



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**"DETERMINACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE JALES  
MINEROS CON BASE EN LA NORMATIVIDAD  
AMBIENTAL MEXICANA Y SU EFECTO POTENCIAL  
EN EL AMBIENTE"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA**

PRESENTA:

**CLAUDIA ALEJANDRA SANTOS MARTÍNEZ**

DIRECTOR DE TESIS

ING. JOSÉ ENRIQUE SANTOS JALLATH



MÉXICO, D.F.

FEBRERO DE 2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *AGRADECIMIENTOS*

A mis padres *Ing. Luis Santos Cruz y Alejandra Martínez de Santos*, por su amor, comprensión y apoyo durante toda mi vida estudiantil, sin ustedes no hubiera sido posible culminar las metas propuestas a lo largo de mi vida, gracias por sus consejos, por darme fuerzas cuando me sentía flaquear, por estar siempre conmigo en mis momentos buenos y malos.

A mis hermanos *Efrén, Omar, Rosa, Laura, y Carlos*, por el cariño y amor que me han brindado, por los ratos agradables, porque cuando los he necesitado ahí han estado presentes física y emocionalmente, por su confianza y apoyo en todo momento. A *Alicia, Vicente, Enrique y Antonia*, por que ustedes me han brindado mucho más que su amistad, me han apoyado sin condiciones y en mis ratos tristes me han dado un momento de alegría.

Le agradezco principalmente a *Alicia y Efrén* porque en los últimos años me han aguantado, accedieron a que formara parte de sus vidas cuando ustedes iniciaban la suya y aunque ha habido buenos y malos momentos me han dado demasiado, mucho más de lo que yo me hubiera imaginado, *Alis*, gracias por aguantarme y apoyarme en todo momento.

A mis sobrinos adorados, *Deyanira, Sergio, Omar, Valeria, Luis, Carlos, Marcos, Mariana*, mis sobrinos bebés hermosos y mis motores *Luis Octavio y Victoria*, gracias a todos ustedes porque fueron los que más me impulsaron sin darse cuenta a cumplir mi meta.

A mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme sus puertas.

Agradezco a todos los que hicieron posible la realización de este trabajo ya que sin su apoyo no hubiera sido posible llegar hasta el fin.

Principalmente a la Química *Guadalupe Contreras Ordaz* por su apoyo y consejos que hicieron posible realizar la parte experimental, además de brindarme su amistad mil gracias.

Al Ing. Juan Carlos Cruz Ocampo y al Ing. Jesús Castro Mora, por el apoyo prestado en el análisis mineragráfico.

A mi director de tesis y sinodales por sus comentarios y consejos para tratar de realizar un buen trabajo, ingenieros José E. Santos, Gustavo Camacho, Mauricio Mazari, M. en C. José de Jesús Huevo y al Dr. Francisco Romero.

A mis profesores por su paciencia y brindarme su amistad, además de darme lecciones tanto académicas como de vida, José H., José E., Guadalupe, Gustavo, Carlos, Jorge, Víctor, Mauricio, Juan, Carl, Emiliano.

A mis compañeros de la facultad por su compañerismo y amistad, Carmen, Aryn, Homero, Arturo L., Arturo X., Aristeo, Isabel, Gonzalo, Luz, Juan Carlos, Andrés, David, Daniel, Gabriel, Jorge, Edith, Sandra y todos los que escapan de mi memoria

## PENSAMIENTO

*Somos seres humanos con una compleja estructura de creencias. Lo que creemos de nosotros mismos y de la vida se convierte en nuestra verdad. Pero siempre podemos expandir nuestra conciencia. Abandona tus viejas y gastadas creencias y haz espacio para nuevos pensamientos, más apropiados y positivos. Y sé amable contigo mientras aprendes a crecer y cambiar.*

Louise L Hay

### TODO TIENE SU TIEMPO

*Todo tiene su momento, y cada cosa su tiempo bajo el cielo:*

*Tiempo de nacer y tiempo de morir, tiempo de arrancar y tiempo de plantar,  
Tiempo de matar y tiempo de sanar, tiempo de destruir y tiempo de construir,  
Tiempo de llorar y tiempo de reír, tiempo de hacer duelo y tiempo de bailar,  
Tiempo de tirar piedras y tiempo de recogerlas, tiempo de abrazarse y tiempo de separarse,*

*Tiempo de buscar y tiempo de perder, tiempo de guardar y tiempo de arrojar,  
Tiempo de romper y tiempo de coser, tiempo de callar y tiempo de hablar,  
Tiempo de amar y tiempo de odiar, tiempo de guerra y tiempo de paz.*

ECLESIASTES 3: 1 – 8

---

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>I. GENERALIDADES</b>	
I.1. Yacimientos Minerales	3
I.2. Minerales que forman los yacimientos en México	6
I.3. Mineralogía de los Jales en México	7
I.4. Descripción de los sitios de estudio	8
I.4.1. Jales de Tizapa, Estado de México	8
I.4.1.1. Localización	8
I.4.1.2. Medio Físico	8
I.4.1.3. Medio Biológico	9
I.4.1.4. Geología del yacimiento	9
I.4.1.5. Mineralogía	10
I.4.2. Jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua	10
I.4.2.1. Localización	10
I.4.2.2. Medio Físico	11
I.4.2.3. Medio Biológico	11
I.4.2.4. Geología del yacimiento	12
I.4.2.5. Mineralogía	13
I.4.3. Jales de la Mina Pilares, Nacoziari, Estado de Sonora	13
I.4.3.1. Localización	13
I.4.3.2. Medio Físico	13
I.4.3.3. Medio Biológico	14
I.4.3.4. Geología del yacimiento	15
I.4.3.5. Mineralogía	16

---

**II. GENERACIÓN, CARACTERÍSTICAS Y ALMACENAMIENTO DE LOS JALES**

II.1. Extracción de los minerales	17
II.1.1. Exploración	17
II.1.2. Preparación y desarrollo	17
II.1.3. Explotación Minera	17
II.1.4. Abandono	18
II.2. Concentración de los minerales	18
II.2.1. Etapas de un proceso de concentración	19
II.2.2. Métodos de Concentración.	19
II.2.2.1. Concentración Gravimétrica	19
II.2.2.2. Concentración Magnética	20
II.2.2.3. Flotación	21
II.2.2.4. Cianuración	22
II.2.2.5. Lixiviación	23
II.2.3. Manejo de los jales	24
II.3. Características de los Jales	24
II.3.1. Características Físicas	24
II.3.1.1. Tamaño de Partícula	24
II.3.1.2. Porosidad	25
II.3.1.3. Densidad	25
II.3.1.4. Coeficiente de Permeabilidad	25
II.3.1.5. Color	25
II.3.2. Características Mecánicas	25
II.3.2.1. Resistencia	25
II.3.2.2. Deformación	26
II.3.2.3. Consolidación	26
II.4. Métodos de almacenamiento de jales	26
II.4.1. Construcción del Dique	28
II.4.1.1. Hidrociclones	28
II.4.1.2. Descarga con Espigas	28
II.4.2. Métodos convencionales	29
II.4.2.1. Método Aguas Arriba	30
II.4.2.2. Método Aguas Abajo	31
II.4.2.3. Método de la Línea Central	32

II.5. Estabilidad de taludes	33
II.6. Principales problemas de inestabilidad en las presas de jales	35
II.6.1. Licuación	36
II.6.2. Deslizamiento de Talud	37
II.6.3. Erosión Pluvial	38
II.6.4. Erosión Eólica	40
II.6.5. Tubificación	41
II.6.6. Métodos Alternativos	42
II.6.6.1. Jales espesados	42
II.6.6.2. Desecación de jales	44
II.6.6.3. Vertimiento en el mar	45
<b>III. RIESGO AMBIENTAL DE LOS JALES</b>	
III.1. Factores que determinan el riesgo ambiental de los jales	47
III.2. Procesos Geoquímicos	48
III.2.1. Oxidación - Reducción	48
III.2.2. Neutralización	50
III.2.2.1. Disolución	50
III.2.2.2. Alteración de minerales	50
III.2.3. Precipitación y Sorción	51
III.3. Formación de drenaje ácido de mina	52
III.4. Lixiviación de elementos metálicos	56
III.5. Toxicología de los elementos metálicos	58
<b>IV. MARCO NORMATIVO</b>	
IV.1. Aspectos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	71
IV.2. Aspectos del Reglamento de la LGEEPA	72
IV.2.1. En Materia de impacto Ambiental	72
IV.2.2. En Materia de Residuos Peligrosos	73
IV.3. Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993	73
IV.4. NOM-141-SEMARNAT-2003	76



**V. TRABAJO EXPERIMENTAL**

V.1. Consideraciones generales	80
V.2. Criterios establecidos en la NOM-141-SEMARNAT-2003	80
V.3. Metodología	81
V.3.1. Preparación de las muestras	81
V.3.2. Extracción de los elementos metálicos solubles	82
V.3.3. Determinación de los elementos metálicos	86
V.3.3.1. Concentración total	87
V.3.3.2. Concentración de elementos solubles	87
V.3.4. Prueba de Balance Ácido – Base (ABA)	87
V.3.4.1. Determinación del potencial de acidez	87
V.3.4.2. Determinación del potencial de neutralización	88
V.3.5. Análisis Mineragráficos	90
V.4. Resultados y Discusión	90
V.4.1. Concentración total de elementos metálicos	90
V.4.2. Concentración de elementos metálicos solubles	91
V.4.3. Evaluación de la peligrosidad de los jales por su toxicidad	91
V.4.4. Potencial de acidez	92
V.4.5. Potencial de neutralización	93
V.4.6. Interpretación de la prueba de Balance Ácido – Base	94
V.4.7. Mineragrafía	95

**VI. EVALUACIÓN DEL RIESGO POTENCIAL ASOCIADO A LAS MUESTRAS**

**ANALIZADAS**

VI.1. Jales del Estado de México, Tizapa	100
VI.2. Jales del Estado de Chihuahua, Santa Bárbara	103
VI.3. Jales del Estado de Sonora, Nacozari	106

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES** 109

**BIBLIOGRAFIA** 112

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Regiones que conforman la República Mexicana	6
<b>Figura 2.</b> Ángulo de Contacto	22
<b>Figura 3.</b> Carta Hidrológica de la República Mexicana	27
<b>Figura 4.</b> Regiones Sísmicas de la República Mexicana	27
<b>Figura 5.</b> Métodos Convencionales de Construcción de Presas de Jales	29
<b>Figura 6.</b> Presa de Jales Tipo retención de agua	29
<b>Figura 7.</b> Método de Construcción Aguas Arriba	31
<b>Figura 8.</b> Método de Construcción Aguas Abajo	32
<b>Figura 9.</b> Método de Construcción de la Línea Central	33
<b>Figura 10.</b> Falla de la Presa de Jales por Licuación	36
<b>Figura 11.</b> Falla de una Presa de Jales por Derrame o Reboce por la Cresta	38
<b>Figura 12.</b> Falla de una Presa de Jales por infiltración	39
<b>Figura 13.</b> Evidencia de Erosión Eólica sobre la ladera (talud) de una Presa de Jales	41
<b>Figura 14.</b> Falla de una Presa de Jales por Tubificación	41
<b>Figura 15.</b> Sistema Convencional de Depositación de Jales	42
<b>Figura 16.</b> Disposición de jales Espesados (Sistema TTD)	43
<b>Figura 17.</b> Modelo Físico Esquemático para los jales.	53
<b>Figura 18.</b> Ambiente Químico de los Jales	57
<b>Figura 19.</b> La Geoquímica en las Presas de Jales, influencia del aire y agua dentro de éstas	57
<b>Figura 20.</b> Acondicionamiento del agua destilada con CO <sub>2</sub> .	82
<b>Figura 21.</b> Agitación de Jal de Tizapa, Estado de México	83
<b>Figura 22.</b> Agitación de Jal de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua	84
<b>Figura 23.</b> Agitación de Jal de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora	85
<b>Figura 24.</b> Vista de la Agitación de las tres muestras de Jal (a la izquierda se encuentra la muestra de la Mina Pilares, Nacozari, en medio la muestra de santa Bárbara y a la derecha la de Tizapa)	85
<b>Figura 25.</b> Filtrado	86
<b>Figura 26.</b> Residuos sólidos del Filtrado a) jal del Estado de México, b) jal del Estado de Chihuahua, c) jal del Estado de Sonora	86
<b>Figura 27.</b> Agitación de la muestra de Tizapa	89
<b>Figura 28.</b> Agitación de la muestra de Santa Bárbara	89
<b>Figura 29.</b> Agitación de la muestra de la Mina Pilares, Nacozari	90

<b>Figura 30.</b> En esta imagen se puede observar la presencia de cuarzo, la zona diseminada que se puede apreciar se trata de material arcilloso, producto de alteración. <i>La imagen está tomada con luz paralela y aumento de 10x.</i>	95
<b>Figura 31.</b> En esta imagen se observa una partícula de cuarzo policristalino, en una matriz arcillosa. <i>La imagen está tomada con aumento 10x y nicoles cruzados.</i>	95
<b>Figura 32.</b> En esta imagen se pueden observar partículas de pirita (coloración amarilla), Galena y Esfalerita, se identifican también partículas angulosas a sub angulosas, <i>la imagen está tomada con aumento de 50x y luz paralela.</i>	96
<b>Figura 33.</b> Aquí se pueden apreciar partículas minerales de esfalerita, calcopirita y pirita, <i>la imagen está tomada con aumento de 50x y luz paralela</i>	96
<b>Figura 34.</b> En esta imagen se aprecian partículas minerales de carbonato de calcio (calcita), así como facies inestables de cuarzo mono y policristalino, <i>la imagen fue tomada con aumento de 25x y nicoles cruzados.</i>	97
<b>Figura 35.</b> Esta imagen complementa a la anterior en donde se aprecia perfectamente el material arcilloso (zona punteada) que circunda al cuarzo, <i>la imagen fue tomada con aumento 25x y luz paralela.</i>	97
<b>Figura 36.</b> En esta figura se pueden apreciar partículas de pirita, sulfuros, óxidos y óxidos diseminados con material transparente. En esta imagen se aprecia una pequeña partícula de pirita encapsulada en material transparente, <i>la imagen fue tomada con aumento 50x y luz paralela.</i>	97
<b>Figura 37.</b> En esta imagen se aprecian partículas minerales de hematita, en los bordes se alcanza a apreciar la alteración a hidróxidos de Fe, también se aprecian pequeñas partículas de pirita, <i>esta imagen fue tomada con aumento de 50x y luz paralela</i>	97
<b>Figura 38.</b> Partícula de cuarzo con intercrecimiento de minerales, la zona punteada se trata de material arcilloso. <i>Esta imagen fue tomada con aumento de 10x y luz paralela.</i>	98
<b>Figura 39.</b> Aquí se aprecian partículas minerales de cuarzos mono y policristalinos, <i>esta imagen se tomó con aumento de 10x y nicoles cruzados.</i>	98
<b>Figura 40.</b> La imagen muestra partículas de mineral sulfurosos, (pirita), en cuyo alrededor se aprecia alteración de pirita a Goethita Limonita, en la parte inferior derecha se observan hidróxidos de Fe. <i>Esta imagen fue tomada con aumento de 50x y luz paralela.</i>	99
<b>Figura 41.</b> En esta imagen se puede apreciar partículas de hematita transformándose a Goethita Limonita, también se pueden observar óxidos e hidróxidos de hierro, <i>la imagen se tomó con aumento de 50x y luz paralela.</i>	99
<b>Figura 42.</b> Vista de la presa en la que se observa la playa y el agua.	102

---

<b>Figura 43.</b> Panorámica de la presa de jales del Estado de México	102
<b>Figura 44.</b> Toma de muestra en la presa de jales	103
<b>Figura 45.</b> Vista general de la presa en donde se observa una clara erosión pluvial, originada por el escurrimiento de agua por las laderas, también se puede observar el desprendimiento de una parte de la presa debido al agua	105
<b>Figura 46.</b> Esta es una vista panorámica de diferentes presas en la parte central baja de la fotografía se aprecia un río	105
<b>Figura 47.</b> Aquí se observa el arrastre de los jales por el cause natural de un río seco.	106
<b>Figura 48.</b> En esta imagen se observan perfectamente las evidencias de erosión fluvial se trata de grandes grietas en las que cabe perfectamente una persona	106
<b>Figura 49.</b> Vista del río con los jales sobre su cause (arroyo).	108
<b>Figura 50.</b> Otra vista de los jales en donde se muestra su arrastre	108
<b>Figura 51.</b> Aquí se puede observar claramente la presa al fondo y el cause del arroyo, en cuya superficie se ven los jales.	108

---

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Menas Minerales Corrientes	4
<b>Tabla 2.</b> Minerales de Ganga Comunes	5
<b>Tabla 3.</b> Bacterias de las menas sulfuradas y sus condiciones de crecimiento.	54
<b>Tabla 4.</b> Características que hacen a un residuo peligroso	74
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de residuos peligrosos por su giro industrial y proceso	75
<b>Tabla 6.</b> Características del lixiviado (PECT) que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al Ambiente	76
<b>Tabla 7.</b> Cálculo del volumen de HCl para determinar el PN	89
<b>Tabla 8.</b> Concentración total de elementos metálicos contenidos en las tres muestras de jales	90
<b>Tabla 9.</b> Concentración de elementos metálicos solubles contenidos en los extractos de las tres muestras de jales	91
<b>Tabla 10.</b> Características del Lixiviado (PECT) que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente	91
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de azufre total	92
<b>Tabla 12.</b> Porcentaje de azufre contenido en forma de sulfatos	93
<b>Tabla 13.</b> Potencial de Acidez	93
<b>Tabla 14.</b> Adición de ácido clorhídrico 1.0 N y de hidróxido de sodio 0.1 N	93
<b>Tabla 15.</b> pH medido durante el tiempo de agitación	93
<b>Tabla 16.</b> Potencial de Neutralización obtenido	94
<b>Tabla 17.</b> Relación Potencial de Neutralización / Potencial de Acidez (PN/PA)	94
<b>Tabla 18.</b> Comparación de los elementos metálicos totales y solubles con las cantidades máximas permitidas en la norma, para Tizapa, Estado de México.	101
<b>Tabla 19.</b> Comparación de los elementos metálicos totales y solubles con las cantidades máximas permitidas en la norma, para Santa Bárbara, Estado de Chihuahua.	104
<b>Tabla 20.</b> Comparación de los elementos metálicos totales y solubles con las cantidades máximas permitidas en la norma, para Nacozari, Estado de Sonora.	107

# INTRODUCCIÓN

Los Jales, colas, relaves son el residuo generado por las operaciones de concentración de minerales extraídos a partir de un yacimiento mineral, su composición varía de acuerdo a la zona y tipo de yacimiento del cual provienen, así como de los reactivos empleados en la concentración de los minerales. El objetivo principal de todos los métodos de concentración es separar selectivamente uno o varios de los minerales de interés económico, produciendo un concentrado de mineral y un residuo comúnmente conocido como Jales.

Los jales en algunos casos son empleados como material de relleno dentro de la mina si es que el método de explotación lo permite, pero la gran mayoría de los que se generan son almacenados en grandes depósitos conocidos comúnmente como presas de jales, en sitios cercanos a la mina. Las presas son diferenciadas según el método de construcción de la cortina contenedora, es de esta forma que se conocen tres tipos: aguas arriba, aguas abajo y de la línea central, el más usado es el método de aguas arriba por su bajo costo, pero es el más inestable sobretodo en zonas sísmicas.

Las presas de jales representan un riesgo potencial para el medio ambiente cuando se conjugan diversos factores que originan la dispersión de los jales y la liberación de los elementos metálicos con características tóxicas contenidos en ellos. El contenido de metales y no metales en los jales, como el plomo, arsénico, cadmio, mercurio y selenio, entre otros, representa un riesgo potencial por su naturaleza tóxica y bajo ciertas condiciones pueden ocasionar algún daño al medio biológico incluyendo a la salud del hombre.

Otro de los principales problemas relacionados con los jales, sobre todo con aquellos que contienen sulfuros metálicos como la pirita, es la generación de drenaje ácido, producido por la oxidación de los sulfuros en presencia de agua y oxígeno. La generación de drenaje ácido depende además de otros factores como la presencia de minerales productores de ácido (sulfuros) y minerales consumidores de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos); cuando estos últimos se encuentran en mayor abundancia que los primeros, ocurre un proceso de neutralización que limita la formación de ácido. Al producirse el drenaje ácido, si dentro de los jales se encuentran minerales reactivos, estos en condiciones de acidez liberan a los elementos metálicos que contienen y en forma soluble son transportados por el agua.

Por otro lado, también como característica propia de los jales, está su composición mineralógica, la cual influye de manera importante ya que a partir de las especies minerales y de las condiciones de oxidoreducción que prevalezcan en el ambiente, podrán ocurrir reacciones que permitan la liberación de los elementos potencialmente tóxicos.

Otro factor que determina el riesgo potencial que representa una presa de jales para el ambiente, es la estabilidad misma de la presa. Cuando una presa llega a fallar por inestabilidad, origina el desbordamiento de los jales y del agua con elementos en solución, provocando su dispersión en el entorno, ya sea en las zonas aledañas o en el peor de los casos hasta el cauce de ríos donde son transportados a grandes distancias.

Dentro de los principales problemas de estabilidad de taludes en las presas de jales se conocen: la Licuación (falla por sismos), Deslizamiento de talud (falla por reblandecimiento del talud debido a la acción del agua y/o debilitamiento de los cimientos), la lluvia ocasiona la Erosión Pluvial que conlleva derrames, infiltración y erosión de la superficie, la Tubificación se da por infiltración del agua contenida en la presa en la cortina hasta que se presenta un rompimiento, y por último la Erosión Eólica es otro problema de inestabilidad en presas fuera de operación debido a que las laderas van perdiendo parte de los jales que las componen y se depositan en las zonas cercanas.

