

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**“CONTAMINACIÓN DE SUELO POR METALES PESADOS DEBIDO A LA
ACTIVIDAD MINERA”**

POR:

PERLA MARICELA JÁQUEZ VALENZUELA

MONOGRAFÍA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA

ENERO DE 2013

“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO”

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

“CONTAMINACIÓN DE SUELO POR METALES PESADOS DEBIDO A LA
ACTIVIDAD MINERA.”

MONOGRAFÍA QUE SE PRESENTA PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

PERLA MARICELA JÁQUEZ VALENZUELA

APROBADA POR EL H. CUERPO DE ASESORES

ASESOR PRINCIPAL



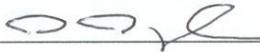
ING. JOEL LIMONES AVITIA

ASESOR



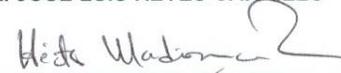
MC. NORMA L. ORTIZ GUERRERO

ASESOR



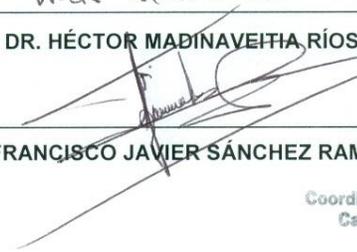
DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

ASESOR



DR. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

COORDINADOR DE LA
DIVISIÓN DE CARRERAS
AGRONÓMICAS



DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS


Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA

ENERO DE 2013

MONOGRAFÍA QUE SE SOMETE A CONSIDERACION DEL H. JURADO
EXAMINADOR COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:
INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

PRESIDENTE DEL JURADO



ING. JOEL LIMONES AVITIA

VOCAL



MC. NORMA L. ORTIZ GUERRERO

VOCAL



DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

VOCAL SUPLENTE



DR. HÉCTOR MADINAVEITIA RÍOS

COORDINADOR DE LA
DIVISIÓN DE CARRERAS
AGRONÓMICAS



DR. FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ RAMOS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA

ENERO DE 2013

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater, por darme la oportunidad de alcanzar esta meta, gracias a los profesores quienes durante todo este transcurso se esmeraron por dar lo mejor para mi formación profesional, por los conocimientos teóricos y las experiencias vividas.

A Rafael Guevara que ha sido una fuente de motivación, gracias por tu paciencia, comprensión y por apoyarme en los momentos más difíciles.

Al Ing. Joel Limones por su alto empeño, dedicación profesional, consejos y llamadas de atención en el transcurso de la realización de este trabajo. Sin su dedicación y disponibilidad, sin duda no hubiera podido lograr esta meta.

Al Dr. José Luis Reyes por su amable aceptación y gran participación para concluir este trabajo.

A la MC. Norma L. Ortiz por su valiosa colaboración en la revisión del presente trabajo.

Al Dr. Héctor Madinaveitia por su valiosa amistad y compartir desinteresadamente todos sus conocimientos.

A todos mis maestros que intervinieron a lo largo de mi carrera y contribuyeron en mi formación académica.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera colaboraron en el desarrollo de mis estudios y en la realización de este trabajo.

DEDICATORIAS

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer, por su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde estén o si alguna vez lleguen a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mi vida, por todas las enseñanzas y por dejarme formar parte de sus vidas.

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi madre Santiago Valenzuela, por darme la vida, porque gracias a ella he llegado a esta etapa; por su paciencia y comprensión, porque a pesar de las dificultades y carencias ha realizado el máximo esfuerzo para darme lo mejor, reconozco su infinito esfuerzo por educarme y formarme, por los valores que siempre me ha inculcado. Este trabajo se lo dedico con mucho cariño, como un símbolo de gratitud por el amor incondicional que siempre me ha brindado. Todo esto te lo debo a ti.

A mi padre José Luis Jáquez⁺, que aunque fue poco el tiempo que estuvo a mi lado, me enseñó que nunca hay que darse por vencido, y que no existe barrera u obstáculo alguno que pueda detenerme. Sé que este momento hubiera sido tan especial para ti, como lo es para mí.

A mis hermanas Lorena y GeorGINA por ayudarme y apoyarme en todo momento. Ustedes han sido un motor para lograr todos mis propósitos. Gracias por su tiempo, sus consejos, su apoyo incondicional y su cariño.

A mis amigas Fabiola, Ana, Carmen, Nereida y Bianca, que me han brindado su amistad incondicional. A ti Juan Gámez⁺ “Wamas”, por enseñarme el valor de la amistad, por haberme hecho sentir la persona más privilegiada al tener un amigo como tú. A pesar de que no estás aquí ahora conmigo, sé que tu alma si lo está, te dedico con todo mi corazón este trabajo. Nunca te olvidaré...

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
RESUMEN	vi
I.- INTRODUCCIÓN	1
II.- OBJETIVO.....	2
2.1.- Objetivo general.....	2
2.2.- Objetivo específico.	2
III.- REVISIÓN DE LITERATURA	3
3.1.- El suelo.....	3
3.2.- Composición del suelo.....	3
3.3.- Estructura del suelo.....	4
3.4.- Clasificación de los suelos	5
3.4.1.- Por su origen se clasifican en:	6
3.4.2.- Por su composición se clasifican en:	6
3.5.- Generalidades sobre metales pesados.....	6
3.6.- Contaminación de suelo por metales pesados.....	9
3.7.- Efectos de los metales pesados en el suelo	11
3.8.- La explotación de recursos naturales.....	11
3.9.- Economía minera.....	12
3.10.- La minería y la contaminación de suelos en México	13
3.11.- Tipos de explotación minera.....	16
3.11.1.- Cielo abierto	17
3.11.2.- Subterránea	17
3.12.- Impactos ambientales de la minería.....	17
3.12.1.- Drenaje ácido.....	17
3.12.2.- Contaminación de metales pesados en agua	18
3.12.3.- Alteración visual	18
3.12.4.- Impacto de ruido.....	19
3.13.- Jales mineros	19
3.13.1.- Características de los residuos mineros y formas de manejo	20
3.13.2.- Depósitos o presas de relaves mineros	21
3.13.3.- Aspectos ambientales relacionados con el manejo de los jales o relaves mineros.....	24
3.14.- Cronología de algunas de las fallas más importantes de la gran minería a nivel mundial.....	24
3.15.- Movilización de los metales pesados en el suelo	32
3.16.- Remediación de suelos contaminados	33
3.16.1.- Legislación	33
3.16.2.- Clasificación de tecnologías de remediación	34
3.17.- Arsénico	37
3.17.1.- Usos del arsénico.....	37
3.17.2.- Obtención del arsénico.....	38
3.17.3.- Toxicología del arsénico	38
3.17.4.- Cinética del arsénico	39
3.17.5.- Dosis tóxica.....	39

3.18.- Cromo.....	39
3.18.1.- Usos del cromo.....	39
3.18.2.- Obtención del cromo.....	40
3.18.3.- Toxicología del cromo	41
3.18.4.- Cinética del cromo	42
3.18.5.- Dosis tóxica	42
3.19.- Cadmio	42
3.19.1.- Obtención del cadmio.....	43
3.19.2.- Usos del cadmio.....	43
3.19.3.- Toxicología del cadmio.....	44
3.19.4.- Cinética del cadmio.....	44
3.19.5.- Dosis tóxica.....	45
3.19.6.- Contaminación de suelo por cadmio.....	45
IV.- CONCLUSIÓN	46
LITERATURA CITADA	48

INDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Valor de producción, 2005. INEGI	13
Figura 2.-Plano de Potencial Geológico en la Republica Mexicana. Programa Minero del Estado de Coahuila.	14

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Rangos de concentraciones típicas de metales traza en los tipos de rocas más abundantes (en mg kg^{-1}) (Fuente: Ross, 1994)	9
Tabla 2.- Niveles de metales ($\mu\text{g g}^{-1}$) en los suelos.....	10
Tabla 3.- Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente	16
Tabla 4.- Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo ..	34
Tabla 5.- Ventajas/desventajas de tecnologías de remediación <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>	36
Tabla 6.- Características de las Tecnologías de Tratamiento de Suelos	37
Tabla 7.- Principales usos del cadmio. Manual de Minería.	43

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con la finalidad de conocer sobre los impactos ambientales provocados por la actividad minera, con destrucción de los suelos naturales que pueden presentar limitaciones físicas, químicas y biológicas que dificultan la reinstalación de vegetación.

El suelo es considerado un recurso natural frágil y no renovable, debido a que resulta difícil y costoso recuperarlo o incluso, mejorar sus propiedades después de haber sido alterado.

La contaminación del medio ambiente por metales pesados es un serio problema mundial que ha atraído la atención de diversos sectores de la sociedad. La minería es una de las actividades más perjudiciales y contaminantes para este, ya que los contaminantes pueden permanecer durante mucho tiempo. Esta permanencia a largo plazo es especialmente en el caso de contaminantes inorgánicos como los metales pesados, que no pueden ser degradados.

PALABRAS CLAVES: Suelos, contaminación, minería, metales pesados, normatividad.

I.- INTRODUCCIÓN

La contaminación del medio ambiente por metales pesados es un serio problema mundial que ha atraído la atención de diversos sectores de la sociedad. Diversas instituciones e investigadores han considerado que los metales pesados son los principales contaminantes de este siglo (Mohan *et al.*, 2006).

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, la cual ha contribuido desde la época prehispánica hasta nuestros tiempos al desarrollo del país (Hernández *et al.*, 2009).

La actividad minera es potencialmente contaminante de metales pesados como un riesgo generalmente asociado con el almacenamiento y disposición de escombreras, drenajes ácidos y el uso de ciertos reactivos químicos, ya que los contaminantes pueden permanecer durante mucho tiempo. (Van-Camp *et al.*, 2004).

El suelo es alterado como resultado de las actividades mineras. Una de las anomalías biogeoquímicas que se generan al momento de la extracción es el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo convirtiéndolos a niveles demacroelementos los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo; estos afectan el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, inhibiendo la descomposición de la materia orgánica del suelo (Wong, 2003).

Los minerales se extraen y se concentran al utilizar métodos físicos, posteriormente se separa la fracción económicamente redituable por gravimetría. Los materiales con baja concentración de metal se retiran en forma de lodos que contienen altas cantidades de elementos potencialmente tóxicos (EPT). Los lodos son depositados en tinajas que en México se denominan presas de jales, estos materiales son difícil de eliminar, ya que pueden permanecer durante décadas en el suelo e incorporarse en la cadena trófica (PROFEPA, 2000).

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas (Prieto et al.2009), Los daños que causan son tan severos y en ocasiones tan ausentes de síntomas, que las autoridades ambientales y de salud de todo el mundo ponen mucha atención en minimizar la exposición de la población, en particular de la población infantil, a estos elementos tóxicos. En México, se carece de información relativa a la calidad de suelos en términos del contenido de metales pesados(Hirataet al.,2008).

Esta producción minera en México, se concentra en trece entidades: Chihuahua, Jalisco, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Guerrero (Carrillo, 2005).

II.- OBJETIVO

2.1.- Objetivo general.

Recopilar información sobre los daños en el suelo que puede ocasionar la actividad minera debido a los desechos conformados por metales pesados que esta genera.

2.2.-Objetivo específico.

Explicar de qué manera la contaminación de suelo por metales pesados puede afectar a la salud humana.

III.- REVISIÓN DE LITERATURA

3.1.- El suelo

El suelo se define como un cuerpo natural conformado por las fases sólida (materiales minerales y orgánico), líquida y gaseosa, presente en la superficie de la corteza terrestre y que se caracteriza por soportar vida o por la presencia de capas u horizontes resultante de adición, pérdida, transformación o translocación de materiales o energía (Peterle, 1991).

El suelo es considerado un recurso natural frágil y no renovable, debido a que resulta difícil y costoso recuperarlo o, incluso mejorar sus propiedades después de haber sido alterado, realiza un gran número de funciones clave tanto ambientales como económicas, sociales y culturales que son esenciales para la vida. Es indispensable para la producción de alimentos y el crecimiento vegetal, almacena minerales, materia orgánica, agua y otras sustancias químicas y participa en su transformación, sirve de filtro natural para las aguas subterráneas; es hábitat de una gran cantidad de organismos; proporciona materia prima para la construcción, además de que es un elemento del paisaje y del patrimonio cultural (SEMARNAT, 2005)

3.2.- Composición del suelo

El suelo está compuesto principalmente de 5 compuestos, entre los que están: la materia orgánica, materia inorgánica, agua y aire, y una parte fundamental, los organismos vivos, que son principalmente pequeños animales y microorganismos. (Neaman et al 2008).

Componentes orgánicos: son los residuos vegetales y animales muertos. La descomposición de estos materiales se debe principalmente a la acción de

bacterias, hongos, musgos, líquenes e insectos, y logran fijar el nitrógeno que es importante como sustancia útil en los procesos esenciales de las plantas.

Componentes inorgánicos: la parte inorgánica del suelo, tiene un efecto muy importante en la vida microbiana, debido a su influencia en la disponibilidad de nutrientes, aereación y retención de agua.

En lo que respecta a la vida animal – microorganismos y animales pequeños- ocupa solamente un 1% del total de los componentes del ecosistema del suelo, sin embargo, es indudablemente necesaria la producción de cultivos y la fertilidad del suelo (Forero, 2010).

Las bacterias que se encuentran en el suelo, pueden dividirse en dos grupos: las autóctonas y las alóctonas. Las bacterias autóctonas o indígenas, son bacterias que existen permanentemente en el suelo, estas tiene la capacidad de tener etapas de resistencia en las cuales existen formaciones de esporas, por lo que son capaces de sobrevivir largos periodos sin ser activas metabólicamente, pero dependiendo de las circunstancias del suelo, con capaces de proliferar en las funciones bioquímicas de la comunidad microbiana (Neaman et al 2008).

