g/ton de Au, en la actualidad van de 0.4 a 0.6 g/ton de Au, siendo redituables por los grandes volúmenes con los que se trabaja de 5,000 a 20,000 ton/día.

Las leyes de oro y plata eran altas (3 gAu/ton y 200 gAg/ton), por lo cual se

trabajaban en procesos cerrados como los tipo tanque Pachuca agitados por aire, así como en tanques súper agitadores con inyección de aire. Sin embargo, los costos de molienda y clasificación eran altos, por ejemplo en Tetuachi, Municipio de Arizpe, Sonora, desde el año 1975 al 1987 se trabajó la mina de La Chispa. Esta planta fue cerrada debido a la escasez de mineral rico en oro y plata. Así como por la peligrosidad que involucraba su cercanía a 300 m con el río más próximo (Río Sonora).

Hoy en día las leyes marginales de 0.4 a 0.6 gAu/ton y con 3 a 10 gAg/ton se obtienen beneficios económicos en su explotación debido a las nuevas tecnologías como los son la cianuración, adsorción con carbón activado y recuperación por electrodeposición.

Antes de que fuera obligatorio el cumplimiento NOM-155 SEMARNAT-2007, muchas empresas mineras por comodidades descargaban los jales en los sitios más cercanos a ríos, arroyos, etc., provocando resultados ambientales fatales, mismos que se asocian con las descargas abiertas de dichos jaleros. En el presente, ésta es una práctica rechazada y castigada por las autoridades ambientales.

El impacto más significativo de un proyecto minero era el efecto de la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos en la zona del proyecto. La pregunta que se hacía acerca del agua superficial y subterránea, era que si esta continuaría siendo apta para el consumo humano, así como si la calidad del agua seguiría siendo la adecuada para mantener las especies acuáticas nativas y la vida silvestre de la región.

Una problemática adicional era la lixiviación de contaminantes, debido al drenado ácido, impactando así a la calidad del agua relacionada con el beneficio de los minerales de oro, plata y cobre. El drenado ácido es la reacción que tienen los minerales sulfurosos al estar en contacto con las aguas meteóricas, dando como resultado la lixiviación de los sulfuros de hierro, provocando valores de pH ácidos, que pueden fluir desde cualquier parte de la mina donde el material sulfuroso se

exponga al aire y agua, incluyendo el material de las pilas. El drenado ácido se considera una amenaza más fuerte contra los recursos hídricos, ya que este causa devastación con daños a largo plazo en ríos, lagos, arroyos y la vida acuática.

Operaciones mineras establecidas previas a la Norma Oficial Mexicana NOM-155 SEMARNAT-2007

En la década de los noventa, las empresas canadienses desarrollaron múltiples proyectos en México. Como ejemplos: Morgain Minerals Incorporated ubicado en la Reserva del Vizcaíno, Baja California, el proyecto de Scorpio Mining Corporation en la reserva estatal del Mineral de Nuestra Señora en Cosalá, Sinaloa. En el caso de La Colorada y la Trinidad en Sonora y Sinaloa respectivamente, ambas propiedades de la empresa canadiense El Dorado Gold Corporation, la cual liquidó sus propiedades y abandonó el país. De igual manera la empresa Geomaque, en el municipio de Santa Ana, Sonora dejó sus propiedades a los contratistas, como pago del manejo de material minado, sin que hubiera una etapa de cierre de la mina, este material posteriormente fue reprocesado por una empresa nacional, la cual continuó lixiviando el mineral con cianuro y ha instalado una nueva planta química metalúrgica utilizando carbón activado para la recuperación de los valores de oro. La empresa *Desarrollos Prodesa* se dedicaba a la venta de materiales pétreos para caminos y carreteras, con lo cual al realizarse un análisis químico se encontraron valores de 0,4 a 0.6 g/ton de Au, lo cual hizo interesante el desarrollo de un proyecto de cianuración acoplado con carbón activado. En la actualidad se procesan los jaleros abandonados por la empresa GEOMAQUE.

A fines de los noventa, México se convirtió en el país que más atrajo las inversiones en exploración por parte de las empresas canadienses, ocupando a nivel mundial el noveno lugar. En ese tiempo, las compañías canadienses contaban con cerca de 300 propiedades distribuidas en 20 de los 31 estados de la República. El Plan Estatal de Desarrollo del Gobierno de Oaxaca en 1998-2001 registra la presencia de 20 empresas nacionales y extranjeras de mediana y gran

minería. El Departamento de Recursos Naturales de Canadá registró en el año 2001 un total de 103 empresas canadienses trabajando en México. El 80% de esta inversión se concentró en siete estados: Sonora ocupó el primer lugar nacional, seguido de Chihuahua, Zacatecas, Durango, Sinaloa, Guerrero y Jalisco. En este escenario se instalaron algunas operaciones minero - metalúrgicas previo a la entrada en vigor de la NOM-155-SEMARNAT-2007, y a la implementación del Código Internacional para el Manejo del Cianuro¹⁹. En el caso del transporte del cianuro, varias empresas en México han implementado el Código Internacional de Manejo del Cianuro.

Se tiene información de diversas operaciones de lixiviación con cianuro en varios estados de la República Mexicana, entre las que destacan: Pachuca y Real del Monte en Hidalgo, Tayoltita, Guanaceví, Bacis y La Ciénega en Durango, La Encantada en Coahuila, Ocampo, Dolores y El Sauzal en Chihuahua, Fresnillo en Zacatecas, El Cubo en Guanajuato y La Francisca en Aguascalientes, Cosalá y La Trinidad en Sinaloa, además de La Colorada, Santa Gertrudis, San Francisco, La Choya en Sonora.

Pachuca–Real del Monte, Estado de Hidalgo

Pachuca–Real del Monte se distingue por ser uno de los distritos mineros productores de plata más antiguos en México, ya que sus minas fueron descubiertas en 1552. El distrito se localiza al norte de la cuenca de México en el

¹⁹ El Código del Cianuro se centra exclusivamente en el manejo seguro del cianuro que es producido, transportado y utilizado en la recuperación del oro, así como en los residuos del tratamiento y las soluciones de lixiviación. El Código del Cianuro fue en un principio creado para operaciones de minería del oro, y para tratar el tema de la producción, transporte, almacenamiento y uso del cianuro, así como el desmantelamiento de instalaciones de cianuro. El Código incluye también requerimientos relacionados con el aseguramiento financiero, la prevención de accidentes, la respuesta ante emergencias, la capacitación, la información pública, la participación de interesados y los procedimientos de verificación. Los productores y transportistas de cianuro están sujetos a aquellas secciones del Código del Cianuro correspondientes, identificadas en sus respectivos Protocolos de Verificación.

El código no se ocupa de todas las actividades de seguridad o medio ambiente que puedan estar presentes en las operaciones de minería del oro, tales como el diseño y construcción de diques de cola o el cierre a largo plazo y la rehabilitación de las operaciones mineras.

actual estado de Hidalgo, en la Sierra de Pachuca, en la provincia metalogenética denominada Eje Neovolcánico Mexicano, lo cual explica la presencia de depósitos polimetálicos de plata, plomo, zinc, cobre y oro. Este distrito se divide en dos áreas: Pachuca y Real del Monte. Debido a su proximidad a la Ciudad de México (se encuentra a casi 100 km de distancia), el eje Pachuca–Real del Monte recibió un especial interés en la búsqueda de metales preciosos, base de las economías colonial e independentista, y se transformó en el centro minero productor de plata más cercano a la capital del territorio, lo que facilitó la continuidad en la explotación de la plata, pese al carácter cíclico característico de la actividad minera.

Mina La Colorada, Estado de Sonora

Inició operaciones en el 1993 con el nombre de Exploraciones El Dorado S.A de C.V, cambiando esta de razón social a finales del año 2000, siendo los nuevos propietarios el Grupo FG, S.A de C.V, el cual dio seguimiento a todas las actividades que se debían de cumplir de acuerdo al plan de cierre que se estableció en 1999. El plan de cierre se presentó en 1994, notificándose varios cambios debido a las ampliaciones que se fueron haciendo durante la vida activa de la mina, presentando en 1999 el plan definitivo ante las dependencias correspondientes (INE, SEMARNAT y PROFEPA para su aprobación).

Actualmente la *Minera Pitalla*, subsidiaria de *Argonaut Gold*, reactivó la mina de “La Colorada”, en su fase 1 comprende el reprocesamiento de antiguo material en bruto y algunos depósitos de residuos. La fase 2 incluye la construcción de plataformas y la planta de adsorción, desorción y recuperación, junto con el procesamiento de mineral proveniente del depósito.

Mina Santa Gertrudis, Estado de Sonora

Inició operaciones en el año de 1984 con la Minera Zapata iniciando exploraciones en la región de Cucurpe, debido de la presencia de varios trabajos a pequeña minería. En octubre del mismo año, se encuentran nuevos depósitos de oro a la

par con tres minas que fueron trabajados en el distrito por Pequeños Mineros (La Amelia, Carmen y la Mina Maribel), estas minas cerraron a fines de la década de los 90's.

Mina Guanaceví, Estado de Durango

Ubicación: A 260 kilómetros al noroeste de la ciudad de Durango, en el estado del mismo nombre. El acceso es por la carretera estatal con rumbo a la localidad de Guanaceví. La propiedad cuenta con un área de 4,100 hectáreas en el quinto distrito minero de tipo histórico más grande en México.

Esta empresa opera 3 minas que alimentan una planta de lixiviación central a una tasa de 1,200 toneladas diarias para producir barras doré. El yacimiento consta de vetas epitermales de baja sulfuración que tienen normalmente una longitud de miles de metros, una profundidad de 600 metros y un grosor de 1 a 5 metros.

Mina Santa Elena, Estado de Sonora

Localizada en el municipio de Banamichi, 150 km al noreste de la ciudad de Hermosillo. Desde el 2010 la empresa canadiense Silver Crest ha estado trabajando en lixiviación en montones (heap leaching), y a partir del 01 de agosto de 2014, iniciaron la expansión y las operaciones de la mina subterránea, se cargaron de nuevo 3000 toneladas de mineral de alta ley al molino para lixiviación dinámica y planta de procesamiento y decantación Merrill Crowe en mina Santa Elena. La primera fase de la expansión de la mina se ha completado y la empresa está operando un promedio de 1300 toneladas por día de este año, incrementando hasta 1500 toneladas diarias a fin de año. Los estudios indican unos 8 años adicionales de las reservas de la mina, las tasas de recuperación promedio en el 2014 fueron 90% para el oro y el 66% de la plata.

Mina de Plata La Encantada, Estado de Coahuila

Es una mina propiedad de First Majestic Silver Corp., posee una planta de cianuración con capacidad de 4,000 toneladas diarias. La propiedad comprende

4,076 hectáreas concesionadas para la explotación minera, así como 1,343 hectáreas superficiales. La Encantada ha estado en el portafolio de activos de First Majestic desde 2006; y desde ese entonces, se ha convertido en la mayor operación de la compañía.