Finalmente, el daño que los jales puedan ocasionar al ambiente también está en función de las características del entorno físico, del medio biológico y social del sitio donde se depositan. Las características como la topografía, hidrología, geohidrología, geología, tipo de suelo, clima, meteorología, vegetación, etc., determinan en gran medida la magnitud de la afectación que pueda ocurrir por la dispersión de los jales.

De lo anterior, para evaluar el riesgo que los jales almacenados en una presa representan para el ambiente es necesario en primera instancia, determinar la peligrosidad de los mismos, posteriormente evaluar las características ambientales del lugar donde se encuentran y por último definir los escenarios de riesgo bajo condiciones naturales.

De acuerdo con la normatividad ambiental mexicana los jales pueden ser peligrosos por su toxicidad al ambiente, es decir, por su capacidad de liberar metales en solución; y, por su capacidad de generar drenaje ácido. 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 postoperación de presas de jales. En sus anexos normativos 1 y 5, se especifica el procedimiento para definir la peligrosidad de los residuos mineros y los métodos de prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en solución y para realizar la prueba de balance ácido – base que determina la capacidad para generar ácido.

Es importante señalar que aunque un jal puede contener sulfuros minerales, no necesariamente será generador de drenaje ácido, aunque el jal puede reaccionar bajo las condiciones ambientales existentes y liberar elementos metálicos en solución.

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo general del presente trabajo es hacer un análisis de la peligrosidad de tres diferentes muestras de jales aplicando la normatividad ambiental mexicana y en cada caso evaluar el riesgo que representan para el ambiente de acuerdo con las características del entorno de los sitios donde están depositados.

El trabajo se realizó con muestras de tres presas de jales ubicadas en diferentes zonas del país. Una de ellas pertenece a la mina de Tizapa en el Estado de México, la segunda pertenece a jales antiguos de la mina Santa Bárbara en el Estado de Chihuahua y la tercera pertenece a jales antiguos de la mina Pilares en Nacozari, Estado de Sonora. A cada muestra se le aplicaron las pruebas correspondientes que marca la normatividad ambiental mexicana, conjuntamente con un análisis minerográfico y petrográfico para poder establecer su peligrosidad. Con los resultados obtenidos se hizo una evaluación cualitativa del riesgo potencial de estos jales considerando las condiciones estructurales de las presas donde están almacenados y las características ambientales del entorno de los sitios donde se encuentran.

## CAPITULO I. GENERALIDADES

### I.1 YACIMIENTOS MINERALES

Los jales son el desecho o residuo que se genera después de un proceso de concentración de los minerales extraídos de un yacimiento mineral. Este material generalmente se deposita en sitios cercanos al lugar donde se realiza la explotación del yacimiento y permanece ahí durante mucho tiempo, en algunos casos de por vida y en otros hasta que ese material pueda ser reprocesado para recuperar elementos de interés. Para evaluar el riesgo que un depósito de jales representa para el ambiente es primordial conocer su composición tanto química como mineralógica y por esta razón resulta necesario conocer el yacimiento mineral de donde provienen.

Un *yacimiento mineral*, ya sea metálico o no metálico, es una acumulación o concentración de una o más sustancias útiles que en su mayoría están distribuidas escasamente en la corteza de la Tierra (BATEMAN, 1974).

Los yacimientos metálicos representan por lo común concentraciones extremas de metales que primitivamente estaban dispersos. Los metales deseados se encuentran con frecuencia unidos químicamente a otros formando las “menas”. Estas a su vez suelen aparecer entremezcladas con minerales no metálicos o materia rocosa de desecho que constituye la “ganga”. La mezcla de mena y ganga se denomina “cuerpo mineralizado” y aunque generalmente está encerrado en rocas pueden no estarlo, como es el caso de los yacimientos superficiales.

Un *mineral* es una sustancia sólida, de origen natural, homogénea, formada usualmente por procesos inorgánicos y que tiene una composición química definida y una estructura atómica ordenada. Los minerales agrupados en una matriz cementante forman lo que conocemos como *Roca*. Las rocas se clasifican de acuerdo a la manera en cómo se formaron, es decir según su génesis. Hay tres grandes grupos de rocas que son: rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas.

*Mena*: Es el mineral que presenta interés económico. En general, es un término que se refiere a minerales metálicos y que designa al mineral del que se extrae el elemento de interés. Para poder aprovechar mejor la mena, suele ser necesario su tratamiento, que en general comprende dos etapas: el tratamiento a pie de mina para aumentar la concentración del mineral en cuestión (procesos hidrometalúrgicos, flotación, etc.) y el tratamiento metalúrgico final, que permita extraer el elemento químico en cuestión (tostación, electrólisis, etc.). Las *menas minerales* son las que están formadas por minerales que pueden ser utilizados para obtener uno o más metales (Tabla 1).

*Ganga*: Comprende a los minerales que acompañan a la mena, pero que no presentan interés económico en el momento de la explotación. Conviene resaltar que minerales considerados como ganga en determinados momentos se han transformado en menas al conocerse alguna aplicación nueva para los mismos. Los *minerales de ganga* son las materias no metálicas asociadas a un yacimiento (Tabla 2). Pueden ser minerales introducidos o bien la roca encajonante y usualmente se desechan al proceder al tratamiento del mineral.

Es práctica común clasificar a los metales como ferrosos y no ferrosos. Los primeros comprenden el hierro, manganeso, cromo, molibdeno, níquel, cobalto, tungsteno y vanadio. Los segundos se clasifican a su vez en metales básicos (cobre, plomo, zinc y estaño), ligeros (aluminio, magnesio y titanio), preciosos (oro, plata y platino) y radiactivos (uranio y torio).



**Tabla 1.** Menas minerales corrientes

<b>Metal</b>	<b>Mineral</b>	<b>Composición</b>	<b>% de Metal</b>
Oro	Oro nativo	Au	100
	Calaverita	Te <sub>2</sub> Au	39
	Silvanito	Te <sub>2</sub> (Au, Ag)	-
Plata	Plata nativa	Ag	100
	Argentita	SAg <sub>2</sub>	87
	Cerargirita	ClAg	75
Hierro	Magnetita	FeO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	72
	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	70
	Limonita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	60
	Siderita	CO <sub>3</sub> Fe	48
Cobre	Cobre nativo	Cu	100
	Bornita	S <sub>4</sub> Cu <sub>5</sub> Fe	63
	Brocantita	SO <sub>4</sub> Cu.3Cu(OH) <sub>2</sub>	62
	Calcocita	SCu <sub>2</sub>	80
	Calcopirita	S <sub>2</sub> CuFe	34
	Covelina	SCu	66
	Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	89
	Enargita	S.3Cu <sub>2</sub> S <sub>5</sub> As <sub>2</sub>	48
	Malaquita	CO <sub>3</sub> Cu.Cu(OH) <sub>2</sub>	57
	Azurita	2CO <sub>3</sub> Cu.Cu(OH) <sub>2</sub>	55
	Crisocola	SiO <sub>3</sub> Cu.2H <sub>2</sub> O	36
Plomo	Galena	SPb	86
	Cerusita	CO <sub>3</sub> Pb	77
	Anglesita	SO <sub>4</sub> Pb	68
Zinc	Blenda	SZn	67
	Smithsonita	CO <sub>3</sub> Zn	52
	Hemimorfita	SiO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> Zn	54
	Zincita	ZnO	80
Estaño	Casiterita	SnO <sub>3</sub>	78
	Estannita	Cu <sub>2</sub> S.FeS.SnS <sub>2</sub>	27
Níquel	Pentlandita	S(Fe,Ni)	22
	Garnierita	SiO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> (Ni,Mg).H <sub>2</sub> O	-
Cromo	Cromita	FeO.Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	68
Manganeso	Pirolusita	MnO <sub>2</sub>	63
	Psilomelana	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .xH <sub>2</sub> O	45
	Braunite	3Mn <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .SiO <sub>3</sub> Mn	69
	Manganita	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O	62
Aluminio	Bauxita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O	39
Antimonio	Estibnita	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	71

<b>Metal</b>	<b>Mineral</b>	<b>Composición</b>	<b>% de Metal</b>
Bismuto	Bismutita	Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	81
Cobalto	Esmaltita	As <sub>2</sub> CO	28
	Cobaltina	AsSCO	35
Mercurio	Cinabrio	SHg	86
Molibdeno	Molibdenita	S <sub>2</sub> Mo	60
	Wolfenita	MoO <sub>4</sub> Pb	39
Wolframio	Wolframita	WO <sub>4</sub> (FE,MN)	76
	Huebnerita	WO <sub>4</sub> Mn	76
	Scheelita	WO <sub>4</sub> Ca	80

FUENTE: Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico

**Tabla 2.** Minerales de ganga comunes

<b>Clase</b>	<b>Nombre</b>	<b>Composición</b>
Óxidos	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
	Otros sílices	SiO <sub>2</sub>
	Bauxita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O
	Limonita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O
Carbonatos	Calcita	CO <sub>3</sub> Ca
	Dolomita	CO <sub>3</sub> (Ca,Mg)
	Siderita	CO <sub>3</sub> Fe
	Rodocrosita	CO <sub>3</sub> Mn
Sulfatos	Baritina	SO <sub>4</sub> Ba
	Yeso	SO <sub>4</sub> Ca + 2H <sub>2</sub> O
Silicatos	Feldespato	-
	Granate	-
	Rodonita	SiO <sub>3</sub> Mn
	Clorita	-
	Minerales arcillosos	-
Varios	Materia rocosa	-
	Fluorita	F <sub>2</sub> Ca
	Apatito	(FCa)(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Ca <sub>4</sub>
	Pirita	S <sub>2</sub> Fe
	Marcasita	S <sub>2</sub> Fe
	Pirrotita	SFe <sub>1,x</sub>
Arsenopirita	SAsFe	

FUENTE: Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico

## I.2 MINERALES QUE FORMAN LOS YACIMIENTOS EN MÉXICO

Es importante conocer los minerales originales que conforman un yacimiento pues debido a su composición química, sufren alteraciones que se manifestarán en la presa de jales.

La mineralogía en México es muy extensa, pero claramente dividida en diferentes tipos de yacimientos. Para su estudio el INEGI (INEGI, 1984) divide al país en cuatro regiones (Figura 1):

- a) Región Noroeste,
- b) Región Norte y Noreste;
- c) Región Central; y
- d) Región Sureste



**Figura 1.** Regiones que conforman la República Mexicana  
(FUENTE: INEGI, 1984)

### *Región Noroeste*

Esta región comprende la Península de Baja California, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Durango, Aguascalientes, Norte de Jalisco y Suroeste (SO) de Chihuahua. En esta región se encuentran yacimientos de sulfuros mesotermales de hierro y cobre, así como óxidos de hierro, venas de oro contenidas en rocas metasedimentarias, depósitos de tungsteno, depósitos superficiales de travertino, sulfuros de manganeso, cobre, plata y plomo, wolfenita, estibnita y otros minerales, depósitos de placer de oro y yacimientos de cobre.

Para el Estado de Sonora los yacimientos más importantes son los de cobre y molibdeno. En el Estado de Sinaloa los depósitos de cobre y molibdeno son yacimientos del tipo pórfido cuprífero, también hay yacimientos asociados a “stockworks” o filones de cuarzo con presencia de wolframio y tungsteno, y yacimientos de molibdeno. Para el Estado de Chihuahua, los principales yacimientos de esta región los constituyen los depósitos hidrotermales de plata, plomo, zinc y oro.

### ***Región Norte y Noreste***

Esta formada por el Noreste (NE) de Jalisco, NE de Chihuahua, NE de Zacatecas, Noroeste (NO) de Hidalgo, Querétaro, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Guanajuato y Norte de Veracruz. Los yacimientos más importantes de plomo, plata y zinc que se han conocido, se localizan en las áreas de Fresnillo, Zacatecas, Sierra de Catorce, Charcas y Zimapán, además del distrito minero de Guanajuato donde la asociación principal es de plata y oro.

### ***Región Central***

La Región Central la conforman el Sur de Jalisco, Hidalgo, Colima, Michoacán, Guerrero, Puebla, Oaxaca, Centro de Veracruz. Los principales yacimientos que se conocen en la región centromeridional son los sulfuros de plomo, plata y zinc, así como los óxidos de hierro.

### ***Región Sureste***

Existen algunos yacimientos minerales de origen hidrotermal conocidos, los cuales presentan la asociación plata – plomo – zinc – oro – cobre. En general son de pequeñas dimensiones y se localizan fundamentalmente en el Sur de Chiapas. Además hay yacimientos metasomáticos de hierro en las localidades de La Ventosa, Nilttepec y Fololopilla; de hierro y cobre en Arriaga y de cobre, plomo y zinc en Ixtapa.

## **I.3 MINERALOGIA DE LOS JALES EN MÉXICO**

La composición de los jales varía, de acuerdo con lo expuesto anteriormente, con la naturaleza de los yacimientos y con el tipo de minerales que contienen. De la caracterización mineralógica de los Distritos Mineros en México, es posible hacer de manera general una clasificación con la mineralogía que pueden presentar las presas de jales en las distintas regiones del país.

### ***Región Noroeste***

**Chihuahua.** Los minerales de ganga predominantes son: el cuarzo que frecuentemente se encuentra acompañado de silicatos de alteración como granate, epidota y clorita, la calcita, fluorita, barita, pirita y arsenopirita, también se incluyen en la ganga. Granate (grosularita – andradita), vesuvianita, wollastonita, hedenbergita, cuarzo, calcita, fluorita, molibdenita, pirita, pirrotita y marcasita.

**Sonora.** Se pueden encontrar los minerales de ganga: pirita, cuarzo, cuarzo lechoso, grosularita, calcita y fluorita y como mineral de alteración clorita.

**Sinaloa.** Se pueden encontrar como minerales de ganga, pirita, calcopirita, cuarzo, calcita y clorita, magnetita, hematita, covelita, calcosita y hematita

### ***Región Norte y Noreste***

**Zacatecas.** La mineralización de ganga que existe en este estado está compuesta principalmente por cuarzo, pirita, calcita, esfalerita, galena, pirolusita, axinita, hedenbergita, clorita, epidota, siderita, material carbonáceo, pirrotita, arsenopirita, fluorita, jarosita y argentojarosita; hay minerales oxidados de plomo y

zinc, como cerusita, anglesita, hidrozincita y hemimorfita, acompañados también de óxidos de fierro y de manganeso.

**Guanajuato.** Minerales como pirargirita, proustita, naumanita y aguilarita, son abundantes en la mina Peregrina. La ganga está constituida principalmente por cuarzo, calcita y adularia.

**San Luis Potosí.** Cuarzo, calcopirita, jalpaita y argentita, calcita, diaforita, dacita, riodacita, caliza, fluorita, pirita diseminada, calcita cristalina, rodocrosita.

**Hidalgo.** Wollastonita, granates y cuarzo con cantidades menores de calcita, clorita, dolomita, y sericita, plagioclasa, feldespato potásico, augita, biotita y esfena, calcopirita, arsenopirita y pirrotita, pirita, algo de magnetita, sulfosales de plomo y antimonio.

### *Región Central*

**Jalisco.** Cuarzo, calcopirita, pirita, bornita, galena, esfalerita, covelita, calcocita, clorita, especularita, hematita, limonita, óxidos de manganeso, adularia, calcita, sericita, cristobalita, vidrio devitrificado, fragmentos de roca, barita, material tobáceo y algo de yeso. Como alteraciones silificación, caolinización y carbonatación.

**Guerrero.** Pirita, tetrahedrita, argentita, hessita y calcopirita, calcita, cuarzo cristalino blanco, barita y apatita, silicatos con sulfuros de plomo y zinc, magnetita, arsenopirita, pirrotita, marcasita, jamesonita, bourmonita, pirargirita, covelita, calcosita, bornita, hematita, pirolusita, cerusita, smithsonita y anglesita.

**Querétaro.** Pirita, pirrotita, arsenopirita, esfalerita (marmatita), calcopirita y galena.

**Michoacán.** Estromeyerita, tetrahedrita, calcopirita, pirita, magnetita, cuarzo, calcita, cerusita y anglesita.

**Edo, de México.** Pirita, calcopirita y tenantita – tetrahedrita, antimonipearcita – pearcita, pirargirita – proustita, argentita, covelita, malaquita, digenita argentojarosita, goethita, hematita, calcopirita, tetrahedrita, sulfosales de plata y posible calcosita, cuarzo, calcita y rodocrosita.

## **I.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO**

Se obtuvieron tres muestras diferentes de jales cada una pertenece a una región minera diferente, la primera corresponde a jales provenientes del Estado de México, la segunda a jales provenientes del Estado de Chihuahua y la tercera a jales provenientes del Estado de Sonora. Cada muestra presenta características diferentes aunque en composición sean similares, a continuación se trata de ubicar en el espacio territorial cada una de ellas, para poder establecer más adelante los criterios propuestos en esta tesis.

### **I.4.1 Jales de Tizapa, Estado de México**

#### **I.4.1.1 Localización**

Los jales del Estado de México corresponden a la mina de Tizapa, que se localiza en el distrito minero de Zacazonapan, en el Estado de México, este distrito se ubica a 80 km., al S 55° W de la ciudad de Toluca, dentro de las coordenadas geográficas centrales 19° 02' de latitud norte y 100° 13' de longitud oeste; su acceso es a partir de la ciudad de Toluca, puede ser por dos vías: por la carretera federal núm. 134, con dirección a Temascaltepec, donde antes de entrar al poblado se desprende una carretera estatal que lleva a la localidad de Zacazonapan, la otra es por la carretera federal núm. 15, que pasa por Valle de Bravo, Colorines, Oztoloapan y que llega a Zacazonapan.

#### **I.4.1.2 Medio Físico**

En el Estado de México se presentan una gran variedad de climas, que van desde el cálido hasta el frío y del semiseco al húmedo. Factores tales como la ubicación geográfica, la altitud y la orientación del relieve en combinación con los elementos atmosféricos, han dado origen a esta gama de climas en la entidad, el clima

predominante en el Estado de México es el templado, abarcando una extensión aproximada del 68% del territorio de la entidad.

Para la región de Tizapa el clima predominante va del semicálido al templado, el clima semicálido se caracteriza por tener un régimen térmico medio anual de 19.1°C, con precipitación media anual de 1,025.5 mm. Para el clima templado el régimen térmico medio anual oscila entre 10 y 18°C, con una precipitación media anual entre 800 y 1,200 mm.

En cuanto a la hidrología y geohidrología, el Estado de México, de acuerdo con la clasificación de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (INEGI, 1987), se encuentra comprendido por las siguientes regiones hidrológicas; Lerma – Chapala – Santiago (esta cubre la porción centro-oeste con una superficie de 5'548,540 km<sup>2</sup>), Río Balsas (cuya área es de 9'761,850 km<sup>2</sup> en la porción sur del estado) y Alto Pánuco (en la porción norte con 7'933,830.km<sup>2</sup>). La región de Tizapa se encuentra dentro de la región del río Balsas a esta región pertenecen cuatro cuencas conocidas como: Río Atoyac, Río Balsas - Zirandaro, Río Grande de Amacuzac y Río Cutzamala, la corriente de agua que corre por la zona es la de Temascaltepec, dentro de este último cae la región estudiada.

Fisiográficamente el Estado de México está comprendido por dos grandes subprovincias: la provincia de la Sierra Madre del Sur y la provincia del Eje Neovolcánico, la región de estudio pertenece a esta última. La provincia del Eje Neovolcánico, según la clasificación del INEGI (1987), se caracteriza por una enorme masa de rocas volcánicas de todos los tipos, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos. Se divide en tres subprovincias: la de Mil Cumbres, la de Llanos y Sierra de Querétaro e Hidalgo y la de Lagos y Volcanes de Anáhuac. Esta última abarca la mayor parte de la provincia.

### **I.4.1.3 Medio Biológico**

Los tipos de vegetación se encuentran delimitados de acuerdo con la fisiografía y condiciones climáticas, Dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico se presentan los climas templado y semifrío, principalmente en los valles de laderas tendidas, donde existen suelos agrícolas de riego y temporal, en los que se cultiva fríjol, maíz, chile, tomate, lechuga, lenteja, sorgo, col, coliflor, cebolla y calabacita, entre otros. En menor proporción se tienen bosques de pinos o encino hacia las partes altas.

### **I.4.1.4 Geología del Yacimiento**

La evolución y el ambiente geológico del Estado de México son propicios para albergar depósitos de minerales, tanto metálicos como no metálicos. Los depósitos minerales no metálicos se distribuyen en todo el territorio del estado, concentrándose notoriamente al este y noreste de la entidad, dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, mientras que los depósitos minerales metálicos se localizan, sobre todo, al suroeste del territorio estatal, dentro de la provincia de la Sierra Madre del Sur. Las rocas que encajonan estos depósitos son muy diversas, abarcando formaciones que en edad varían desde el Triásico hasta finales del Terciario e incluso del Cuaternario. En un 70-75% de los yacimientos, la edad de la mineralización corresponde al Terciario.

#### ***Ambiente geológico local.***

Los cuerpos mineralizados de Tizapa se encuentran encajonados en una secuencia vulcanosedimentaria afectada por un metamorfismo de bajo grado en facies de esquisto verde. La mineralización aflora en el cause del arroyo Tizapa; en el interior de la mina se observa en forma de cuerpos lenticulares sulfuros masivos y sulfuros diseminados, dispuestos concordantemente a la foliación de la roca encajonante la cual está compuesta localmente por una interdigitación de filitas gráficas y esquistos de clorita, biotita, muscovita y cuarzo feldespáticos. En los cuerpos mineralizados se conocen fallas normales e inversas sufriendo los cuerpos desplazamientos locales, plegamiento y brechamiento a pequeña escala.