Las especies alóctonas o invasoras, por su parte, no participan de manera significativa en las actividades de dichas comunidades microbianas, son capaces de vivir algún tiempo con bajas actividades metabólicas, y algunas veces llegan a crecer por periodos cortos, pero nunca participan de manera significativa en las transformaciones o interacciones ecológicas de importancia (FECYT, 2007)

3.3.- Estructura del suelo

La estructura del suelo controla la distribución, flujo y retención de agua, sustancias disueltas y gases; su perturbación conduce a procesos de degradación edáfica que se asocian con diversas causas (compactación y cementación, entre otros), y disminuyen la productividad de los agroecosistemas (Gale et al., 2000).

La estructura del suelo y su estabilidad son los factores que más influyen en el crecimiento de las raíces, ya que afectan el abastecimiento de oxígeno, agua y nutrientes a la solución del suelo adyacente a éstas (Vaz et al., 2001).

Un corte vertical a través de un suelo natural revela una estratificación característica, que se denomina perfil del suelo. Se distinguen en este perfil tres capas superpuestas u horizontes con características distintas. Estos horizontes son:

Horizonte A: es la capa superficial, de color oscuro por su contenido de humus; rica en materia orgánica y actividad biológica. Está formada por partículas de arena y arcilla.

Horizonte B: es de color más claro. En él se asienta el material proveniente desde el horizonte superior como el óxido de hierro y material aluminico.

Horizonte C: es el horizonte más profundo, y constituye el origen de los otros dos horizontes, donde se encuentran fragmentos de la roca madre (Smithson et al., 2002).

3.4.- Clasificación de los suelos

Su clasificación se empezó a dar desde el inicio de la agricultura hace unos 10,000 años, ya que el hombre empezó a considerar la tierra como medio para el desarrollo de las plantas. Para el año 3000 a C, ya existían ideas de esos primeros agricultores de reconocer diferencias entre algunos tipos de suelos mostrando predilección por los limosos.

Se cree que la clasificación de los suelos más antigua se desarrolló en China hace 4,000 o 5,000 años. Se basaba en la capacidad de los suelos para producir cosechas que se utilizaban para determinar impuestos. Los griegos y los romanos también reconocieron una diversidad de suelos que los llevo a una serie de

prácticas de manejo de ellos que todavía se utilizan en la agricultura (Jiménez, 2001).

3.4.1.- Por su origen se clasifican en:

-Suelos residuales: se forman en el mismo punto donde las rocas son desintegradas por los agentes físicos, químicos y biológicos.

-Suelos sedimentarios: se forman por la acumulación de partículas y restos provenientes de otros sitios que han sido arrastrados por agua o viento (Flores *et al.*, 2004)

3.4.2.- Por su composición se clasifican en:

-Suelos arenosos: compuestos principalmente de arena. Son muy permeables, y de color gris.

-Suelos arcillosos: compuestos en su mayoría por arcilla. Son pesados y compactos, y además poco permeables. Son de color rojizo. Son aptos para la agricultura.

-Suelos magros o limosos: son una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla; son muy aptos para la agricultura.

-Suelos humíferos: poseen gran cantidad de humus, y debido a su alto contenido de materia orgánica resultan aptos para cualquier actividad agrícola. Son de color negruzco.

-Suelos calcáreos: en ellos se cultiva maíz y cebada. Requieren ser abonados y regados con abundante agua. Las sales calcáreas les da un color blanquecino (Gerrard, 2002).

3.5.- Generalidades sobre metales pesados

El término de metal pesado se refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones

incluso muy bajas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el Cadmio (Cd), Arsénico (As) y Cromo (Cr). (Lucho *et al.*, 2005).

Además son definidos como elementos con propiedades metálicas (conductibilidad, ductilidad, etc.), número atómico mayor de 20, y cuya densidad es mayor a los 5g/cm³. Constituyen un grupo de gran importancia, ya que algunos son esenciales para las células, pero en altas concentraciones pueden resultar tóxicos para los seres vivos, organismos del suelo, plantas y animales (Spain *et al.*, 2003).

No son biodegradables, se acumulan en el ambiente, son altamente reactivos, persistentes y tóxicos, incluso a bajas concentraciones, por lo que se les considera un gran peligro para la estabilidad del medio ambiente y la salud pública (Das, 2008).

De acuerdo a su interrelación con los seres vivos, se distingue dos grupos dentro de los metales pesados. Un grupo de oligoelementos o micronutrientes que se requieren en pequeñas cantidades para el funcionamiento de sistemas enzimáticos, dentro de los que se encuentra el Cobre, Hierro, Selenio y Zinc, entre otros, que a su vez pueden ser tóxicos si se incrementa la concentración a la cual se exponen los organismos. El otro grupo son los metales pesados sin función biológica conocida, los cuales pueden originar efectos tóxicos a partir de determinadas concentraciones; este grupo tiene la propiedad de ser persistentes en el medio ambiente y bioacumularse haciendo que su concentración en un organismo vivo, tienda con el tiempo a superar la concentración del elemento en el medio ambiente estos son peligrosos porque tienen a bioacumularse en diferentes cultivos, la bioacumulación significa un aumento en la concentración de un producto químico en un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo, comparada a la concentración de dicho producto químico en el ambiente. (Angelova *et al.*, 2004).

El potencial de toxicidad de los metales pesados sin función biológica depende de su capacidad de combinarse con diferentes tipos de moléculas, especialmente las

que cuentan en su estructura con grupos sulfhidrilos. Es importante aclarar que aunque los términos metales pesados y metales tóxicos se utilicen como sinónimos, solo algunos de los metales pesados son tóxicos. (Goyer, R. *et al* 1997)

Los metales son componentes naturales de la corteza terrestre. Tienen un papel importante en los organismos al ser parte fundamental de sus funciones bioquímicas y fisiológicas (Thariat *al.* 2005). Los metales pesados se han convertido en un tema actual tanto en el campo ambiental como en el de salud pública (Vazquez *et al.*, 2006).

La EPA (US Environmental Protection Agency) incluye en la lista de contaminantes prioritarios los siguientes trece elementos: antimonio, arsénico, berilio, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y zinc, que vienen de fuentes naturales tales como piedras y metálicos minerales, y los aportes antropogénicos como la metalurgia de la agricultura, la producción de energía, la microelectrica, la minería, lodos residuales y eliminación de residuos (Houet *al.*, 2009).

En el suelo, de acuerdo a las características del mismo, pueden quedar retenidos, ya sea por fijación por procesos de adsorción y precipitación, o disueltos en la solución del mismo; pueden ser absorbidos por plantas y de esa manera incorporarse a las cadenas tróficas. A nivel aéreo pueden ingresar a la atmosfera por fenómeno de volatilización y por último, pueden movilizarse hacia aguas superficiales o subterráneas, especialmente provenientes de suelos en los cuales el efecto de los ácidos facilita la liberación y migración de los metales. La principal forma por la cual los metales pesados entran en contacto con el ser humano es por el consumo de agua o alimentos contaminados. De acuerdo a las características del metal, también puede presentarse exposición por vía aérea. (López *et al.*, 1995; Manahan *et al.*, 2005).

	Rocas Ígneas			Rocas Sedimentarias		
	Ultrabásicas	Básicas	Granitos	Caliza	Arenisca	Esquistos
Cd	0.12	0.13-0.2	0.09-0.2	0.028-0.1	0.05	0.2
Co	110-150	35-50	1	0.1-4	0.3	19-20
Cr	2000-2980	200	4	10-11	35	90-100
Cu	10-42	90-100	10-13	5.5-15	30	39-50
Hg	0.004	0.01-0.08	0.08	0.05-0.16	0.03-0.29	0.18-0.5
Mn	1040-1300	1500-2200	400-500	620-1100	4-60	850
Ni	2000	150	0.5	7-12	2-9	68-70
Pb	0.1-14	3-5	20-24	5.7-7	8-10	20-23
Sn	0.5	1-1.5	3-3.5	0.5-4	0.5	4-6
Zn	50-58	100	40-52	20-25	16-30	100-120

Tabla 1.- Rangos de concentraciones típicas de metales traza en los tipos de rocas más abundantes (en mg kg⁻¹) (Fuente: Ross, 1994)

La población puede estar expuesta a estos contaminantes como consecuencia de su extensa difusión en el medio (Ferré *et al.* 2007).

3.6.- Contaminación de suelo por metales pesados

Al hablar de contaminación por metales hay que tener en cuenta que más importante que el contenido total de un elemento en el suelo es la forma o especie química bajo la que se encuentra (Mulligan *et al.*, 2001).

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino *et al.*, 2002). Al contenido natural de elementos químicos existentes en un suelo se le llama “fondo geoquímico local” (FG) o nivel de fondo (Ross, 1994).

En el suelo, su actividad depende de transformaciones físicas y químicas como solubilización, precipitación, adsorción y los cambios en su estado de oxidación, procesos que determinan la estabilidad de los metales en el suelo (Galán et al. 2008). Las características del suelo influyen de manera directa y determinante con las concentraciones de metales en éstos y con los niveles de disponibilidad hacia las plantas (Oste et al. 2007 y Teik-Thye et al. 2006). Los metales acumulados en la superficie del suelo se reducen lentamente mediante la lixiviación, el consumo por las plantas, la erosión y la deflación (Martin et al., 2005).

En la tabla 2 se señalan los niveles de metales ($\mu\text{g g}^{-1}$) en los suelos que requieren intervención según la Junta de Andalucía y comparación con las concentraciones máximas permitidas en otros países y para diferentes usos (Rooney et al., 2006).

	Menos sensibles/ sensibles / construido	Residencial pH 6-7	Todos*	Industrial	Agricultura limo/arcilla	Residencial/ industrial	Todos	
As	100 / 52	n.i.	n.i.	5	39	n.i.	100/500	55
Cd	10 / 5	3/12	1/3	1	192	1/1.5	20/100	12
Cu	500 / 250	130/130	50/140	5	15921	40/60	1000/5000	190
Pb	500 / 350	500/2000	50/300	5	744	70/100	300/1500	530
Zn	1200/ 700	300/300	150/300	5	n.i.	150/200	7000/35000	720

Tabla 2.- Niveles de metales ($\mu\text{g g}^{-1}$) en los suelos.

De todos los elementos traza encontrados en suelos, hay 17 que se consideran como muy tóxicos y a la vez fácilmente disponibles en muchos suelos en concentraciones que sobrepasan los niveles de toxicidad. Éstos son: Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Se, Sn, Te, Tl y Zn. De ellos, diez son

fácilmente movilizados por la actividad humana en proporciones que exceden en gran medida la de los procesos geológicos(Fang-Jie et al., 2006).

3.7.- Efectos de los metales pesados en el suelo

La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como el Cu, que pueden quedar en forma no disponible por las plantas, motivo por el cual, algunas plantas crecidas en suelos ricos en materia orgánica, presentan carencia de elementos como el Cu, Pb y Zn, es lo que significa que los suelos no están contaminados y que las poblaciones microbianas se reducen notablemente. La textura favorece la entrada e infiltración de la contaminación de metales pesados en el suelo, por ejemplo la arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio, por el contrario los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos(Pineda, 2004). La arcilla tiene una gran capacidad para inmovilizar el cadmio bajo condiciones ácidas, neutras y ligeramente alcalinas(Puga et al. 2006).

3.8.- La explotación de recursos naturales

El incremento demográfico mundial es bien conocido y es un hecho perfectamente aceptado. Lo que no está claro y a veces discutido es la incapacidad de los recursos naturales, los minerales, los bosques y el suelo, solo se necesitaba para rendir un modesto interés que era suficiente para satisfacer las necesidades primarias del hombre. A medida que la población fue creciendo también fue necesario satisfacer intereses cada vez mayores hasta comenzar a utilizar los recursos capitales (Hudson, 2006).

La expansión demográfica vino de la mano con la revolución industrial, que puso a disposición del hombre herramientas, las máquinas y los ingenios que hicieron posible la explotación de los recursos naturales a escala anteriormente inimaginables. Por lo cual, mientras la curva demográfica muestra una continua

tendencia ascendente, los recursos naturales mostraban una tendencia descendente, a partir de la revolución industrial se iniciaron de la mano del hombre acciones más destructivas, alterando y distorsionando el reciclado biológico de los compuestos químicos del suelo (ASOCAE, 2012).

Una de las consecuencias más negativas de la revolución industrial ha sido la dispersión de los contaminaste en el agua, atmósfera y suelo. De estos, el suelo es el medio en donde los contaminantes pueden permanecer durante mucho tiempo. Esta permanencia a largo plazo es especialmente grave en el caso de contaminantes inorgánicos como los metales pesados, que no pueden ser degradados (Becerril *et al.*, 2007).

3.9.- Economía minera

Considerando que el valor anual de la producción minera es de 6,800 millones de dólares, que representa el 1.6% del PIB de México y genera 279,000 empleos directos y 1.5 millones de empleos indirectos (CAMIMEX, 2007), se puede establecer una clasificación de la misma en función del porcentaje que representa cada una de las siguientes divisiones (Musik, 2004):

- 1) La gran minería, que aporta el 84.1% del valor total de la producción minero-metalúrgica nacional. Es hacia esta élite que se dirigen mayormente las directrices de Estado en materia minera.
- 2) La mediana minería, que aporta el 13% del valor total de la producción minero-metalúrgica nacional.
- 3) La pequeña minería, que aporta el 2.9% del valor total de la producción minero-metalúrgica nacional.

4) Una división que frecuentemente pasa desapercibida, es el estrato más bajo de la cadena minera y, sin embargo, durante muchos años fue la fuente del descubrimiento de importantes zonas mineralizadas. A ella pertenecen los mejor conocidos como “gambusinos” o mineros artesanales, cuyos logros no quedan registrados debido a que son representantes de la informalidad hacendaria. Éstos producen a nivel particular grandes cantidades de metales preciosos (principalmente oro y plata), pero su comercialización se realiza en un mercadeo interno, entre un comprador que paga en efectivo y el productor, ambos cobijados por la ilegalidad.