La Mina de Plata La Encantada se localiza al norte del país, a 708 km al noreste de la ciudad de Torreón, en el estado de Coahuila. El acceso a la mina es a través de la ruta Múzquiz- Boquillas del Carmen. La infraestructura incluye una pista de aterrizaje, hospedaje, oficinas, edificios auxiliares, laboratorio, restaurante, una tienda y un centro de recreación.

El Sauzal, Estado de Chihuahua

El Sauzal es una mina a cielo abierto y operación de molienda convencional. El método de procesamiento es de Circuito de Lixiviación (Cianuración) Dinámico acoplado con la Adsorción de oro en Carbón Activado en Pulpa (CIP), y su capacidad de molienda y procesamiento es de aproximadamente 5,800 toneladas por día.

El Sauzal se localiza cerca del pueblo de Urique, en el estado de Chihuahua, al oeste de la cadena montañosa llamada Sierra Madre Occidental. El cinturón de oro de la Sierra Madre se conoce mundialmente como una región tradicional de minería de oro, plata y cobre. El Sauzal está aproximadamente a 200 kilómetros al noreste de Los Mochis, en Sinaloa, y a 550 kilómetros al sur de la ciudad de Chihuahua.

El Sauzal es un depósito epitermal de alta sulfuración definido por mega brechas y eventos de flujo volcánico. Se trata de un cuerpo mineral con óxido diseminado de alta ley y mineralización aurífera asociada con una alteración argílica avanzada. El oro está diseminado en el cuerpo mineral y se encuentra con menor frecuencia a lo largo de las fracturas en las que es visible.

El Sauzal fue la primera operación minera en América Latina en obtener el reconocimiento con Certificación, del Código Internacional del Cianuro. Esta

certificación se enfoca exclusivamente en el manejo seguro del cianuro, en los jales de molino de cianuración y las soluciones de lixiviación.

Mina Peñasquito, Estado de Zacatecas

Localizado en el noreste del estado de Zacatecas, al norte del centro de México, a 14 km al este del pueblo de Mazapil. Se trata de una región minera histórica, y en la zona hay disponibles fundiciones y mano de obra calificada.

El depósito de Au-Ag-Zn-Pb se relaciona con una brecha que corta unidades clásticas del Cretácico. La cubierta del depósito consiste de un conjunto central de sericita, pirita-cuarzo-calcita, y un halo secundario de pirita y alteración de carbonato. Las láminas se ubican en la caliza subyacente valorada en oro, plata, zinc y plomo en profundidad.

Peñasquito está incorporado al Programa Nacional de Auditoría Ambiental. Así también se ha implementado un sistema amplio de manejo, salud y seguridad ambiental enfocado a mejorar el desempeño al medio ambiente, seguridad y salud en las áreas de trabajo.

Los Filos, Estado de Guerrero

La mina Los Filos está ubicada en el distrito minero de Nukay, en el centro del estado de Guerrero, al sur de México, en el pueblo de Mezcala, aproximadamente a 230 km al sur de la Ciudad de México. La vía de acceso es la Carretera Federal 95, una autopista importante entre la Ciudad de México y Acapulco.

La Cuenca de Morelos y Guerrero, en el sur de México, donde se ubica la operación, es una cuenca más o menos circular ocupada por una gruesa secuencia de sedimentos de carbonato de una plataforma del Mesozoico que abarca las formaciones Morelos, Cuautla y Mezcala, y que ha sido intrusada por varios cuerpos graníticos.

Los cuerpos minerales en Los Filos y El Bermejil consisten de skarn de hierro y oro con cantidades menores de Cu y Ag en contacto con la caliza intrusiva.

La mineralogía de los cuerpos minerales de contacto es predominantemente de óxidos de hierro con Au, en asociaciones con menores cantidades de Cu, Pb, Zn y As, ocurriendo en carbonatos y óxidos, así como en sulfuros. Los minerales primarios son hematita, magnetita y jaspe, con menores cantidades de pirita, calcopirita y arsenopirita.

La mina Los Filos obtuvo la licencia maestra Ambiental emitida por la SEMARNAT, la cual autoriza la extracción y beneficio de oro y plata en las etapas de producción. En el 2010, la mina Los Filos logró la certificación completa bajo el Código Internacional de Manejo de Cianuro para la Manufactura, Transporte y Uso de Cianuro en la producción de Oro.

Cerro de San Pedro, Estado de San Luis Potosí

Minera San Xavier se encuentra en el Municipio de Cerro de San Pedro en el Estado de San Luis Potosí. El mineral de Cerro de San Pedro fue descubierto desde el siglo XVI dando origen a la fundación de la ciudad de San Luis Potosí. Cerro de San Pedro tiene una importante historia y tradición minera. A lo largo de los siglos, la actividad minera en Cerro de San Pedro ha jugado un papel preponderante en el desarrollo tanto social como económico de la región.

La mina se encuentra a 20 km al noroeste de la Ciudad de San Luis Potosí, capital del Estado, con una población alrededor de un millón de habitantes. La ciudad cuenta con una importante base industrial lo que permite el acceso a infraestructura, recursos y proveedores locales. El aeropuerto internacional de San Luis Potosí se encuentra a una corta distancia de la mina.

Unidad Santa Francisca, Estado de Aguascalientes

En el Estado se encuentra explotando el Grupo FRISCO, S.A. de C.V., con la compañía Real de Ángeles, S.A. de C.V., la cual realiza una inversión de 40 millones de dólares, en el Estado. Esta empresa minera tiene una planta de beneficio con capacidad instalada plata de 3,500 ton/día, empleando el sistema de flotación (proceso de beneficio con molienda SAG, semiautógeno sin trituración).

Contando con 700 empleados, la vida útil de esta mina es de 9 años, pretendiendo con la exploración que se lleva a cabo incrementarla a 20 años, el método de extracción es por medio de rampa y tiro, beneficiando Zn, Ag, Pb, Cu.

Los proyectos son: Santa Francisca, El Orito y Sagrado Corazón, ubicando en los municipios de Asientos y Tepezalá, Ags. Además se tiene la compañía minera canadiense CANDYMIN, S.A. DE C.V., con una vida útil de 7.7 años en el Proyecto El Porvenir, el cual ya se tienen 14 millones de toneladas con leyes de 0.75 g/t de Au, con un sistema de operación de Heap Leaching (lixiviación en montones), este proyecto se ubica en el municipio de Asientos, en las minas de El Porvenir, El Orito y San Jerónimo, que están sobre la misma veta.

Según la Manifestación de Impacto Ambiental para un proyecto de mina de oro en 2008, en los siguientes puntos se resume el proceso de operación para extracción de oro y plata común en los años previos a la entrada en vigor de la NOM-155-SEMARNAT-2007:

- 1. Se reduce el tamaño del mineral mediante una quebradora primaria giratoria triturando el mineral procedente de la mina.*
- 2. Se apila el mineral triturado para ser enviado a quebradora secundaria por medio de bandas.*
- 3. El mineral se reduce a tamaño más pequeño con quebradoras secundarias y terciarias hasta 3/8 pulgada (aprox 1 cm).*
- 4. El mineral ya triturado es apilado y se transporta a patios de lixiviación mediante bandas.*
- 5. El mineral ya depositado en el patio se riega con solución de cianuro de sodio para lixiviar el oro y la plata.*
- 6. Los valores de oro y plata en solución son recuperados pasándola por uno de los dos circuitos de columnas de carbón activado que se tienen.*
- 7. El carbón ya cargado de valores es despojado con solución caliente de*

sosa cáustica y cianuro para posteriormente ser reactivado.

- 8. Los valores de oro y plata en solución son recuperados como lodos pasando la solución rica del despojo del carbón por un cátodo de malla de acero inoxidable en una celda electrolítica.*
- 9. El lodo ya seco se trata con fundentes para obtener una barra de oro-plata, Dore, el cual es el producto final del proceso.*
- 10. Los reactivos que se almacenan, preparan y se aplican al proceso son: cianuro de sodio, sosa cáustica, ácido clorhídrico, cal y anti incrustante.*

Situación Actual

Anteriormente la carga de mineral sobre las geomembranas, se hacía por medio de los “yuckles” (camiones de volteo que manejan 200 y 300 toneladas de mineral), los cuales dañaban las geomembranas. Actualmente a la entrada en vigor de la *NOM 155 SEMARNAT 2007*, todas las operaciones de lixiviación utilizan la carga de mineral en los terreros por medio de bandas transportadoras, las cuales pueden moverse en diferentes áreas de lixiviación (por eso se les llama comúnmente “chapulines”). Se tiene control de humedad, utilizando la técnica de aglomeración, lo cual permite un mayor amortiguamiento y se evita la generación de polvos. Se tiene un mejor diseño en los ángulos de talud, para prever canalizaciones en caso de lluvias extremas.

Actualmente para el control ambiental se cuentan con estaciones meteorológicas para el monitoreo de Precipitaciones, Vientos, Temperaturas, Radiación Solar.

Referente a la química del cianuro, se tiene la cultura de impartición de cursos de capacitación para los nuevos empleados, personal de lixiviación, contratistas. Los cursos tratan sobre salud ambiental, buenas prácticas del cianuro y primeros auxilios.

Se tienen bien localizados los señalamientos de tuberías y áreas de preparación de soluciones con cianuro.

En las piletas de soluciones cianuradas se han instalado un sistema de piezas de plástico en la superficie, con el propósito de aislarlas y de que las aves no se acerquen a tomar de esta agua. Con esta técnica también se evita la volatilización de HCN, que al igual que la mayoría de los gases, se separa del agua y escapa al aire.

Actualmente existe un control estricto de seguridad debidamente documentado en cuanto al transporte, almacenamiento y manejo del cianuro. Las empresas se preocupan en la capacitación en el manejo del cianuro (briquetas y líquido), así como en la seguridad del personal en planta.

Principales afectaciones ambientales relacionadas con los sistemas de lixiviación de oro y plata

El impacto ambiental provocado por cualquier actividad minera está relacionado con cuatro factores principales:

- I. Tamaño de la explotación, que se refiere al volumen de producción de la explotación, y que a su vez influye en la producción de desechos.
- II. Localización, que se refiere al sitio en el que se lleva a cabo la explotación, las poblaciones aledañas, la topografía y el clima.
- III. Métodos de explotación, que dependen del tipo de yacimiento de interés. Dentro de estos están: (a) Minería a cielo abierto o minería superficial; (b) Minería subterránea; (c) Minería por lavado y dragado.
- IV. Características de los minerales y de su procesamiento, que se refiere al hecho de que la naturaleza del mineral determina el tratamiento a utilizar. Dentro de esto los minerales son: (a) No metálicos, como los materiales de construcción y que requieren poco o nulo tratamiento químico, y (b) Metálicos, que requieren procesamiento físico y uso de reactivos químicos.