El yacimiento está formado por una serie de mantos que se extienden en concordancia con el plano de estratificación del protolito (sedimentos vulcanoclásticos interestratificados con calizas y areniscas), de acuerdo a su posición estratigráfica destacan tres niveles de mineralización correspondientes al nivel superior, medio e inferior, la roca encajonante varía de acuerdo al nivel de mineralización. El principal control de la mineralización, son los planos de foliación, tanto en las filitas gráficas como en los esquistos.

### ***Yacimientos Minerales***

Existen dos tipos de depósitos minerales metálicos de acuerdo con su origen: hidrotermales y vulcanogénicos. Por su composición se conocen, sobre todo, yacimientos auroargentíferos, polimetálicos y algunos de hierro, cobre, estaño, magnesio y mercurio.

La mineralización epitermal de los *depósitos hidrotermales* ha sido reconocida principalmente en el suroeste y oeste del estado, dentro de los distritos de El Oro, Ixtapan del Oro, Zacualpan, Temascaltepec, Sultepec, Amatepec y Tlatlaya. En estas localidades se han explotado yacimientos de oro y plata (Au, Ag), cobre y zinc (Cu, Zn), polimetálicos (Ag, Pb, Zn, Au, Cu) y algunas pequeñas localidades con mineralización de cobre (Cu), estaño (Sn), manganeso (Mn), hierro (Fe) y mercurio (Hg).

Los depósitos minerales de tipo vulcanogénico consisten en cuerpos estratiformes lenticulares, constituidos por pirita, esfalerita, galena, arsenopirita y calcopirita, con menores cantidades de pirrotita, tetrahedrita, argentita y freibergita, con valores importantes de oro, plata, plomo, zinc, cobre y en algunos casos cadmio. En el yacimiento Tizapa, la roca encajonante es una secuencia vulcano sedimentaria con metamorfismo de facies de esquisto verde, constituida por filita granítica con intercalaciones complejas de esquistos de clorita y moscovita y pizarra carbonosa. Las dimensiones de los cuerpos mineralizados en este yacimiento tanto en espesor como en extensión, son variables. Asociados a estos cuerpos es posible encontrar también zonas relativamente extensas con diseminación de sulfuros.

#### **I.4.1.5 Mineralogía**

El yacimiento Tizapa está formado por tres cuerpos estratiformes de sulfuros masivos de forma lenticular, concordante con la foliación de la roca huésped. El nivel favorable para la mineralización dentro de esta roca, corresponde al estrato rico en esquisto de cuarzo – sericita. El cuerpo de sulfuros masivos está constituido principalmente por pirita, comparativamente abundante esfalerita hacia la parte superior y con tendencia al aumento de calcopirita en la parte inferior. Además, hay presencia de minerales como arsenopirita, pirrotita y freibergita.

Otros elementos que se obtienen de los sulfuros masivos son: cadmio, plata y oro; en pequeñas cantidades de selenio, telurio, talio, galio, bismuto, germanio, bario y mercurio (Japan International Cooperation Agency & Metal Mining Agency of Japan, 1989).

La mineralogía reportada en los jales para este yacimiento es de: pirita, esfalerita, galena, calcopirita, hematita, gohetita – limonita y mineral transparente.

### **I.4.2 Jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua**

#### **I.4.2.1 Localización**

Los jales del Estado de Chihuahua corresponden al distrito minero de Santa Bárbara, este se localiza cerca del borde sur del Estado de Chihuahua 20 km., al oeste suroeste de la ciudad de Parral y 200 km., al sur de la

ciudad de Chihuahua, comprende dos campos mineros: Santa Bárbara y San Francisco del Oro. La unidad minera de Santa Bárbara, se encuentra localizada al Norte, Sur y Oriente de la ciudad del mismo nombre, en la parte central del sur del Estado de Chihuahua, con una latitud norte de 26° 48' 13", longitud oeste de 105° 49' 01", su elevación sobre el nivel del mar es de 1,969 m. (INAFED, 2000)

#### **I.4.2.2 Medio Físico**

Debido a la extensión territorial del Estado de Chihuahua se caracterizan diversos microclimas, lo que origina una extensa variedad de vegetación, en el estado se conocen cuatro regiones diferentes de acuerdo con el tipo de clima: el Desierto, la Región de las Montañas y la Región de las Barrancas en la Sierra Tarahumara; y la Región de los Valles Centrales.

Para la Región de las Barrancas que es en donde se encuentra localizado el distrito de Santa Bárbara, el hondón tiene un clima seco cálido con sequía invernal intensa. La temperatura asciende en la máxima extrema a 44°C, la precipitación media anual es de 400 mm, solo en invierno se disfrutan días frescos. Esta región constituye la verdadera región serrana, donde una red irregular de grandes barrancas e imponentes cañones forman una barrera de extrema dificultad de acceso. Como el distrito de Santa Bárbara se localiza en la Región de las Barrancas, el clima predominante es templado, semidesértico extremo con precipitación pluvial de 600 mm al año.

El rumbo de los vientos predominantes y frecuentes es sureste – noroeste. La mayor parte del año la dirección de los vientos es hacia el sureste y únicamente en temporada de invierno por las tardes, su dirección cambia a noroeste.

Los recursos hidrológicos del Estado de Chihuahua se alimentan de una precipitación pluvial media de 470 mm anuales. Las corrientes que drenan al interior, sumadas a los depósitos (lagunas y presas) y aguas subterráneas integran el potencial hidrológico del estado. Desde el punto de vista hidrogeológico el área de estudio pertenece al acuífero Parral - Valle del Verano, que se localiza en la porción sur del Estado de Chihuahua, cubriendo un área de 1,620 km<sup>2</sup>. El acuífero comprende completamente al municipio de Santa Bárbara, y parcialmente a los municipios de Hidalgo del Parral, Allende, Matamoros y San Francisco del Oro, además de una pequeña parte de Huejotitán. El acuífero Parral-Valle del Verano pertenece a la Región Hidrológica No.24, denominada Zona Alta de la Cuenca del Río Bravo, Cuenca del río Conchos, Subcuenca del río Florido. El acuífero se puede dividir en tres unidades geohidrológicas (CNA, 1982): la Unidad I que corresponde a la subcuenca superficial del río Santa Bárbara; la Unidad II que representa cierta correspondencia con la cuenca superficial del río Parral, y la Unidad III que se refiere a la cuenca del río Primero.

La Unidad se encuentra sobre la falda oriental de la Montaña Santa Bárbara cerca de las cabeceras del Río Santa Bárbara, también conocido como el Río Valle de Allende, en el tiempo de la colonia, como el valle de San Bartolomé. Este Río junto al Río Florido el cual corre al Norte del Conchos que vierte su cauce al Río Bravo sobre la frontera con Texas.

Fisiográficamente, el distrito de Santa Bárbara pertenece a la subprovincia de las Barrancas, la cual se presenta como una faja de contorno irregular de 40 a 60 km de anchura, en la cual corrientes de la vertiente del Pacífico han modelado un relieve en etapa juvenil, caracterizado por barrancas imponentes, angostas y escalonadas, que en casos extremos abundan más de 1,800 metros.

#### **I.4.2.3 Medio Biológico**

La vegetación es característica de las regiones semiáridas del norte de México, donde predominan los pastizales y sabanas. La flora es del tipo de montebajo y la escasa vegetación se encuentra integrada por



encinos, enebros, nogales, abetos, pastizales en las partes bajas en relieve casi horizontal, y coníferas y pináceas en sus regiones montañosas, (INAFED, 2000). En la Unidad Santa Bárbara se aprecian variedades de coníferas y pináceas en las áreas habitacionales; matorrales y pastizales en las áreas de mina y proceso. La fauna de la región del área de estudio se compone de paloma güilota y alas blancas, conejo, liebre, venado cola blanca, puma, gato montés y coyote. En el área que ocupa la Unidad Santa Bárbara, la fauna se limita a especies como liebres y roedores, cuya población es reducida.

#### **I.4.2.4 Geología del Yacimiento**

El distrito Santa Bárbara comprende un raro sistema complejo de vetas de cuarzo sobre pizarra. Estas vetas corren de Norte a Sur y el echado al Este y Oeste con inclinaciones que van desde 45° a la vertical. Existen cuatro grupos principales de vetas y numerosas vetillas.

Las vetas ocupan fisuras de falla formadas por los pequeños y grandes desplazamientos que cortaron la pizarra. La pizarra carbonosa y las vetas, son cortadas por diques de riolita diabasa. Estas rocas están cubiertas por una mezcla de grava de basalto. La andesita en la parte sur cubre la pizarra. La pizarra dentro del distrito Santa Bárbara parece formar un anticlinorio y las vetas se encuentran en los limbos de la estructura. Las diferentes clases de rocas que forman parte del yacimiento de Santa Bárbara son: pizarra, andesita, riolita, conglomerado, diabasa, basalto y sedimentos no consolidados como grava, cantos rodados y arenas derivados de la pizarra, caliza, riolita, así como de varios tipos de andesita, y basalto.

#### ***Síntesis Geológica***

La columna estratigráfica del distrito minero Santa Bárbara está compuesta por una gruesa sección de sedimentos cretácicos plegados (Kil), que son sobreyacidos e intrusionados, por rocas volcánicas e hipabisales del terciario.

Los sedimentos cretácicos se agrupan bajo el nombre informal de Formación Parral, la cual está compuesta por una secuencia monótona de juntas calcáreas y carbonáceas cuyo espesor conocido es del orden de mil metros. Se presentan además intercalaciones de lentes de calizas de grano fino, arenáceas y conglomeráticas, margas y ocasionalmente cuarcitas. La estratificación es delgada (promedio 5 cm) y las capas no son fosilíferas, pero con base en escasas determinaciones paleontológicas se han circunscrito al intervalo aptiano – albiano. Esta Unidad Litológica constituye la roca encajonante de la mineralización.

Las rocas volcánicas son andesitas y riolitas del oligoceno (Tor), coronadas por mesas de basalto pliocénico (Tpb) de edad claramente posterior a la mineralización. Los únicos intrusivos reconocidos son: diques y sills de riolita, penecontemporáneos a la mineralización y diques basálticos, asociados a las emisiones de basalto.

Localmente, el plegamiento de la Formación Parral adopta la forma de un anticlinal asimétrico de buzamiento suave, con echados entre 15 a 30° generalmente, y con su eje orientado N 30° W. Es común la presencia de pliegues menores recostados, interpretados como pliegues de arrastre asociados a las estructuras de falla preminerales y plegamiento dismónico atribuido a un origen primario por deslizamientos antes de la consolidación de los sedimentos.

#### ***Yacimientos Minerales***

Los cuerpos minerales son vetas emplazadas en estructuras de falla de tipo normal, agrupadas en cuatro sistemas que oscilan en rumbo entre N 25° E y N 25° W y dispuestas en un enrejado. Una franja norte – sur de potentes diques riolíticos, hacia el centro de la zona mineralizada constituye la divisoria entre los dos campos mineros que integran el distrito: hacia el este, en Santa Bárbara, las vetas son muy persistentes y

anchas, con afloramientos llamativos; en San Francisco del Oro, las vetas son angostas, de menor continuidad y comúnmente ciegas, pero muy numerosas.

La estructura interna de la veta es de dos tipos: bandeamiento de mena y ganga y brechamiento interno, ya sea de fragmentos de roca encajonante, de la propia ganga o bien del propio mineral. Las diferentes clases de rocas que se encuentran en la unidad son pizarra, andesita, riolita, conglomerado, diabasa, basalto, sedimentos no consolidados (grava, cantos rodados y arenas y son derivados de la pizarra, caliza, riolita, varios tipos de andesita y basalto).

La mineralización en el distrito representa la superposición de al menos dos sistemas hidrotermales que evolucionaron bajo condiciones diferentes de emplazamiento, separados por un intervalo de tiempo desconocido y que, de acuerdo a las relaciones observadas con los diques y las rocas volcánicas, pueden alcanzar cinco millones de años.

#### **I.4.2.5 Mineralogía del Yacimiento**

La mineralogía de las vetas, cae en dos divisiones: los que están arriba del nivel freático que son los óxidos y los que están abajo que son los sulfuros. Los minerales primarios y secundarios identificados en el distrito son 3 de los cuales los que hacen posible la explotación comercial son los sulfuros de zinc, plomo y cobre. La distribución en orden de abundancia no es igual que en todas las vetas, pero un promedio generalizado nos da el siguiente orden: esfalerita, galena y calcopirita.

El mineral de ganga predominante es el cuarzo que frecuentemente se encuentra acompañado de silicatos de alteración como granate, epidota y clorita, la calcita, fluorita, barita, pirita y arsenopirita, también se incluyen en la ganga. Los más importantes en orden de abundancia son: cuarzo, calcita, pirita y fluorita.

La mineralogía reportada en los jales para este yacimiento es de: hematita, gohetita – limonita y mineral transparente.

### **I.4.3 Jales de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora**

#### **I.4.3.1 Localización**

Los jales del Estado de Sonora corresponden al distrito minero de Nacozari el cual se localiza en la porción nororiente del Estado de Sonora, 195 km. al oriente de la Ciudad de Hermosillo. Se localiza en el paralelo 30°23' de latitud norte y a los 109°41' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, a una altura de 1,040 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Colinda con los siguientes municipios: al norte con Agua Prieta, al este con Bavispe, al sureste con Bacerac, al sur con Villa Hidalgo y Cumpas, al oeste con Arizpe y al noroeste con Bacoachi y Fronteras.

#### **I.4.3.2 Medio Físico**

En el territorio sonorense se presenta una gran variedad de climas los que en términos generales se pueden agrupar por su grado de temperatura en tres tipos: cálidos, semicálidos y templados. Cada uno de ellos con variantes en relación a la precipitación, desde los muy secos hasta los subhúmedos. Nacozari, presenta dos tipos de climas, *semicálido seco*, cuya temperatura media anual es de 18°C a 22°C, con precipitación media anual de 300 a 500 mm; y *templado semiseco*, presenta una temperatura media anual de 16°C a 18°C, con precipitación media anual de 300 a 400 mm.

No se localizó estaciones ni en la zona de estudio ni en los sitios aledaños con información acerca de los vientos dominantes y frecuentes. Sin embargo, durante la realización del muestreo se hicieron observaciones periódicas y se constató que los vientos dominantes van principalmente de S a N y de WWS a NNE.

Nacozari pertenece a la región Sonora Sur, la cual comprende las cuencas de los ríos Mayo, Yaqui, Matape, Sonora y Bacoachi; en esta región se localizan las presas más importantes como la presa Adolfo Ruiz Cortínez, Lázaro Cárdenas (La Angostura), Plutarco Elías Calles, Álvaro Obregón, Ignacio L. Alatorre y Abelardo L. Rodríguez. La presa Lázaro Cárdenas tiene una capacidad de 921.2 millones de m<sup>3</sup> y su uso es de riego y generación de energía eléctrica.

Con base en la clasificación de cuencas definidas por la SARH, el Estado de Sonora cuenta con 5 regiones hidrológicas que son las siguientes: Río Colorado, Sonora Norte, Sonora, Sur, Sinaloa y Cuencas Cerradas del Norte. Hidrológicamente la región está asociada a la Región Hidrológica RH-9 denominada Sonora Sur que comprende las cuencas de los ríos Mayo, Yaqui, Matape, Sonora y Bacoachi. Regionalmente destacan los ríos Bavispe que fluye de norte a sur por la parte oriental del municipio de Nacozari de García y el Río Moctezuma que fluye de norte a sur en la parte occidental del mismo municipio.

Localmente, por el sitio de estudio fluye el denominado arroyo Nacozari cuya corriente es intermitente, y al cual confluyen los arroyos, también de corrientes intermitentes, que bajan de las sierras que están al este y oeste del poblado de Nacozari; por lo que se puede inferir que los principales patrones de drenaje de la zona son los que bajan del este y oeste hasta unirse al drenaje mayor que es el arroyo Nacozari el cual fluye del norte hacia el sur. Durante el muestreo se observó que en este arroyo Nacozari se descargan las aguas domésticas del pueblo.

Fisiográficamente, la región donde se encuentra el sitio de estudio pertenece a la provincia Sierra Madre Occidental y a la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos, lo que explica el relieve montañoso y muy accidentado que es característico de la región. En particular el sitio de estudio se ubica en una especie de valle que está flanqueado por sierras de hasta 1,300 – 1,500 m.s.n.m. en su parte oeste y este. En algunas de las quebradas que se desarrollan entre las sierras que están al este y al oeste del poblado Nacozari de García, fueron depositados los jales de las actualmente presas inactivas de Nacozari que son objeto de este estudio.

### **I.4.3.3 Medio Biológico**

Los tipos de vegetación se encuentran directamente relacionados con el aspecto fisiográfico y las condiciones climatológicas predominantes en cada una de las diferentes regiones. En la llanura sonorensis se tiene una vegetación constituida por plantas de zonas costeras, así como desérticas, representadas por manglares y matorrales, respectivamente, además de agricultura de riego y de temporal y vegetación de dunas costeras y desiertos arenosos. En la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos, predominan la selva baja caducifolia, los pastizales y los encinos, mientras que en las partes altas de la Sierra, dominan los bosques de pinos y encinos, con presencia ocasional de bosques de táscate.

En el municipio de Nacozari de García son variados los tipos de vegetación: bosque de pino en la parte noreste, centro y sureste, así como pastizales, en la región sureste y noreste del municipio existe vegetación de matorral subtropical cuyas principales especies son cacahuates, copales, acebuche, nopales, uña de gato y garambullo.

La fauna existente en el municipio se compone principalmente de las siguientes especies de animales: sapo, sapo toro, rana, tortuga de río, coralillo, iguana de rocas, víbora de cascabel, camaleón, huico, cachora, víbora sorda, ratón de campo, tortolita cola corta, tecolote carnudo, golondrina común, tordo de ojos amarillos, aura y aguililla cola roja.

#### **I.4.3.4 Geología del Yacimiento**

El estado presenta condiciones geológicas y tectónicas sumamente favorables para permitir el emplazamiento de una gran diversidad de yacimientos minerales tanto metálicos como no metálicos. La mineralización se presenta con mayor incidencia en algunos lugares, permitiendo definir algunas regiones mineras de mayor importancia.

En la región de Nacozari existe una gran cantidad y variedad de yacimientos minerales, destacando la presencia de los depósitos del tipo pórfidos cupríferos, algunos de los cuales adquieren carácter económico al producirse enriquecimiento supergénico que da lugar a un cuerpo de sulfuros secundarios principalmente de calcosita. A los pórfidos le siguen en importancia las chimeneas brechoideas y las estructuras vetiformes.

Dentro del distrito, las alteraciones hidrotermales relacionadas con los eventos de la mineralización, concuerdan en forma general con las de los modelos propuestos para los de depósitos cupríferos. Las principales sustancias metálicas que produce la región son cobre, molibdeno, oro, plata y zinc.

En el sitio de estudio y sus alrededores los suelos están poco desarrollados y sobresalen los denominados litosoles, los cuales son altamente susceptibles a la erosión hídrica en dependencia de la pendiente del terreno. Los litosoles son suelos de poco espesor y son los que predominan en el sitio de estudio y se encuentran en las laderas, barrancas y lomeríos.

##### ***Síntesis Geológica***

En el distrito de Nacozari, el basamento está representado por rocas metamórficas de edad Precámbrica (Pem). Las rocas aflorantes corresponden a los tipos sedimentarias e ígneas, tanto intrusivas como extrusivas.

La secuencia sedimentaria corresponde a calizas con intercalación de areniscas, de edad Paleozoico Superior (Pss), parcialmente metamorfizadas, en las Sierras de Copper Queen y La Cobriza. Al norte y oeste de La Caridad aflora un conglomerado rojo, con clastos de rocas ígneas y cementante de arena hematítica (Kis), aflorando en capas irregulares. Hacia el oriente de esta mina, aflora un conglomerado gris, cementado por una matriz arenosa, con intercalaciones de tobas y areniscas, correspondiente a la formación Báucarit (Tsc).

Las rocas volcánicas son las que predominan en el distrito, consisten en una gruesa secuencia de flujos de latitas y andesitas de probable edad cretácica, cubiertos por riolitas y material tobáceo posiblemente del Terciario Inferior (Tive).

Las rocas intrusivas corresponden a granitos silicificados, con sericita y caolín, que aflora en La Caridad, Mina Carta Blanca y Sierra La Purica; granodioritas, en La Caridad (Mina Nuevo Continente) y SE del Rancho El Alamito. El distrito se encuentra afectado por un intrusivo Cuarzomonzónico, expuesto en una superficie de 40 km<sup>2</sup>, presentando una forma alargada en dirección NW-SE. Este pórfido cuarzomonzónico se relaciona genéticamente a la mineralización de La Caridad (Mi).

Las rocas volcánicas postminerales son de composición de riolítica a basáltica, incluyendo el conglomerado de La Caridad, de edad Cretácica (Kv). Como cierre de estos eventos extrusivos, se tienen basaltos del Cuaternario (Qb).

##### ***Yacimientos minerales***

En el distrito minero de Nacozari, destacan los depósitos del tipo pórfido cuprífero, algunos de los cuales adquieren carácter económico al producirse enriquecimiento supergénico que da lugar a un cuerpo de sulfuros secundarios principalmente de calcosita, siguiéndole en importancia las chimeneas brechoideas

(brecha pipe) y las estructuras vetiformes. Los principales metales comerciales que se han explotado en la región son el cobre, molibdeno, oro, plata y zinc. En lo que respecta a los depósitos de minerales no metálicos, destacan la fluorita y caliza. Las alteraciones hidrotermales relacionadas con los eventos de la mineralización, concuerdan de manera general con las de los modelos propuestos para los depósitos de pórfidos cupríferos.