Figura. 1 Valor de producción, 2005. INEGI

3.10.- La minería y la contaminación de suelos en México

México es uno de los países de Latinoamérica que se encuentra localizado en una región volcánica rica en minerales. La tradición minera en el país remonta a la

siglos, ayudando a generar infraestructura y polos de desarrollo en el país. A nivel mundial, el auge de la minería mexicana se tradujo en un importante flujo de metales preciosos, especialmente plata, hacia los circuitos comerciales europeos. Actualmente, la posición de la minería dentro de las industrias de sector primario es significativa (Gutiérrez, 2003).

La explotación minera en el país se realiza básicamente en dos modalidades: (i) explotación y beneficio de metales (preciosos e industriales) y (ii) explotación de piedras preciosas y minerales industriales, como los ópalos y caolines, respectivamente. También es común la explotación de rocas para la elaboración de artesanías y construcciones (canteras) (Volke et al, 2005).

En la tabla 3 se describen las fases del proceso minero y las afectaciones ambientales de cada etapa, entre las que destacan la deforestación, la disposición de residuos al aire, agua y suelo, daños a otros recursos naturales, además de la generación de ruido, entre otros.

Fase	Descripción	Impacto ambiental
Prospección	Estudios de gravimetría, geología superficial, densidad, etc	Procedimientos que no generan impactos ambientales significativos
Exploración	Barrenación, obras, perforaciones, construcción de caminos, instalación de campamentos	Destrucción de vegetación
Explotación y beneficio	Descapote: eliminación de suelo y vegetación Construcción y obras diversas (tiros, socavones, patios para depósito de minerales, zonas para descarga de materiales) Alto consumo de agua Acumulación de material sin valor en terreros Transporte del material con valor hacia molinos Extracción y concentración de	Destrucción de la capa del suelo y la vegetación Afectación a cuerpos de agua Generación de terreros inestables Generación de jales o colas Esguerramiento y arrastre de residuos Oxidación de minerales insolubles y formación de sustancias solubles con alto contenido de metales (drenaje)

	minerales Reducción del tamaño del mineral por trituración y molienda Tratamientos previos a una fusión primaria o electro-depositación	ácido) Descarga de lixiviado que contienen iones metálicos y reactivos tóxicos La trituración y molienda pueden provocar ruido, vibración y emisión de polvo (efectos de bajo impacto). Descarga de aguas residuales
Fundición y refinación	Obtención de metales y sus aleaciones (uso de hornos industriales) Eliminación de impurezas en los metales para aumentar la ley de contenido	Emisiones a la atmósfera, residuos peligrosos y aguas residuales

Tabla 3.- Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente

FUENTE: Dirección General de Minas, Subsecretaría de Minas, SEMIP, 1994.

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

1. Tamaño de la explotación, que se refiere al volumen de producción de la explotación, el cual tiene como consecuencia una determinada dimensión de actividades y producción de desechos y aguas residuales.
2. Localización, que se refiere al sitio en el que se lleve a cabo la explotación, las poblaciones que puedan aledañas y la naturaleza de la topografía social.
3. Métodos de explotación, que dependen del tipo de yacimientos a explorar y que están directamente relacionados con la naturaleza y extensión del impacto. Se utilizan tres métodos principales:
 - a) Minería a cielo abierto (o minería superficial).
 - b) Minería subterránea (Kussmaul, 1989).

3.11.- Tipos de explotación minera

De acuerdo con la ubicación del yacimiento, la minería en el país se realiza a cielo abierto (cuando los minerales se encuentran en zonas más o menos superficiales) o bien, opera de forma subterránea (Gutiérrez *et al.*, 1997).

3.11.1.- Cielo abierto

En suma, lo particular de este tipo de minería (a cielo abierto), diferente de la tradicional, es que implica niveles aún mayores de afectación del medio ambiente, generando cuantiosos pasivos ambientales, al tiempo que requiere tanto un uso desmesurado de recursos, entre ellos el agua y la energía, ambos imprescindibles para sus operaciones, como asimismo, intervenir de manera violenta la geografía de los territorios para la explotación (Svampa, 2009).

3.11.2.- Subterránea

La minería subterránea presenta mayores costos de explotación que la minería a cielo abierto. A esto hay que sumarle las complicaciones asociadas a una menor capacidad de extracción del mineral económico y mayores riesgos laborales. Se recurre a la explotación subterránea cuando la sobrecarga de estéril sobre la masa mineralizada es tal que su remoción hace inviable un proyecto minero a cielo abierto. Podemos decir también, que bajo un punto de vista ambiental, la minería subterránea suele crear un impacto menor que una minería a cielo abierto (Molina *et al.*, 2006).

3.12.- Impactos ambientales de la minería

3.12.1.- Drenaje ácido

El drenaje de roca ácida es un proceso natural en el cual el ácido sulfúrico es producido ya que los sulfatos de las rocas son expuestos al aire libre o al agua. El Drenaje Ácido de la Minería (DAM) es el mismo proceso, solo que en una cantidad mayor (Neaman, 2007).

Cuando las grandes cantidades de roca que contienen minerales sulfatados, son excavadas en minas subterráneas, estos materiales reaccionan con el aire o con el agua creando ácido sulfúrico.

Cuando el agua alcanza cierto nivel de acidez, un tipo de bacteria llamada *Tiobacillus Ferroxidantes*, puede aparecer acelerando los procesos de oxidación y acidificación, disolviendo aún más los residuos de los metales (Fuentes, 2011).

3.12.2.- Contaminación de metales pesados en agua

Entre las sustancias que se incorporan al suelo vía el agua, se encuentran los metales pesados, los cuales pueden participar en diversos procesos como incorporación al ciclo del agua, principalmente en la fase relacionada con el suelo y el agua subterránea; también pueden acumularse en el suelo con diversos grados de disponibilidad o en el tejido vegetal, debido a su absorción por las plantas (Gadd, 2010).

La acumulación de metales pesados en sedimentos y suelos, por adsorción y/o coprecipitación u otras formas de asociación natural, puede acarrear a la larga consecuencias negativas para el entorno ecobiológico. Las variaciones del medio circundante a los sólidos y sedimentos pueden producir la lixiviación de cantidades significativamente elevadas al estado disuelto, y con ello accesibles a los sistemas acuosos y seres vivos (Prieto *et al.*, 2005).

El ácido es transportado desde la mina por el agua, las lluvias o por corrientes superficiales, y posteriormente depositado en lo estanque de agua, arroyos, ríos, lagos y mantos acuíferos cercanos. El DAM degrada severamente la calidad del agua y puede aniquilar la vida acuática, así como volver el agua prácticamente inversible (López, 1995).

3.12.3.- Alteración visual

Por su parte, el impacto visual de las minas será mínimo a ras de suelo aunque grande desde una posición de altura. Las minas a cielo abierto solo pueden ser percibidas desde arriba. Otra cosa son las instalaciones de procesamiento de minerales, en particular las fundiciones, que desde lejos mostrarán la existencia de

grandes chimeneas. La destrucción de los bosques y del cauce de los ríos altera profundamente el paisaje, lo que impacta en el ecoturismo (Oyarzun, 2011).

3.12.4.- Impacto de ruido

La operación de retroexcavadoras, cargadores frontales, volquetes, motores y bombas impacta en la fauna por los ruidos que generan. La perturbación no sólo aleja a la fauna, sino que impacta directamente cuando las operaciones se realizan cerca de zonas turísticas, y cerca o en tierras de los pueblos indígenas (Álvarez *et al.*, 2011).

3.13.- Jales mineros

Como en ningún proceso de concentración se logra una recuperación de 100%, los desechos mineros (colas o jales) siempre contienen residuos del mineral, permitiendo su eventual recuperación a futuro. Sin embargo, era común que muchas empresas descartan sus desechos en ríos o los dispusieran en grandes pilas. La composición de estos residuos puede ser muy diversa en su naturaleza química y mineralógica (Sánchez, 1995).

Los residuos mineros, conocidos también como *colas* (tailings), relaves o jales mineros, son el producto de la trituración y molienda del mineral una vez que se han recuperado los metales comerciales mediante procesos físicos y químicos. (Armienta *et al.*, 2005). La composición de estos jales mineros puede ser muy diversa en su naturaleza tanto química como mineralógica (Volke, 2005).

Los elementos presentes en los jales que pueden ocasionar problemas por su alta toxicidad son el arsénico, cadmio y cromo (Ramos, 2004) algunos otros como el fierro y el manganeso aunque se representen un riesgo menos, se considera que podrían tener efectos adversos a la salud. (Volke, 2005).

Los residuos mineros (llamados jales en México) normalmente son depositados en embalses o presas sobre distintos tipos de terrenos de la superficie donde permanecen expuestos a las condiciones climáticas ambientales. Bajo estas condiciones puede ocurrir la dispersión de contaminantes por medios físicos (erosión, transporte eólico y pluvial) y/o por su alteración (reacción y neoformación) y movilidad química (disolución y transporte en medio acuoso) que dan origen a una mineralogía secundaria (precipitación de fases minerales secundarias como óxidos, oxihidróxidos, sulfatos e hidroxisulfatos (Nordstrom *et al.*, 1999).

3.13.1.- Características de los residuos mineros y formas de manejo

La mayoría de los relaves o jales se encuentran en forma de lodos o de una mezcla líquida de materiales finos que en cierta manera se comporta como un suelo, por lo que aplican para su caracterización los principios de la mecánica de suelos; a condición de que se reconozcan los procesos de consolidación que tienen lugar y la forma en que fluyen los lodos. Entre las diferencias que tienen estos residuos con respecto de los suelos comunes, se encuentran el hecho de que su densidad y cuerpo son inicialmente bajos y crecen con el tiempo. (Contreras *et al.*, 2000).

Frecuentemente, para conservar y reusar el agua de proceso, así como para concentrar los lodos, se suele someterlos a un proceso de deshidratación hasta que alcancen una consistencia tal que facilite su transporte hacia las instalaciones de depósito, lo que ocurre cuando el contenido de sólidos es de 40 a 50 por ciento y el de agua de 150 a 100 por ciento, respectivamente; lo cual constituye un lodo con propiedades de fluido. Los lodos son transportados a las presas o depósitos mediante ductos, ya sea por gravedad o con ayuda de bombeo, y a través de descargas subaéreas o por métodos de descarga por inyección subacuosa, bajo el agua superficial. También, puede ocurrir que se remueva agua adicionalmente, para crear una descarga engrosada o densa. La forma en que se depositan los relaves en las presas influyen de manera importante en su

comportamiento y en la constitución de capas con diferente grosor de partículas y humedad (US EPA, 2011).

A medida que las partículas de los relaves se empaquetan bajo el efecto de la gravedad, se provoca el fenómeno de consolidación, el cual aporta tres beneficios: aumento de sólidos que pueden ser almacenados en un volumen dado; aumento del cuerpo del suelo por eliminación de agua; y disminución de la cantidad de filtraciones hacia el subsuelo. Cuando el proceso se completa, es común encontrar contenidos de 20 por ciento de agua unida a las partículas, aún en medios muy áridos con elevada evaporación. La permeabilidad de los relaves depositados en una presa es utilizada como un indicador de consolidación y potencial de filtraciones. Como resultado del depósito segregado de partículas por influencia de la gravedad, la permeabilidad es mayor cerca del punto de depósito y disminuye progresivamente (Doyle, 1990).

Un grave peligro, como consecuencia de fuerzas dinámicas como las que ocurren durante un terremoto, es la posibilidad de licuefacción de los relaves por la vulnerabilidad que les ocasiona el que se trate de depósitos débiles de partículas en un estado libre y saturado. En tales condiciones, y de ocurrir una fuga, los relaves pueden fluir a distancias considerables, a gran velocidad, y con consecuencias desastrosas. Dichas consecuencias se agravan cuando los metales en los relaves se encuentran en forma de sulfuros y existe un gran potencial de generación de ácidos en presencia de oxígeno y agua. También, requieren particular atención los relaves que contienen otros elementos potencialmente tóxicos como el arsénico, los que presentan altas concentraciones del cianuro empleado en el beneficio de metales o los que pueden provocar la contaminación por sales utilizadas en los procesos salinos (UNEP, 1996).

3.13.2.- Depósitos o presas de relaves mineros

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios

para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales.

Diversas características de los depósitos o presas de relaves mineros los hacen diferentes de las presas de agua para generación de electricidad y requieren ser tenidos en consideración para incrementar su seguridad y prevenir el riesgo de ruptura o liberación de los residuos contenidos en ellos (Reyes *et al.*, 2010).

Destaca el hecho de que el diseño de tales presas o depósitos no puede concluirse antes del inicio de las operaciones que generarán los relaves; de hecho, el tamaño y capacidad de estos depósitos suele expandirse a medida que se lleva a cabo la producción minera, lo cual demanda un proceso continuo de construcción y la atención permanente a las cuestiones de seguridad asociadas a ello.

La pared externa de los depósitos suele construirse a partir de suelos naturales, de los materiales que se generan durante las actividades de extracción, e incluso con relaves de depósitos preexistentes o los mismos que se están generando en las operaciones en curso. En estos últimos casos, se separan los materiales gruesos o arenosos de los fangosos, para emplear los primeros en la construcción de las paredes y verter los segundos dentro del depósito. En cualquier caso, como lo que se busca es almacenar sólidos y no el retener el agua, la pared en la medida de lo posible deberá ser permeable. La geometría de las presas varía dependiendo de la topografía del lugar, empleándose por lo general presas circulares en terrenos planos (Cortinas, 2007).

Como medidas preventivas de su contaminación, se recomienda desviar los cursos de agua más cercanos a las presas y establecer sistemas para captar el agua que caiga dentro del área de confinamiento, así como mecanismos para retener a los materiales de las paredes externas que puedan estarse erosionando. La cantidad de agua dentro de las presas de relaves debe mantenerse bajo

control, eliminando periódicamente los excesos de manera a no provocar contaminación (lo cual puede llegar a implicar su tratamiento previo para remover sustancias tóxicas), así como previniendo que exista déficit de agua. En algunos casos, puede llegarse a requerir dotar a la presa de un recubrimiento inferior con una capa plástica que prevenga las filtraciones (Santibañez *et al.*, 2012).