En el caso de la explotación por oro y plata, la implementación de la tecnología de lixiviación por cianuro (en sustitución de la recuperación de oro por amalgamación

con mercurio), así como los aumentos en el precio de los metales han llevado a la explotación de yacimientos con leyes variables pero que permiten la remoción de grandes cantidades de material cortical. La mayoría de las operaciones que utilizan la extracción por lixiviación con cianuro usan la minería a cielo abierto, esto requiere que la mena²⁰ triturada se acumule en montículos sobre plataformas de lixiviación que requieren tener un forro plástico o "liner" de materiales sintéticos o naturales y que se usan para evitar filtraciones.

Las principales afectaciones ambientales relacionadas con un sistema de lixiviación de oro y plata incluyen: (i) la movilidad de metales del mineral lixiviado, (ii) la pérdida de estabilidad del sistema, (iii) el potencial generador de drenaje ácido de mina. Adicionalmente a los impactos ambientales derivados de la operación del sistema de lixiviación, así como la elevada toxicidad y reactividad natural del cianuro hace que el transporte y la contención de esta sustancia sea una de las preocupaciones principales de las minas en la que se utiliza la extracción por lixiviación.

La toxicidad del cianuro se relaciona con su alta capacidad para combinarse con los metales: Fe, Ag, Au, Ni, Zn, Cd, Hg, etc. La principal afectación ambiental del cianuro a la biota deriva de la capacidad del cianuro para capturar el hierro en las células de los organismos vivos, afectando la citocromo-C oxidasa la cual posee en el centro de su compleja estructura un átomo de hierro. Como consecuencia, las células expuestas dejan de "respirar" y mueren. En una zona minera, las principales rutas de fugas de soluciones conteniendo cianuro se relacionan con:

- I. Fallas en las geomembranas colocadas debajo de los montículos de mineral, lo que puede causar filtraciones y afectaciones a los cuerpos de agua.
- II. Fallas en los embalses de almacenamiento, que aunque son diseñados para resistir grandes tormentas y crecidas, pueden afectarse en caso de eventos no comunes como huracanes.

²⁰ Rocas que contienen el mineral en concentraciones económicamente atractivas para su explotación.

III. Transporte y almacenamiento del cianuro.

Aunque se argumenta que el cianuro en presencia de oxígeno y luz solar, se descompone dando lugar a productos no tóxicos como el dióxido de carbono y nitratos, es importante conocer las condiciones de reacción, los factores que afectan la velocidad del proceso y el mecanismo de reacción y productos intermedios, ya que el cianuro necesita un medio neutro y luz solar para que tenga lugar su descomposición a productos no tóxicos. Cuando el medio es ácido el producto de la reacción es altamente tóxico, mientras que en un medio básico no ocurre la transformación. En el caso de los cuerpos de agua, la velocidad de descomposición del cianuro va a depender de cuan aireada esté el agua impactada ó contaminada. Por ejemplo, en algunos lagos la oxidación ocurre principalmente a nivel superficial por lo que es importante conocer las condiciones generales de los cuerpos de agua cercanos a los residuos mineros para poder entender mejor las reacciones y productos de la descomposición del cianuro en esos medios particulares. Esto sugiere que es necesario tener un adecuado control del pH de las soluciones cianuradas, como actualmente se regula en Canadá.

Ejemplos de casos reales de afectaciones ambientales por problemas de inestabilidad de los sistemas de lixiviación, y por la disposición inadecuada del mineral lixiviado

Casos de afectaciones ambientales en el mundo

Mina de oro Zortman-Landusky (Montana, Estados Unidos). Operada por Pegasus Gold Inc. de 1979 a 1998, fue la primera en utilizar cianuro a gran escala en la recuperación aurífera. Debido a los continuos escapes y derrames del compuesto, los efectos sobre el ecosistema del área afectada fueron devastadores. Tras la quiebra de la compañía minera, el Estado de Montana y el Departamento de Interior de los Estados Unidos comenzaron un proceso judicial para conseguir el tratamiento de la contaminación del agua por parte de la compañía, tal como

figuraba en la declaración de impacto ambiental del proyecto.

Mina de oro Summitville (Colorado, Estados Unidos). El caso de Summitville cambió la legislación en los estados de Montana y Idaho, y a la fecha sigue influyendo en las comunidades que son afectadas por la minería de oro y el proceso de cianuración. La mina Summitville, operada a más de 3.800 metros de altitud en las Montañas San Juan por Galactic Resources Ltd. de 1986 a 1992, causó múltiples derrames de cianuro y metales tóxicos que contribuyeron a graves problemas ambientales en una franja de más de 27 kilómetros del río Alamosa, del que se abastece para riego el sector agrícola del Valle de San Luís. La operación de la mina afectó diversas especies en peligro de extinción.

Mina de oro Brewer (Carolina del Sur, Estados Unidos). Operada por Brewer Gold Company hasta 1999. En 1990, tras un período de lluvias intensas, más de 40 millones de litros de solución cianurada y toneladas de sedimentos altamente contaminados fueron vertidos en el arroyo Little Fork poniendo en peligro la salud de la población y los ecosistemas. Fueron contabilizados más de 11.000 peces muertos a lo largo de 80 km. del río Lynces. El costo de la remediación tuvo que ser cubierto por el Gobierno Federal, y actualmente este enclave está dentro de la lista de Superfund Sites, siendo uno de los lugares más contaminados de los Estados Unidos.

Mina de oro Grouse Creek (Idaho, Estados Unidos). Entre 1993 y 1997 esta mina, actualmente operada por la canadiense Hecla Mining Company, contaminó las aguas superficiales y subterráneas por distintos vertidos de cianuro, alcanzando los acuíferos e impidiendo el suministro de agua potable a la población.

Mina de oro Omai (Guyana). Coparticipada por la canadiense Cambior Mining y la norteamericana Golden Star Resources. En 1995, más de 3.200 millones de litros de aguas residuales cianuradas fueron vertidas al principal río de Guyana, el Essequibo, tras la ruptura de la presa de contención de una balsa minera, amenazando la vida de los pobladores y el ecosistema.

Mina de oro Kumtor (Kyrgyzstan). Operada a 4.000 metros de altitud en las montañas Tien Shan por la canadiense Cencerra Gold Ltd. En 1998, un camión de transporte de camino a la mina originó un vertido de 1.762 kilos de cianuro que alcanzó el río Barskaun. La compañía no avisó a los residentes de la zona, que utilizaron el agua para consumo humano e irrigación hasta cinco horas después del accidente. Como resultado, casi 2.500 personas fueron envenenadas, 850 tuvieron que ser hospitalizadas y al menos hubo cuatro fallecimientos.

Mina de oro Santa Rosa (El Corozal, Panamá). Operada por la compañía minera Santa Rosa. En 1998, un derrame de cianuro impactó la quebrada El Corozal, llegando a los ríos Corita y Santa María, afectando la biodiversidad de la zona y poniendo en peligro el suministro de agua potable al distrito de Santiago de Veraguas.

Mina de oro de Aurul (Rumanía). Operada por la empresa Remin S.A. y coparticipada por el gobierno rumano y la minera australiana Esmeralda Exploration Ltd. En el año 2000, se rompió un dique de contención de la mina, provocando un desastre ecológico y social sin precedentes por el vertido de más de 100.000 metros cúbicos de lodos con metales pesados y aguas residuales con una concentración de 126 mg. de cianuro por litro. El vertido tóxico descendió por el río Lopus, afluente del Somes, alcanzando posteriormente al Tisza, en Hungría y al Danubio en Serbia y Bulgaria. Este accidente dejó sin suministro de agua potable a más de dos millones y medio de personas.

Mina de oro de Tulukuma (Papúa Nueva Guinea). Operada por la australiana Allied Gold Mining. En el año 2000, un helicóptero de la compañía perdió en vuelo una tonelada de cianuro, cayendo en una zona a 85 km. de la capital, Port Moresby, afectando a una amplia área selvática y contaminando los sistemas fluviales.

Mina de oro Lihir (Papúa Nueva Guinea). En 2001, esta explotación, operada por Rio Tinto, originó una serie de vertidos cianurados al mar, que sumados a los millones de toneladas de estériles de mina arrojados a un kilómetro de la costa

causaron una catástrofe ecológica en el entorno marino de esa zona.

A continuación se enlistan los principales incidentes que de alguna manera tienen relación con las actividades minero-metalúrgicas, causa y derrames ocasionados, en Tablas 3 y 4

Tabla 3. Cronología de principales incidentes ambientales relacionados a la minería desde 1998-2003²¹.

Año	País	Causa	Tipo de Operación	Descripción tamaño del incidente y fatalidades humanas		Cianuro presente
1998	España	Derrame de Presa	Fosfatos	50,000 m ³	No	No
1999	Filipinas	Falla de Tubería	Oro	700,000 t	No	Si
2000	Rumania	Derrame de Presa	Oro	100,000 m ³	No	Si
2000	Rumania	Derrame de Presa	Metales base	22,000 m ³	No	No
2000	Papua New Guinea	Accidente de Transporte	Oro	150 kg NaCN	No	Si
2000	U.S.A.	Derrame de Presa	Carbón	950,000 m ³	No	No
2000	Suecia	Derrame de Presa	Cobre	2,500,000 m ³	No	No
2001	Ghana	Falla de Tubería	Oro	650 m ³	No	Si
2001	China	Accidente de Transporte	Oro	11 t NaCN líquido	No	Si
2002	Australia	Accidente de Transporte	Oro	400 L NaCN líquido	No	Si
2003	Chile	Derrame de Presa	Cobre	50,000 t	No	No

²¹ T.I. Mudder and M. Botz / The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection Vol. 4, No. 1, 1303-0868, 2004, pp. 62-74.

Tabla 4. Accidentes de cianuro en el mundo en años recientes.

Lugar	Fecha	Accidente	Empresa
Rumania	30 de Enero del 2000	Baia Mare, 100 000 m ³ de aguas residuales contaminadas con cianuro afectando el río Somes y alcanzó el Danubio. Sistemas fluviales en Rumania, Hungría y Yugoslavia.	Compañía Aurul (Australia-Rumania)
Ghana	18 de Junio del 2006	Derrame de presa de jales en el arroyo Ajoo.	Bogoso Gold Limited ²²
Rumania	28 de Noviembre del 2005	Derrame de cianuro al río Tisza. El derrame alcanzó Hungría.	Bursa Mining
Filipinas	11 de Octubre 2005	Derrame de cianuro en Rapu Rapu.	Lafayette Mining
Laos, Camboya	20 de Junio del 2005	Derrame en mina de oro Phu Bia.	Pan Australian Resources
Ghana	11 de Enero del 2005	Contaminación por derrame de cianuro al Río Kubekro	Bogoso Gold Limited.
Ghana	23 de Octubre del 2004	Contaminación al río Aprepre, Egya Nsiah, Benya y Manse.	Bogoso Gold Limited
Australia	Octubre 2004	Derrame de presa de jales en la mina Kalgoorlie Gold Mine.	
Papua Nueva Guinea	7 de Agosto 2004	Derrame en la mina Misima, afectó vida marina	Placer Dome
Ghana	21 de Marzo de 2004	Prestea Sankofa Mine, derrame al río.	Ghana National Petroleum Corporation
Ghana	29 de Mayo de 2003	Derrame de cianuro por falla en tubería en el distrito Wassa West.	Tarkwa Gold Mine
Nicaragua	14 de Enero de 2003	Derrame de cianuro en la región autónoma del Atlántico, hacia el Río Bambana	HEMCONIC Canadian Gold Mining Company.
Honduras	Enero del 2003	Mina San Andrés, Departamento de Copán, Oeste de Honduras. Contaminación del Río Lara.	Minosa.
Nevada, Estados Unidos	16 de Mayo de 2002	Twin Creeks Mine.	Newmont Mining Company
Papua, Nueva Guinea	30 de Junio del 2000	Mina Rio Tinto Lihir	
Guyana	Diciembre de 2000	Essequibo región.	
Summitville, CO, Estados Unidos	1984-1992	Contaminación del río Alamosa, hacia el valle de San Luis.	Galactic Resources Ltd.