Entre los yacimientos más importantes del distrito, se tienen la Brecha Pilares, El Batamote, La Florida Barrigón, La Bella Esperanza, Los Alisos, Los Júcaros, La Gloria y San Nicolás. Sobresaliendo de entre ellos La Caridad. Además de estos yacimientos, se tienen abundantes manifestaciones de mineralizaciones de plata, plomo, zinc, cobre y oro, en forma de estructuras vetiformes tabulares.

Los estudios reportan que la roca encajonante de la mineralización de la Brecha Pilares está compuesta de lutita-andesita y pórfido diorítico. Este yacimiento cuprífero fue explotado en el periodo comprendido entre 1900 y 1949, y producto de esta explotación se generaron jales que se depositaron en las presa inactivas ubicadas en los alrededores del poblado Nacozari de García.

De acuerdo a registros históricos, las leyes de cobre (Cu) en Pilares eran de 0.7 a 1.2 %; y este yacimientos se caracterizó por el poco contenido de sulfuros metálicos como la pirita (FeS), galena (PbS) y esfalerita (ZnS), que es un mineral al que comúnmente está asociado el Cd.

El yacimiento mineral de Pilares es clasificado como brecha (chimenea) y la roca encajonante es lutita-andesita y pórfido diorítico.

#### **I.4.3.5 Mineralogía del Yacimiento**

Las mineralizaciones en la zona consisten principalmente de cobre, en forma de sulfuros generalmente acompañados de plata y molibdeno, en la mina de Pilares las fracturas, en la roca latítica están rellenos de pirita, calcocita, calcopirita, malaquita, hematita y limonita, y fuera de este lugar se pueden observar la existencia de esos minerales llenando fracturas y fallas.

La mineralización que se ha reportado para la mina Pilares incluye los siguientes minerales: pirita, calcopirita, molibdenita, esfalerita, galena, malaquita, azurita, calcocita, especularita cuarzo y limonita. No se cuentan con datos de los porcentajes de cada mineral.

La mineralogía reportada en los jales para este yacimiento es: óxidos e hidróxidos de hierro, pirita, calcopirita y mineral transparente.

## **CAPITULO II.**

### ***GENERACIÓN, CARACTERÍSTICAS Y ALMACENAMIENTO DE LOS JALES***

#### **II.1 EXTRACCIÓN DE LOS MINERALES.**

El desarrollo de una mina consta de cuatro diferentes etapas que son: exploración, preparación y desarrollo, explotación y abandono. Como parte de la explotación está el beneficio del mineral, que es propiamente la concentración de los minerales con valor económico.

##### **II.1.1 Exploración**

El objetivo de la *exploración* es encontrar un yacimiento mineral y conocer sus características físicas, así como su contenido mineralógico con el propósito de valorar si puede ser económicamente explotable. En esta etapa se lleva a cabo tanto la exploración geológica como la prospección geofísica, en la que los métodos más empleados son los magnéticos, eléctricos, electromagnéticos, gravimétricos, sísmicos y radiométricos.

Después de la prospección, la exploración continua con la recolección de datos específicos de un área determinada, mediante barrenación a diamante y obras directas, con lo cual se genera información para establecer el carácter, forma, tamaño, grado y tonelaje del depósito.

##### **II.1.2 Preparación y desarrollo**

En la etapa de preparación y desarrollo se construye la infraestructura necesaria para iniciar la explotación de la mina; caminos de acceso, instalaciones, planta de beneficio, servicios, etc.

La preparación del yacimiento consiste en la creación de obras de acceso a éste, en el caso de una mina superficial se realiza el descapote o remoción de la capa superficial para descubrir el mineral, en el caso de una mina subterránea se cuelan tiros, rampas, socavones, para llegar al mineral, a una profundidad determinada 25 – 50 metros se van colando niveles.

##### **II.1.3 Explotación**

La etapa de explotación comprende propiamente la operación de la mina y esta puede ser subterránea o a cielo abierto. El tipo de minado depende en primera instancia de la forma y profundidad del yacimiento; sin embargo, existen otros factores de importancia como el tipo de yacimiento, el volumen de mineral, las leyes, la extensión del depósito y la profundidad de la carga superior.

Existen factores cuantitativos y cualitativos que deben ser evaluados para la elección del sistema de minado a emplear (HARTMAN, 2002), estos son:

a) *Características espaciales del yacimiento*: Este factor es muy importante debido a que es el que en mayor medida determina el tipo de minado (superficial o subterráneo). Involucra el tamaño, forma, inclinación y altitud del yacimiento.

- b) *Condiciones geológicas e hidrológicas.* La geología del depósito determina características como las especies mineralógicas existentes, su distribución, los minerales de ganga, el tipo de roca encajonante, la estratigrafía de la zona, las características estructurales, etc.
- c) *Propiedades Mecánicas.* Las propiedades mecánicas del mineral y de la roca encajonante son factores importantes para seleccionar el método de minado, ya que se involucran las propiedades elásticas, de plasticidad o viscosidad, estado de esfuerzos, masa de roca, porosidad, permeabilidad y gravedad específica.
- d) *Consideraciones económicas.* Reservas de mineral, las leyes, cotización en el mercado, el ritmo de producción, productividad, costos de operación y costos de capital, entre otros, son determinantes para definir el tipo de explotación.
- e) *Factores Operativos.* La recuperación, dilución, flexibilidad del método a condiciones cambiantes, selectividad del método, son factores importantes en la selección.
- f) *Factores Tecnológicos.* El grado de mecanización y automatización de las operaciones son también factores determinantes para operación de la mina.
- g) *Consideraciones ambientales.* Las características del medio físico, biológico y socioeconómico, aún cuando no son determinantes para la selección del método de minado, son factores que deben ser considerados para la operación de la mina.

No importa cual sea el tipo de minería que se lleve a cabo, el ciclo de producción sigue las mismas operaciones unitarias: perforación, voladura, rezagado y transporte. En ambos casos el mineral de mena se transporta a la planta de beneficio para su concentración y el material estéril es enviado a sitios previamente seleccionados para su disposición final formando lo que se conoce como terreros.

#### **II.1.4 Abandono**

La etapa de abandono de la mina es aquella que representa el cierre de las operaciones de una mina; este cierre puede ser temporal, debido a problemas operativos, a la baja de precios en el mercado, al aumento de costos de operación, etc., o bien puede ser un cierre definitivo ocasionado principalmente por el agotamiento de reservas económicas.

En esta etapa se realizan trabajos de desmantelamiento de las instalaciones y de manera muy importante se establecen acciones para prevenir afectaciones ambientales futuras que se puedan originar por los residuos generados durante la operación de la mina.

## **II.2 CONCENTRACIÓN DE LOS MINERALES**

La concentración o *beneficio* es el proceso posterior a la extracción del mineral y se divide en las siguientes etapas: trituración y molienda, clasificación, concentración, sedimentación y filtrado. De todo el proceso de beneficio y para los fines del presente trabajo se da mayor importancia a la etapa de concentración, ya que es en ésta donde se generan los jales que constituyen el principal residuo producido por la actividad minera. Es importante conocer los métodos de concentración existentes puesto que algunos de ellos utilizan sólo las características físicas de los minerales para lograr su separación, mientras que otros requieren del uso de reactivos para recuperar los minerales de interés.

*El objetivo principal de todos los métodos de concentración es separar selectivamente uno o varios de los minerales de interés económico, produciendo un concentrado de mineral y un residuo comúnmente conocido como Jales, que son el tema central de esta tesis.*

El método de concentración utilizado depende de la *naturaleza del mineral* y de las propiedades de los minerales asociados (KELLY, 1990). El *tamaño de partícula* es un factor de gran importancia ya que de

este depende el tipo de concentración a emplear. Los minerales pueden separarse con base en sus propiedades físicas y químicas.

### **II.2.1 Etapas de un proceso de concentración**

El mineral que es extraído de la mina es necesario reducirlo de tamaño mediante la trituración y molienda, una vez que el mineral ha sido reducido a su tamaño mínimo es procesado en la etapa de concentración. En la sección de *trituración* el mineral es quebrado hasta un tamaño que varía entre 1.90 cm ( $\frac{3}{4}$ " ) y 0.95 cm ( $\frac{3}{8}$ " ), esto generalmente se hace en dos o tres pasos de trituración (primaria, secundaria y terciaria).

El último paso de la reducción de tamaño es la molienda, en la cual se agrega agua al mineral para formar una pulpa. El tamaño de partícula después de la molienda debe ser tal que se libere el mineral económico de la ganga sin que se genere un exceso de partículas muy finas. De la molienda el mineral sale en forma de pulpa hacia clasificadores en los cuales las partículas gruesas se regresan al molino y las finas pasan a la concentración.

### **II.2.2 Métodos de Concentración**

Debido a que las partículas minerales son de naturaleza diversa y su composición varía siendo de fácil o compleja separación, se han desarrollado varios métodos de concentración.

Los métodos de concentración se pueden separar en físicos, químicos y físico - químicos. Los métodos físicos emplean las propiedades físicas de los minerales para su concentración, principalmente la densidad. Los métodos químicos emplean compuestos para disolver los minerales de interés y recuperarlos en forma iónica dentro de una solución que se llama lixiviado. Los métodos físico - químicos utilizan reactivos que modifican las características superficiales de las partículas de mineral para lograr la separación de los minerales de interés. Es así que se conocen como métodos físicos a la Concentración Gravimétrica y a la Concentración Magnética, como métodos químicos a la Cianuración y Lixiviación y como método físico - químicos a la Flotación. .

#### **II.2.2.1 Concentración Gravimétrica**

La Concentración Gravimétrica "es el proceso mediante el cual partículas de diferentes tamaños, forma y gravedad específica son separadas por medio de la fuerza de gravedad o por fuerzas centrífugas" (KELLY, 1990) aprovechando la diferencia de densidades entre los minerales de mena y los de ganga. En la naturaleza se observa este método de concentración ya que se forman depósitos de placer en arenas de playa de minerales duros e indestructibles como el oro, platino, casiterita, ilmenita, circón y diamante.

La concentración gravimétrica se aplica por ser un proceso simple de alta capacidad de procesamiento y bajos costos. Se emplea en los siguientes casos (WEISS, 1985):

- a) Para minerales ricos.
- b) Para minerales que tengan un amplio rango de tamaño de liberación.
- c) Para minerales en los que la separación por medio de la flotación o de la concentración magnética no son efectivos.
- d) Para grandes volúmenes de bajo valor de los materiales.
- e) Para depósitos de placer.

Generalmente se utiliza un medio acuoso que facilita la separación entre los minerales, el objetivo es promover que los minerales de menor peso específico floten mientras que los minerales de mayor peso se depriman.



### ***Separación en Medio Pesado***

Los procesos que emplean un medio pesado son usados para la limpieza del carbón y para la concentración de una amplia variedad de minerales como por ejemplo, hierro, plomo – zinc, cromo, manganeso, estaño, tungsteno, feldespato, magnesita, silvita, granate, diamante, etc. (WEISS, 1985). Éste se emplea cuando hay una diferencia de densidades significativa entre dos o más minerales, comercialmente se ha trabajado con densidades comprendidas entre 1.3 a 3.8 de gravedad específica (sp. gr.). El tamaño de las partículas está comprendido entre 15 y 20 cm (6 – 8”) como máximo, aunque para tamaños de partícula de 15 mm (1/16”, 10 mallas), la concentración pueden hacerse en un baño estático; para una mayor eficiencia del método se prefiere una alimentación de +1.27 cm (+ $\frac{1}{2}$ ”)

En general el proceso que utiliza un medio ferroso consiste en: 1) Preparación de la alimentación, haciendo un cribado húmedo para remover los finos; 2) Separación en Medio Pesado, y 3) Remoción y separación del medio a partir de los productos separados.

### ***Separación en Medio Denso***

La Separación en Medio Denso utiliza un medio de densidad mayor que la del agua y comprendida entre las densidades de los minerales por separar. Este medio puede estar formado por sales disueltas en agua o más comúnmente por una suspensión en agua de partículas finamente divididas de alta densidad. Es decir, se emplea una suspensión de partículas finas en agua como un pseudo fluido.

Es una característica de todos los equipos de concentración gravimétrica que las partículas se mantengan ligeramente apartadas, de manera que puedan moverse unas con relación a las otras y así puedan separarse en capas de minerales densos y ligeros.

Las propiedades más relevantes de los medios empleados son: *Densidad* y *Viscosidad* y las fuerzas asociadas a ellas que son *Flotabilidad* e *Impulso Ascendente* (que es la fuerza con que la partícula mineral responde a un impulso).

Es mediante estas propiedades que se selecciona el tipo de concentrador gravimétrico, ya que existen diferentes tipos en arreglos horizontales o verticales: la Mesa Wilfley, el Jig y el concentrador en espirales.

#### **II.2.2.2 Concentración Magnética**

La *Concentración Magnética* es el método empleado para concentrar minerales que tengan susceptibilidad magnética. Se basa en someter un mineral a un campo magnético, de tal manera que todas las partículas queden bajo el efecto de dicho campo y se puedan separar los minerales magnéticos de los no magnéticos (KELLY, 1990).

La propiedad de un material que determina su respuesta a un campo magnético es la *susceptibilidad magnética*. Con base en esta propiedad, los materiales pueden dividirse en dos grupos: materiales *paramagnéticos* (*ferromagnéticos*), o sea, los atraídos por un campo magnético, y materiales *diamagnéticos*, o sea, aquellos que son repelidos por un campo magnético (KELLY, 1990; WEISS, 1985)).

#### **Minerales Diamagnéticos**

Elementos: Diamante, Grafito, Cobre, Plata, Oro, Bismuto

Sulfuros: Esfalerita, Molibdenita, Argentita, Estibnita, Cinabrio, Galena

Óxidos: Corindón, Cuarzo, Cuprita, Zincita, Casiterita, Halita, Silvita, Fluorita  
Carbonatos: Magnesita, Calcita, Cerusita  
Sulfatos: Anhidrita, Yeso, Smithsonita, Barita, Anglesita

#### Minerales Paramagnéticos

Sulfuros: Pirita, Marcasita, Milerita, Calcopirita, Bornita  
Arseniuros: Nicolita  
Óxidos: Gohetita, Manganita, Braunita, Pirolusita, Wolframita, Cromita,  
Carbonatos: Siderita, Rodocrosita  
Silicatos: Olivino, Ortopiroxeno, Clinopiroxeno, Anfíboles, Biotita, Cordierita, Granate, Rodocrosita,  
Diópsido, Garnierita

Cuando una mezcla de partículas magnéticas y no magnéticas se transporta a través de un campo magnético, las partículas magnéticas tienden a permanecer en el campo, mientras que las otras lo atraviesan.

### II.2.2.3 Flotación

La *Flotación* es un proceso de separación en el que las especies minerales contenidas en la mena son suspendidas en una solución acuosa y se mantienen en suspensión mediante una agitación continua. Puede ser de dos formas: *Flotación Colectiva* donde el concentrado contiene a lo menos 2 ó mas componentes o minerales de interés y *Flotación Selectiva* donde se efectúa una separación de compuestos complejos en productos que contienen no mas de una especie individual (KELLY, 1990).

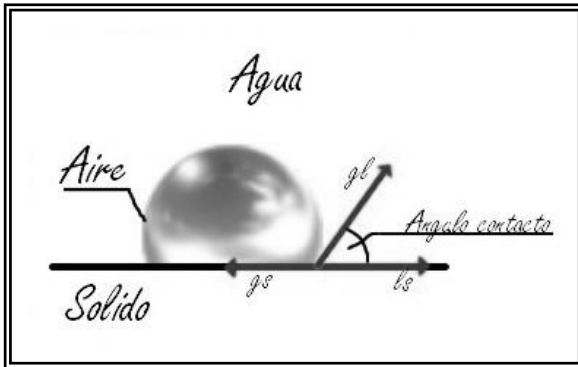
La *Flotación* aprovecha las condiciones hidrofóbicas que puede tener un mineral y este proceso se emplea cuando no es posible separar las partículas de interés debido a que el tamaño de liberación de partícula no es el óptimo para utilizar un método de concentración física. La flotación utiliza sustancias químicas especiales (reactivos) que producen reacciones surfactivas fisicoquímicas en el mineral. La clase más abundante de menas minerales que es tratada mediante la flotación es la que contiene minerales de cobre formados por sulfuros, le siguen las menas que contienen los sulfuros de plomo y zinc mezclados, con o sin pirita.

La recuperación de un mineral por flotación consiste sólo en revestir el mineral de interés con una capa colectora que sea capaz de adherirse por sí sola a una burbuja separándola así de los minerales de ganga. La adsorción en la superficie de una partícula mineral está fuertemente controlada por la naturaleza eléctrica de esa superficie.

La flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está representada por los minerales a separar, la fase líquida es el medio acuoso donde se lleva a cabo la separación y la fase gaseosa generalmente es aire inyectado en el medio acuoso para formar las burbujas donde se adhieren las partículas de mineral económico.

La operación de  **acondicionamiento**  consiste en hacer reaccionar los reactivos con el mineral para modificar sus propiedades superficiales y posteriormente hacer la flotación. Después de un periodo determinado de acondicionamiento, la pulpa formada con el mineral pasa a las celdas de flotación. Entonces se introduce aire en la pulpa junto con un **espumante** cuya función es la de hacer que la corriente de aire entrante se desbarate o rompa formando burbujas pequeñas. Las partículas minerales acondicionadas para volverse hidrofóbicas se adhieren a las burbujas en cuanto están en contacto con ellas. Las burbujas cargadas con las partículas minerales flotan hasta la superficie y se derraman sobre el vertedor de la celda. Los minerales de ganga no se adhieren a las burbujas y quedan en el fondo de la celda constituyendo lo que se denomina como colas.

Para relacionar en forma cuantitativa las propiedades hidrofóbicas de un mineral se utiliza el ángulo de contacto. En la coexistencia de las tres fases (sólida, líquida y gaseosa) corresponde al ángulo formado por el plano tangente a la interfase líquido-gas y el plano formado por el sólido en contacto trifásico sólido-líquido-gas (ver Figura 2).



**Figura 2.** Angulo contacto  
(FUENTE: Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes  
[http://www.aguamarket.com/temas\\_interes/033.asp](http://www.aguamarket.com/temas_interes/033.asp))

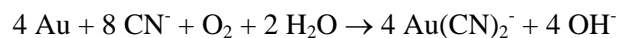
Pocas partículas minerales tienen flotabilidad natural, es decir, capacidad para formar una unión estable entre la burbuja y la partícula. Para ello, es necesario cambiar las propiedades superficiales de las partículas minerales de hidrofílicas a hidrofóbicas mediante el uso de un reactivo químico llamado colector. También es necesario que éstas posean el tamaño adecuado de tal forma que se asegure una buena liberación de las especies minerales.

#### II.2.2.4 Cianuración.

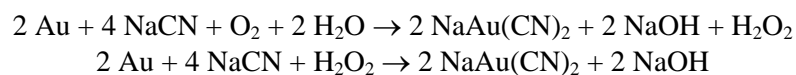
El cianuro ha sido reconocido por mucho tiempo como un lixiviante poderoso para oro y plata, ya que forma complejos muy estables con ambos metales. El cianuro es muy efectivo en la lixiviación de minerales durante la molienda, hay ciertas clases de minerales de oro y plata (como los carbonaceos, piríticos, arseniuros, manganoferrosos y cuproferrosos) que son considerados minerales refractarios por la cianuración convencional.

El proceso de cianuración para la recuperación de metales preciosos tuvo su inicio en 1844 cuando Elsner postula que para disolver oro y plata de un mineral en una solución de cianuro es necesaria la presencia de oxígeno en la solución lixiviante. Esta observación tuvo su primera aplicación industrial en 1887 cuando Mc Arthur y Forrest cianuraron oro de un mineral en presencia de oxígeno. Obteniendo excelentes resultados.

Las ecuaciones aplicables para la disolución del oro contenido en minerales molidos mediante soluciones de cianuro son las postuladas por Elsner (Sosa Sánchez, 1992):



O, por las ecuaciones de Bodlander:



La velocidad de disolución del oro depende de la concentración de NaCN y de la alcalinidad de la solución (pH alrededor de 10.3).

Una vez que el oro y/o la plata han sido lixiviados, la solución es separada de la pulpa molida (o mineral quebrado) mediante filtración o sedimentación, después esta solución es tratada con polvo de zinc para recuperar el oro por precipitación. La solución estéril resultante contiene cianuro libre y complejos ciano – metálicos de: cobre, fierro, níquel y zinc, así como otras impurezas, incluyendo productos de reacción del azufre (en caso de que se procesen sulfuros) y del cianuro, por ejemplo  $S^{-2}$ ,  $S_2O_3^{-2}$ ,  $SCN^{-}$ ,  $CNO^{-}$ ,  $NH_3$ ; así como otros compuestos solubles en soluciones alcalinas (arsénico, antimonio y/o sílice), los que se disuelven simultáneamente con el oro.

Existen dos corrientes principales de desecho que contienen cianuros, estas son descargadas como efluentes a partir de una planta de cianuración en forma de:

- 1) Purga de solución estéril del circuito de lixiviación y
- 2) Colas de suspensión de sólidos lixiviados descargados en la presa de jales.

El proceso de cianuración tiene la ventaja que adquiere el hecho de que la solución de cianuro tiene una acción selectiva sobre el oro. Ya que los lixiviantes más fuertes como los usados en clorinación tienen una tendencia a disolver numerosas impurezas. Además de que el proceso incluyó un método adecuado para recuperar oro desde la solución de cianuro por precipitación con polvo de zinc.