Al diseñar las presas o depósitos se recomienda considerar su estabilidad y seguridad en todo momento de su vida, incluyendo la etapa de cierre o clausura. Ello implica considerar todo tipo de eventos como que se llene hasta el tope el depósito, la posible erosión de las paredes, los derrumbes o erosión asociados con los ductos que transportan los jales al depósito; todo lo cual hace necesario el empleo de métodos de evaluación y manejo de riesgos.

Es importante considerar la posible flexibilidad en el diseño de las presas, con base en criterios y requisitos de aseguramiento de la calidad que incluyan, entre otros, los siguientes:

- . *Consistencia y distribución de los tamaños de partículas de los relaves a ser depositados.

- . *Precipitación pluvial y evaporación.

- *Bordes libres del depósito para prevenir desbordes.

- *Cantidad de relaves a ser depositados y el volumen de agua a ser decantada (Caldwell *et al.*, 1982)

Además de lo expuesto, se recomienda prever y realizar la vigilancia de la construcción de la presa para verificar la conformidad con el diseño, así como llevar a cabo la revisión periódica de las características de diseño a medida que avanza la obra, efectuar la inspección y auditoría regular de la presa, con perforación de los depósitos y tomas de muestras para caracterizar el estado de los relaves; se considera además pertinente al efectuar estas actividades incluir cuando sea conveniente la supervisión por autoridades o expertos independientes y, en su caso, la adopción de medidas correctivas. En cuanto a la previsión,

preparación y ejecución de las obras para el cierre de los depósitos o presas de jales, se plantea la necesidad de considerar las medidas pertinentes para prevenir impactos adversos al ambiente (Mosquera *et al.*, 2009).

3.13.3.- Aspectos ambientales relacionados con el manejo de los jales o relaves mineros

En las condiciones normales de operación de los depósitos o presas de jales mineros, y como consecuencia de tormentas y derrames, puede ocurrir la contaminación de los cuerpos de abastecimiento de agua, con el posible deterioro de la calidad de la misma, sobre todo si los relaves tienen un pH o un contenido de metales que pueden volver el agua temporal o permanentemente no apta para el consumo. Por lo general, la afectación de los cuerpos de agua superficiales suele ser sólo local, pero en algunos casos puede alcanzar distancias alejadas varios kilómetros del lugar en el que ocurre la contaminación. La afectación depende del tipo y características de los jales mineros vertidos, de la frecuencia e importancia de las descargas, así como de los regímenes hidrológicos de las aguas receptoras. También, puede producirse la contaminación de los mantos freáticos como consecuencia de las filtraciones en las presas, lo cual requiere ser vigilado mediante monitoreo. Todo ello, implica la necesidad de contar con programas de manejo y protección del agua en las operaciones mineras (Orozco, 1991).

En los últimos años han ocurrido accidentes en presas de jales, como los resumidos en el cuadro siguiente, que han alertado a la comunidad mundial y deben ser considerados como lecciones de las cuales derivar medidas para incrementar la seguridad en este tipo de instalaciones.

3.14.- Cronología de algunas de las fallas más importantes de la gran minería a nivel mundial

1) 1961, MINA DE CARBÓN - TYMAWR REINO UNIDO - falla de presa, las colas viajaron 800 metros aguas abajo.

- 2) 1962, PERÚ – falla de la presa por licuación durante un terremoto ocurrido después de intensas lluvias.
- 3) 1961, MINA DE CARBÓN - TYMAWR REINO UNIDO- falla de presa por sobrepaso, las colas viajaron 700 metros aguas abajo causando daños considerables.
- 4) 1965, 28 DE MARZO, MINA DE COBRE - LOS MAQUIS CHILE – falla de presa por licuación en un terremoto, 21.000 m³, las colas viajaron 5 kilómetros aguas abajo.
- 5) 1965, 28 DE MARZO, MINA DE COBRE – LA PATAGUA NEW DAM, CHILE – falla de presa por licuación en un terremoto, 35.000 m³, las colas viajaron 5 kilómetros aguas abajo.
- 6) 1965, 28 DE MARZO, MINA DE COBRE – EL COBRE OLD DAM, CHILE – falla de presa por licuación en un terremoto, 1.900.000 m³, las colas viajaron 12 kilómetros aguas abajo destruyendo el pueblo de el cobre y matando a más de 200 personas.
- 7) 1965, 28 DE MARZO, MINA DE COBRE – EL COBRE NEW DAM, CHILE – falla de presa por licuación en un terremoto, 350.000 m³, las colas viajaron 12 kilómetros aguas abajo.
- 8) 1965, 28 DE MARZO, MINA DE COBRE – CERRO NEGRO N° 3, CHILE – falla de presa por un terremoto, 85.000 m³, las colas viajaron 5 kilómetros aguas abajo.
- 9) 1965, 28 DE MARZO, MINA DE COBRE – BELLAVISTA, CHILE – falla de presa por un terremoto, 70.000 m³, las colas viajaron 800 metros aguas abajo.
- 10) 1966, MINA DE PLOMO Y ZINC - MIR, BULGARIA – falla de presa, pérdida de vidas.
- 11) 1966, MINA DE CARBÓN – ABERFAN, WALES, REINO UNIDO – falla de la presa por licuación después de intensas lluvias, las colas viajaron 600 metros aguas abajo, 144 personas resultaron muertas.
- 12) 1966, MINA DE CARBÓN – DERBYSHIRE, REINO UNIDO – falla de la presa por la fundación, 30.000 m³, las colas viajaron 100 metros aguas abajo.
- 13) 1966, MINA DE YESO – EAST TEXAS U.S.A. - falla de la presa, 76.000 – 130.000 m³ de yeso, las colas viajaron 300 metros aguas abajo.
- 14) 1967, MINA DE CARBÓN – REINO UNIDO – falla de la presa durante la operación de perfilado, las colas cubrieron un área de 4 hectáreas.
- 15) 1967, MINA DE FOSFATO – FORT MEADE, FLORIDA, U.S.A. – falla de la presa, 250.000 m³ de residuos fosfatados, contaminó 1.800.000 m³ de agua, se reportaron peces muertos en peaceriver.
- 16) 1968 – HOKKAIDO, JAPÓN – falla de la presa por licuación por un terremoto, 90.000 m³, las colas viajaron 150 metros.

- 17) 1969 – BILBAO ESPAÑA – falla de la presa por licuación después de intensas lluvias, 115.000 m³, pérdidas de vidas.
- 18) 1970, MINA DE CAOLÍN – MAGGIE PIE, REINO UNIDO – falla de la presa después de haber sido recrecida y de intensas lluvias, 15.000 m³.
- 19) 1970, MINA DE COBRE – MUFULIRA, ZAMBIA – licuación de colas que fluyeron hacia obras subterráneas, cerca de 1.000.000 de toneladas, 89 mineros muertos.
- 20) 1971, MINA DE FOSFATO – FORT MEADE, FLORIDA, U.S.A. - falla de la presa, 9.000.000 de agua con arcilla, las colas viajaron por 120 kilómetros por PeaceRiver, murieron muchos peces.
- 21) 1972, MINA DE CARBÓN – BÚFALO CREEK, WEST VIRGINI, U.S.A. – falla de la presa después de intensas lluvias, 500.000 m³, las colas viajaron por 27 kilómetros, murieron 125 personas, se destruyeron 500 casas, los daños superan los 65 millones de dólares.
- 22) 1973, MINA DE COBRE – SOWTHWESTERN U.S.A. – rotura de la presa por aumento de presión de poros causados por la construcción de recrecimiento, 170.000 m³, las colas viajaron 25 kilómetros río abajo.
- 23) 1974, MINA DE MICA – DENEEN MICA, NORTH CALIFORNIA, U.S.A. – falla de la presa después de intensas lluvias, 38.000 m³, las colas drenaron a un río adyacente.
- 24) 1974, MINA DE PLATINO – BAFOKENG, SUDÁFRICA – falla de la presa por filtraciones concentradas y tubificación a través de grietas, 3.000.000 m³, 12 personas muertas en la mina inundada por colas, las colas viajaron 45 kilómetros aguas abajo.
- 25) 1975, MINA DE PLOMO Y ZINC – MIKE HORSE, MONTANA, U.S.A. – falla de presa después de intensas lluvias, 150.000 m³.
- 26) 1975, MINA DE PLOMO, ZINC, ORO – MADJAREVO, BULGARIA – aumento de la altura de las colas por arriba del nivel de diseño, causo la sobrecarga de la torre de drenaje y de los colectores, 250.000 m³.
- 27) 1975, MINA DE METALES – SILVERTON, COLORADO, U.S.A. – falla de presa, 116.000 toneladas, las colas contaminaron cerca de 160 kilómetros del río Ánimas y sus tributarios, severos daños a la propiedad.
- 28) 1976, MINA DE PLOMO Y ZINC – ZLEVOTO, YUGOSLAVIA – falla de la presa debido a un nivel freático demasiado elevado, y salida de filtraciones en el talud de aguas debajo de la presa, 300.000 m³, las colas alcanzaron y contaminaron un río vecino.
- 29) 1977, MINA DE URANIO – HOMESTAKE, MILAN, NUEVO MÉXICO, U.S.A. – falla de la presa por rotura de una tubería de transporte de lodos obturada, 30.000 m³, sin impactos fuera de la mina.

- 30) 1978, MINA DE ORO – MOCHIKOSHI N° 1, JAPÓN – falla de la presa por licuación durante un terremoto, 80.000 m³, una persona muerta, las colas fluyeron 7 u 8 kilómetros aguas abajo.
- 31) 1978, MINA DE ORO – ARCTURUS, ZIMBABWE – sobrepaso después de varios días de lluvia continuada, 30.000 toneladas, una persona muerta vías de agua, y pasturas afectadas.
- 32) 1979, - COLUMBIA BRITÁNICA, CANADÁ – tubificación, 40.000 m³ de agua embalsada, considerables daños a la propiedad.
- 33) 1979, MINA DE URANIO – CHURCH ROCK, NUEVO MÉXICO, U.S.A. – rotura de la presa debido a asentamientos diferenciales de la fundación, 370.000 m³ de aguas radioactivas, 1000 toneladas de sedimentos contaminados, contaminación del río puerco con sedimentos hasta 110 kilómetros aguas abajo.
- 34) 1980, MINA DE COBRE – TYRONE, NUEVO MÉXICO, U.S.A. – rotura de la presa por aumento de presión de poros causado por la construcción rápida de un recrecimiento, 2.000.000 m³, las colas fluyeron 8 kilómetros aguas abajo, inundando tierras de cultivo.
- 35) 1981, MINA DE HIERRO – BALKA CHUFICHEVA, LEBEDINSKY, RUSIA – fallas de la presa, 3.500.000 m³, las colas viajaron 1,3 kilómetros.
- 36) 1981, MINA DE CARBÓN – AGES, HARLAN COUNTY, KENTUCKY, U.S.A. – falla de la presa después de intensas lluvias, 96.000 m³, de lodos de desechos de carbón, la ola de lodo viajó a lo largo del arroyo LeftFork Of Ages, 1,3 kilómetros aguas abajo, una persona murió, tres viviendas destruidas, 30 viviendas dañadas, mortandad de peces en el río CloverFork of The Cumberland.
- 37) 1982, MINA DE COBRE – SIPALAY, NEGROS ACCIDENTAL, FILIPINAS – falla de la presa por deslizamiento de la fundación sobre suelo arcilloso, 28.000.000 de toneladas, extensa inundación de tierras agrícolas con asta 1,5 metros de residuos.
- 38) 1985, MINA DE ORO – OLINGHOUSE, WADSWORTH, NEVADA, U.S.A. – colapso de un terraplén por saturación, 25.000 m³, las colas fluyeron 1,5 kilómetros aguas abajo.
- 39) 1985, MINA DE COBRE – CERRO NEGRO N° 4 CHILE – falla de la presa por licuación durante un terremoto, 500.000 m³, las colas fluyeron 8 kilómetros aguas abajo.
- 40) 1985, MINA DE COBRE – VETA DE AGUA N° 1 CHILE - falla de la presa por licuación durante un terremoto, 280.000 m³, las colas fluyeron 5 kilómetros aguas abajo.
- 41) 1985, MINA DE FLUORITA – STAVA, TRENTO, ITALIA - falla de la presa por inestabilidad del talud diseñado con una pendiente excesiva y drenajes inadecuados, 200.000 m³, las colas fluyeron 4,2 kilómetros aguas abajo, a una

velocidad de 90 kilómetros por hora; 268 personas murieron, 62 edificios y 8 puentes destruidos.

42) 1986, MINA DE HIERRO – HUANGMEISHAN, CHINA – falla de la presa por deslizamiento del talud a causa del flujo del agua, 19 personas muertas.

43) 1986, - ITABIRITO, MINAS GERAIS, BRASIL – rotura de la presa, 100.000 toneladas, las colas fluyeron 12 kilómetros aguas abajo.

44) 1987, MINA DE ORO – MINA COMSUR, BOLIVIA – contaminación con arsénico y otros metales pesados en el río Pilcomayo. Murieron dos niños por ingesta de pescado contaminado y se revelaron valores elevados de metales pesados en pobladores indígenas de las riberas del río Pilcomayo.

45) 1988, MINA DE FOSFATO – RIVER VIEW, FLORIDA, U.S.A. – vertido ácido, miles de peces muertos en la desembocadura del río Alafia.

46) 1988, MINA DE CARBÓN – TENNESSEE CONSOLIDATED N° 1, GRAYS CREEK, TN, U.S.A. – la presa fallo por erosión interna causada por la rotura de una tubería de descarga abandonada, 250.000 m³.

47) 1988, MINA DE MOLIBDENO – JINDUICHENG, SHAANXI PROVINCE, CHINA – rotura de la presa, el bloqueo del vertedero causo la elevación del nivel del embalse, 700.000 m³, murieron 20 personas.