²² Publicado en E&MJ News febrero 2012, The Current Status of Cyanide Regulations

Casos de accidentes en México relacionados a operaciones metalúrgicas de lixiviación de oro y plata utilizando cianuro

Zacatecas²³. Derrame de cianuro en la mina Real de Ángeles, Unidad El Coronel S.A. de C. V., ubicada en el Estado de Zacatecas, Municipio de Ojo Caliente. Se presentó una emergencia ambiental provocada por la liberación de la solución de cianuro, utilizada en el proceso de beneficio del oro, por lo que personal de la PROFEPA en dicha entidad se movilizó para prevenir afectaciones graves en el medio ambiente. El área afectada fue de mil metros cuadrados, al verterse 70 metros cúbicos de solución cianurada.

La emergencia se suscitó con la ruptura, por presión, del ducto de 24 pulgadas de diámetro que conduce dicha sustancia en los patios de lixiviación de la empresa minera, provocando que el derrame se presentara dentro y fuera del plástico que existe para evitar la infiltración de la solución cianurada en suelo natural.

Por ello, la PROFEPA realizó una visita de inspección para constatar los hechos y determinar las medidas de urgencia que aplicó la empresa. La implementación del Código Internacional para el Manejo del Cianuro²⁴, permitió que la empresa neutralizara el derrame con la adición de hipoclorito.

Durango. La presa de jales de la empresa Proyecto Magistral derramó alrededor de 2 mil metros cúbicos de agua con cianuro al arroyo La Cruz. El derrame en El Oro ocurrió en período de lluvias, provocando que la presa de jales se sobresaturara y derramara parte de esta solución, la cual impactó el arroyo La Cruz que a su vez se conecta al río Magistral, se muestra en la Figura 2. Tanto el arroyo como el río son áreas donde los animales, principalmente el ganado bovino, acude a beber agua. La afectación a suelos se estima en 400 metros cuadrados.

²³ La Prensa, Organización Editorial Mexicana, 14 de junio de 2013. SITEQ: Sistema de Emergencias en Transporte para la Industria Química

²⁴ El Código se centra exclusivamente en el manejo seguro del cianuro que es producido, transportado y utilizado en la recuperación del oro, así como en los residuos del tratamiento de cianuración y las soluciones de lixiviación.

La delegación de la PROFEPA acudió a la zona y ordenó cinco medidas de urgente aplicación para la reparación de los daños ambientales, además de iniciar el procedimiento administrativo correspondiente contra la empresa. Entre las medidas ordenadas están realizar la caracterización de los jales y agua cianurada depositados en su actual presa de jales; colocar una geomembrana en todo el perímetro que abarca la presa de jales actual para prevenir que el agua cianurada tenga contacto con el suelo natural. También tendrá que levantar la cortina contenedora de la presa de jales hasta una altura de 3 metros, así como utilizar la galería de inspección y presa de demasías únicamente como drenaje pluvial.



Figura 2. Presa de jales de la empresa Proyecto Magistral ²⁵

²⁵ Publicado en Excelsior el 14 de Agosto de 2014.

Sonora²⁶. El 22 de Agosto del 2010, la volcadura de una pipa que transportaba cianuro a la mina Mulatos, Sahuaripa, Sonora, provocó el derrame de 3 mil litros de cianuro de sodio, en la carretera Onavas-Hermosillo, ver Figura 3. La delegación federal de PROFEPA en Sonora detalló que el líquido derramado escurrió por la cuneta aproximadamente 400 metros hasta llegar a la margen del Río Yaqui pero sin incorporarse a la corriente del mismo. Sin embargo, a solicitud de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cerró las unidades de generación en la planta Plutarco Elías Calles (El Novillo) con el fin de reducir el caudal del río Yaqui. Se reportaron algunas aves y reptiles muertos y cerca de 10 personas tuvieron que recibir atención médica por haberse expuesto a los vapores de cianuro. En las comunidades de Onavas y Rosario Tesopaco, en el sur de Sonora, se dejaron de utilizar los pozos que abastecen de agua potable a las comunidades, adonde se han enviado pipas para surtir a cerca de 600 habitantes, dio a conocer. Otra de las consecuencias de este derrame fue la reducción de energía para Sonora y Sinaloa, debido a la suspensión de operaciones en la presa El Novillo.



Figura 3. Camión pipa volcada y adición de cal en el sitio del accidente.

²⁶http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/5314/1/mx.wap/sin_afectaciones_al_rio_yaqui_por_derrame_de_cianuro_de_sodio_en_sonora:_profepa.html

Sonora²⁷. Derrame de cianuro en interior de mina en Caborca, Sonora, ocurrido el 7 de enero del 2015, dentro del patio de lixiviación de las instalaciones de Minera Penmont. Se derramó un volumen de 82 metros cúbicos de solución cianurada agotada, dentro del proyecto Unidad Noche Buena, en el patio de lixiviación suroeste. El derrame se controló mediante la colocación de un bordo de contención y la solución no llegó a cauces, arroyos o suelos naturales. Con esta medida fue posible que 64 metros cúbicos de solución se rebombeara a los patios destinados para dicho fin y que los 18 metros cúbicos restantes fueran absorbidos por el material que se utilizó para la elaboración del bordo de contención, el cual, fue levantado y también dispuesto en los patios de lixiviación con que cuenta la empresa. La empresa implementó el Código Internacional para el Manejo del Cianuro por lo que fue posible contener el derrame de manera adecuada y evitar la afectación a cuerpos de agua y suelos.

²⁷ <http://www.profepa.gob.mx>

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DE LA NORMA, CONSIDERANDO LA EXPERIENCIA INTERNACIONAL Y NACIONAL SOBRE PROTECCIÓN AMBIENTAL Y LA IDENTIFICACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS OPERATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN DE ORO Y PLATA

La información documentada acerca de la experiencia internacional sobre la protección ambiental relacionada con la lixiviación con cianuro indica que los países utilizan criterios muy variables, inclusive dentro de los estados/provincias de cada país.

A continuación se enlistan los principales cambios en la legislación de otros países, considerando principalmente aquellos que se implementaron a partir de la aplicación de la NOM-155- SEMARNAT-2007 en México.

Latinoamérica

Argentina se ha convertido en una región activa para prospección y minería de oro. Debido al temor que causa el uso del cianuro, en algunas provincias de este país ha sido prohibido su uso, por ejemplo en: Río Negro, Chubut, Tucumán, La Pampa, Córdoba, San Luis y La Rioja. En las provincias de Chubut y Río Negro, la legislatura prohibió el uso de cianuro y mercurio en la minería en 2003 y 2005, respectivamente. Ambas prohibiciones se consideran inconstitucionales. Costa Rica prohibió el uso de cianuro en la minería a cielo abierto en el 2010, cuando su presidente firmó un decreto motivado por la degradación ambiental, así como repetidas fallas de las empresas en la operación y manejo seguro del cianuro.

Norteamérica

En los Estados Unidos, tanto a nivel estatal como local, la operación de los sistemas de lixiviación de oro y plata se regula por el U.S. Bureau of Land Management's (BLM²⁸) a partir de su política nacional para el cianuro. La oficina estatal del BLM exige la preparación de un plan de manejo del cianuro previo a la expedición de permisos a las empresas. En el plan de manejo la empresa debe garantizar la contención del cianuro en cualquier etapa del proceso, considerando escorrentía superficial para tormenta de 24 horas con período de retorno de 100 años. El estado de Nevada ha promulgado varias regulaciones sobre el diseño, operación y cierre de operaciones mineras, incluyendo a aquellas minas que usan sistemas de lixiviación de oro y plata. Adicionalmente, el Nevada Department of Conservation and Natural Resources Division of Environmental Protection (NDEP) Bureau of Mining Regulation and Reclamation ha emitido una serie de documentos guía para el diseño, operación, y cierre de las minas que utilizan la técnica de cianuración²⁹. Estos documentos se orientan a la protección ambiental, seguridad y salud asociados a la lixiviación por cianuro, esto considerando que:

- El oro contiene constituyentes peligrosos como el antimonio, arsénico, talio, y azufre. Durante la lixiviación activa la solución cianurada se mezcla y solubiliza estos elementos tóxicos.
- La solución con cianuro en el circuito, y las presas de jales contiene cianuro libre y complejos de cobre, hierro, níquel y cinc, así como otros elementos potencialmente tóxicos.
- Los jales y las membranas (liners) se consideran residuos al momento del cierre.

Los materiales del proceso de cianuración, así como los residuos generados pueden quedar expuestos al medio ambiente, representando un potencial transporte de contaminantes. Por ejemplo, un inadecuado diseño de la presa de

²⁸ Technical Report: Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings. EPA530-R-94-037, NTISPB94-201837 U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste. 1994.

²⁹ Nevada Gold Cyanide Mill Tailings Regulation en <http://www.epa.gov/osw/hazard/tsd/ldr/mine/goldvur.pdf>

jales puede resultar en falla en la misma o rotura de la membrana (liner). La liberación de la solución con cianuro puede ocurrir durante tormentas y derretimiento de nieve, a menos que el sistema haya sido diseñado para contener este volumen adicional de líquido. Las aves y otros animales que entran en contacto con las presas de jales deben ser protegidos y evitar su acceso a las mismas. La mayor amenaza de contaminación ambiental durante y después de la operación de los sistemas de lixiviación, es la posible liberación de la solución con cianuro a cuerpos de agua superficiales y subterráneos. El esquema regulatorio del estado de Nevada se enfoca a la prevención de este potencial transporte de contaminantes.

La experiencia minera del estado de Nevada orienta la mayor parte de la política de regulación del BLM. Un ejemplo es el documento orientado al cierre de mina "Preparation Requirements and Guidelines for Permanent Closure Plans and Final Closure Reports NRS 445A³⁰. El plan de cierre debe incluir la neutralización de los patios de lixiviación y presas de jales, así como la caracterización de los materiales. Las regulaciones y requisitos para permisos de operación de sistemas de lixiviación de oro y plata se encuentran en el documento Nevada Administrative Codes (NAC 445.390) que indica que:

- Todas las operaciones mineras que existieran previamente al 1 de Septiembre de 1989, debe obtener un permiso válido dentro de los tres años posteriores a esta fecha.
- A partir del 1 de Julio de 1990, ninguna persona o empresa puede iniciar la construcción y operación de sistemas de lixiviación de oro y plata sin haber obtenido antes el permiso o la modificación al permiso.