### **II.2.2.5 Lixiviación.**

La lixiviación es el proceso por medio del cual se disuelve el mineral deseado en el disolvente que ha sido seleccionado (VAN ARSDALE, George D.). Se entiende por lixiviación el ataque químico de una determinada materia prima para disolver algún metal valioso utilizando reacciones: ácidas o básicas, reductoras u oxidantes, complejantes o combinaciones de ellas (BALLESTER, Antonio, et. al., 2000). La dificultad de la lixiviación es determinar las condiciones mecánicas, químicas y económicas mediante las cuales se puede hacer la disposición máxima del metal deseado.

La lixiviación depende de diversos factores:

- a) Tamaño de partícula. El objeto de reducir el tamaño del mineral antes de la lixiviación se debe a que facilita el contacto del disolvente con el mineral.
- b) Composición y concentración del disolvente.
- c) Tiempo de contacto.
- d) Temperatura del disolvente.

La materia prima de la lixiviación (puede ser de naturaleza diversa) está conformada por el mineral (pobre o rico) o el concentrado, productos metalúrgicos intermedios, a tratar así como del disolvente. Cuando el metal deseado se encuentra en forma de sulfuro, carbonato, silicato, óxido o sulfato y/o aún en estado libre, puede llegar a presentar dificultades en el proceso de lixiviación debido a que por lo general se encuentra acompañado de impurezas que reaccionan de igual forma (en mayor o menor grado) con los disolventes empleados, dentro de los que se pueden encontrar tanto soluciones ácidas como soluciones alcalinas y algunas sales, aunque el ácido sulfúrico es el más empleado por su versatilidad.

Se emplean reactivos de muy distinta naturaleza, ya sean ácidos o bases, estos van en función del tipo de ganga que se tenga en el mineral. Existen reactivos accesorios como el sulfato férrico y/o ferroso, sin ser el disolvente principal, que tienen por objeto activar las reacciones de disolución. El sulfato férrico ayuda a disolver algunos sulfuros de cobre y el sulfato ferroso actúa como agente despolarizante en la electrólisis del cobre. El óxido de hierro actúa como catalizador en la producción de anhídrido sulfúrico durante la tostación sulfatante.

### II.2.3 Manejo de los Jales

En general no importa cual sea el proceso de concentración, al final se tienen dos productos: el concentrado y las colas. Estas últimas constituyen el principal residuo generado por la minería y su disposición final se hace en una presa a la que se da el nombre de presa de jales. Para los fines del presente trabajo, los jales tienen mayor relevancia ya que la cantidad que se genera de ellos y el riesgo que pueden representar para el ambiente, hace necesario que se garantice su adecuado almacenamiento a futuro.

Los jales antes de ser conducidos a la presa reciben un tratamiento previo al salir de la planta de beneficio, éstos primero se canalizan hacia un tanque espesador, la capacidad de éste varía de acuerdo a la cantidad de agua que lleva la pulpa y a la naturaleza y tamaño de los sólidos, el motivo por el que primero pasa al tanque es para recuperar la mayor cantidad de agua posible y poder retornarla al proceso de beneficio, dejando la cantidad adecuada para poder conducir los jales hasta la presa.

Si en los jales existe una cantidad de finos que impida el asentamiento de éstos, se emplean reactivos floculantes para acelerar su sedimentación.

Cuando el proceso de explotación emplea el método de relleno hidráulico, los jales son conducidos a un clasificador en donde se separan las partículas más gruesas para enviarlas al interior de la mina y revolverlas con cemento Pórtland para formar el relleno hidráulico; las partículas finas se conducen por tubería hacia la presa.

## II.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS JALES

El origen de los jales se da con la reducción del mineral hasta tamaños de partícula generalmente en el rango de centímetros o milímetros y una reducción posterior a tamaños menores a un milímetro.

Los jales pueden estudiarse como un suelo, ya que el depósito final se constituye en gran parte por arenas finas, por lo que tienen características de identificación, resistencia y deformación. Los desechos son un medio de tres fases (granos sólidos, líquidos y gases en los poros).

### II.3.1 Características Físicas

Por definición las propiedades físicas son todas aquellas que pueden ser observadas sin que exista cambio alguno en cuanto a su apariencia, las más importantes desde el punto de vista ambiental son: *composición mineralógica*, *tamaño de partícula* (granulometría), *densidad*, *porosidad* y *permeabilidad*. También puede presentar cierta importancia en determinados casos, otros parámetros como: el *volumen*, la *consistencia*, el *color* y la *temperatura*.

#### II.3.1.1 Tamaño de Partícula

Este es importante puesto que la reducción de tamaño de una mena mineral se realiza para liberar los diferentes minerales presentes y así poder llevar a cabo la separación. No es posible hablar de un solo tamaño, puesto que debido al tipo de material que se maneja son diversos los tamaños que se forman, para el caso tanto de la separación de minerales como para los jales, los tamaños son medidos en  $\mu\text{m}$ . El tamaño de las partículas es importante en la presa ya que partículas muy finas pueden generar lamas las cuales impedirán la depositación o sedimentación de los jales.

La granulometría sirve para establecer de forma cuantitativa el tamaño de los granos que componen una muestra, que a menudo es reflejo de otras características de interés, como: porosidad y permeabilidad,

comportamiento mecánico, etc. Los jales pueden presentar una gran variedad de tamaños de partícula, yendo de granos gruesos a partículas coloidales. Aunque generalmente el tamaño mayor de partícula es de 100 mallas y el menor está por debajo de 350 mallas.

### **II.3.1.2 Porosidad**

En términos simples es la cantidad de huecos, poros o fisuras que se encuentran en el depósito de jales. Es generalmente expresada como un porcentaje del volumen poroso con respecto al volumen total de suelo, la porosidad es importante dentro de una presa de jales debido a que el agua puede circular libremente dentro de ésta.

### **II.3.1.3 Densidad**

La densidad que se mide puede ser: densidad real o densidad aparente. La real corresponde a la densidad media de la fase sólida, mientras que la aparente es la que puede medirse directamente, esto es, la masa por unidad de volumen, siendo éste el volumen total de la muestra, incluyendo los huecos que contenga (a esto también se le llama peso volumétrico y es un parámetro muy utilizado en la minería).

### **II.3.1.4 Coeficiente de Permeabilidad $k$ (m/s)**

La permeabilidad es la facilidad con la que una solución acuosa puede atravesar un suelo o, en este caso, la masa de jales. Este parámetro se ve afectado por diversos factores inherentes tanto al material como a las características del agua circulante, los factores principales que determinan la permeabilidad en el caso de una presa de jales, son la relación de vacíos y la temperatura del agua. (JUAREZ Badillo).

### **II.3.1.5 Color**

El color es un parámetro que refleja otros parámetros físicos como la composición mineralógica o química, como por ejemplo el contenido de óxidos de hierro muestra una coloración café-rojiza que es indicadora de un proceso de oxidación de los jales.

## **II.3.2 Características Mecánicas**

Las principales propiedades mecánicas que se consideran para el almacenamiento de los jales son su resistencia y el grado de consolidación que pueden alcanzar.

### **II.3.2.1 Resistencia**

El esfuerzo cortante es el esfuerzo producido debido a la fricción entre partículas para resistir un corte. O en otras palabras la resistencia es la máxima tensión que puede soportar un cuerpo sin ceder (ya sea por rotura o bien por deformación continua). De acuerdo con la ley de Mohr – Coulomb, la resistencia al esfuerzo cortante se expresa como:

$$\tau = c + \sigma_n \tan\phi$$

Donde:

$\tau$ : Resistencia al esfuerzo cortante

$\phi$ : Ángulo de resistencia al esfuerzo cortante

$c$ : cohesión

$\sigma_n$ : esfuerzo normal a la superficie de la falla

Esta es la ecuación general es aplicable a los taludes, pero se puede considerar que los jales son friccionantes y de cohesión casi nula por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$\tau = \sigma_n \tan\phi$$

La resistencia al esfuerzo cortante que se mide en los jales sirve para evaluar la estabilidad de las presas y poder establecer criterios de control en cuanto a capacidades de almacenamiento y alturas efectivas antes de que sufran alguna fractura o lleguen a fallar.

### **II.3.2.2 Deformación**

La deformación es el movimiento absoluto o relativo de un punto de un cuerpo o bien la variación de una dimensión lineal. Este parámetro sirve para medir hasta que punto van a resistir los materiales de construcción movimientos bruscos (como los sísmicos) antes de sufrir un cambio en su forma.

### **II.3.2.3 Consolidación**

La consolidación es la porción de la resistencia al esfuerzo cortante indicada por el término **c** en la ecuación de Coulomb:  $s = c + p \tan \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo de resistencia al esfuerzo cortante. Tiene la naturaleza de una fuerza de liga intergranular.

El decir que los jales depositados dentro una presa se encuentran consolidados quiere decir que están unidos fuertemente entre sí y resisten esfuerzos externos sin sufrir daños.

## **II.4 MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE LOS JALES**

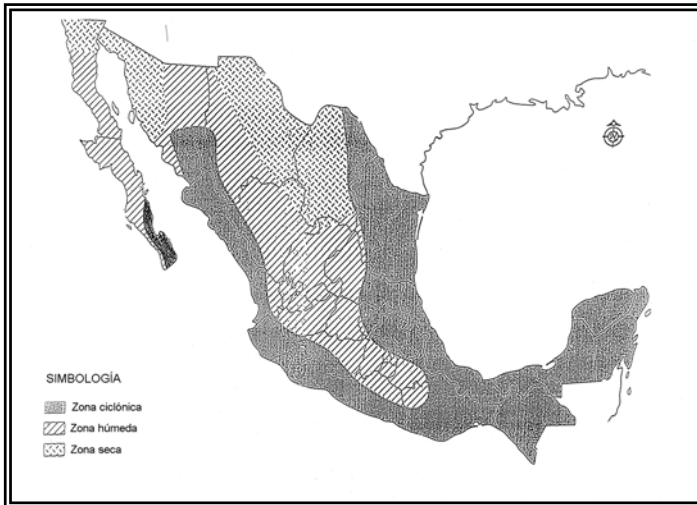
Las presas de jales son similares a las presas de agua, con la diferencia de que las presas de jales se diseñan para retener sólidos y agua (lodos en suspensión) se construyen en el área donde se encuentran las minas o muy cercanas a éstas, y su construcción se realiza en etapas de acuerdo con la operación de la mina.

Como una presa de jales es construida en un área cercana a las instalaciones de la planta de beneficio, se hace necesario considerar principalmente las condiciones geomorfológicas, meteorológicas, y sismológicas que se tienen en el área planeada para su ubicación; de estos estudios se podrá establecer el tipo de presa a emplear, así como asegurar su estabilidad.

Las condiciones geomorfológicas del área incluyen:

1. La Topografía, que clasifica a un terreno como Montañoso, Lomerío o Plano;
2. La Geología, que incluye el tipo de roca y estructuras existentes en el área;
3. La Fisiografía, que trata la formación dentro de la cual se encuentra comprendida el área de ubicación (Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico).

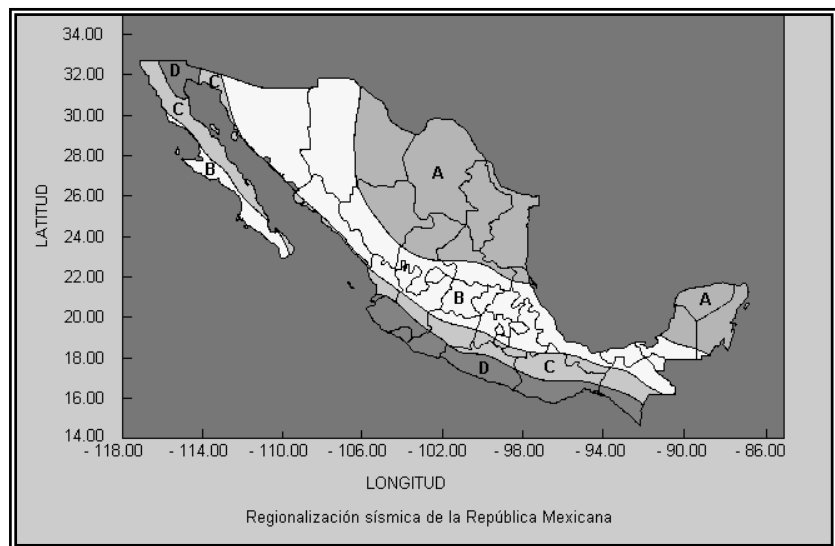
Dentro de las condiciones meteorológicas (ver Figura 3) del área se consideran principalmente al clima, del cual es importante conocer las tormentas máximas, la dirección de los vientos, así como su velocidad y frecuencia, esto se requiere para evitar dispersión de partículas finas en el aire y que se depositen en zonas habitadas o que puedan afectar al entorno natural, de igual forma se evita que los taludes de las presas fallen por erosión.



**Figura 3.** Carta Hidrológica de la República Mexicana  
 (FUENTE: NOM – 141- SEMARNAT – 2003)

Las condiciones sismológicas consideran a la actividad sísmica que predomina en el área seleccionada, la actividad sísmica se divide por regiones, las que se conocen como región Sísmica, Penesísmica y Asísmica. La República Mexicana se encuentra dividida en estas regiones como se puede observar en la siguiente figura 4, donde **A** pertenece a la región Asísmica, **B** a la Penesísmica, y **C** y **D** a la región sísmica.

**Figura 4.** Regiones Sísmicas de la República Mexicana  
 (FUENTE: NOM – 141- SEMARNAT – 2003)



Las Presas de Jales tienen 4 elementos constitutivos:

- 1) **Cortina Contenedora (Dique).** Se construye con los métodos denominados “aguas arriba” (upstream), “aguas abajo” (downstream) o combinados.
- 2) **Vaso de Almacenamiento:** Se delimita con los parteaguas y las obras de encauzamiento y/o derivación. En todas las etapas de construcción y operación del depósito de jales, el estanque de agua libre (clarificada) debe localizarse lo más alejado posible de la cortina contenedora (playa extensa).
- 3) **Sistema Decantador Drenante:** Se construye con tuberías de concreto reforzado con o sin perforaciones, de sección cuadrada, circular o sección portal.
- 4) **Vertedor de Excedencias:** Puede alojarse en roca firme, para evitar colapsamientos o derrumbes.



## **II.4.1 Construcción del Dique**

El *Dique* o *Cortina Contenedora* de una presa puede ser construido de diferente manera y de ésta la presa toma su nombre, para poder determinar el tipo de dique que se requiere para un sitio determinado es necesario tomar en cuenta diferentes factores, tales como:

- la cantidad de material disponible, la actividad sísmica del área, condiciones climatológicas, distancia de la planta concentradora a la presa (costos de bombeo) y la elevación de la presa con respecto al molino,
- caminos de acceso,
- hidrología, geología,
- áreas de interés ecológico e impacto visual,

La mayoría de las presas de jales en nuestro país contienen sulfuros metálicos como la pirita, que al ser expuestos a las condiciones naturales (clima) son susceptibles de sufrir alteraciones en su composición y originar algún tipo de contaminación dependiendo de los factores que circunden a la presa, por lo que se requiere hacer consideraciones tanto técnicas como ambientales para la selección del sitio.

Existen dos formas para construir los diques una es con hidrociclones y la otra mediante descarga de espigas.

### **II.4.1.1 Hidrociclones**

El hidrociclón divide los jales en dos componentes:

- 1) El flujo inferior del hidrociclón, que contiene las partículas más gruesas y poca agua. Este por lo general es un producto con buenas propiedades de resistencia al esfuerzo cortante y proporciona un buen drenaje.
- 2) El flujo superior que contiene las partículas finas y la mayor parte del agua. Este es un lodo con poca permeabilidad y buenas características de flujo.

El objetivo de utilizar los hidrociclones es colocar el producto del flujo inferior (material grueso) a modo de formar una cortina que permita el almacenamiento del producto superior (material fino) durante toda la vida del depósito.

### **II.4.1.2 Descarga con Espigas**

Las espigas es un procedimiento generalmente usado en el método de construcción de aguas arriba de diques. Las espigas son salidas múltiples a lo largo de una línea alimentadora y se usan cuando es posible y deseable producir una separación graduada de los elementos gruesos y los finos del producto de jales.

Las espigas dividen la descarga de jales en descargas de menor volumen, permitiendo así una disminución rápida en la velocidad del flujo. Después de cada ciclo de vaciado con espigas debe construirse un nuevo bordo de contención.

La playa que se forma con las espigas incluye su propio bordo libre. Las fracciones de elementos gruesos se depositan con una pendiente más pronunciada que las fracciones de finos.

El método preferido para la disposición o almacenamiento de jales es muy específico para cada proyecto y ubicación, la mejor solución puede ser obvia o puede requerir de investigación considerable dependiendo de las circunstancias únicas de la mina, las cuales incluyen: localización, su topografía, tipo de suelo,

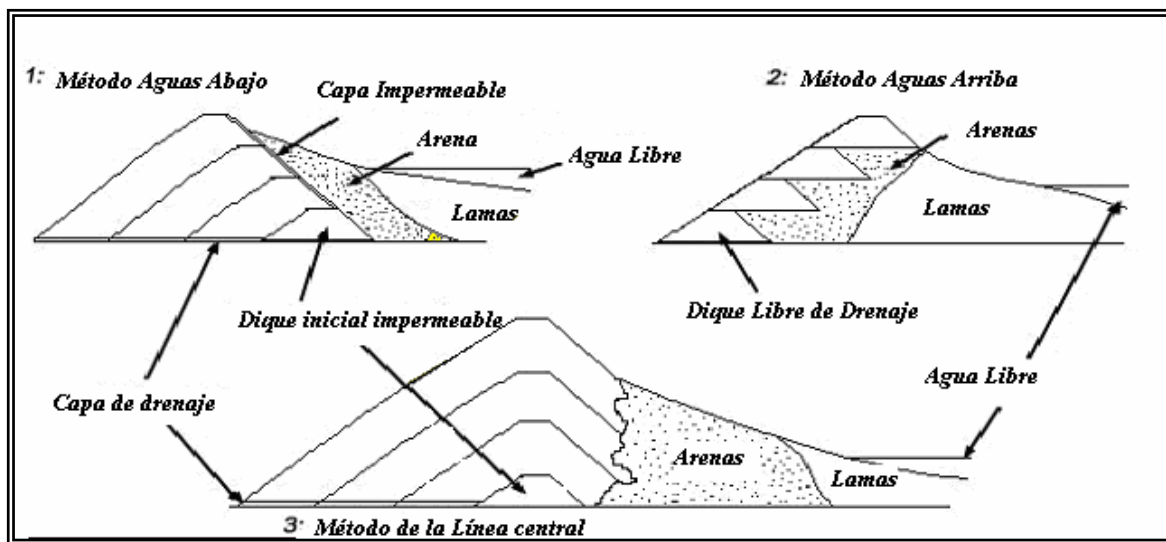
método de minado, geología del cuerpo mineralizado, métodos de procesamiento, características físicas y químicas de los jales y su potencial de generación de drenaje ácido.

### II.4.2 Métodos convencionales

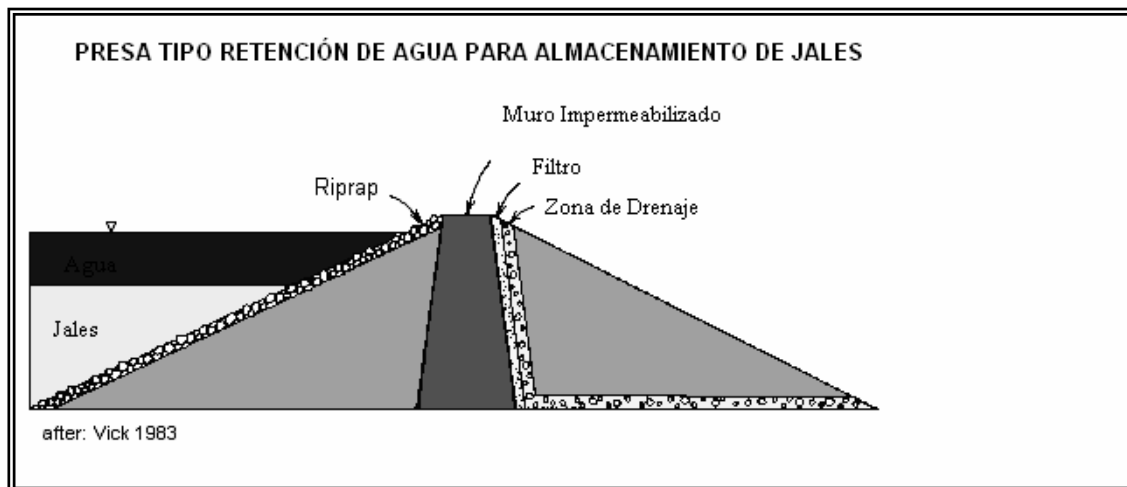
Se usan clasificaciones de presas de jales para diferentes propósitos. La clasificación más conocida está basada en tres métodos convencionales principales de almacenamiento para jales (ver Figura. 5), que son los más comunes empleados hasta ahora para la construcción de diques:

- Método de Aguas Arriba
- Método de Aguas Abajo
- Método del Eje central

Aunque en ocasiones las presas son construidas como una presa convencional de agua (ver Figura 6)



**Figura 5.** Métodos Convencionales de construcción de presas de jales  
 (FUENTE: ¿Qué son los jales? <http://www.tailings.info/>)



**Figura 6.** Presa de Jales Tipo retención de agua  
 (FUENTE: Propiedades de las Presas de Jales <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdap.html>)

Cuando se piensa en la fase de cierre de las presas de jales se considera que la siguiente clasificación para las presas de jales puede ser útil: (a) Altamente permeable; (b) Permeable y (c) Baja permeabilidad.