48) 1989, MINA DE ARENA Y GRAVA – STANCIL, PERRY VILLE, MARYLAND, U.S.A. – rotura de la presa después de intensas lluvias, 38.000 m³, las colas derramadas cubrieron 5.000 m².

49) 1989, MINA DE ORO - minera santa rosa, el corozal, panamá. Un derrame de cianuro ocasiona gran mortandad de peces y pone en peligro la vida de muchos panameños.

50) 1989, - MINA DE ORO – MINA KUMTOR, KYRGYSZTAN – un camión que transportaba cianuro de sodio, volcó en un puente derramando sobre la superficie del agua 1.762 kilos, murieron 4 pobladores y cientos de personas debieron ser asistidas en los hospitales.

51) 1990, MINA DE ORO – MINA SUMMITVILLE, COLORADO E.E.U.U. – un derrame de cianuro acabo con toda la vida acuática a lo largo de 27 kilómetros del río Alamosa, la mina fue clausurada en diciembre de 1992, y el US Geological Survey, estimo que los costos de limpieza superarían los 150 millones de dólares.

52) 1991, MINA DE PLOMO Y ZINC –SULLIVAN MINE, KIMBERLEY, COLUMBIA BRITÁNICA CANADÁ – falla de la presa por licuación de antiguas colas provocadas por el recrecimiento de la presas, 75.000 m³, el material deslizado fue contenido en un reservorio adyacente.

- 53) 1992, MINA DE ORO – MINA BREWER, CAROLINA DEL SUR E.E.U.U. – 11.000 peces murieron a lo largo de 80 kilómetros del río Lynches por un derrame de cianuro.
- 54) 1992, MINA DE COBRE – N° 2 TAILINGS POND, PADCAL, LUZÓN, FILIPINAS – colapso de la presa por la falta de la fundación, 80.000.000 de toneladas.
- 55) 1992, MINA DE CENIZA Y ESCORIA – MARIÍTAS ISTOK 1, NEAR STARA, ZAGORA, BULGARIA – falla de la presa por inundación del vaso, 500.000 m³.
- 56) 1993, MINA DE ORO – MARSÁ, PERÚ – falla de la presa por sobrepaso, 6 personas muertas.
- 57) 1993, MINA DE FOSFATO – GIBSONTON, FLORIDA, U.S.A. – mortandad de peces causada por agua ácida vertida al arroyo Archie.
- 58) 1994, MINA DE ORO – MINA HARMONY, SUDÁFRICA – colapso de un dique en desuso de contención de residuos cianurados, enterraron un complejo habitacional causando la muerte de 10 trabajadores.
- 59) 1994, MINA DE COBRE Y URANIO – OLIMPIC DAM, ROXBY DOWNS, SUR DE AUSTRALIA – pérdidas en una presa de colas durante más de 2 años, vertidos de hasta 5.000.000m³ de agua contaminada al subsuelo.
- 60) 1994, MINA DE ORO – HARMONY, MERRIESPRUIT, SUDÁFRICA – rotura de la presa después de intensas lluvias, 600.000 m³, las colas viajaron 4 kilómetros aguas abajo, 17 personas murieron, extensos daños en áreas residenciales.
- 61) 1994, MINA DE FOSFATO – IMC-AGRICO, FLORIDA U.S.A. – se abre una cárcava en una pila de residuos, contaminación de aguas subterráneas.
- 62) 1994, MINA DE FOSFATO – FORT MEADE, FLORIDA U.S.A. – 76.000 m³ de agua vertido en el río Peace cerca de Fort Meade.
- 63) 1994, MINA DE FOSFATO – PAYNE CREEK MINE, POLK COUNTY, FLORIDA U.S.A. – falla de la presa, 6.800.000 m³ de agua de un reservorio de sedimento de arcilla, la mayor parte del vertido fue contenido por un área minera adyacente, 500.000 m³ se vertieron al arroyo Hickey, tributario del Payne Creek.
- 64) 1994, MINA DE FOSFATO –HOPEWELL MINE, HILLSBOROUGH COUNTY, FLORIDA, U.S.A. – falla de la presa, cerca de 1.900.000 m³ de agua de un reservorio de sedimentación de arcilla vertido a un humedal vecino y al río Alafia, Keyville fue inundado.
- 65) 1995, MINA DE ORO – OMAI, GUYANA – falla de la presa de colas por erosión interna, 4.200.000 m³ de lodos cianurados, 80 kilómetros del río Essequibo, fueron declarados zona de desastre medioambiental.

- 66) 1995, MINA DE ORO – PLACER, SURIGAO DEL NORTE, FILIPINAS – falla de la fundación de la presa, 50.000 m³, 12 personas muertas, polución de la costa.
- 67) 1995, MINA DE ORO – GOLDEN CROSS, NUEVA ZELANDA – movimientos de la presa que contiene 3.000.000 de toneladas de colas.
- 68) 1995, MINA DE ORO – BARRICK, MINA EL INDIO, CHILE – escape de colas de dique contaminó el río Elqui, comprometiendo el consumo de agua.
- 69) 1996, MINA DE COBRE – MARCOPPER, ISLA MARINDUQUE, FILIPINAS – escape de colas de un reservorio a través de un antiguo túnel de drenaje, 1.600.000 m³, evacuación de 1.200 residentes, 18 kilómetros de río inundado, con colas, 80 millones de dólares en daños.
- 70) 1996, MINA DE PLOMO, ZINC, COBRE Y PLATA – SGURIGRAD, BULGARIA – falla de la presa debido a un nivel de embalse excesivo producido por intensas lluvias, 220.000 m³, las colas viajaron 6 kilómetros aguas abajo, y destruyeron la mitad de un pueblo ubicado 1 kilómetro aguas debajo de la presa, produciendo 107 víctimas.
- 71) 1996, MINA DE ZINC, PLOMO Y PLATA – EL PORCO, BOLIVIA – falla de la presa, 400.000 toneladas, 300 kilómetros del río Pilcomayo contaminado.
- 72) 1996, - NAZCA PERÚ – falla de la presa durante un terremoto, más de 300.000 m³ de colas vertidos en el río.
- 73) 1997, MINA DE ORO – MINA GOLD QUERRY, NEVADA E.E.U.U. – derrame de 1.000.000 de litros de desechos de cianuro.
- 74) 1997, MINA DE COBRE – PINTO VALLEY, ARIZONA, U.S.A. – falla del talud de la presa de colas, 230.000 m³, de colas y escombros, las colas cubrieron 16 hectáreas.
- 75) 1997, MINA DE FOSFATO – MULBERRY PHOSTHATHE, POLK COUNTY, FLORIDA U.S.A. – falla de una pila de residuos, 200.000 m³ de agua de proceso, flora y fauna eliminadas del río Alafia.
- 76) 1998, MINA DE ZINC, PLOMO COBRE Y PLATA – LOS FRAILES, AZNALCOLLAR, ESPAÑA – falla de la presa por fundación entre 4 y 5 millones de m³ de agua y lodo tóxicos, miles de hectáreas de campo cultivable y del parque natural de Doñana cubiertas con lodo.
- 77) 1998, MINA DE FOSFATO – HUELVA, ESPAÑA – falla de la presa durante una tormenta 50.000 m³ de agua ácida y tóxica.
- 78) 1998, MINA DE ORO – MINA BACK HOMESTAKE, WHITEWOOD CREEK HILLS, DAKOTA DEL SUR, E.E.U.U. – 7 toneladas de desechos cianurados se derramaron causando importante mortandad de peces.
- 79) 1999, MINA DE ORO – PLACER, ZURRIAGO DEL NORTE, FILIPINAS, vertido de colas desde una tubería de hormigón dañada, 700.000 toneladas de

colas cianuradas, 17 casa sepultadas, 51 hectáreas de campos de arroz inundados.

80) 2000, MINA DE ORO – TULUKUMA, PAPUA NUEVA GUINEA – un helicóptero de la compañía minera pierde en vuelo una tonelada de cianuro, cayendo en los bosques a 85 kilómetros de la capital, Port Moreby, las obras de recuperero y descontaminación no impidió la afectación de los cursos de agua

81) 2000, MINA DE RECUPERACIÓN DE ORO DE ANTIGUAS COLAS – BAIAMARE, RUMANIA – falla del coronamiento de la presa de colas por sobre paso causado por intensas lluvias y deshielo, 100.000 m³ de liquido contaminado con cianuro, contaminación del arroyo Somes / Szamos, tributario del río Tisza, matando toneladas de peces y envenenando las fuentes de agua potable de mas de 2.000.000 de personas en Hungría.

82) 2000, - BORSA, RUMANIA – falla de las presas de colas después de intensas lluvias, 22.000 toneladas de colas contaminados con metales pesados, contaminación de río Vaser, tributario del río Tisza.

83) 2000, MINA DE COBRE – AITIK MINE, GÄLLIVARE, SUECIA – falla de la presa de colas debido a la insuficiente permeabilidad del drenaje, dando origen a un deslizamiento por exceso de presión de poros, vertido de 2.500.000 m³ de liquido en un reservorio de sedimentación adyacente, y subsiguiente vertido al ambiente de 1.500.000 m³ de liquido arrastrando algo de lodo.

84) 2000, MINA DE CARBÓN – INEZ, MARTÍN COUNTY KENTUCKY, U.S.A. – falla de la presa de colas debido al colapso de una mina subterránea bajo el reservorio de residuos, 950.000 m³ de residuos de carbón en forma de lodo, se vertieron a cursos de agua cercano, cerca de 120 kilómetros de ríos y arroyos se tornaron de un color negro iridiscente, provocando la mortandad de peces a lo largo del río Big Sandy, y algunos de sus tributarios. Pueblos debieron clausurar sus tomas de agua potable.

85) 2000, - NANDAN COUNTY, GUANGXI PROVINCE, CHINA – falla de la presa de colas, al menos 15 personas murieron, 100 desaparecidos, mas de 100 casas fueron destruidas.

86) 2001, MINA DE HIERRO – SEBASTIÃO DAS AGUAS CLARAS, NOVA LIMA DISTRICT, MINAS GERAIS, BRASIL – falla de la presa de colas por causas desconocidas. Inspectores estatales señalaron la ausencia de piezómetros en mayo del 2001, la avalancha de colas viajo 6 kilómetros matando al menos a dos mineros, tres trabajadores mas se encuentran desaparecidos.

87) 2002, - SAN MARCELINO, ZAMBALES, FILIPINAS – sobrepaso y falla del vertedero en dos presas de colas abandonadas luego de intensas lluvias, se vertieron colas en el lago Mapanuepe y eventualmente también al río santo tomas. Pueblos ubicados en zonas bajas resultaron inundados con residuos mineros y químicos, 250 familias evacuadas. 1.000 familias de tres pueblos evacuadas ante la amenaza del colapso de la presa.

88) 2003, MINA DE ORO – la prensa de Bolivia denunció la ocurrencia de un desastre ecológico de magnitud insospechada al romperse el dique de una mina en Potosí, vertiéndose a las aguas químicos que se utilizan en la explotación minera de la alta cuenca del río Pilcomayo. El desastre ocurrió en febrero pasado, la información ha sido mantenida en secreto para proteger las inversiones de la compañía minera salinas (Comisal). Cada año el sur boliviano reporta pérdidas calculadas en 62 millones de dólares por la severa contaminación del río Pilcomayo, denuncia Lidema.

Cabe destacar que no representan todos los casos de contaminación, ya que hay innumerables casos que nunca han sido denunciados.

Universidad nacional de San Juan, departamento de minas – instituto de investigaciones mineras.

3.15.- Movilización de los metales pesados en el suelo

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son: Características del suelo: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura; naturaleza de la contaminación: origen de los metales y forma de deposición y condiciones medioambientales: acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad (Sauquillo *et al.*, 2003).

Una evaluación del destino de los elementos traza, la biodisponibilidad y el transporte se requiere a fin de predecir la contaminación potencial y el impacto sobre la calidad del suelo y agua. (Burt *et al.*, 2011).

En general, los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías: quedan retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del suelo y/o precipitados como sólidos puros o mixtos; pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a la cadena trófica; pasan a la atmósfera por volatilización y se movilizan a las aguas superficiales o subterráneas (García *et al.*, 2005)

3.16.- Remediación de suelos contaminados

La remediación de suelos contaminados comprende un conjunto de procedimientos que, mediante la contención, retirada o destrucción de las sustancias contaminantes permite la recuperación total o parcial de las funciones del suelo. El gran número de técnicas existentes puede agruparse en función de sus características de operación o finalidad. Así, según el objetivo del tratamiento, un grupo está formado por tecnologías de inmovilización o contención de los contaminantes, mientras que otro comprende los diferentes tratamientos para eliminarlos, mediante su retirada (lavado, extracción de vapores, arrastre con vapor, etc.) o su transformación (incineración, vitrificación, biodegradación, etc.) (Miliarium, 2008).

Puede decirse que la selección de una tecnología de remediación para un suelo con características particulares, contaminado con un(os) contaminante(s) en particular, básicamente depende de los siguientes criterios:

- (i) Características ambientales, geográficas, demográficas, hidrológicas y ecológicas del sitio.
- (ii) Tipo de contaminante (orgánico o inorgánico), concentración y características fisicoquímicas.
- (iii) Propiedades fisicoquímicas y tipo de suelo a tratar
- (iv) Costo de las posibles tecnologías a aplicar

En cuanto a costos, como se ha mencionado, las tecnologías térmicas son las más costosas del mercado, mientras que dentro de las más económicas se encuentran las tecnologías de biorremediación aplicadas in situ. (INE, 2007).

3.16.1.- Legislación

La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. En donde dice que el plomo en uso agrícola/residencial/comercial debe ser menor de 390mg/kg y en uso industrial < 800 mg/kg, mientras tanto en la EPA dice que en áreas de recreación infantil (400mg/kg Pb) y en los suelos de uso común (1200mg/Kg Pb) a estos márgenes ya se recomienda hacer una remediación.