El principio básico de la regulación en el estado de Nevada indica que las operaciones de los sistemas de lixiviación por cianuración se regulan por la

³⁰ Nevada Bureau of Mining Regulation and Reclamation. <http://ndep.nv.gov/BMRR/index.htm> y Nevada Gold Cyanide Mill Tailings Regulation en <http://www.epa.gov/osw/hazard/tsd/ldr/mine/goldvur.pdf>

evaluación de cada componente del proceso de la operación minera³¹.

En el estado de Nevada, los elementos que debe contener un permiso para los sistemas de lixiviación de oro y plata se encuentran en el documento NAC 445A.394. Este documento busca garantizar que las partes responsables sean claramente identificadas, y el diseño y operación de las instalaciones sean adecuadas para las condiciones particulares del sitio (condiciones físicas, geológicas, hidrológicas). El documento incluye al menos lo siguiente:

- Datos del dueño, agente autorizado, y estructura legal de la empresa solicitante.
- Documentación que indique que la junta local y comisionados han recibido notificación del desarrollo propuesto.
- Reporte meteorológico, como se describe en la NAC 445A.396, incluyendo promedios mensuales para lluvia, eventos de tormentas de 24 horas con intervalos de recurrencia, variación en la temperatura y caracterización de los terreros, y muestras de la mena que representan un potencial para liberar elementos potencialmente tóxicos.
- Un reporte de ingeniería, descrito en la NAC 445A.397, y aprobado por un Ingeniero registrado por el estado de Nevada, incluyendo todas las fuentes potenciales de emisión al ambiente (sitios de extracción y beneficio, terreros, presas de jales, métodos para contención de agua de lluvia en tormentas extraordinarias, condiciones geológicas e hidrológicas pre-existentes, cercanas y adyacentes al sitio y el nivel al cual estas condiciones pueden actual para la contención o atenuación natural, escorrentía superficial, estabilidad estructural, descripción de la membrana utilizada y la descripción de la preparación del sitio para el sistema de lixiviación; esquemas del proceso y métodos de monitoreo). Toda esta información debe ser detallada para permitir determinar: 1) cuales de las

³¹ Se entiende por componente del proceso a una porción distintiva de la operación minera que puede ser una fuente puntual (NAC 445A.375. <http://www.epa.gov/osw/hazard/tsd/ldr/mine/goldvur.pdf> . El estado de Nevada tiene la autoridad para implementar la Clean Water Act NPDES que define fuentes puntuales que pueden descargar contaminantes a cuerpos de agua federales y estatales, ya sean superficiales o subterráneos.

fuentes potenciales deben considerarse como componentes del proceso, y 2) que el diseño de los componentes del proceso y el sistema de monitoreo sean adecuados y suficientes para proteger los cuerpos de agua estatales de la degradación ambiental.

- Un plan de manejo para todos los fluidos del proceso, un plan de monitoreo, plan de emergencia, plan de cierre temporal, plan de cierre permanente.

La iniciativa de prohibición al proceso de cianuración en minas a cielo abierto en el estado de Montana, Estados Unidos, conocida como la iniciativa I-13730, aprobada el 3 de Noviembre de 1998, prohíbe el uso de lixiviación con cianuro en lotes para minas de cielo abierto. Es actualmente el único estado que no permite la apertura de nuevas minas de oro a cielo abierto y que ha prohibido completamente el uso de cianuración en lotes, las únicas operaciones mineras son aquellas establecidas antes de Noviembre de 1998. En el caso del Acta de 1971 para Minería Superficial del Estado de Idaho, efectiva a partir de 2005, se requiere que cualquier operación minera que utiliza la cianuración, pruebe solvencia económica como seguro, de aproximadamente una fianza de 5 millones de dólares por operación minera, o superior. Con este recurso el estado de Idaho buscar proteger los recursos naturales como suelo y agua alrededor del sitio minero, en caso que el sitio requiera limpieza. El Acta de 1971 se enfoca principalmente al cierre de mina y a posibles accidentes, buscando no afectar económicamente al Estado. Ambas acciones (Idaho y Montana) surgen posteriormente, como respuesta al accidente de cianuro en Summitville.

La empresa Galactic Resources's Summitville mine en Colorado, causó un desastre ecológico en 1991 que afectó al río Alamosa, cuando 85000 galones de solución con cianuro se filtró a través de membranas dañadas. La empresa minera abandonó la mina en Colorado cuando no pudo controlar las fugas de cianuro. Como resultado de esto, todas las especies acuáticas en un tramo de 22 millas del río Alamosa murieron. Debido a que la empresa era canadiense, escapaba a las regulaciones del estado de Colorado al declararse en bancarrota. En Estados Unidos, el estado de Oregon es el único que ha desarrollado un programa de

regulación específica para operaciones mineras con lixiviación con cianuro. Sin embargo, el estado de Oregon no cuenta con minas de oro. En Estados Unidos, no existe un estatuto general anti-cianuro para la minería. Los estatutos federales que afectan el uso del cianuro incluyen: Clean Water Act (CWA), Endangered Species Act (ESA), National Environmental Policy Act (NEPA), Federal Land Policy Management Act (FLPMA) y National Forest Management Act. De estos cinco estatutos, el más poderoso y que puede significar un veto a la actividad minera que use lixiviación con cianuro es la Endangered Species Act (Acta de Especies en Peligro).

En lo referente al cierre de los sistemas de lixiviación, los estados no indican tecnologías específicas para la detoxificación del sitio, sino que se presenta un programa de acuerdo al sitio específico en el cual los parámetros más importantes a considerar incluye el WAD, el cianuro libre y total, pH, y metales (elementos potencialmente tóxicos). Por ejemplo el estado de Idaho requiere que el pH esté entre 6.5 y 9, al igual que el estado de Nevada y California³², que requieren que el nivel de cianuro-WAD esté debajo de 0.2 mg/L. Anteriormente a 1987 el nivel máximo de cianuro-WAD era de 0.5 mg/L en Estados Unidos.

Canadá

En el caso de Canadá³³ y Australia³⁴, se implementa el Código Internacional del Manejo del Cianuro, el cual implica la reducción máxima del uso del cianuro, el diseño de estrategias para proteger las aguas superficiales y subterráneas, así como el diseño y operación de sistemas que reducen la concentración de cianuro en los efluentes y la prevención de derrames. En Canadá, el cianuro es considerado como una sustancia peligrosa, y la legislación federal y por provincias requiere que personal altamente especializado transporte, maneje y almacene el

³² California Regional Water Quality Board "Cyanidation Requirements for Cyanidation Process Wastes" April 22, 1987.

³³ Canada, Health Canada. *Cyanide*. Environmental and Workplace Health 2008 [2012 June 11]; <http://hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/cyanide-cyanure/index-eng.php>. <http://www.miningfacts.org/environment/what-is-the-role-of-cyanide-in-mining/#sthash.QII6FQ7i.dpuf>

³⁴ Australia Government, Department of Resources, Energy and Tourism. *Cyanide Management*. 2008. Commonwealth of Australia. <http://www.miningfacts.org/environment/what-is-the-role-of-cyanide-in-mining/#sthash.QII6FQ7i.dpuf>
Minerals Council of Australia. *Fact Sheet--Cyanide and its Use by the Minerals Industry*. 2005. - <http://www.miningfacts.org/environment/what-is-the-role-of-cyanide-in-mining/#sthash.QII6FQ7i.dpuf>

cianuro en contenedores certificados. La descarga al ambiente del cianuro en Canadá³⁵ se regula mediante el uso de permisos y licencias emitidas por las provincias y la concentración del cianuro en los efluentes que salen de la operación minera debe estar por debajo de la concentración máxima permitida de 1.0 mg/L³⁶ de acuerdo al documento Metal Mining Effluent Regulations, dentro de la ley federal Fisheries Act. El cianuro se mide en efluentes a través del muestreo del agua³⁷. Las empresas mineras en Canadá están obligadas a reportar el volumen en metros cúbicos mensual en cada punto de descarga de las operaciones mineras. Los flujos además se calculan al mismo tiempo en que las muestras se colectan para su análisis. La legislación en Canadá indica que se debe hacer un monitoreo de al menos una vez a la semana, de pH en cada punto de descarga en el sistema de lixiviación³⁸.

En Canadá las especificaciones para los sistemas de lixiviación de oro y plata se agrupan en los siguientes documentos:

- Environment Canada (2009). “Environmental Code of Practice for Metal Mines 2009”, TD195 M5 E58 2009.
- Environment Canada (2010). “2009 Guide for Reporting to the National Pollutant Release Inventory, *Canadian Environmental Protection Action 1999*”, publication date (to be determined).
- Environment Canada (2009). “Notice with respect to tailings and waste rock reporting under the National Pollutant Release Inventory for 2006 to 2008”, *Canada Gazette*, Part I, December 5, 2009
- Environment Canada (2009). “Notice with respect to substances in the National Pollutant Release Inventory for 2009”, *Canada Gazette*, Part I, December 5, 2009

³⁵ <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2002-222/index.html>

³⁶ 1 mg/L equivale a 1 ppm

³⁷ Canada, Environment Canada. *Summary Review of Performance of Metal Mines Subject to the Metal Mining Effluent Regulations*. 2012

<http://www.ec.gc.ca/pollution/default.asp?lang=En&n=C6A98427-1>. <http://www.miningfacts.org/environment/what-is-the-role-of-cyanide-in-mining/#sthash.QII6FQ7i.dpuf>

³⁸ <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2002-222/page-3.html#docCont>

- Natural Resources Canada (1994). “Handbook for Waste Rock Sampling Techniques”, June 1994.
- Natural Resources Canada (1994). “Review of Waste Rock Sampling Techniques”, June 1994.
- U.S. EPA (1999). “EPCRA Section 313 Industry Guidance – Metal Mining Facilities”, January 1999.

La normatividad que busca regular efluentes con metales en minas (Metal Mining Effluent Regulations, MMER³⁹) entró en vigor en Canadá en Diciembre de 2002, reemplazando la Metal Mining Effluent Regulations 1977. La MMER autoriza, bajo ciertas condiciones, el depósito de sustancias específicas⁴⁰ de las minas metálicas. Las condiciones principalmente se relacionan con límites en el pH del efluente y prohíbe la liberación de efluentes que son letales. La MMER aplica para todas las minas metálicas en Canadá, con excepción de los depósitos de placer de oro, que excedan efluentes con tasa mayor a 50 m³/día, en operaciones mineras posteriores al 6 de Junio del 2002. Los puntos más importantes de la MMER para la prevención de daños al medio ambiente son:

- Prohibición a los dueños de las empresas mineras de la dilución el efluente con agua para tratar de alcanzar los niveles permisibles de concentración de sustancias potencialmente tóxicas.
- La realización de estudios de monitoreo de los efectos ambientales y potencial efecto del efluente en la población de peces, tejido de peces, ó en la comunidad béntica de invertebrados que habitan cuerpos de agua relacionados con la operación mineral.
- El registro actualizado de los estudios y envío de reportes a la autoridad

³⁹ <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2002-222/index.html>

⁴⁰ Las sustancias específicas que indica la MMER incluyen al arsénico (As), cobre (Cu), cianuro (CN), plomo (Pb), níquel (Ni), cinc (Zn), sólidos totales suspendidos (TSS), y radio 226 (Ra-226). Environment Canada (2012) [Summary Review of Performance of Metal Mines Subject to the Metal Mining Effluent Regulations](#). Retrieved on 23 September, 2014.

competente.