Los procesos normales de construcción envuelven la depositación hidráulica de jales a través de espigas en dirección aguas arriba fuera del dique inicial, el dique es incrementado por el dragado de material grueso desde los jales previamente depositados en la vecindad de la presa.

El proceso general se puede esquematizar de la siguiente manera:

1. Se forma el dique inicial, posteriormente los jales en forma de lodos son depositados detrás del dique para formar la laguna (playa y poza de decantación).
2. La arena es “rastrillada” y enviada para formar el frente de los diques subsecuentes de la presa de jales sobre el dique inicial y los jales compuestos.
3. Los lodos o jales son depositados detrás del nuevo dique, cuando la laguna está llena, más arena es “rastrillada” y enviada para formar el siguiente dique de la presa; esto se realiza sucesivamente hasta la altura considerada.

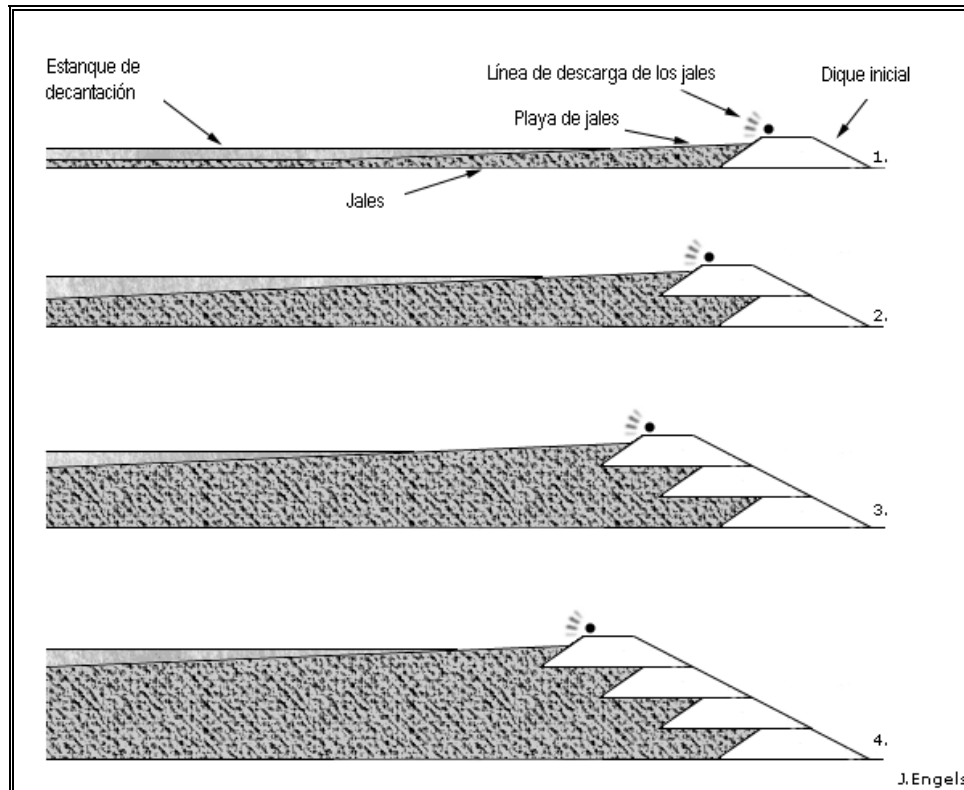
Debido a que no todos los yacimientos y minas son iguales, existen diferentes riesgos que afectan a la presa, por este motivo se han estudiado métodos alternativos para evitar problemas a futuro de fallas o contaminación por parte de las presas existentes.

#### **II.4.2.1 Método Aguas Arriba**

Este tipo de presas es el más viejo, común y más simple método de construcción, se usa cuando la arena es más apropiada para la construcción de este tipo de diques, si el riesgo de sismos es muy bajo y si los diques no van a ser muy altos.

Este método de construcción se lleva a cabo mediante la construcción de un dique inicial (Figura 7). El punto de descarga de los jales se realiza en el borde del dique desde donde los jales son depositados en forma de lodos y estos por segregación se van asentando en el depósito formando un espacio de arena conocido como playa y el agua que contienen se decanta sobre el punto más bajo. La corona del dique se mueve progresivamente hacia aguas arriba según se eleva el depósito.

Cuando se emplean hidrociclones en este método, la tubería de alimentación de lodos se coloca inicialmente en la base del bordo iniciador de la presa y el producto del flujo inferior de los hidrociclones se vacía en el perímetro interior de dicho bordo y parcialmente sobre los finos de la playa, la cual se forma al mismo tiempo.



**Figura 7** Método de Construcción Aguas Arriba  
 (FUENTE: ¿Qué son los jales? <http://www.tailings.info>)

Con el fin de obtener componentes estables de apoyo de un material con características suficientes de resistencia al esfuerzo cortante, es necesario tener una instalación apropiada descentralizada “de espigas” a partir del bordo iniciador y mantener playas largas no sumergidas. Si el material original contiene una cantidad suficiente de arenas y la playa es larga, se forma fácilmente un apoyo estable del tamaño requerido.

Los factores que controlan este método de construcción incluyen: (a) la superficie freática, (b) la capacidad de almacenamiento de agua y, (c) la susceptibilidad a la licuación sísmica.

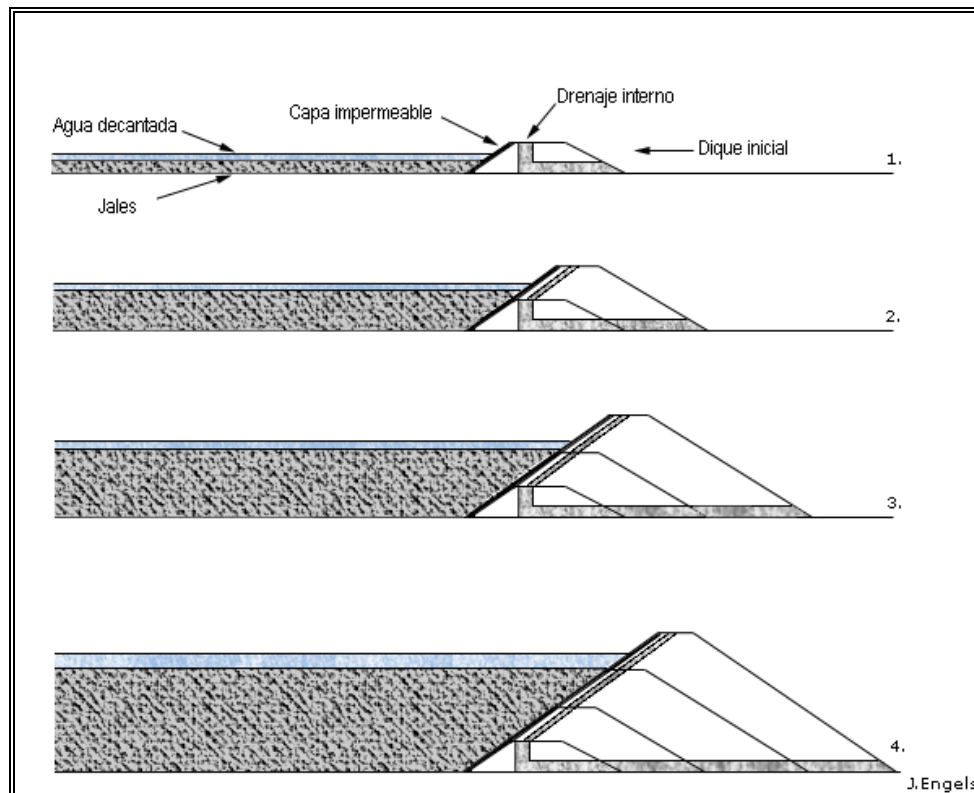
#### DESVENTAJAS

Las principales desventajas de este método de construcción son: 1) Las secciones del punto de apoyo construidas en etapas posteriores, reposarán sobre material granular más fino depositado en las etapas precedentes. 2) Este material es de características de resistencia menores y se consolida más lentamente. 3) La estabilidad de este tipo de presas es inversamente proporcional a su altura.

#### II.4.2.2 Método Aguas Abajo

El método de construcción Aguas Abajo es un desarrollo relativamente nuevo, fue desarrollado para construir presas de jales más grandes y más seguras (de las que usualmente se construyen con el método de Aguas Arriba). Éste método solo se usa en regiones extremadamente sísmicas, en las cuales es el único método que permitiría garantizar un dique seguro. La corona del dique (ver Figura 8) se mueve progresivamente hacia aguas abajo según se eleva el almacenamiento, suministrando así un depósito de “cuña completa” de material altamente resistente.

El sistema de construcción se realiza de la siguiente manera: De la misma forma que con el método de Aguas Arriba se construye un dique inicial con la diferencia de que éste se construirá con dirección Aguas Abajo y no es subdrenado por jales depositados previamente (ver Figura 8), además de que las capas de jales finos no están entremezcladas con los jales arenosos (los que pueden formar planos de debilidad) los cuales permiten diques seguros para ser construidos a alturas apropiadas, con tal de proporcionar la compactación y el control de infiltración adecuada (SARSBY, Robert, 2000). Sin embargo cada elevación sucesiva requiere más material para construcción que el dique previo si los jales asumen su ángulo natural de reposo, el volumen de relleno requiere frecuentemente incrementos exponenciales a su altura, de esta manera se incrementan los costos. La superficie freática puede ser mantenida a bajos niveles dentro de la presa, porque el cuerpo entero de relleno puede ser compactado. La construcción aguas abajo es resistente a la licuación y puede ser usada en áreas de alta sismicidad.



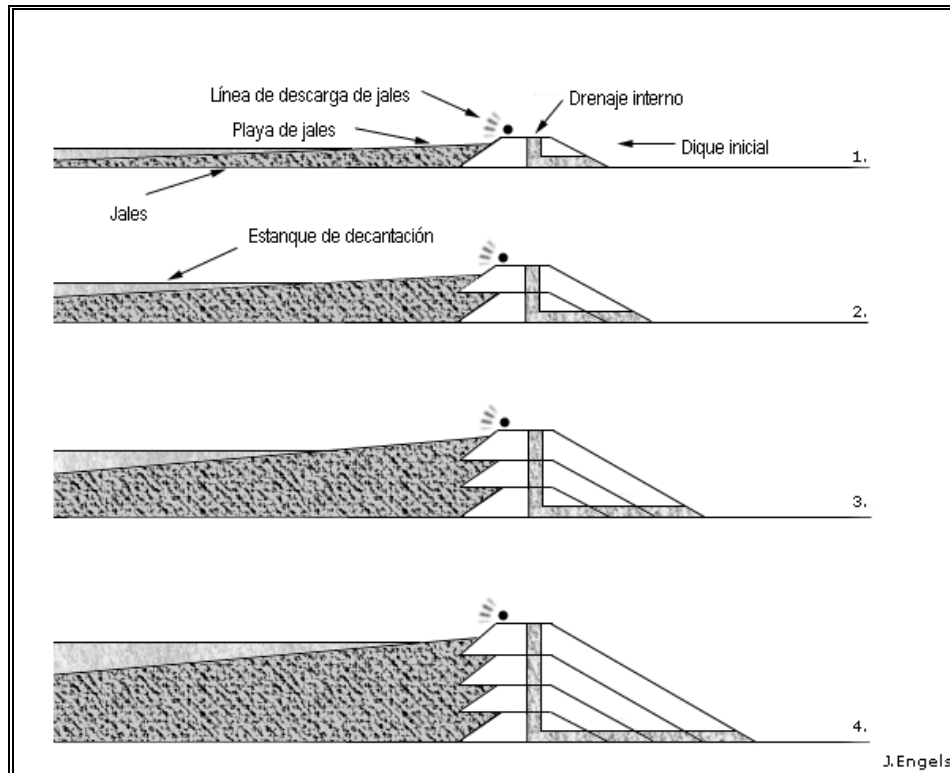
**Figura 8. Método Aguas Abajo**  
(FUENTE: ¿Qué son los jales? <http://www.tailings.info>)

En este método la tubería de jales se coloca sobre el dique divisorio interno y el material del flujo inferior de los hidrociclones se coloca en la zona entre este dique y el dique inicial de la presa. El bordo iniciador funciona inicialmente como un almacenamiento de material fino, permitiendo que los jales gruesos se almacenen hasta que puedan formar una cortina adecuada para continuar la playa de finos y el estanque.

### II.4.2.3 Método de la Línea Central

En este método pueden usarse para la construcción del dique partículas más finas que en el método de Aguas Arriba, pero a veces puede requerirse roca de desperdicio adicional que sirva como fuerte en la cara aguas abajo para dar mayor estabilidad. El eje del depósito permanece en posición fija (ver Figura 9). Con el empleo de este método se pueden desarrollar presas significativamente más altas que con los métodos anteriores Aguas Arriba y Agua Abajo y a la vez son más seguras.

El Método de la Línea Central es una variación del Método de Aguas Arriba, en donde la presa se levanta verticalmente, con la línea central del incremento coincidiendo con el aumento de la altura de la presa (ver Figura 9). La parte de la presa correspondiente al dique no se construye sobre jales finos previamente depositados, el sistema de drenaje interno puede instalarse igual que en el método de Aguas Abajo. El principal cuerpo de relleno de la presa puede colocarse y compactarse de una manera ordenada y la saturación puede controlarse de manera que el método produzca buena resistencia a sismos.



**Figura 9. Método de la Línea Central**  
(FUENTE: ¿Qué son los jales? <http://www.tailings.info>)

Aquí la tubería alimentadora de jales y los hidrociclones se colocan en el eje central del bordo final, quedando relativamente en la misma posición durante todo el periodo de construcción, pero siendo elevados paulatinamente sobre dicho eje.

## II.5 ESTABILIDAD DE TALUDES

El otro aspecto importante en la evaluación del riesgo ambiental de un depósito de jales, son las condiciones de almacenamiento, principalmente las relacionadas con el diseño y construcción de la presa, ya que éstas determinan la estabilidad de la instalación.

Se comprende bajo el nombre genérico de taludes, cualquiera superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería (JUÁREZ BADILLO).

Los taludes se dividen en: naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes). La determinación del estado de esfuerzos en los diferentes puntos del medio material que constituye un talud es un problema no

resuelto en la actualidad. En taludes siempre se ha considerado que la falla siempre ocurre como un deslizamiento de la masa del suelo, actuando como un cuerpo rígido, a lo largo de una superficie de falla supuesta.

Para una valoración de la estabilidad de un talud de tierra, se analiza el equilibrio de fuerzas y momentos a lo largo de las superficies potenciales de falla. El rebaje es estable, si la fuerza de corte del suelo excede los requerimientos para mantener el talud estable.

Los factores que afectan a la estabilidad del talud son: la altura y el ángulo del talud, las propiedades del suelo, la presión de poro dentro del talud, y las fuerzas externas. Se conoce que la estabilidad de las presas de jales construidas por el método aguas abajo es mayor que las que se construyen con el método aguas arriba. Debido a que la estabilidad depende de la resistencia al esfuerzo cortante de la porción de tamaño más fina de los jales, la cual está gobernada, por la velocidad de consolidación y la rapidez de acumulación de las partículas.

Para poder asegurar la estabilidad del talud de una presa de jales es necesario conocer las características del sitio como son la geología, geotecnia, hidrología, sismicidad y clima, entre otros.

### ***Geología***

Las características geológicas del sitio afectan la estabilidad física de las represas y la movilidad de los contaminantes potenciales hacia y dentro del agua subterránea. Se necesita que las condiciones de suelo y roca que pueden afectar desfavorablemente la estabilidad física sean identificadas junto con la extensión y profundidad de cualquiera de dichos depósitos. Esto incluye planos de estratificación mal y/o débilmente orientados; depósitos de arena, limo o grava propensos a la licuación, o que podrían volverse así bajo la influencia de la percolación de la represa; turba y arcilla saturada independientemente de su rigidez.

Algunas condiciones geológicas pueden automáticamente excluir de consideración un sitio; dentro de las condiciones se incluyen:

- ❖ La ***presencia de una falla activa***, o una ***falla inactiva*** que pueda ser reactivada por el peso y la percolación de la instalación propuesta, debajo o adyacente al sitio.
- ❖ La ***presencia de labores de mina subterránea activas*** o que pasan directamente debajo o adyacente al sitio.
- ❖ Un ***sitio geológicamente inestable***, tal como un desprendimiento o derrumbe de basura. La presencia de un área relativamente plana en el medio de otra forma de terreno escarpado, que puede presentarse como un sitio atractivo, deberá ser examinada con particular cuidado.
- ❖ La ***presencia de presiones altas de agua subterránea***, como lo indican algunas veces los manantiales artesianos en el área del sitio.
- ❖ ***Propensión de un sitio a riesgos geológicos***, tales como derrumbes activos fácilmente identificables durante el reconocimiento geológico y que deberían evitarse en caso de producirse ya sea debajo o sobre el depósito. A veces se puede indicar el potencial de caídas de rocas grandes por evidencia geológica mediante la evaluación del terreno

### ***Hidrología***

Cuando la topografía es abrupta y hay falta de áreas planas para la construcción de presas de jales, muchas de estas presas se encuentran ubicadas adyacentes a los ríos, corrientes o lagos. Estas ubicaciones presentan aspectos particulares de diseño y mantenimiento:

- ❖ Cuando se efectúan los análisis de estabilidad se debe tomar en cuenta la altura de la superficie freática natural en suelos para cimentación adyacentes a cuerpos de agua.
- ❖ La presa de jales debe estar lo suficientemente elevada con respecto a una corriente o río adyacente para evitar cualquier daño a la presa o sus cimientos por la acción erosiva del agua o socavación. Alternativamente, las presas deben ser reforzadas contra la acción de tales corrientes, por ejemplo, mediante el enrocamiento. En algunos casos, se justifica la derivación de la corriente.
- ❖ Incluso si los efectos inmediatos de la corriente no son aparentes, se debe realizar una evaluación geomorfológica del sitio y de la corriente o el río para asegurar la viabilidad a largo plazo y posterior al cierre del sitio. Por ejemplo, se debe considerar la posible migración de meandros de río.

Los efectos ambientales que originan una falla de talud constan tanto de efectos directos como indirectos. Siendo los *efectos directos* la pérdida inmediata de vidas humanas y la destrucción de toda estructura existente en el área, ya sea vida animal o vegetal por el paso de los jales y/o desechos liberados. Los *efectos indirectos* incluyen daños aparentemente menores al medio ambiente. La falla de un depósito de jales adyacente a una corriente o río puede represar la corriente de agua, causando avenida aguas arriba. La eventual ruptura de la presa temporal de desecho puede ocasionar una avenida significativa y erosión aguas abajo. La falla de un depósito de jales en un cuerpo de agua puede causar también la destrucción de la vida acuática.

El riesgo de que una presa o depósito de jales falle de acuerdo con las probabilidades de falla no deberían exceder unos cuantos puntos porcentuales dependiendo de las consecuencias de falla para los habitantes aguas abajo, el uso de tierra aguas abajo y la instalación misma; igualmente las consecuencias ambientales de falla podrían ser significativas. Cuando se determina la posibilidad del riesgo de falla, es necesario considerar las consecuencias de daño para los habitantes aguas abajo, así como el uso de la tierra aguas abajo o el daño ambiental potencial.

Lo básico para el análisis de estabilidad es una interpretación de las diferentes fuentes de presión de poro y la forma en las que éstas afectan la interpretación de la resistencia al corte. Además, las condiciones de carga para los depósitos de jales son a veces diferentes de aquellas experimentadas por presas de agua convencionales, dando un énfasis diferente a las diversas condiciones que deben ser consideradas en el análisis.

Asumiendo que se ha establecido el tipo básico de depósito, los materiales y la zonificación interna, el *primer paso* es seleccionar una configuración e inclinación del talud de prueba del depósito. El *segundo paso* es la predicción de la ubicación de la superficie freática con el fin de estimar las presiones de poro estáticas iniciales. Además, como *tercer paso* se debe realizar una evaluación para determinar si la velocidad de elevación del depósito es suficiente para generar presión excedente de poro tanto en los materiales de depósito como en los de cimentación. Después que se ha terminado con estos pasos, se puede efectuar el cálculo de estabilidad para determinar si los taludes de depósitos de prueba son estables bajo todas las condiciones aplicables de análisis. Si no, se debe efectuar una nueva iteración de los pasos comprendidos en el procedimiento, o quizás de todo el rediseño efectuado, hasta que se obtenga una configuración estable del depósito.

## II.6 PRINCIPALES PROBLEMAS DE INESTABILIDAD EN LAS PRESAS DE JALES

Existe una combinación de razones para que una presa falle: Inestabilidad, rebose y erosión interna. Los accidentes en resumen están causados por:

- ❖ Primero, el uso de un diseño inapropiado
- ❖ Segundo, por la aceptación de este diseño



- ❖ Tercero, por el monitoreo y la construcción, operación y mantenimiento inadecuado de la presa.