Concentraciones de referencia totales (CRt) por tipo de uso de suelo		
Contaminante	Uso agrícola /residencial / comercial (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Arsénico	22	260
Bario	5 400	67 000
Berilio	150	1900
Cadmio	37	450
Cromo Hexavalente	280	510
Mercurio	23	310
Níquel	1 600	20 000
Plata	390	5 100
Plomo	400	800
Selenio	390	5 100
Talio	5,2	67
Vanadio	78	1000

NOTA:

- En caso de que se presenten diversos usos del suelo en un sitio, debe considerarse el uso que predomine.
- Cuando en los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano no estén establecidos los usos del suelo, se usará el valor residencial.

Tabla 4.- Concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo

3.16.2.- Clasificación de tecnologías de remediación

El término tecnología de remediación implica el uso de cualquier operación unitaria o conjunto de ellas, que altere la composición de un contaminante peligroso a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan su toxicidad, movilidad o volumen en la matriz o material contaminado. Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de residuos peligrosos sin tratamiento y sus posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente (US EPA, 2001).

En la legislación mexicana proyecto de norma (PROY-NOM-138-Semarnat-2003), el término *remediación de suelos* se entiende como el conjunto de acciones necesarias para recuperar y reestablecer sus condiciones, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable para la zona respectiva. En la citada norma, el término remediación se utiliza como sinónimo de restauración, reversión, saneamiento, limpieza, rehabilitación y regeneración.

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras: con base en su estado de desarrollo (tradicionales e innovadoras), al lugar en donde se realizan (*in situ* y *ex situ*) (Landa, 2005).

In situ. Los tratamientos *in situ* son aquellos que permiten tratar el suelo contaminado sin la necesidad de excavar y transportar el suelo fuera de la zona (espacio) contaminada, lo cual genera una disminución de los costos. Este tipo de tratamiento generalmente requiere de periodos largos, además de que existe la posibilidad de que el tratamiento de remediación no sea uniforme dada la variabilidad de las características del suelo y debido a que es más difícil de verificar la eficacia de los procesos empleados (US EPA 2001).

Ex situ. Los tratamientos *ex situ* son aquellos que requieren de una excavación del suelo contaminado antes de realizar los procesos de remediación, lo cual incrementa los costos. Este tipo de tratamiento, generalmente requiere de periodos cortos y presenta una mayor certeza en la uniformidad de los procesos

empleados debido a que se puede obtener una adecuada homogeneización del suelo. En general, existe un mejor manejo del suelo contaminado (mezclado, tamizado), sin embargo, esto puede presentar condiciones de exposición a los trabajadores. Los tratamientos *ex situ*, a su vez, se dividen en:

. *Onsite*. El tratamiento se realiza en el mismo sitio en donde se realizó la excavación.

. *Off site*. El tratamiento se realiza fuera del sitio en donde se excavó (González, 2005).

	<i>IN SITU</i>	<i>EX SITU</i>
Ventajas	Permiten tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar Potencial disminución en costos	Menor tiempo de tratamiento Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente
Desventajas	Mayores tiempos de tratamiento Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo Dificultad para verificar la eficiencia del proceso	Necesidad de excavar el suelo Aumento en costos e ingeniería para equipos Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición

Tabla 5.- Ventajas/desventajas de tecnologías de remediación *in situ* y *ex situ*

Los elementos más móviles como el Cd tienden a precipitar cuando el pH es básico hacia la parte inferior de la capa o la parte superior del suelo subyacente(Landa, 2005).

En caso de la remediación de un sitio minero contaminado generalmente se requiere de ajustes de pH, condiciones oxidantes o reductoras (redox) y/o de la estabilización de los residuos (US EPA, 2001).

Técnica	Lugar de aplicación	Velocidad de tratamiento	Coste económico
Tecnologías de pantalla	In situ	Lenta	Bajo
Vitrificación in situ	In situ	Media	Alto
Estabilización/solidificación	In situ/ex situ	Rápida	Bajo
Enjuague de suelos	In situ	Media	Medio
Lavado de suelos	Ex situ	Rápida	Medio
Tratamiento electrocinético	In situ	Media	Alto
Barreras reactivas	In situ	Lenta	Medio

Tabla 6.- Características de las Tecnologías de Tratamiento de Suelos

3.17.- Arsénico

Elemento químico, cuyo símbolo es As y su número atómico, 33. El arsénico se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza (cerca de 5 x 10⁻⁴% de la corteza terrestre). Es uno de los 22 elementos conocidos que se componen de un solo nucleído estable, ⁷⁵33As; el peso atómico es de 74.922. Se conocen otros 17 nucleídos radiactivos de As. (Lenntech, 1999).

3.17.1.- Usos del arsénico

El arsénico se puede usar como: Productos químicos, usados en agricultura como pesticidas, industria del vidriotextiles, papeles, madera y cristal. Reactivos

inorgánicos industriales empleados como catalizadores y reactivos, aleaciones no ferrosas con cobre y plomo. Para la disección de animales, conservación de pieles, en la industria de curtiduría. En la elaboración de insecticidas, herbicidas, fungicidas, etc. (Miliarium, 2004)

3.17.2.- Obtención del arsénico

Se obtiene como subproducto ya que está asociado a otros minerales de cobre y plomo con contenidos de Enargita; depósitos de cobre con pirita arsenical; depósitos de níquel, cobalto, arsénico y plata nativa; depósitos de oro arsenical; depósitos de sulfuro arsenical con oros y sulfuro de arsénico y depósitos de estaño arsenical (Ros, 2009).

3.17.3.- Toxicología del arsénico

El arsénico es de origen natural en el suelo (Castro de Esparza, 2006).

El arsénico puede ser fatal en el ser humano; sin embargo esto podría ser debido al tiempo de exposición al arsénico en las personas, así como a la susceptibilidad al arsénico (Navas, 2006).

El consumo de agua contaminada con arsénico está asociado con síntomas respiratorios y mala función pulmonar en los hombres (Ondine et al., 2005), lesiones en la piel (Navas, 2008), presión arterial y problemas circulatorios (Zierold et al., 2004).

Las mujeres embarazadas deben ser prioridad para las actividades de mitigación (Anisuret et al., 2007). Se observó estadísticamente que el arsénico afecta el transporte de oxígeno, el ciclo celular las transcripciones que participan en la angiogénesis y el metabolismo de los lípidos (Angeline S. et al., 2007). Los grupos socioeconómicos más bajos (indicado por características de los hogares) tienen

un riesgo significativamente mayor de beber agua contaminada por arsénico(Khanet *al.*, 2007).

3.17.4.- Cinética del arsénico

Los compuestos arsenicales se absorben a través de las vía digestiva, respiratoria y cutánea.

Los compuestos orgánicos de arsénico se absorben mejor que los inorgánicos y los pentavalentes más que los trivalentes (ATSDR, 2007).

3.17.5.- Dosis tóxica

La dosis letal para el trióxido de arsénico es de unos 120 mg y para los compuestos orgánicos oscilan entre 0.1 y 0.5 g/Kg(Wright *et al.*, 2007).

3.18.- Cromo

El cromo tiene el símbolo atómico Cr, tiene una densidad de 7.19 g/cm³ y un peso atómico de 51.99 UMA. Tiene tres estados de oxidación +2,3 y 6, presenta propiedades anfotéricas en solución y sus sales en el estado hexavalente son oxidantes fuertes. No tiene olor ni sabor (EGVM, 2002).

Es un metal bastante duro y poco alterable. Aparece como terrones, gránulos, polvo o cristales, es soluble en ácido sulfúrico. Se encuentra en el grupo VI B de la tabla periódica, situado entre los grupos II A y II a dentro de los metales de transición. (Mencías*et al.*, 2000).

3.18.1.- Usos del cromo

Cromo parece ser involucradas en el metabolismo de las grasas, proteínas y carbohidratos. Los usuarios pueden tomar suplementos de cromo para aumentar la pérdida de peso. Puede ayudar en la pérdida de peso sin ejercicio o cambio de

la dieta. En teoría, el cromo ayuda a nuestros cuerpos a perder grasa ayudando en el Reglamento de la insulina. Cromo puede estimular la producción de insulina, pero también se comercializa como un supresor del apetito (Armendáriz *et al.*, 2007).

- El cromo es usado en la creación de aleaciones de hierro, níquel y cobalto.
- El uso de la cromita como refractante se debe a su alto punto de fusión, su moderada dilatación térmica y la estabilidad de su estructura cristalina.
- Los cromatos y óxidos de cromo se emplean en colorantes y pinturas
- El dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) es un reactivo químico que se emplea en la limpieza de material de vidrio de laboratorio y, en análisis volumétricos.
- El cromo y alguno de sus óxidos es usado además como catalizadores, por ejemplo, en la síntesis de amoníaco (NH_3).
- El mineral cromita ($Cr_2O_3 \cdot FeO$) se emplea en moldes para la fabricación de ladrillos (en general, para fabricar materiales refractarios).
- El dióxido de cromo (CrO_2) se emplea para fabricar las cintas magnéticas empleadas en las cassetes.
- El verde de cromo se utiliza para la elaboración de la porcelana y del cristal y en la industria química como intermedio de síntesis o como catalizador (Sánchez, 2009).

3.18.2.- Obtención del cromo

El cromo se encuentra en rocas, plantas, suelos, y el polvo volcánico, los humanos y animales. El cromo se manifiesta en el medio ambiente más comúnmente como el trivalente (cromo (III)), hexavalente (cromo-(VI)) y en la forma metálica (cromo (0)). El cromo III ocurre naturalmente en muchos vegetales, frutas, carnes, granos y levadura. El cromo (VI) y el cromo (0) son generalmente producidos mediante procesos industriales. Las fuentes principales del cromo (VI) son descargas de fábricas de acero y celulosa, y la erosión de depósitos naturales de cromo (III). En muchos lugares, los compuestos de cromo han sido diseminados al medio

ambiente mediante filtraciones, pobre almacenaje, o prácticas inadecuadas de disposición (EPA, 2010).

Los diversos compuestos del cromo hexavalente representa la mayor amenaza, especialmente debido a sus efectos genéticos. Los compuestos del cromo (VI) actúan en casi todos los sistemas de ensayo diseñados para determinar sus efectos mutagénicos. El hecho comprobado de que atraviesa la placenta significa alto riesgo, para los embriones y fetos (Gómez, 1997).

Carcinogenicidad ocasionada en particular por el Cromo, por la producción de **epoxialdehídos** en una reacción catalizada por las aspasosomales (Shoental, 1975).

3.18.3.- Toxicología del cromo

Los efectos tóxicos del Cr dependen de su estado de oxidación (Cervantes *et al.*, 2007).

El cromo hexavalente [Cr(VI)] es la forma más tóxica de este metal, ya que es un potente oxidante de la materia orgánica, es sumamente carcinogénico, mutagénico y teratogénico. Se ha demostrado que es 100 veces más tóxico y 1000 veces más mutagénico que la forma trivalente (Guillén *et al.*, 2009). Actualmente el Cr(VI) se considera un contaminante prioritario en muchos países (Wang, 2000).

El cromo produce un cuadro gastrointestinal en forma de vómitos, dolores abdominales, diarreas, y hemorragias intestinales. Se han descrito casos de muerte, por colapso cardiocirculatorio; si el paciente sobrevive, puede aparecer una insuficiencia renal aguda debido a necrosis tubular aguda. También puede ocasionar un fallo hepático, coagulopatía, o hemólisis intravascular (Cervantes, 1999).

El contacto cutáneo con compuestos hexavalentes de cromo puede producir úlceras de 5 a 10 mm, no dolorosas, a veces pruriginosas, que suelen afectar al

dorso de las manos y de los dedos, reciben el nombre de úlceras en "nido de paloma". También pueden ocasionar dermatitis de contacto (irritativas y alérgicas). La exposición a los compuestos hexavalentes de cromo se les relaciona con cuadros de bronquitis y de asma. También pueden producir ulceraciones y perforaciones del septum nasal. A diferentes compuestos de cromo y procesos industriales donde se utiliza cromo, se les relaciona con una mayor incidencia de cáncer de pulmón y de senos paranasales (Rico, 1996).

3.18.4.- Cinética del cromo

Los compuestos hexavalentes se absorben por vía digestiva, cutánea y respiratoria. Penetra con facilidad en el interior de los eritrocitos, combinándose con la fracción globínica de la hemoglobina, reduciéndose posteriormente a estado trivalente; en esta forma tiene gran afinidad por las proteínas plasmáticas, principalmente a la transferrina. La principal vía de eliminación es la renal (80%). La semivida de eliminación de 15-41 h.(Rico, 1996).

3.18.5.- Dosis tóxica

La DL50 de un cromato soluble en el hombre, es de unos 50 mg/Kg. A partir de 1-2 mg de cromo hexavalente/Kg puede ocasionar una insuficiencia renal aguda. Son concentraciones tóxicas en suero: >40 mg/L (Suarez, O., 2010).

3.19.- Cadmio

El cadmio es un elemento natural de la corteza terrestre. Generalmente se encuentra como mineral combinado con otros elementos tales como oxígeno (óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio). (ATSDR, 2008).

Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza.

Es un metal dúctil, de color blanco argentino con un ligero matiz azulado. Peso atómico de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20°C (68°F). Su punto de fusión de 320.9°C (610°F) y de ebullición de 765°C (1410°F) son inferiores a los del zinc. Hay ocho isótopos estables en la naturaleza y se han descrito once radioisótopos inestables de tipo artificial. El cadmio es miembro del grupo IIb (zinc, cadmio y mercurio) en la tabla periódica, y presenta propiedades químicas intermedias entre las del zinc metálico en soluciones ácidas de sulfato (Lenntech, 1998).

3.19.1.- Obtención del cadmio

Se obtiene principalmente en los procesos de refinación del zinc y menor grado en la refinación del plomo, también se obtiene como sub-producto a partir de la tierra o chatarra de baterías (Manual de Minería del Perú).