- La realización de los estudios con métodos validados y competentes, con resultados interpretados de acuerdo a estándares de buenas prácticas científicas actualizadas.
- La identificación y notificación escrita a la autoridad competente de cada punto de descarga incluyendo la siguiente información:
 - Plan que contenga las especificaciones y la descripción general de cada punto de descarga, con los datos de localización en latitud y longitud, con grados, minutos y segundo.
 - Descripción detallada de cómo se ha diseñado y plan de mantenimiento de cada punto de descarga.
 - El nombre y descripción de cada cuerpo de agua potencialmente receptor.
 - La lectura de pH en el efluente, así como el control del volumen se realiza al menos una vez por semana y no más de 24 horas entre cada análisis.
 - Pruebas mensuales de letalidad del efluente en cada punto de descarga de acuerdo al Reference Method EPS 1/RM/13⁴¹.
 - Si la muestra analizada en el punto de descarga resultara potencialmente letal, el dueño de la empresa deberá: (a) inmediatamente realizar una caracterización del efluente de acuerdo a lo indicado en la subsección 4(1) de la MMER y llenar los formatos indicados en la misma. (b) Colectar una muestra dos veces por mes, sin ningún retraso, y realizar de nuevo las pruebas de acuerdo al procedimiento Reference Method EPS 1/RM/13. Las muestras deberán colectarse con no más de siete días de separación. El

⁴¹ <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/SOR-2002-222/page-4.html#docCont>

efluente se considera controlado o no potencialmente letal, cuando ha pasado tres evaluaciones consecutivas.

- El control de los efluentes en cada punto de descarga debe realizarse de manera mensual durante la operación del sistema de lixiviación. Esto puede ser medido de las siguientes formas:
 - Determinando la tasa de flujo promedio en metros cúbicos por día ya sea midiendo la tasa de flujo al mismo tiempo que se colectan las muestras. Calculando la tasa de flujo mensual y estimando un promedio.
 - Utilizando un sistema de monitoreo que proporcione una medida continua del volumen del efluente que es depositado en las presas. La incertidumbre en la medida es 15%.

Las siguientes operaciones mineras no son reguladas por la MMER: minas de carbón, diamantes, graveras y no metálicos, sin embargo están sujetas a la Fisheries Act⁴².

Europa

Europa mantiene restricciones muy fuertes para el uso del cianuro. La Unión Europea tiene los límites más estrictos a nivel mundial, para represas de relaves o jales (Adopted Directive 2006/21/EC). Por ejemplo, el Artículo 13 requiere que la concentración de cianuro disociable en la presa sea reducido a la menor concentración posible utilizando la tecnología más avanzada. Por ejemplo, todas aquellas minas que iniciaron operaciones posteriormente al 1 de Mayo del 2008, no pueden descargar desechos con más de 10 ppm de cianuro WAD y a las empresas que iniciaron operaciones en fechas anteriores se les permite un límite de 50 ppm, con la condición de reducirlo a 25 ppm para el 2013 y a 10 ppm para el 2018. El Artículo 14 requiere que las empresas entreguen garantías financieras para asegurar el cierre de la mina. Alemania y la República Checa emitieron un

⁴² <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/F-14/>

decreto en 2002 prohibiendo el proceso de lixiviación con cianuro. En 1997, el Consejo de Estado Turco, en base al artículo 56 de la Constitución Turca, prohibió el uso de la cianuración en minas de oro, como una garantía de protección a la población.

CAPÍTULO V

IDENTIFICACIÓN DE BUENAS Y MALAS PRÁCTICAS OPERATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN DE ORO Y PLATA

Peligrosidad del mineral lixiviado o gastado

Caracterización del sitio

Para la construcción y operación del patio, la NOM-155-SEMARNAT-2007 considera las intensidades relativas de riesgo por:

- Capacidad de carga del terreno de cimentación
- Estabilidad de taludes de las pilas
- Rotura del recubrimiento
- Erosión en la superficie de las pilas por efecto de las lluvias,
- Derrames de lixiviados por efecto de tormentas

Al respecto, se enumeran algunos ejemplos de prácticas internacionales que reducen los impactos ambientales de los sistemas de lixiviación y que son referentes a la construcción y operación del patio.

Los sistemas de geomembranas utilizados actualmente en la práctica son los sistemas de doble capa, o liners compuestos⁴³. El propósito principal de este sistema de geomembranas, es prevenir la pérdida de soluciones del proceso, tanto por razones económicas como ambientales. Los liners compuestos proveen

⁴³ Breitenbach, A.J. (1997) "Overview Study of Several Geomembrane Liner Failures Under High Fill Load Conditions" Geosynthetics 97 Conference Proceedings, Industrial Fabrics Association International, Long Beach, California, Vol. 2, páginas 1045-1062.

de una baja permeabilidad, para que no exista un contacto directo con la capa se suelo. Adicionalmente, se cuenta con una red de tuberías espaciadas adecuadamente para coleccionar la solución lixiviada. Se debe mantener un bajo cabezal hidráulico sobre la geomembrana, para el manejo eficiente de las soluciones de proceso.

Determinación de la magnitud de riesgos físicos y criterios del proyecto del patio

Criterios de obra

La NOM-155-SEMARNAT-2007 establece en la sección Criterios de obra, que “Las actividades de excavación, nivelación, compactación y relleno necesarios para la preparación del sitio deben garantizar su impermeabilización, así como la conservación de la capacidad de drenaje natural de la zona”.

Las prácticas internacionales consideran:

Diseño de una cama de arena. Esta cama de arena fina, provee de una barrera de contención secundaria para las soluciones de lixiviación. Asimismo, protege a la geomembrana de rocas angulosas, que puedan perforarla.

El diseño de esta cama de arena, generalmente incluye lo siguiente: 1) Una capa de arena y gravilla fina de baja permeabilidad, no mayor de 19 mm de tamaño de partícula; 2) Un contenido de humedad no mayor al 2% en base seca; 3) una superficie lisa, firmemente compactada; 4) La capa superior del sistema de colección de solución, con una pendiente positiva.

Diseño de la sobrecubierta de protección. Los requerimientos del diseño general de esta sobrecubierta, consideran varios aspectos que incluyen: 1) El máximo tamaño de roca en contacto con la superficie de la geomembrana; 2) la forma de la partícula; 3) el espesor de la sobrecubierta de plástico; 4) un adecuado drenaje de la solución; 5) equipo adecuado para el riego de la solución; y 6) el tipo de geomembrana, la cual debe soportar los sistemas de carga extrema del

mineral. Las cubiertas son acondicionadas generalmente con tuberías perforadas para mantener un orden de magnitud para una alta permeabilidad en el drenado, en comparación con la altura de la capa del terrero. Se diseñan sistemas de tuberías complementarias para el transporte de las soluciones de proceso y aguas de lluvia, manteniendo un bajo cabezal hidráulico sobre el sistema de geomembranas compuestas. La base se debe construir con una determinada pendiente para que el fluido que se recolecta en la membrana fluya en la dirección deseada. Normalmente se usa una pendiente de 2 a 5%. Se recomienda instalar dos capas de geomembranas de plástico. Las tuberías para drenaje flexible se tienden sobre la geomembrana superior y transportan la solución enriquecida a una pila. Una capa de arena cubre las geomembranas y los tubos de drenaje protegiéndolos de posibles daños ocasionados por rocas grandes y filosas que pueden caer dentro del patio de lixiviación, un esquema de la planilla de lixiviación se muestra en la Figura 5.

Un propósito secundario de esta sobrecubierta, es la protección de la geomembrana contra climas extremos, así como para la protección contra la biota. Las condiciones climáticas incluyen principalmente vientos fuertes, fluctuaciones de temperatura y exposición a la luz solar. La protección contra la biota incluye, garras y pezuñas de animales salvajes o domésticos. También incluye la protección contra equipo de tráfico pesado, así como contra rocas lanzadas por las voladuras. Esta sobrecubierta en conjunto con la cubierta mineral minimizan el potencial para la rotura por tensión, movimiento de los vientos, doblado de la geomembrana, degradación por la luz solar y otros problemas operacionales. En la siguiente figura se muestra un esquema de las diferentes capas, drenes y geomembranas en un terrero o planilla de lixiviación:

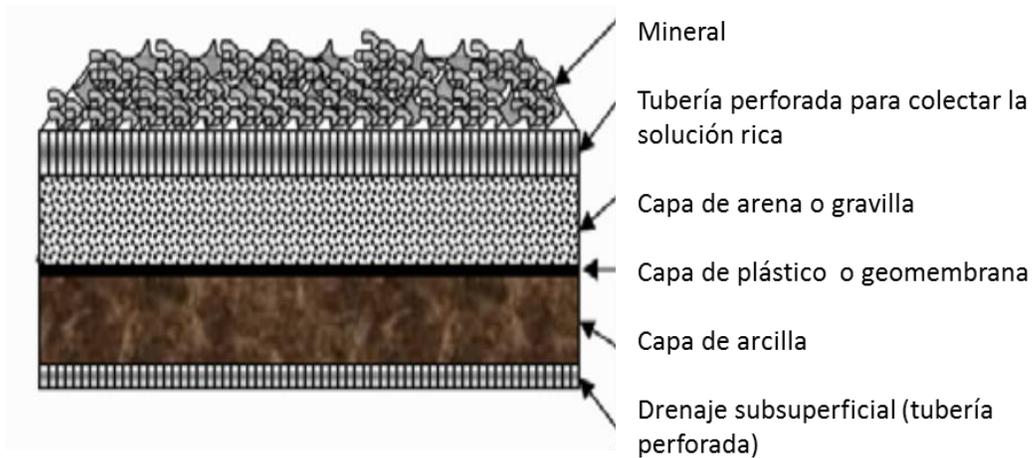


Figura 5. Corte transversal de una planilla de lixiviación

Criterios de construcción de taludes en un terrero de lixiviación

Normalmente se ejerce una presión de 10 toneladas por metro cuadrado por cada 6 metros de altura de roca suelta que se apila encima. Las geomembranas son frágiles y necesitan protegerse de posibles perforaciones que pudieran ocasionarse por la maquinaria que transite sobre ellas. Las perforaciones son frecuentes ya que las rocas filosas pueden cortar el plástico cuando se coloca el mineral sobre éste. La mejor forma de proteger el plástico es colocando una capa de arena sobre él, esto además proporciona un lecho para la tubería. La arena no debe tener finos ya que esto puede disminuir su drenaje. También en el diseño de taludes se debe mantener un ángulo de 30° para evitar canalizaciones, como se muestra en la Figura 6:



Figura 6. Construcción del talud de 30° con respecto a la Norma Internacional establecida, para evitar canalizaciones en caso de lluvias extremas⁴⁴.