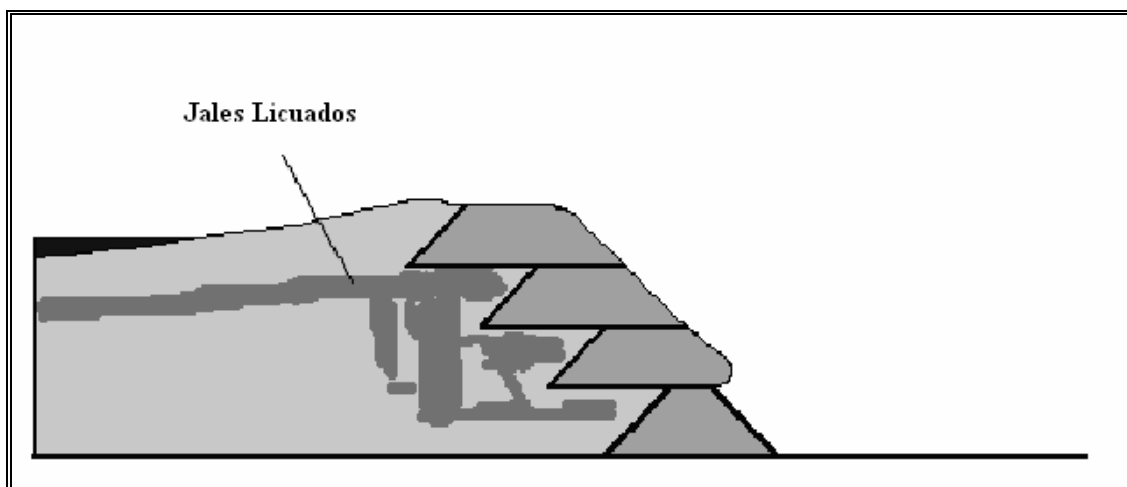
Las fallas de diseño son:

- ❖ Uso de un circuito cerrado con la previsión no especificada para las descargas/almacenamiento de agua excesiva en caso de emergencia.
- ❖ La construcción inadecuada de la pared del dique debido a la falta de homogeneidad de los jales.
- ❖ El mal funcionamiento de los hidrociclones en temperaturas muy bajas.

### II.6.1 Licuación

Se entiende por licuación de un suelo a la pérdida de su resistencia al esfuerzo cortante temporal o definitivo (JUAREZ, Badillo). Esta ocurre cuando en la zona del deslizamiento el suelo pasa rápidamente de una condición más o menos firme a la correspondiente a una suspensión con una pérdida casi total de resistencia al esfuerzo cortante.

La licuación (figura 10) es la repentina y gran disminución de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo sin cohesión, causada por el colapso de la estructura del suelo, producido por choque o por pequeñas deformaciones, asociado con un incremento repentino pero temporal de la presión de poro.



**Figura 10.** Falla de la Presa de Jales por Licuación

(FUENTE: Propiedades de las Presas de Jales, (<http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdap.html>))

#### *Evaluación de la Licuación*

Los materiales sueltos, saturados, con partículas del tamaño de arenas están sujetos a una pérdida repentina de resistencia al corte, o licuación, cuando están expuestos a un evento sísmico. Los jales, debido a su método de colocación generalmente suelta y a su naturaleza no cohesiva, frecuentemente son propensos a la licuación. Para cualquier material que tiene propensión, el peligro de licuación está controlado por:

- ❖ La densidad del material – a menor densidad, más fácilmente se producirá la licuación.
- ❖ La presión de confinamiento que actúa en el material – a menor presión de confinamiento, se producirá más fácilmente la licuación.
- ❖ La magnitud del esfuerzo o deformación cíclica – a mayor esfuerzo o deformación, se requerirá un menor número de ciclos para inducir la licuación.

- ❖ El número de ciclos de esfuerzo a los cuales está sujeto el material – a mayor número de ciclos mayor posibilidad que se produzca la licuación.

Evidentemente, los últimos dos factores son una función del evento sísmico y están más allá del control del diseñador. Sin embargo, se puede controlar la densidad, saturación, y presiones de confinamiento y se puede reducir la amenaza de licuación, incorporando las instalaciones de drenaje, manteniendo todas las superficies de las pozas lejos del depósito, o compactando el material durante o después de la construcción. En general, los materiales compactados a una densidad relativa de 60% o más no se licuarán.

Seed (1987) distingue entre el desencadenamiento de la licuación y el comportamiento posterior a la licuación de suelos susceptibles y describe una filosofía de diseño. La compactación de rellenos de presas de jales de acuerdo a las especificaciones ordinariamente evitará la licuación de los materiales de depósito para nuevas presas. Por lo tanto, para las presas de jales construidas empleando el método de construcción de la línea central y el de aguas abajo, el área de principal interés lo constituye la licuación potencial de suelos de cimentación de las presas. Para las presas existentes construidas empleando el método de construcción aguas arriba, la licuación del material de jales dentro de la poza, debido a su estado saturado y a las densidades in situ relativamente bajas, está prácticamente asegurada en estos niveles altos esperados de Aceleración Pico de Terreno.

Todos los suelos de cimentación en los cuales podría desencadenarse la licuación deberían ser removidos del área del depósito fuera de los límites finales de la presa. Si las condiciones prácticas ocasionaran que fuera imposible de realizar esto, entonces se les debería asignar a estos suelos una resistencia residual al corte sin drenaje para licuación.

Incluso si se mantiene la estabilidad general de la presa durante un terremoto, puede todavía experimentar deformaciones perjudiciales, incluyendo el establecimiento de la cresta y la combadura del talud junto con el agrietamiento. Son posibles las evaluaciones aproximadas de deformaciones sísmicas para presas bien construidas sobre cimientos firmes no licuables.

Basándose en la observación de campo observada en las presas de tierra durante un terremoto, Seed et. al. (1987) determinaron las siguientes conclusiones generales para presas que no tienen relleno licuable o materiales de cimentación; *“Virtualmente cualquier presa bien compactada puede soportar terremotos moderados, con aceleraciones máximas de aproximadamente 0.2 g y más, sin tener efectos perjudiciales. Las presas construidas con suelos de arcilla sobre cimientos de arcilla o de roca han tolerado sacudidas extremadamente fuertes desde 0.35 hasta 0.8 g de un terremoto de magnitud 8.5 sin producirse daños aparentes.”*

Estas conclusiones también deberían aplicarse en un sentido general a presas de jales de materiales similares, tanto, aguas abajo como de la línea central y a las de retención de agua empleando las prácticas adecuadas de compactación y de construcción.

## II.6.2 Deslizamiento de Talud

Cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones del suelo próximas a su frontera se deslicen hacia abajo; el fenómeno es más intenso cerca de la superficie inclinada del talud a causa de la falta de presión normal confinante que allí existe.

Pueden ocurrir en los taludes movimientos bruscos que afectan a masas considerables de suelo, con superficies de falla, que penetran profundamente en su cuerpo.

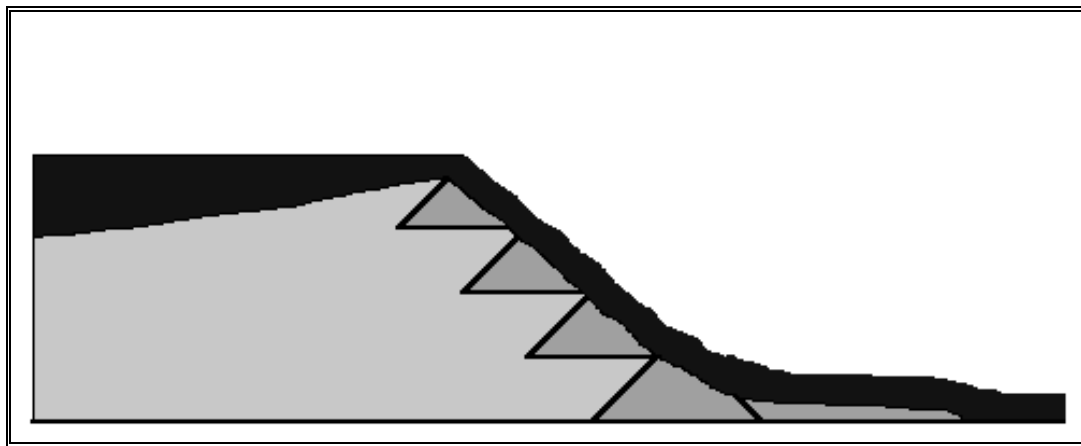
### II.6.3 Erosión Pluvial

Las fallas por erosión son fallas de tipo superficial provocadas por arrastres de viento y/o agua en taludes. Para el caso de la erosión pluvial pueden ocurrir diferentes formas por derrames, por infiltración o por erosión de la superficie.

#### *Derrame o Rebose por la Cresta*

Ocurre cuando el nivel del estanque sube más arriba del nivel del dique y el agua fluye por encima del mismo. El material por lo general se erosiona y forma un arroyuelo cuyo tamaño dependerá del volumen del derrame y la erosionabilidad del material (figura 11).

Tal como lo trataron Vick et al. (1995), el rebose por la cresta es una de las causas principales de fallas en las presas de jales. Se debe prevenir a toda costa el rebose de las presas de jales ya que podría ocasionar una falla catastrófica por la liberación repentina de grandes cantidades de jales y agua tóxicos.



**Figura 11.** Falla de una Presa de Jales por Derrame o Rebose por la Cresta  
(FUENTE: Propiedades de las Presas de Jales <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdap.html>)

Para minimizar la posibilidad de un rebose, se deberían tomar las siguientes precauciones durante la operación de una presa de jales:

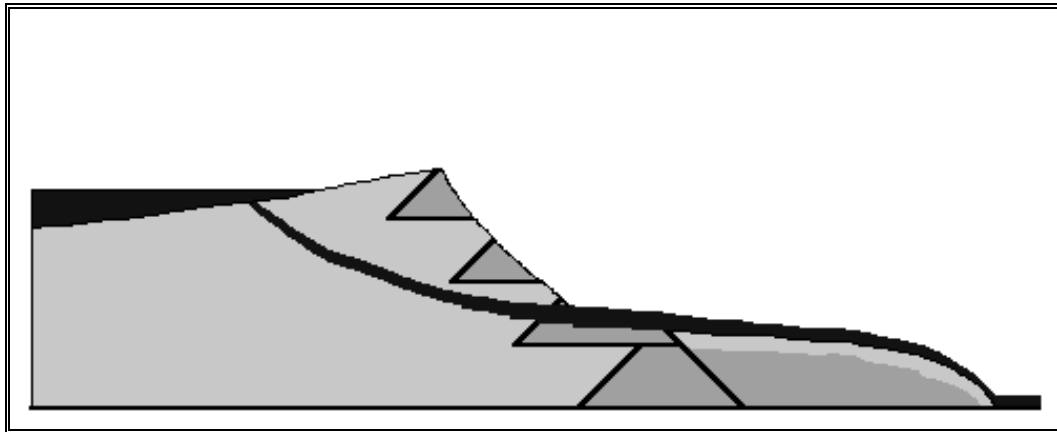
- ❖ Almacenamiento de un mínimo de agua libre en las pozas de jales
- ❖ Mantenimiento de una playa lo más ancha posible aguas arriba en la presa de jales
- ❖ Procurar la derivación fuera del depósito de la máxima cantidad posible de escurrimientos que contribuyan a la poza de jales
- ❖ Para operaciones en “circuito cerrado”, la poza deberá tener suficiente bordo libre de líquido para que la avenida máxima probable (AMP) pueda ser almacenada (o la captación máxima si no está diseñada para la precipitación máxima probable) como una sobrecarga sobre la parte superior del nivel de operación normal de la poza sin causar avenida en la playa de jales y colocar agua libre contra la presa de jales.
- ❖ En los lugares donde está permitida la descarga de efluente de jales durante periodos de grandes escurrimientos, se debe proporcionar un vertedero adecuado para manejar los flujos de diseño. Debido a que este vertedero sólo puede manejar los flujos excedentes que no pueden ser almacenados en forma segura en las pozas de jales, su capacidad puede ser considerablemente menor que la requerida para manejar la avenida máxima probable (AMP) de diseño.

- ❖ Se deben minimizar los flujos de percolación y las presiones piezométricas conservando una amplia playa de jales y manteniendo el agua libre lo más lejos posible de la presa de jales.

En caso que se desarrollen flujos excesivos de percolación y/o presiones piezométricas en las presas de jales y en sus cimientos, éstos deberían ser cuidadosamente monitoreados, y las áreas con problemas deberán ser tratadas empleando procedimientos convencionales como: filtros, drenajes en el caso de cimientos o estribos permeables, posiblemente con inyecciones de cemento. En el caso de que no sea posible mantener la presa de jales y la playa de jales ubicada aguas arriba a una distancia suficiente sobre la poza para proporcionar el almacenamiento de sobrecarga requerido sin causar avenida en la playa de jales y sin que llegue agua libre contra la presa de jales, se debe proporcionar una zona impermeable para la cara aguas arriba de la presa con el fin de prevenir grandes pérdidas de percolación con la amenaza inherente de una socavación.

### ***Infiltración***

Cuando el drenaje en la base del dique es insuficiente, el agua de infiltración sale en la base del dique, creando una zona húmeda y débil, a menudo acompañada de erosión, lo que conduce a la socavación de los diques exteriores (figura 12).



**Figura 12.** Falla de una Presa de Jales por Infiltración

(FUENTE: Propiedades de las Presas de Jales <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdap.html>)

Se pueden presentar problemas debido a la erosión interna del material proveniente de la presa de jales ocasionada por la percolación del lixiviado. Esto puede ocurrir cuando las medidas de drenaje proporcionadas para controlar la percolación son inadecuadas o cuando se presentan defectos dentro de la presa, por ejemplo cuando se producen resquebrajaduras por la sedimentación o por una pobre compactación del relleno. La erosión de material fino puede conducir a una falla rápida y catastrófica de la presa de jales.

Es difícil de detectar el potencial para erosión interna dentro de una presa de jales. El método más importante para detectar la posible erosión interna es mediante inspección diaria de la presa de jales por una persona calificada, buscando particularmente nuevas fuentes de percolación o cambios en la cantidad o el carácter de los rezumaderos existentes. Es muy difícil recolectar toda la percolación, pero la descarga medida desde el sistema de drenaje generalmente indicará el aumento peligroso de la velocidad de flujo. Asimismo, se deberá efectuar una inspección regular para evaluar la coloración del efluente. Por otro lado, las erosiones considerables producen flujos con lodo. Un incremento escalonado en el flujo de percolación, sin un aumento proporcional en el nivel de agua del depósito o sin una fuerte precipitación constituye una señal de peligro significativo.

### ***Erosión de la Superficie***

La cara exterior de una presa de jales presenta un área considerable de captación para las precipitaciones pluviales y los escurrimientos resultantes tienden a formar arroyuelos en las caras expuestas de los diques.

La erosión externa se puede presentar debido a la acción del viento o el agua y si no es controlada puede afectar desfavorablemente la estabilidad de las presas de jales ya sea directamente, por la modificación de la geometría de la presa, o indirectamente como resultado del material erosionado bloqueando los drenajes.

La erosión externa por el agua puede ocurrir por varias razones. Sobre la cara aguas abajo se puede presentar como resultado del rebose por la cresta o debido a la precipitación, las cuales pueden ocasionar una profunda quebrada en los materiales de grano fino. También puede presentarse en situaciones donde un drenaje interno inadecuado de la presa conduzca a la superficie freática llegando al talud aguas abajo y al agua de percolación que existe en la cara aguas abajo. Esta es una situación extremadamente peligrosa y requiere una inmediata acción de rehabilitación.

El aumento en el nivel del charco de agua causado por una avenida, por una decantación obstruida u otras causas puede ocasionar la falla antes del rebose por la cresta debido al incremento consecuente de la superficie freática. Otra situación de riesgo considerable sería cuando una presa de jales es afectada por la avenida del terreno en la base del depósito. En este caso, la erosión por el pasaje del agua de avenida a lo largo de la base del depósito podría ocasionar el socavamiento y la falla de la cara aguas abajo.

Sobre la cara aguas abajo de las presas de jales diseñadas para almacenar volúmenes considerables de agua o donde los jales tienen que ser almacenados bajo una profundidad de agua tal que el reservorio de agua esté en contacto con el talud aguas arriba de la presa, es importante asegurar que la cara esté protegida del efecto de la acción de las olas.

#### **II.6.4 Erosión Eólica**

La forma de actuar del viento sobre una ladera se puede concebir por medio del arrastre de partículas finas no consolidadas de la ladera (figura 13), originando un debilitamiento en las paredes de la presa ocasionando un plano de falla.

La erosión por el viento puede ser un problema significativo en donde existan grandes áreas expuestas de material de grano fino como en la cara río abajo de una presa de jales o en áreas de playa del depósito. La erosión por el viento además puede causar problemas ambientales si el material transportado por el aire es llevado a una propiedad adyacente.

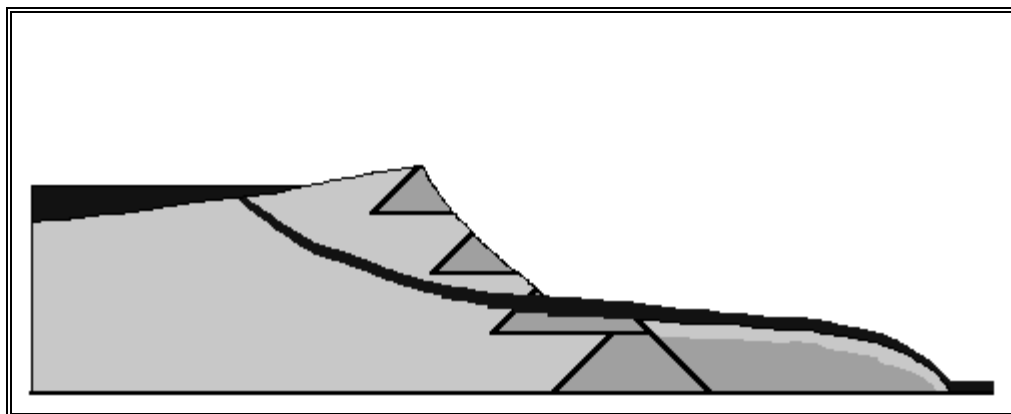


**Figura 13.** Evidencia de Erosión Eólica sobre la ladera (talud) de una Presa de Jales.

### II.6.5 Tubificación

Es el movimiento de partículas de suelo como resultado de fuerzas no equilibradas de infiltración, producido por la infiltración de agua, que da por resultado canales de erosión (Figura 14).

El flujo de la infiltración se concentra en una vía preferencial que produce la erosión interna y la formación de tubos o túneles que pueden originar la destrucción del dique si no se controla.



**Figura 14.** Falla de una Presa de Jales por Tubificación  
(FUENTE: Propiedades de las Presas de Jales <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdap.html>)

## II.7 MÉTODOS ALTERNATIVOS

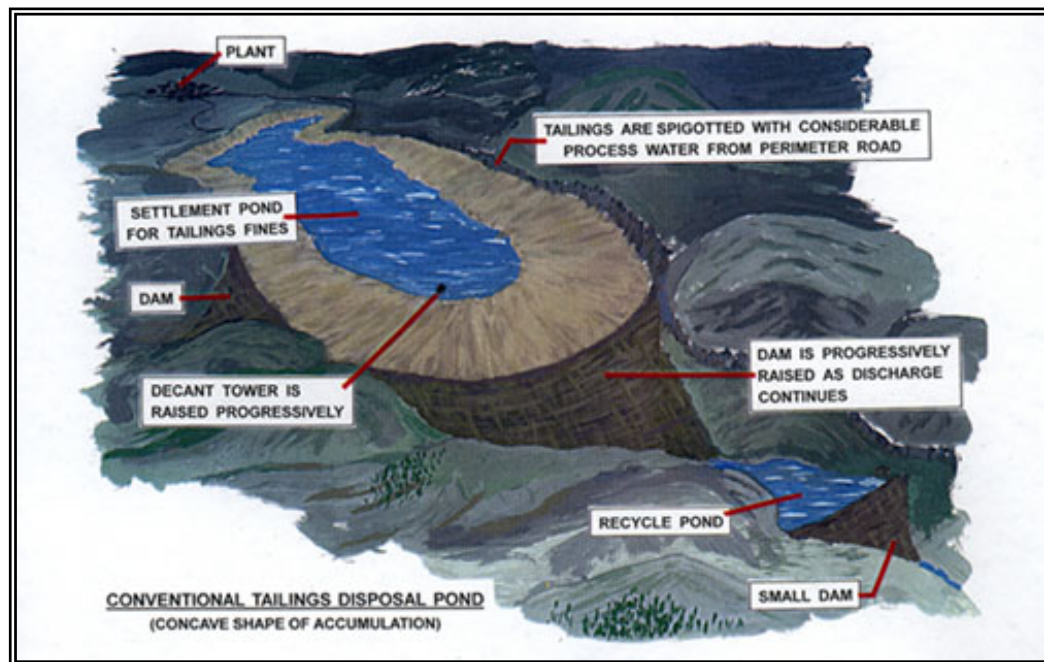
Debido a los numerosos derrames de jales, fallas en las presas de jales así como la contaminación ambiental generada, las formas de depositar los jales han variado con el tiempo buscando nuevas formas de almacenamiento que sean seguras tanto estructural como ambientalmente y cuyo costo sea reducido. A continuación se mencionan algunos ejemplos de nuevas alternativas de almacenamiento.

### II.7.1.1 Jales Espesados

Una de las técnicas desarrolladas es el sistema de disposición de jales espesados (sistema TTD, por sus siglas en inglés Thickened Tailings Disposal), esta tecnología es relativamente nueva, se desarrolló a partir del relleno hidráulico; se basa en la eliminación de la mayor cantidad de agua de los lodos de los jales, mediante espesamiento en la planta concentradora hasta por lo menos 50 - 60% de sólidos.