3.19.2.- Usos del cadmio

Se utiliza principalmente en la fabricación de baterías, la mayor aplicación es en baterías de níquel-cadmio. Pigmentos: las sales de cadmio se utilizan como pigmentos en plásticos y cerámicas. Estabilizadores: en la manufactura de PVC. Recubrimiento: como cubierta galvanizada para proteger equipos contra la corrosión marina. Otros: en la industria nuclear como retardador de las reacciones involucradas.

PRINCIPALES USOS DEL CADMIO	
USOS	IMPORTANCIA
Baterías	59.0%
Pigmentos	16.0%
Estabilizadores	10.0%
Recubrimientos	8.0%
Aleaciones	3.0%
Otros	4.0%

Tabla 7.- Principales usos del cadmio. Manual de Minería.

El cadmio (Cd) es un metal pesado que ha adquirido una gran importancia toxicológica y ecotoxicológica (WHO 1992). Ello está asociado al hecho de que la actividad antrópica lo remueve de sus depósitos naturales insolubles distribuyéndolo en los diferentes compartimentos ambientales -aire, tierra, agua- siendo el último, el sitio más importante del depósito final de sus diferentes formas solubles (Nriagu, 1988). Esta dinámica ambiental del metal conlleva la exposición crónica de los organismos, con consecuencias tanto a escala individual como poblacional, como consecuencia de los procesos de bioacumulación. Por ello los impactos son variados, desde los que ocurren a nivel suborganísmico hasta aquellos que se pueden manifestar como alteraciones en el ecosistema (Wright *et al.*, 1994).

3.19.3.- Toxicología del cadmio

Se conoce que el Cd es un elemento tóxico, cancerígeno, que en muy bajas cantidades afecta mecanismos y funciones fundamentales de diferentes especies, incluidos los humanos, siendo los órganos blanco más importantes el hígado y el riñón. A nivel celular la base de su acción tóxica radica en su interacción con fosfatidiletanolamina y fosfatidilserina; otro aspecto de su toxicidad está vinculado a su interacción con los grupos -SH de macromoléculas y la generación de radicales libres (Siesae *et al.*, 2003).

El cadmio puede dañar la función renal, y algunos estudios indican un efecto neoplásico (Hee Park *et al.*, 2001).

3.19.4.- Cinética del cadmio

La vía principal de absorción del cadmio es la respiratoria; los alimentos y los cigarrillos; una vez que pasa al torrente circulatorio, entre el 90 y el 95% se encuentra dentro de los eritrocitos y se fija a la hemoglobina y a la metalotionina, una proteína de bajo peso molecular rica en grupos SH. El cadmio tiene una vida media larga, de unos 15 años. La mayor parte se deposita en el hígado y en los

riñones, y se elimina esencialmente por la vía renal, intestinal y por las faneras (Pinot, 2000).

3.19.5.-Dosis tóxica

Por vía digestiva, ingestas de hasta 100 mg van a producir síntomas gastrointestinales, mientras que a partir de los 350 mg se considera que es potencialmentemortal. Por vía inhalatoria, concentraciones ambientales superiores a los 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ inducen la "fiebre de los metales", a partir de 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aparece una neumonitis química y más allá de los 5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se considera que es mortal (Andoet *al.*, 1996).

3.19.6.- Contaminación de suelo por cadmio

El cadmio llega al suelo de los terrenos agrícolaspor deposición aérea (41%), con los fertilizantes fosfatados (54%), por aplicación de abono de estiércol (5%) y, en el Perú, frecuentemente por efluentes que contienen residuos líquidos y sólidos de plantas hidrometalúrgicas de cadmio.Se ha encontrado que, en suelos contaminados, los niveles de cadmio alcanzan valores de hasta 1mg de Cd/g y el agua de ríos contaminados puede contener hasta 0,14 mg de Cd por L (Alarcón, 1994).

IV.- CONCLUSIÓN

La actividad minera, como la mayor parte de las actividades que el hombre realiza para su subsistencia, crea alteraciones en el medio natural, desde las más imperceptibles hasta las que representan claros impactos sobre el medio en que se desarrolla. Estas cuestiones, que hace algunos años no se percibía como un factor de riesgo para el futuro de la humanidad, hoy se contemplan con gran preocupación, que no siempre está justificada.

Pero ciertamente, los abusos anteriormente cometidos en este campo han hecho que crezca la conciencia de la necesidad de regular los impactos originados por la minería. De cualquier manera, también debe quedar claro que el hombre necesita los recursos mineros hoy, y los seguirá necesitando en el futuro. Otro punto que hay que destacar es que la actividad minera es infinitamente menos impactante (por su escasa extensión) que otras actividades industriales, como el desarrollo de grandes obras civiles (impacto visual, modificación del medio original) y la agricultura (modificación del medio original, uso masivo de químicos: pesticidas, fertilizantes). Así, en el momento actual existen normativas muy estrictas sobre el impacto que puede producir una explotación minera, que incluyen una reglamentación de la composición de los vertidos líquidos, de las emisiones de polvo, de gases de ruidos, de restitución del paisaje, etc. Que ciertamente a menudo resaltan muy problemáticos de cumplir por el alto costo económico que representa, pero que indudablemente han de ser asumidos para llevar a cabo la explotación.

No obstante, la humanidad necesita de los metales y minerales y no puede renunciar a su extracción salvo que todo el progreso que tan difícilmente se ha conseguido desaparezca. Pensemos por un momento que quedaría de cosas tan comunes que utilizamos, si muchos de los materiales de los cuales están conformado, fueron extraídos de una mina.

No se puede renunciar a la extracción de los recursos minerales, sin embargo, si se puede y debe minimizar los impactos sobre el medio.

LITERATURA CITADA

Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. and Barberis, R. 2002. Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. Environmental Pollution, 119: 177.

Agency for toxic substances and diseases registry, División of Toxicology

Alarcón, A. 1994. Contaminación Minero Metalúrgica de Lago de Chichaycocha y del Río Mantaro. Instituto para el Desarrollo de la Pesca y la Minería.

Álvarez, J., Sotero, V. y Brack, A. 2011. Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio. Insituto de la Amazonia Peruana, 9:93.

Ando, Y., Shibata, E. and Tsuchiyama, F. 1996. Elevated Urinary Cadmium Concentrations in a Patient With Acute Cadmium. Jurnal Scand J Work Environ Health. 22. Pp.3-10

Angeline S. Andrew†, Viviane Bernardo, Linda A. Warnke, Jennifer C. Davey, Thomas Hampton, Rebecca A. Mason, Jessica E. Thorpe, Michael A. Ihnat, and Joshua W. Hamilton 2007. Exposure to Arsenic at Levels Found in U.S. Drinking Water Modifies Expression in the Mouse Lung. TOXICOLOGICAL SCIENCES p 75–87.

Angelova V., Ivanova, R., Delibaltova, V. and Ivanov, K. 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Industrial Crops and Products, 19: 197–205.

Anisur, R., Vahter, M., Ekstrom, E., Rahman, M., Abu Haider, Mustafa, M., Wahed, M., Mohammed Yunus, M. and Persson, L. 2007. Association of Arsenic Exposure during Pregnancy with Fetal Loss and Infant Death: A

Cohort Study in Bangladesh 165. American Journal of Epidemiology p. 1389–1396.

Armendáriz, A., Bacardí, M. y Jiménez, A. 2007. Evidencias del efecto del cromo en personas con diabetes: revisión sistemática. Rev. Biomed. Vol 18. Pp. 117-126.

Armienta, A., Villaseñor, G. y Romero, M., 2005. Propuesta de estrategia metodológica para la evaluación de la peligrosidad de jales mineros en México.

AIMMGM. Convención internacional de minería. Pp. 12-15.

ASOCAE Asociación Española para la cultura, el Arte y la Educación. El hombre y la tierra. [En línea]: http://www.natureduca.com/hom_degrad_suelo1.php.(consulta 23 de septiembre de 2012)

ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. 2007. Resumen de Salud Pública Arsénico. División de Toxicología y Medicina Ambiental. CAS#: 7440-38-2.

ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. 2008. Reseña Toxicológica del Cadmio. División de Toxicología y Medicina Ambiental. CAS#: 7440-43-9.

Becerril, J., Barrutia, O., García Plazaola J., Hernández A., Olano J., Garbisu, C. 2007. Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. Ecosistemas, 16 (2), 50-55.

- Burt, R., Weber, T., Park, S., Yochum, S. y Ferguson, R. 2011. Trace Element Concentration and Speciation in Selected Mining-Contaminated Soils and Water in Willow Creek Floodplain, Colorado. *Applied and Environmental Soil Science*, pp 20.
- Caldwell, J. and Welsh, J. 1982. Tailings disposal in rugged, high precipitation environments. *Ann Arbor Science*. P.p. 5:62
- Cámara Minera de México (CAMIMEX), 2007, La industria minera de México: Revista de la Cámara Minera de México, marzo 2007.
- Carrillo, G. 2005. Niveles de contaminación de los suelos y las plantas. En: González-Chávez M.C. PérezMoreno J. y Carrillo-González R. Eds. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas, pp. 161 Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.
- Castro de Esparza, M., 2006 Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America* p. 1-14
- Cervantes, C., Campos, J., 2007. Reduction and efflux of chromate by bacteria. En: *Molecular Microbiology of Heavy Metals*, Springer-Verlag, Berlin. p. 407-420.
- Cervantes, C., Moreno, R., 1999. Contaminación ambiental por metales pesados. A.G.T. Editor, S. A. México. p. 157.
- Contreras, F., Ortiz J. y Padilla M. 2000. [En línea]. Unidad Académica de Economía de la Universidad Autónoma de Zacatecas (consulta 05 de Diciembre de 2011)

<<http://www.ciu.reduaz.mx/Pruebas.nsf/b4c56a1adbc9e5f86256ac300614816/8ad4c2450a00aeab86256ec8a2?OpenDocument>>

Cortinas, C. 2007. Manejo Ambiental de los Relaves o Jales Mineros. Instituto Nacional de Ecología.

Das, N., Vimala, R., Karthika, P., 2008. Biosorption of heavy metals. *Journal Biotechnol.* Vol. 7. Pp. 159-169.

Doyle, F. 1990, Mining and Mineral Processing Wastes, proceedings of the Western Regional Symposium on Mining and Mineral Processing Wastes. Berkeley, CA. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. 7- 3

Eissa, B., Saliban, A., Ferrari, L., Porta, P. Y Borgnia, M. 2003. Evaluación Toxicológica no invasiva del Cadmio: modificaciones de biomarcadores conductuales en *Cyprinus carpio*. *Revista Biología Acuática*, 20, pp. 56-62.

Expert Group on Vitamins and Minerals (EGVM) 2002. [En Línea]. Review of chromium [//www.foodstandards.gov.uk/multimedia/pdfs/reviewofchrome.pdf](http://www.foodstandards.gov.uk/multimedia/pdfs/reviewofchrome.pdf) (consulta 19 de Mayo de 2012).

Fang-Jie, Z., Corinne P. R., H. Zhang, S. P. McGrath. 2006. Comparison of soil solution speciation and diffusive gradients in thin-films measurement as an indicator of copper bioavailability to plants. *Environmental Toxicology and Chemistry*. Vol 25 pag 733-742.

Fuentes, J. Contaminación del agua por la Minería. [En Línea] <http://prezi.com/ivdms0ouiix1/contaminacion-del-agua-por-la-mineria/> (consulta 23 Octubre 2012).

- Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología. 2007. [En Línea].Biodiversidad. El mosaico de la vida. <http://www.oei.es/salactsi/491929281.pdf>(consulta 23 de Octubre de 2012).
- Federal Register 2001.Lead; Identification of Dangerous Levels of Lead; Final Rule. 40 CFR Part 745 Environmental Protection Agency.
- Ferré, N., Schuhmacher, M., Llobet, J. y Domingo, J. 2007. Diseño de un software para evaluar los riesgos de la exposición ambiental a través del agua, suelos y aire. Mapfreseguridad. vol 4. pag. 50-58.
- Flores, M., Torres, S. y Téllez, R. 2004. Medidas de Mitigación para Uso de Suelos Contaminados por Derrames de Hidrocarburos en Infraestructura de Transporte Terrestre. 257. 1-65.
- Forero, R. 2010. El suelo. Recurso natural. Universidad de Santo Tomás. Pp58-62.
- Gadd, M. G. 2010. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. Microbiology. Vol 156 pag. 609-643
- Galán H., Romero, E., 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. (ed.) Revista de la sociedad española de minerología. vol. 10 pp. 48-60.
- Gale, W., Cambardella, A. y Bailey, T., 2000. Surface residue and root derived carbón in stable and unstable aggregates. SoilScri. 196-201.
- García, I., Dorronsoro, C. 2005. Contaminación por Metales Pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm>

García, 2005. Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). Environmental monitoring and assessment. pag. 405-407. France

Gerrard, A., 2000. Fundamentals of soils. P.P. 1:225

Gilmour, C. & Riedel, G. 2009. Biogeochemistry of trace metals and metalloids. In Encyclopedia of Inland Waters. G. E. Likens vol 15 pag 7–15. Amsterdam: Elsevier

Gómez Mesa E., 1997. [En línea]. Problemas Ambientales del Cromo. Santo Domingo, Republica Dominicana. <http://html.rincondelvago.com/cadmio.html> (consulta 24 de Noviembre de 2011)

González M. 2005. Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. TerraLatinoamerica 23:29-37

Goyer, R. 1997. Toxic and essential metal interactions. Annu. Rev. Nur. 17:37-50

Guillén, F., Netzahuatl A., Morales L., Cristiani E., 2009. Hexavalent chromium removal by *Candida* sp. in a concentric draft-tube airlift bioreactor. Water Air Soil Poll 204:pp. 43-51.

Gutiérrez, M. 2003. [En Línea]. Minería Unión de Grupos Ambientalistas (UGAM). <http://www.union.org.mx/guia/actividadesyagravios/mineria.htm>. (consulta 25 de Octubre de 2012)

Gutiérrez, M.E. y M. Moreno. 1997. [En línea]. Los residuos en la minería mexicana. INE,

México.http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/35/los_residuos.html?id_pub=35(consulta 22 de Mayo de 2012)

Hee Park, J., Lamb, D., Paneerselvam, P., Choppala, G., Bolan, N. y Chung, J. 2001. Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. *Journal of Hazardous materials*.Vol. 185.Pag.549-574.