En el apilado de mineral y para evitar daño por compactación en las geomembranas (liners) por camiones pesados (yuckles), actualmente se utilizan bandas transportadoras (stacker), así se tiene una mejor distribución del material y se evitan daños por el tránsito de maquinaria pesada sobre éstas, esta es una muy buena práctica internacional, que se debe adaptar para las operaciones en minas mexicanas, como se muestra en las figuras 7 y 8. También en la Figura 9 se muestra el arreglo de geomembranas en una pileta para contener las soluciones.

⁴⁴ Fuente: Allan Breitenbach, Geotechnical Engineering, Heap Leach Conference. Vancouver, B.C., Canada, Septiembre 22-25, 2013

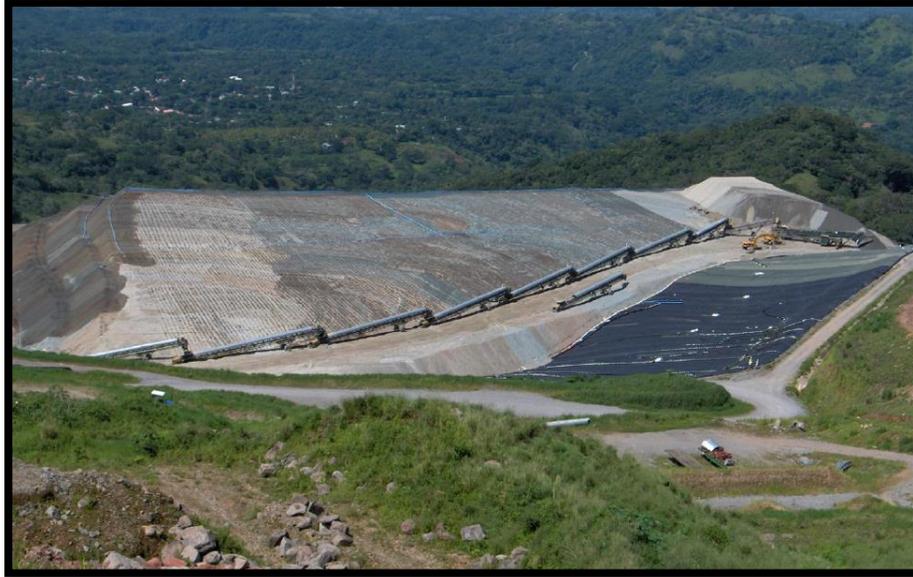


Figura 7. Uso de liners doble capa. Se muestra la recuperación de áreas verdes.



Figura 8. Uso de bandas transportadoras (stacker), para evitar daño por compactación en los liners por camiones pesados (yuckles).



Figura 9. Pileta de contingencias y pileta de soluciones del proceso, utilización de geomembranas de doble capa (liner).

En situaciones de lluvias extraordinarias o tormentas, se debe tener una adecuada preparación en la instalación de las geomembranas, ya que esto puede ocasionar rompimiento o arrastre de ellas, provocando infiltraciones en la capa de mineral y por ende al suelo, pudiendo afectar el medio ambiente. Para evitar estas situaciones, se recomienda la instalación de geomembranas en forma escalonada sobre los taludes, como se muestra en las figuras 10 y 11.



Figura 10. Instalación de geomembranas para situaciones de lluvias extraordinarias



Figura 11. Protección de los patios de lixiviación en caso de contingencias por lluvias extremas

Es importante considerar las recomendaciones internacionales, precisamente las experiencias en la instalación de geomembranas (liners), en lugares donde ocurren abundantes precipitaciones, ya que así se pueden evitar riesgos de rotura de las geomembranas, se debe tener la protección adecuada, principalmente en

colinas con grandes pendientes. En las fotos 12 y 13 se muestra un diseño no adecuado de geomembranas para contener los caudales excesivos:



Figura 12. Efectos dañinos por carecer de protección de geomembranas adecuadas para lluvias extremas



Figura 13. Diseño no adecuado de geomembranas para contener los caudales excesivos.

Aislantes para patios y pilas. Generalmente se utilizan dos tipos de láminas plásticas, uno es polietileno de alta densidad (HDPE) y el otro es cloruro de polivinilo (PVC). El HDPE puede soportar la luz solar por largos períodos de tiempo. El PVC se puede colocar o pegar manualmente, es mas flexible y tiene mejor resistencia a perforaciones, pero no resiste la luz solar por muchos años. Las regulaciones gubernamentales en Estados Unidos de Norteamérica especifican emplear aislantes dobles bajo todos los patios y pilas, sobre una capa de arcilla compactada, estos recubrimientos adecuados se muestran en la figuras 14 y 15.



Figura 14. Recubrimientos adecuados con capas de arcillas y geomembrana



Figura 15. Recubrimientos de arcilla y geomembrana adecuados con respecto a la pendiente

Recomendaciones de prácticas internacionales, para tomar como base en las instalaciones de las minas mexicanas y que se pudieran integrar en la NOM 155 SEMARNAT 2007

- Diseño del talud de 30° con respecto a las prácticas internacionales comunes, para evitar canalizaciones en caso de lluvias extremas.
- Uso de liners doble capa como lo establecen las prácticas internacionales comunes.
- Uso de bandas transportadoras (stacker), para evitar daño por compactación en los liners por camiones pesados (yuckles).
- Pileta de contingencias y pileta de soluciones del proceso, utilización de geomembranas de doble capa (liner).
- Protección de los patios de lixiviación en caso de contingencias por lluvias extremas.
- Recubrimientos adecuados con capas de arcillas y geomembrana.
- Recubrimientos de arcilla y geomembrana adecuados con respecto a la

pendiente.

- Colocación de bolsas de arena temporal antes de instalar la geomembrana, para evitar que queden dobladuras o flejes por acción de vientos en la membrana.
- Buena protección contra los vientos y evitar dobladuras por mala instalación de geomembranas (estiramiento no adecuado)
- Evitar realizar voladuras cercanas al almacén de geomembranas (liners), ya que estas pueden dañarse por efecto de onda sísmica.
- Instalación de drenes adecuados de las tuberías, cubiertas de gravilla y arena, previo a la carga del mineral.
- Instalación de tubería corrugada con refuerzo interno para resistir altas presiones de compresión.
- Colocación de recubrimientos adecuados con geomembranas en pendientes escalonadas.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES DE MEJORA EN EL DISEÑO Y APLICACIÓN DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM 155 SEMARNAT 2007

Generalidades

La NOM-155-SEMARNAT-2007 establece que “la preparación del sitio para construir un sistema de lixiviación debe incluir medidas de prevención o control de la contaminación, a través de obras de ingeniería que acrediten técnicamente que no se afectará a los cuerpos de agua superficiales, a los acuíferos o a los aprovechamientos hidráulicos subterráneos”, al respecto se sugiere se incluyan ciertas especificaciones sobre las afectaciones a los cuerpos de agua subterráneos y superficiales en función de lo siguiente:

- **Control periódico de pH, tanto en las soluciones cianuradas como en cuerpos de agua superficiales y subterráneos que tengan conexión hídrica con los sistemas de lixiviación.** Se asume que el cianuro se descompone a productos no tóxicos como el dióxido de carbono y nitratos, cuando está en presencia de oxígeno y luz solar. Esto es en parte correcto, sin embargo la norma no es clara en cuanto a que se requiere un medio neutro, además de la luz solar, para que ocurra la transformación del cianuro a productos no tóxicos. En el caso de los cuerpos de agua subterráneos y superficiales, si el medio es reductor no ocurrirá esta transformación, ya que la velocidad de descomposición del cianuro va a depender del oxígeno disuelto presente en el agua. Se sugiere entonces que las empresas lleven a cabo una mejor caracterización de los cuerpos

de agua que tienen conexión hídrica con los sistemas de lixiviación (que pueden ser impactados en caso de emisiones al ambiente). Siendo más específicos, si existe presencia de lagos o manglares, es posible que la oxidación ocurra a nivel superficial solamente, por lo que es necesario que la toma de muestras de agua sean profundas y que adicionalmente se considere la verificación periódica de los parámetros de pH y oxígeno disuelto.

- **Estabilidad de la obra.** La norma presenta fortalezas en este aspecto en comparación con las prácticas internacionales. Como una opción de mejora a la norma, se sugiere se detallen especificaciones en lo referente a la cubierta protectora de las geomembranas, en particular para encauzar el drenaje natural y la escorrentía por lluvia para reducir la erosión del material de cubierta; se sugiere agregar especificaciones similares a las descritas en el punto 5.5.2.2. de la NOM-155-SEMARNAT-2007 pero para la cubierta de las pilas.
- **Clima.** Este es un factor que requiere de mayores especificaciones en la Norma. En climas húmedos o donde llueva regularmente, es importante que en la operación del sistema de lixiviación se considere un control de flujos de solución, y un plan de manejo de solución excesiva⁴⁵. Adicionalmente debe considerarse que el terrero de lixiviación tendrá mayor inestabilidad debido a elevada saturación y erosión, por lo que también es muy importante el control de la permeabilidad de las pilas. En las zonas desérticas donde se utiliza el riego por goteo, la luz solar calentará la solución cianurada acelerando la degradación del cianuro, sin embargo al tratarse de zonas con pocas fuentes de agua, los sistemas de lixiviación deben ser protegidos para evitar que especies animales accedan al sitio, ya que es común que las zonas áridas sean corredores de especies migratorias⁴⁶. En el aspecto de estabilidad de terreros la norma presenta

⁴⁵ Por ejemplo cubiertas para lluvia, bombeo de solución en exceso, caracterización de la permeabilidad del terrero, tratamiento y descarga de la solución en exceso, etc.

⁴⁶ The Management of Cyanide in Gold Extraction. Logsdon, M.J., Hagelstein, K., Mudder, T.I. 1999. International Council of Metals and The Environment.

fortalezas ya que en el Anexo Normativo 3 se establecen los criterios y se recomiendan los métodos de análisis de estabilidad y monitoreo más apropiados según la región geográfica del proyecto.

- **Permeabilidad.** Existen tres opciones generales para el tratamiento de preparación de los sistemas de lixiviación para el cierre de la operación⁴⁷: (i) Permitir la degradación lenta del cianuro a especies no tóxicas, esto sin intervención de la acción del hombre; (ii) tratar el sistema en lotes pequeños cuando ciertas secciones de las pilas son impermeables y se busca valorizar el residuo; (iii) lavado de las pilas y colecta de la solución para su disposición, posteriormente, seguir cualquiera de los dos métodos mencionados anteriormente. La norma establece que se debe obtener los perfiles estratigráficos del terreno de cimentación y realizar pruebas *in situ* de permeabilidad⁴⁸, sin embargo, se sugiere incluir recomendaciones referentes a un control general de la permeabilidad de las pilas para contar con mayor información en la propuesta de cierre del sistema de lixiviación.