Hernández, E., Mongragón E., Cristobal, D., Rubiño, J. y Robledo, E. 2009. Vegetación, Residuos de Mina y Elementos Potencialmente Tóxicos de un Jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Forestal y del Ambiente*, 15, pp. 109-114.

Hirata, k., R. Oda, S. Tanaka, H. Tanigawa y J. Funaki. 2008. Pressure-loss reduction and velocity-profile improvement in a catalytic converter by a flow deflector. *Maizuru National College of Technology*.Vol 222.pag. 455-467. Japan.

Hou, H., Parent, M., Savard, M., Tassé, N., Bégin, C. y Marion, J. 2009. Lead concentrations and isotope ratios in the exchangeable fraction: tracing soil contamination near a copper smelter. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*.vol. 6 pag. 229-236

Hudson, N. 2006. *Conservación de suelo*, primera edición, editorial reverté S.A. España Pag. 332.

INE Instituto Nacional de Ecología. 2007. [En línea] www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/selección.html (consulta 01 de diciembre de 2012).

- Jiménez, B., 2001. La Contaminación Ambiental en México. Causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa, S.A. de C.V. México.
- Kussmaul S., 1989. La minería en Costa Rica y sus efectos en el ambiente.- En: Zamora D., (ed.): El impacto ambiental por la actividad minera en costa rica. EUNA, Heredia: 17-25
- Khan, M., Aklimunnessa, K., Kabir, M. and Mori, M. 2007. Determinants of drinking arsenic-contaminated tubewell water in Bangladesh. vol 22. Health Policy and Planning p 335–343
- Landa, E. R. 2005. Microbial biogeochemistry of uranium mill tailings. AdvApplMicrobiol. vol 57 pag 113–130.
- Lenntech, 1998. [En línea]. Propiedades químicas del cadmio. <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm#ixzz2E3YTLJsL> (consulta 03 de Diciembre de 2010)
- Lenntech, 1999. [En línea]. Propiedades químicas del cadmio. <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/as.htm#ixzz2E3cqZqrV> (consulta 03 de Diciembre de 2010).
- López, C., Gómez, J. , López, E. y Manglano, S. 1995. Manual de carga y transporte en minería a cielo abierto. Pp. 23
- López, S., Ayala L. F. 1995. Contaminación y Depuración de Suelos. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Capítulo 3. Dinámica de metales pesados en suelos. Pag. 49-58.
- Lucho, C., Álvarez, M., Beltrán, R.I., Prieto, F. and Poggi, H. 2005. A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in

agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with rawwastewater. Environmental International.

Martin F., I. Ortiz, I. García, M. Simón, E. Fernández, J. Aguilar y J. Fernández. 2005. Migration of Trace Elements from Pyrite Tailings in Carbonate Soils. Journal of Environmental Quality. Vol 31 Pag 829-835.

Manahan S. 2005. Enviromentalchemistry. pag 655

Manual de Minería del Perú. Estudios Mineros del Perú S.A.C. p.p 2:290.

Mencías, E. y Mayero, L. 2000. Manual de Toxicología Básica. Ed. Díaz de Santos. Pp. 1-866.

Miliarium. 2004. [Enlínea]. Aplicaciones del Arsénico. <http://www.miliarium.com/Monografias/Arsenico/Aplicaciones/aplicaciones.asp> (consulta 14 de Noviembre de 2012)

Miliarium 2008. [En línea]. Técnicas de remediación de Suelos Contaminados. (Consulta 01 de diciembre de 2012) <http://www.miliarium.com/Prontuario/TratamientoSuelos/Welcome.asp>

Mohan, D. y Pittman J., 2006. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. Journal Hazard Mater pp. 762-811.

Molina, J., Indhira, M. y Jiménez. 2006. Propuesta de Medición de la Productividad en Minería de Oro Vertiforme y Reconocimiento de Estándares Productivos Sostenibles. En: Boletín de Ciencias de la Tierra. Pp. 73-85

Mosquera, C., Chávez, M y Pachas, V. 2009. Estudio Diagnóstico de la Actividad Minera Artesanal en Madre de Dios.

Mulligan, C., Yong, R., and Gibbs, B. 2001. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60: 193-207

Musik G., 2004, El sector minero en México; diagnóstico, prospectiva y estrategia: México, D.F., Centro de Estudios de Competitividad, Instituto Tecnológico Autónomo de México, 7 p

Navas A., and Guallar, E., 2008. Measuring Arsenic Exposure, Metabolism, and Biological Effects: The Role of Urine Proteomics. *TOXICOLOGICAL SCIENCES*.p.1-4.

Navas, A., Silbergeld, E., Pastor, R. and Guallar, E.2006. Arsenic Exposure and Prevalence of Type 2 Diabetes in US Adults.Vol. 200. *JAMA* p. 814-822

Neaman, A., Ávila, G., Gaete, H. y Morales, M. 2007. Reproducción de Eisenia foetida en suelos agrícolas de áreas mineras contaminadas por cobre y arsénico. Vol. 42, p 435-441.

Neaman, A., González, I., Muenen, V. y Cisternas, M. 2008. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchunvací, Chile central. ED. *Revista Chilena de Historia Natural*. VI. 81 pp. 279-291.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

NOM-141-SEMARNAT-2003

Nordstrom, D and Alpers, C. 1999. Geochemistry of acid mine waste, in: Plumlee, G. S. and Logsdon, M. J., Eds. *Reviews, in Economic Geology, The*

environmental geochemistry of ore deposits. Part A: Processes, techniques and health issues, v. 6A, p.p. 133-160.

Nriagu, J. O. and J. M. Pacyna. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature* 333: 134-139.

Ondine S. von Ehrenstein, D. N. GuhaMazumder, Yan Yuan, SambitSamanta, John Balmes, ArabindaSil, NilimaGhosh, MeeraHira-Smith, Reina Haque, RadhikaPurushothamam, SarbariLahiri, Subhankar Das, and Allan H. Smith 2005. Decrements in Lung Function Related to Arsenic in Drinking Water in West Bengal, India. Vol. 162 *American Journal of Epidemiology*. P.533-541.

Orozco, R. 1991. Criterios Básicos para el Proyecto, la Construcción y la Operación de Presas de Jales. Cámara Minera de México.

Oste, L. A., Lexmond, T. M. y Riemsdijk, W. H. Van 2007. Metal Immobilization in Soils Using Synthetic Zeolites.(ed.) *JournalEnvironmentalQuality*. vol. 31, pag. 813-821

Oyarzun, R., Higuera, P. y Lillo, J. 2011. Minería Ambiental. Una introducción a los Impactos y su Remediación. GEMM. Pp. 1-341

Peterle, T. 1991 *Wildlife toxicology*. Van NostrandReinold Publication.U.S.A.

Pineda, H. R. 2004. Presencia de Hongos MicorrízicosArbusculares y Contribución de GlomusIntraradices en la Absorción y Translocación de Cinc y Cobre en Girasol (*HelianthusAnnuus* L.) Crecido en un Suelo Contaminado con Residuos de Mina. Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Tecoman, Colima

Pinot, F., Kreps, S., Bachelet, M., Hainaut, P., Bakonyi, M and Polla, B. (2000). Cadmium in the environment: Sources, mechanisms of biotoxicity, and biomarkers. *Rev. Environmental Health* 15. Pp 299-323

Prieto Méndez, J., C. A. González Ramírez, A. D. Román Gutiérrez y F. Prieto García. 2009. Plant contamination and phytotoxicity due to heavy metals from soil and water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. Vol. 10 pag. 29-44. Hidalgo, México.

PROFEPA. 2000. Segundo grupo de criterios interinos de restauración de suelos contaminados con inorgánicos tóxicos (metales pesados) y otros. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. D. F.

PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003

Puga, S., M. Sosa, T. Lebgue, C. Quintana y A. Campos 2006. Contaminación Por Metales Pesados En Suelo Provocada Por La Industria Minera. *Revista del departamento Academico de Biología*. vol 5 Pag 149-155.

Reyes, V., Veloz, A. y Vargas, R. Evaluación de lqslqternativas para la disminución del impacto ambiental por jales históricos en el distrito minero de Zimapán. INIFAP.

Rico, C., Cuevas, Y., 1996. Recuperación y reutilización de cromo en aguas residuales del curtido de pieles. *Rev Univ Soc*. pp. 11-12.

Rooney, P. C., Z. Fang-Jie, S. P. McGrath 2006. Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. *Environmental Toxicology and Chemistry*. vol 25 pag 726-732.

- Ros, A. 2009. Extracción del Arsénico y Estaño (Revisado el 14 de noviembre de 2012) [En Línes]: <http://www.emagister.com/curso-metalurgia-antimonio/extraccion-arsenico-estano>
- Ross, S. 1994. Toxic Metals in Soil-Plant Systems. Department of Geography. Pp. 27-553.
- Sánchez, D. 2009. Reproducción de Cr VI y Biosorción de Cromo por Materiales Biológicos Inactivos. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Pp 1-139,
- Sánchez, L., 1995. Manejo de residuos sólidos en minería. Aspectos Geológicos de Protección Ambiental. Vol. I, UNESCO. 239-250
- Santibañez, C., De la Fuente, L., Bustamante, E., Silva, S., León, P. and Ginocchio, R. 2012. Potential Use of Organic- and Hard-Rock Mine Wastes on Aided Phytostabilization of Large-Scale Mine Tailings under Semiarid Mediterranean Climatic Conditions: Short-Term Field Study. En: Applied and Environmental Soil Science.
- Sauquillo, A., Rigol, A. y Rauret, G. 2003. Overview of the use of Leaching/Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. Trends in Analytical Chemistry, 22, pp. 152-159.
- SEMARNAT, 2005 Informe de la situación del medio ambiente en México, comprendió de estadísticas ambientales, capítulo 3: suelos, México.
- Shoental, R. 1975. Chromium carcinogenesis, formation of epoxyaldehydes and tanning. Br. J. Cancer 32: 403-404.

- Smithson, P., Addison, K. y Atkinson, K. 2002. Fundamentals of the Physical Environment. 3. Routledge.
- Spain, Anne. 2003. Implications Of Microbial Heavy Metals Tolerance in the Environment. Reviews In Undergraduate Research, 2,1-6
- Suarez, O., 2010. Obtención y Caracterización Electroquímica y Estructural Obtención y Caracterización Electroquímica y Estructural de Recubrimientos de Cromo Decorativo a Partir de Soluciones de Cromo Trivalente.
- Svampa, M. y Antonelli, M. 2009. Minería Transnacional, narrativas del desarrollo y resistencias sociales. Buenos Aires.
- Prieto, F., Prieto, J., Callejas, J., Román, A. y Méndez, M. 2010. Bioacumulación de Arsénico en las etapas de desarrollo de la Cebada Maltera. Revista Mexicana. Vol. 1.
- Tahri, M., Benyaïch, F. And Bounakhla, M. 2005. Multivariate Analysis Of Heavy Metal Contents In Soils, Sediments And Water In The Region Of Meknes (Central Morocco). Environmental Monitoring And Assessment 102:405-417.
- Teik-Thye Lim, Joo-Hwa Tay y Cee-Ing 2006. The Contamination Time Effect on Lead and Cadmium Fractionation in a Tropical Coastal Clay. Journal environmental quality. Vol 3 pag. 806-812
- UNEP. 1996. Environmental and Safety Incidents Concerning Tailing Dams at Mines. Mining Journal Research Services, London.
- US EPA, 2001. Treatment technologies for site clean-up: annual status report. 10th Ed. Office of Solid Waste and Emergency Response/Technology Innovation Office. EPA-542-R-01-004. P.38.

- US EPA, 2010. [En línea]. Cromo (VI) en el agua potable. EPA 815-F-10-006. P.P 1-4 http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/upload/Cromo-VI-enelaguapotable_QAs.pdf(consulta 24 de Octubre de 2012)
- US EPA, 2011. Guía de Revisión Técnica de EIA: Minería no Metálica y Metálica. EPA/315R10002.
- Van-Camp, L., Bujarrabal, B., Gentile A., Jones, R., Montanarella, L., Olazabal, C. Selvaradjou, S. 2004. Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Office for Official Publications fo the European Communities. Pp. 872.
- Vaz, C., Basso, L. y Hopmans, J. 2001. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. 35-42
- Vázquez-Alarcón, A., J. Cajuste, R. Carrillo-González, B. Zamudio-González, E. Álvarez-Sánchez y J. Z. Castellanos-Ramos. 2006. Permissible Limits of Cadmium, Nickel, and Lead Accumulation in Soil in the Valley of Mezquital, Hidalgo, Mexico. Terra Latinoamericana vol.23.pag 447-456 México.
- Volke, T., Velasco, J. y de la Rosa, A. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Primera Ed, México.
- Ramos, Y., Prol, R. y Siebe, C. 2004. Características Geológicas y Mineralógicas e Historia de Extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles Escenarios Geoquímicos para los Residuos Mineros. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, num (1). Pp 54-74.

- Wang, Y., 2000. Microbial reduction of chromate. American Society for Microbiology Press. p. 225-235.
- Wong M.H. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. Chemosphere. 6: 775-780.
- WHO (World Health Organization). 1992. Cadmium. Environmental Aspects. Environmental Health Criteria Series N° 135. Geneva.
- Wright, D., Welbourn, P. 1994. Cadmium in the aquatic environment: a review of ecological, physiological and toxicological effects on biota. Environ. Rev. 2: 187-214.
- Wright, R. and Baccarelli, A. 2007 Metals and Neurotoxicology. Vol. 137 The Journal of Nutrition p. 2809–2813
- Zierold, K., Knobeloch, L., and Anderson, 2004. Prevalence of Chronic Diseases in Adults Exposed to Arsenic-Contaminated Drinking Water. Vol. 94 American Journal of Public Health.