⁴⁷ Technical Report Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings. EPA530-R-94-037 NTISPB94-201837, U.S. Environmental Protection Agency, Septiembre 1994.

⁴⁸ NOM-155-SEMARNAT-2007, 5.3.3.2. Obtener los perfiles estratigráficos del terreno de cimentación, haciendo resaltar la variación de la resistencia relativa, la homogeneidad o heterogeneidad de los mismos, así como la clasificación de los suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (véase Anexo Normativo 2), y realizar pruebas *in situ* de permeabilidad, porosidad, compresibilidad y resistencia al corte.

Tabla 5. Fortalezas y debilidades de la Norma Oficial Mexicana

ASPECTOS A VALORAR		ANTES DE LA PUBLICACIÓN DE LA NORMA	DESPUÉS DE LA PUBLICACIÓN DE LA NORMA	
			FORTALEZAS	DEBILIDADES
Peligrosidad del mineral lixiviado	Muestreo	<p>No se requería un muestreo del mineral lixiviado.</p> <p>No se realizaba la caracterización del mineral gastado o lixiviado.</p>	<p>Las pruebas para la caracterización del mineral lixiviado o gastado permiten detectar aspectos críticos ambientales relacionados al potencial de generación de drenaje ácido y a la movilidad de metales del material lixiviado. En este sentido la NOM-155-SEMARNAT-2007 es más estricta en cuanto a la protección al ambiente, en comparación con prácticas internacionales.</p>	<p>La frecuencia en la toma de muestra considerando al menos dos muestras representativas cada mes, obtenidas de pruebas de lixiviación en laboratorio representa una inversión significativa de tiempo y recursos, lo que lleva a tener en ocasiones un registro incompleto.</p>
	Pruebas de movilidad	<p>No se requería realizar pruebas de movilidad de constituyentes tóxicos</p>	<p>Las pruebas para la caracterización del mineral lixiviado o gastado permiten detectar aspectos críticos ambientales relacionados a la movilidad de metales del material lixiviado. Se recomienda que este muestreo se realice también en la pileta de contingencias.</p>	<p>En el caso del cianuro es muy importante la identificación de sus formas químicas y definir la clase de cianuro que se va a eliminar: cianuro libre, cianuro disociable en ácido débil (WAD) y cianuro total, ya que esto determina las formas tóxicas derivadas de la degradación del cianuro. Debe Monitorearse pileta de contingencias.</p>

	Pruebas de generación de drenaje ácido	No se requería realizar pruebas en el mineral para conocer si era susceptible de generar drenado ácido de mina	El potencial generador de drenaje ácido se considera una de las principales afectaciones ambientales. La norma requiere el registro de esta información para tomar las medidas precautorias de protección ambiental. Adicionalmente, esta información puede ser de utilidad en la valorización de los residuos de la mina.	No presenta debilidades. Solo se recomendaría la evaluación de la capacidad de atenuación natural o neutralización a partir de las rocas circundantes.
Caracterización del sitio	Aspectos climáticos	No se consideraban situaciones de riesgo relacionadas con lluvias extraordinarias.	Los riesgos relacionados a aspectos climáticos son específicos al sitio, se consideran tormenta de diseño para período de retorno considerable (100 años) lo que representa una medida adecuada para la protección al ambiente.	No establece especificaciones sobre la necesidad de un plan detallado de manejo de flujo excesivo. Se recomienda que las minas que se localizan en zonas lluviosas el volumen de la pileta de contingencias debe ser más del doble que de la pileta conteniendo la solución rica.
	Aspectos geotécnicos	Falta de especificaciones acerca de riesgos físicos y criterios de proyecto de patio.	La norma presenta fortalezas con respecto a las prácticas internacionales documentadas.	Se sugieren estudios de permeabilidad en el material de las pilas de lixiviación con el fin de desarrollar el proyecto de cierre.
	Aspectos hidrológicos	Falta de evaluación de vulnerabilidad de los acuíferos.	Los criterios de protección a cuerpos de agua	Se recomienda aumentar las especificaciones

		No se consideraba la hidrología superficial en las actividades de excavación, nivelación, compactación y relleno necesarios para la preparación el sitio.	son rigurosos y adecuados, los parámetros físicos y químicos, así como la frecuencia de muestreo (estiaje y lluvias) es adecuada.	acerca de la determinación del volumen medio anual del escurrimiento superficial aguas arriba del patio. Al respecto se recomienda implementar medidas similares a la normatividad de Canadá, en particular la referente al registro de volumen de solución en cada punto de descarga del sistema de lixiviación y al control de pH. Se recomienda una caracterización de los cuerpos de agua y la presentación de un plan de atención a emergencia en aquellos casos que involucren cuerpos de agua superficiales o subterráneos con condiciones de bajo oxígeno como manglares y lagos (lagunas).
	Vida silvestre	No se requería antes de entrar en vigor la norma	Establece criterios de protección a la biota que son tan rigurosos como las prácticas internacionales. En particular una fortaleza de la norma radica en la identificación y plan de	Se sugiere se integren especificaciones acerca del establecimiento, manejo y conservación de un banco de semillas de especies endémicas, así como un

			protección de especies nativas previamente a las actividades de desmonte.	inventario florístico para garantizar el re-establecimiento de las mismas en el plan de cierre.
Monitoreo		No se requería realizar muestreos	La norma ya lo especifica en sus apartados	Algunas empresas mineras no lo contemplan porque requieren estar certificados ante una instancia (por ejemplo Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)).
Responsable de la supervisión ambiental		No se contemplaba un responsable directo de la supervisión ambiental en el manejo de químicos tóxicos	La norma ya lo especifica en sus apartados. Se deberá designar un responsable de la supervisión ambiental en el sitio del proyecto, para detectar aspectos críticos y que pueda tomar decisiones, así como que se cumplan las especificaciones establecidas en esta Norma.	En base a las encuestas realizadas en las minas en cuestión, este rubro no se cumple totalmente, falta una mayor supervisión
Aplicación del Código Cianuro, referente al manejo del cianuro		No se requería un programa de implementación de este código por la norma.	La Norma no lo especifica en sus apartados, pero si exige un manejo muy riguroso en el uso de cianuro en minerales para la lixiviación de oro y plata.	Algunas empresas mineras han comenzado a implementar el Código de Cianuro, pero se requiere que en las nuevas modificaciones a la Norma se implemente un mecanismo obligatorio de su aplicación, así como una mayor supervisión

<p>La restauración de la mina y sus instalaciones después del cierre.</p>		<p>No se requería un programa de restauración del medio ambiente a como estaba inicialmente.</p> <p>Este punto es muy importante a considerar ya que se han presentado casos en el pasado en donde algunas minas dejaron pasivos con altos niveles de toxicidad (metales pesados).</p>	<p>La Norma especifica que debe considerarse la restauración del área de explotación en condiciones muy semejantes a como estaba inicialmente.</p>	<p>Al respecto, en la modificación de la Norma se debe de trabajar en desarrollar mecanismos más efectivos para garantizar que se cumpla</p>
---	--	--	--	--

Tabla 6. Especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM 155 SEMARNAT 2007

ESPECIFICACIONES	DEBILIDADES	CAMBIOS SUGERIDOS
<p>5.2. Peligrosidad del mineral lixiviado o gastado.</p> <p>5.2.2. Para la caracterización del mineral lixiviado o gastado las muestras deben ser obtenidas:</p> <p>(ii) Durante la operación minera, de pruebas metalúrgicas realizadas en laboratorio o directamente de las pilas.</p>	<p>La norma considera la toma de dos muestras representativas cada mes durante la vida útil del proyecto. Las muestras deber ser obtenidas de pruebas de lixiviación a nivel laboratorio, preparadas con mineral a lixiviar extraído de la mina, o bien, con mineral gastado de las pilas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estas pruebas son específicas para evaluar la movilidad de elementos potencialmente tóxicos, sin embargo hacer los análisis cada mes, de dos muestras, resulta poco eficiente debido al tiempo que se necesita invertir para hacer las pruebas de lixiviación a nivel laboratorio. Para el caso particular del método de cianuración es conveniente el control del pH en el circuito de lixiviación de la planta metalúrgica. El control del pH es más importante porque de este factor depende la degradación del cianuro a formas más tóxicas. La norma en su forma actual no considera un monitoreo continuo de pH en el circuito de lixiviación, así como un control de pH en los cuerpos de agua cercanos o vinculados a la planta metalúrgica por medio de la red de drenaje natural. • Es importante que las empresas lleven un control semanal de los flujos (volumen) de soluciones con cianuro en el circuito total de lixiviación de la planta, esto para que en caso de un accidente que libere la solución al medio ambiente, sea posible cuantificar la magnitud del evento así como llevar un mejor control para la prevención de derrames y/o establecer medidas de mitigación/remediación adecuadas. • La norma no exige la caracterización de las formas químicas del cianuro, esto es importante porque las formas a la que se degrada dependen también del tipo de cianuro original en la solución. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir el monitoreo mensual de dos muestras representativas durante la vida útil del proyecto a dos muestreos anuales, previo y posterior a la época de lluvias. A estas muestras se les deberán hacer las pruebas de lixiviación como lo marca actualmente la norma. • Incluir un monitoreo diario de pH en las soluciones del circuito de lixiviación. • Incluir un monitoreo semanal de pH de los cuerpos de agua cercanos a la planta metalúrgica. • Presentar un plan de prevención de accidentes específico en caso de detectar ambientes con poco oxígeno (reductores) en cuerpos de agua cercanos, principalmente lagos y manglares. • Llevar un control semanal de los flujos (volumen) de soluciones con cianuro en el circuito metalúrgico. • Caracterizar las formas químicas del cianuro al inicio del proceso de operación de la planta metalúrgica y dos veces al año (previo a lluvias y posterior a lluvias).

<p>5.7.11. Si en la evaluación correspondiente resulta un acuífero vulnerable o existen aprovechamientos alrededor del sistema de lixiviación, el monitoreo debe llegar hasta el nivel del agua. En este caso se deben construir obras de ingeniería complementarias que garanticen la no afectación a los acuíferos.</p>	<p>En el caso de cuerpos de agua que no presentan una circulación continua que garantice una oxigenación adecuada, por ejemplo en lagos y manglares, el monitoreo a nivel del agua no es suficiente para garantizar la protección al cuerpo de agua en caso que entre en contacto con solución cianurada. Esto debido a que si el ambiente no cuenta con niveles de oxígeno suficientes, la degradación de cianuro será a especies tóxicas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se sugiere incluir la medición de oxígeno disuelto y pH en cuerpos de agua, y en el caso de lagos, lagunas y manglares, la medición debe ser en la columna de agua, incluyendo las partes profundas y no solo a nivel superficial.
---	---	--