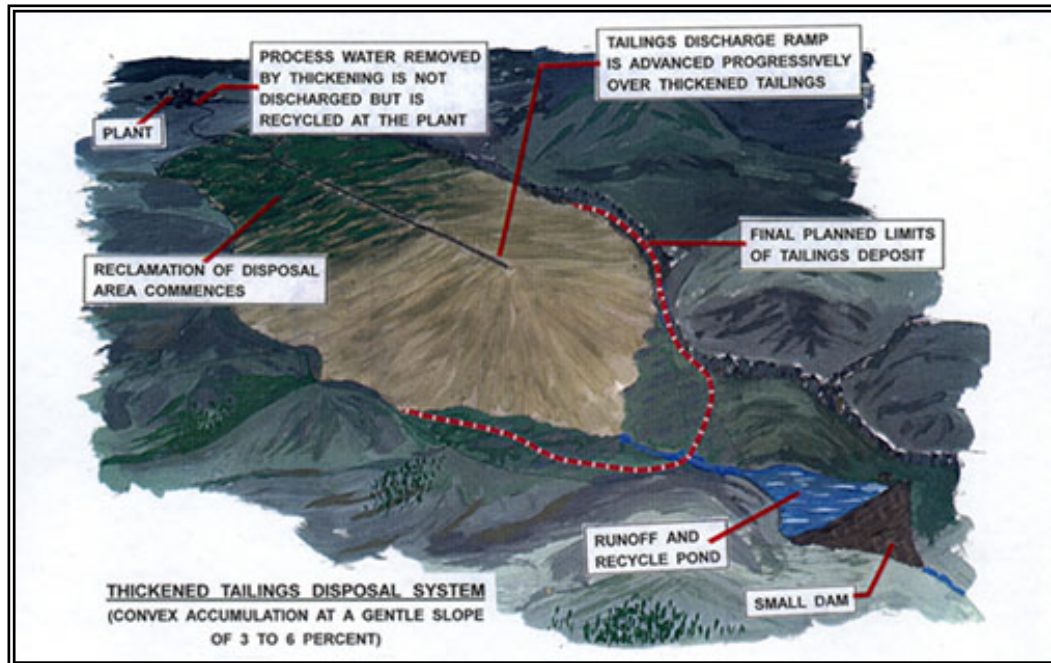
El diseño de este tipo de depósito se basa en la retención de sólidos sin agua a diferencia de las presas convencionales (ver Figuras 15 y 16), la pasta se deposita en la parte central del depósito el cual se diseña de manera que los puntos de la depositación puedan levantarse en cuanto más pasta se deposite, lo que forma un montón cónico de jales que se puede ir enfocando la mayoría del volumen en el centro del depósito, los depósitos pueden alcanzar una inclinación de 3 - 6 grados cuando son depositados a partir de una tubería.

Se requiere un lugar amplio y plano para utilizar la depositación mediante descarga espesada. Con su superficie cónica inclinada, el método ha sido también propuesto como un medio para incrementar la capacidad de los depósitos superficiales convencionales y para ayudar en la construcción final de las pendientes de los depósitos superficiales que controlan el escurrimiento pluvial durante la operación y después del cierre.



**Figura 15.** Sistema Convencional de Deposición de Jales

(FUENTE: An Alternative to Conventional Tailings Disposal <http://www.thickenedtailings.com/introduction.html>)



**Figura 16.** Disposición de jales Espesados (Sistema TTD)

(FUENTE: An Alternative to Conventional Tailings Disposal <http://www.thickenedtailings.com/introduction.html>)

Existen consideraciones ambientales por las que se recomienda este sistema de disposición, ya que presenta características únicas en la descarga de jales, que actúan para reducir el impacto ambiental del material depositado. Los requerimientos para la disposición de los jales (tanto partículas gruesas como finas), incluyendo los jales que se consideran como potenciales generadores de acidez pueden incluir: a) la reducción de afluentes de infiltración y velocidad de descarga, b) la prevención de acidificación por el mantenimiento de condiciones saturadas en la superficie de la presa.

Las características positivas del sistema para controlar la contaminación ambiental son las propias características hidráulicas, que consisten en: a) un bajo gradiente hidráulico; b) baja conductividad hidráulica; c) alta capilaridad; y d) homogeneidad espacial de los jales. De donde un gradiente hidráulico bajo es el resultado directo de la pendiente suave de los depósitos de jales y la consecuente eliminación de grandes perímetros de presas; y una baja conductividad hidráulica, se da debido a que por la homogeneidad del depósito se reduce la dispersión de la fracción fina de los jales por todas partes.

Dentro de las consideraciones ambientales que se tomaron en cuenta para proponer el sistema de descarga de jales espesados se incluye: la infiltración, la prevención del drenaje ácido, la erosividad del talud del depósito, la reducción de polvos y la resistencia a la licuación

En el caso de la infiltración, la descarga por el sistema TTD reduce la cantidad de infiltración dentro del suelo subyacente y formaciones rocosas a una fracción de la que puede llegar a ocurrir en sistemas de depósitos convencionales con la laguna de decantación, ya que es debido a la eliminación de esta laguna que es posible disminuir a su mínima expresión la presión hidrostática, principal causante de este fenómeno; otro aspecto importante es que al tener una pendiente homogénea de jales no es posible la acumulación de líquidos en su superficie, lo que lleva a un rápido desarrollo de tensión capilar en los jales, ya que la finura de las partículas así como la homogeneidad de los depósitos son conductos para el desarrollo de una capilaridad muy alta.



La formación del drenaje ácido, se da debido a que en el sistema convencional el agua de las presas de jales se acidifica por la acción del oxígeno, este fenómeno que se presenta dentro de las lagunas de decantación, es posible reducirlo con el sistema TTD ya que las elimina, por lo que se disminuye la cantidad de infiltración y reduce la generación de agua contaminada.

El talud de una presa de jales es susceptible a la erosión tanto eólica como pluvial, en el caso del sistema de jales espesados este tipo de erosión se reduce, ya que los depósitos son construidos por la progresiva expansión del cono,

La reducción de polvos se da debido a que como los jales son depositados en forma de pasta capa tras capa, van homogéneos y se van compactando y aumentando su cohesión, quedando de esta manera aglomerados entre sí lo que evita que se dispersen durante su depositación, y aun cuando la vida del depósito llegue a su fin, la generación de polvos, si es que se da, es mínima en comparación a la que se presenta con los sistemas tradicionales de construcción de presas de jales.

La licuación es un problema de inestabilidad que se da en zonas sísmicas; ésta se produce al fallar la presa en presencia de un sismo, se presenta porque los jales dentro de las presas convencionales no se encuentran consolidados, el sistema de jales espesados propone que al ser disminuida el agua y no haber lagunas de decantación, no hay jales en forma de lodo que puedan ser arrastrados a través de distancias grandes.

Una ventaja principal de lo anterior es que los terraplenes para el depósito pueden ser relativamente bajos y sólo necesita ser levantado periódicamente. Las presas o depósitos convencionales necesitan elevarse constantemente y tener en cuenta barreras de filtración de jales (y a veces del agua). Algunas de las ventajas de la disposición en pasta comparadas a la depositación convencional son:

- ❖ Sin agua contenida en la presa, en caso de ocurrir una fractura no hay presencia de líquido que ayude al flujo de los jales.
- ❖ Se reducen los costos asociados al bombeo y reciclaje de agua de mina.
- ❖ El Drenaje Ácido de Mina se reduce con la consistencia de una densidad alta y bajo contenido de agua. Cuando los jales piríticos empiezan a reaccionar una capa de pasta fresca se pone sobre la cima reduciendo dramáticamente el agua y el volumen de oxígeno necesarios para la generación de drenaje ácido.
- ❖ Los depósitos de jales en pasta son más estables para áreas de actividad sísmica y mucho más resistentes a los fenómenos de licuación.
- ❖ La restauración progresiva del depósito puede efectuarse durante la etapa de operación.
- ❖ Las torres de decantación empleadas para prevenir los escurrimientos pueden llegar a fallar bajo el creciente peso de los jales; en el caso de la depositación en pasta no se requiere de las torres.
- ❖ Un depósito de pasta puede hacerse muy estable usando capas delgadas. Como las capas viejas se secan naturalmente y se rompen cuando se depositan capas nuevas de jal fresco, se forma un punto de adherencia entre las dos capas.
- ❖ No hay erosión en las laderas de la presa por movimiento subterráneo y/o filtración de agua. La migración del afluente de jales en el ambiente se ve dramáticamente reducida.
- ❖ El depósito de jales en pasta puede ser rediseñado para aceptar otros tipos de desechos en pasta.

### **II.7.1.2 Desecación de jales**

Es posible eliminar agua de la pulpa de jales en la planta de beneficio utilizando equipos tales como: filtros de vacío, filtros de presión, filtros de tambor, filtros de faja y/o centrífugas. El contenido de agua de los jales puede ser reducido lo suficiente como para permitir su transporte y ubicación por camiones o bandas transportadoras, usualmente hasta 20 - 25% en peso (para gravedad específica del mineral cercano a 2.8).

Adicionalmente, las operaciones de oro pueden lograr un incremento en la recuperación de la solución y con ello incrementar la extracción de oro y reducir al mismo tiempo y en forma significativa la contaminación por cianuro. Las pérdidas de agua por evaporación que de otra manera ocurren a partir de los depósitos convencionales, pueden reducirse en climas extremadamente áridos o en otros casos donde la disponibilidad de agua para la planta de beneficio es limitada. En efecto, la infiltración y evaporación bajo condiciones operativas se reduce sustancialmente o eliminada porque sin depositación hidráulica no habrá agua de decantación embalsada en la superficie del depósito. El agua recuperada de los filtros es fácilmente recirculada al proceso de concentración o cianuración, eliminando la necesidad de descargas directas del agua de proceso aún en áreas húmedas que tienen un balance desfavorable de agua debido a las precipitaciones pluviales.

Los procedimientos de manejo y apilamiento ejercen una influencia en el control de la estabilidad física de los depósitos de jales deshidratados. Puede ocurrir la total saturación en las zonas de mayor profundidad debido a la compresión de los jales o a la infiltración, y esto a su vez ocasiona susceptibilidad frente a la licuación sísmica. Por otra parte, el secado por aire puede reducir el contenido de agua aún más hasta en un 5 - 15%. Mientras esto puede producir condiciones ideales para la descarga final de jales en pilas altas (muy semejantes a las pilas de estéril en la construcción de una mina) también hace que el material sea extremadamente suelto. Si es que los jales se saturan por infiltración u otros medios, pueden producirse grandes deslizamientos aún en ausencia de movimiento sísmico.

Estos problemas, sin embargo, pueden tratarse apropiadamente si se colocan los jales deshidratados en pilas horizontales y se compactan mecánicamente para incrementar su densidad "in-situ". Si esto se hace correctamente, la compactación puede garantizar la estabilidad física de los jales bajo todas las condiciones, sísmica, hidrológica, eliminando virtualmente el riesgo potencial de fallas por deslizamiento. Esto hace que la eliminación de agua sea una técnica con potencial significativo, donde la economía y las condiciones de operación lo permitan. Estos jales pueden ser colocados en las laderas de los valles, minimizando los problemas de inundaciones y proporcionando probablemente el máximo grado de estabilidad física a largo plazo. En casos que involucran el drenaje ácido de mina (DAM), los depósitos de jales desecados y compactados pueden también resolver algunas de las dificultades encontradas al construir coberturas secas post-clausura.

### **II.7.1.3 Vertimiento en el mar**

La disposición submarina se refiere a la descarga de jales al mar a través de un punto de descarga debidamente diseñado a una profundidad y ubicación seleccionadas para minimizar los impactos ambientales, tales como turbidez y su efecto sobre los peces. Se diferencia claramente este procedimiento de la simple descarga de jales a los ríos o a las playas del mar, los cuales, causan impactos severos totalmente inaceptables.

El monitoreo oceanográfico, batimétrico, químico y biológico ha mostrado que los jales flocculan y se asientan rápidamente bajo la influencia combinada de los aditivos de la planta de beneficio y el pH ligeramente alcalino del agua de mar, con algunos episodios ocasionales de suspensión de jales y turbidez en la columna de agua. Esto se logra por una desaereación y dilución en agua de mar de los lodos de jales en una cámara de mezcla previa a la descarga; el punto de descarga se ubica a una profundidad de 50 m, por debajo de la zona de producción biológica primaria en la columna de agua. No ha habido indicación de toxicidad por jales o bioacumulación de metales en los organismos marinos. El más importante y más significativo de los impactos parece ser la sofocación de organismos bénticos inmóviles, ocasionado por los jales, pero la recolonización y recuperación de las poblaciones bénticas en la superficie de los jales parecen ocurrir luego de un año o dos, después de que la depositación termina, de tal manera que los principales efectos ambientales son bastante recuperables tal como hasta ahora se han indicado.

Se han propuesto varios criterios, delineando condiciones favorables para una disposición submarina ambientalmente aceptable. En adición a lo obvio, que es que la mina esté razonablemente ubicada cerca del mar, otros requerimientos técnicos incluyen:

Un bajo porcentaje de mineral sulfurado y ausencia de metales tóxicos solubles, de reactivos de concentración y de productos secundarios de la planta de beneficio en los jales (condiciones más fácilmente satisfechas por minerales porfiríticos). El espesamiento de la pulpa de jales en la planta de beneficio, la deaeración de los jales, y su mezcla con agua de mar de tal manera que la densidad de los lodos de jales no sea menor que la densidad del agua de mar en la profundidad. Ubicación biológica y oceanográfica adecuada del punto de descarga, en un ambiente deposicional que sea relativamente estable con respecto a las corrientes, tal como el fondo de un fiordo.

La mayor ventaja potencial de la disposición submarina de jales es la posibilidad de eliminar la generación del DAM de los jales mediante las condiciones de saturación bajo el mar, mientras que al mismo tiempo se evita la licuación sísmica, el desbordamiento hidrológico y los riesgos de estabilidad relacionados a los depósitos o embalses superficiales.

La disposición de jales en las aguas frescas de los lagos naturales es similar en algunos aspectos a la disposición submarina de jales, excepto en que pueden producir pequeños lagos biológicamente estériles. La disposición de jales en lagos se ha practicada, por ejemplo, en Canadá y Finlandia. Su principal ventaja es que tiene el potencial para eliminar completa y permanentemente la generación del DAM sin ninguno de los riesgos de estabilidad asociados a los diques de jales. Al igual que la disposición submarina, sin embargo, la disposición incontrolada de jales en lagos naturales sin adecuado conocimiento de los sitios o de los jales y sin un monitoreo biológico y químico, no es una práctica aceptable.

A pesar de que este sistema se ha propuesto como una alternativa de disposición segura hay evidencias en donde se afirma lo contrario, ya que de acuerdo con información existente en donde se aplica la disposición submarina se han presentado causas adversas provocando alarma en zonas costeras al ver disminuida la pesca y serios efectos sobre la salud; también se ha visto una masiva pérdida de arrecifes de coral, aparentemente causados por esta disposición submarina.

## CAPITULO III.

### *RIESGO AMBIENTAL DE LOS JALES*

#### III.1 FACTORES QUE DETERMINAN EL RIESGO AMBIENTAL DE LOS JALES

La industria minera es la principal proveedora de metales, México es productor de oro, plata, plomo, cobre, zinc, fierro, manganeso, arsénico, bismuto, cadmio, molibdeno, antimonio, estaño, tungsteno, aluminio, celestita, fluorita, grafito, diatomita, barita, sal, yeso, feldespatos, azufre, fosforita, caolín, mármol. Para su obtención es necesario extraer una gran cantidad de minerales del subsuelo que son procesados para recuperar los elementos metálicos con valor económico y esto genera una gran cantidad de residuos llamados jales que están formados por el mineral que no tiene valor y al que en el medio minero se le llama ganga.

Los jales pueden representar un riesgo para el medio ambiente si se conjugan una serie de factores que ocasionen su dispersión y la liberación de los elementos potencialmente tóxicos contenidos en ellos. Estos factores se relacionan con las características intrínsecas de los jales y con la condiciones de almacenamiento.

En el primer caso es importante el contenido de elementos metálicos y no metálicos que por su naturaleza puedan ocasionar algún daño al medio biológico incluyendo a la salud del hombre, tal es el caso de elementos como el plomo, arsénico, cadmio, mercurio y selenio, entre otros, que son tóxicos y que bajo ciertas condiciones pueden causar la afectación de los ecosistemas y daño a la salud humana.

Por otro lado, también como característica propia de los jales, está su composición mineralógica, la cual influye de manera importante ya que a partir de las especies minerales y de las condiciones de oxidoreducción que prevalezcan en el ambiente, podrán ocurrir reacciones que permitan la liberación de los elementos potencialmente tóxicos.

La composición de los jales se determina por las especies mineralógicas que los constituyen y por los elementos químicos presentes. En México, las especies mineralógicas que predominan en los jales son los sulfuros metálicos, los silicatos y silicoaluminatos, carbonatos y óxidos, principalmente. Por ende, la composición de los jales varía de una mina a otra y estará en función de la mineralogía del yacimiento. Desde el punto de vista ambiental, los elementos químicos de interés son aquellos que por su toxicidad representan un riesgo para los ecosistemas y para la salud del hombre, por lo general estos elementos están en forma de sulfuros; entre estos elementos destacan: plomo, arsénico, mercurio, selenio, berilio, cromo, cadmio, níquel y bario, entre otros.

El riesgo que estos elementos representan para el ambiente, radica en la posibilidad de que se liberen a partir de los jales y se incorporen al agua y al suelo y posteriormente puedan afectar alguna especie del medio biótico. Para que los elementos potencialmente tóxicos se liberen de los jales es necesario que ocurran procesos físicos y químicos, como la dispersión (por viento o agua), la erosión y la lixiviación, principalmente; esta última quizá es la de mayor importancia ya que mediante este proceso los elementos metálicos se solubilizan y se transportan en forma iónica en un medio acuoso.

Los procesos de lixiviación se favorecen en ambientes ácidos, con un pH ácido los metales son más solubles. Esta condición es importante dado el proceso de generación de drenaje ácido que se presenta en algunos jales por la oxidación de sulfuros metálicos, principalmente de la pirita, que en México es un mineral de ganga muy común.

El intemperismo juega un papel importante en la disponibilidad de los elementos debido a que éste mecanismo es el causante de la dispersión de los jales hacia el entorno de la presa. El intemperismo químico propicia, debido al aire y al agua, cambios químicos a las partículas minerales mediante disolución, oxidación e hidrólisis. Los minerales presentan resistencia al intemperismo de acuerdo a su composición física y química, existen minerales que son solubles como la calcita, así como también existen minerales parcialmente solubles como los aluminosilicatos los cuales al interactuar con agua produce fases sólidas y disueltas. Siendo la reacción de hidrólisis ácida el mecanismo mediante el cual la mayor parte de elementos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) son removidos de minerales silicatados.

En cuanto a los factores que se relacionan con las condiciones de almacenamiento, destaca principalmente la estabilidad de la presa de jales y en particular de la cortina contenedora, ya que ésta garantiza que no pueda haber en el futuro una descarga de jales debido al desbordamiento de la presa o a la ruptura de la cortina. Hay otros problemas de estabilidad que se pueden presentar en la presa y estos son originados por un sistema deficiente de desagüe, como es la licuación, la tubificación e incluso el deslizamiento del talud.

Otro aspecto importante del almacenamiento son las condiciones que se van a mantener en la presa una vez que llegue a su capacidad máxima y se cierre su operación ya que con el tiempo los jales se desecarán y quedarán expuestos a la erosión por la acción del viento o del agua pluvial, lo que ocasiona en muchos casos la dispersión de los jales hacia sitios aledaños.

Por lo anterior, para evaluar el riesgo que representa una presa de jales al medio ambiente, es necesario conocer tanto las características propias del jal como las condiciones de diseño y construcción de la presa.

## III.2 PROCESOS GEOQUÍMICOS

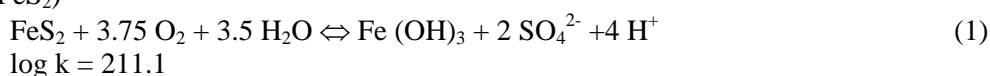
La peligrosidad de los jales se relaciona con su composición química, con la disponibilidad de los elementos a partir de las especies mineralógicas y con la toxicología de los elementos presentes. Por otro lado, los factores ambientales como: precipitación, humedad, temperatura, presión y en general el clima; contribuyen de manera importante a la ocurrencia de procesos físicos y químicos, que dispersan los jales y liberan los elementos contenidos en ellos. Dentro de los procesos geoquímicos que se presentan dentro de las presas de jales se pueden mencionar la oxidación – reducción, la neutralización, la precipitación y la absorción,

### Oxidación – Reducción

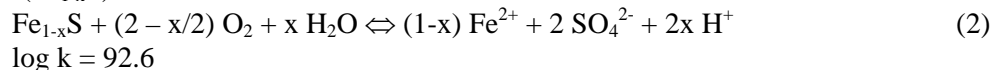
Los sulfuros metálicos en los jales se pueden oxidar al estar expuestos a los fenómenos de intemperismo (interacción con el oxígeno y el agua), ya que los minerales se oxidan con mayor dificultad que los compuestos amorfos, los más importantes asociados a la acidez son la pirita y la pirrotita.

Diferentes autores han registrado las reacciones de oxidación de los principales sulfuros metálicos que se encuentran en los jales, cuyas constantes de equilibrio ( $\log k$ ) se pueden estimar a partir de las energías libres de formación ( $\Delta G^\circ$ ) reportadas en la literatura especializada.

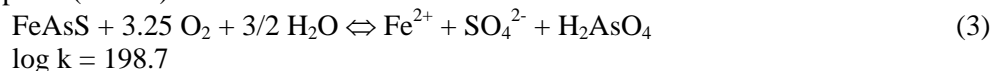
Pirita ( $\text{FeS}_2$ )



Pirrotita ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ )



Arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ )



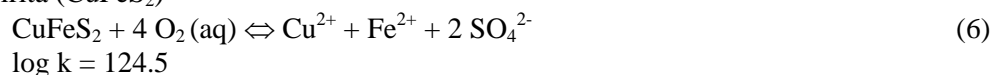
Galena ( $\text{PbS}$ )



Esfalerita ( $\text{ZnS}$ )



Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ )



La oxidación de los sulfuros metálicos en los jales está asociada a la generación de drenaje ácido (DA), que son soluciones ácidas con metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) disueltos. Este fenómeno puede ser catalizado por la presencia de microorganismos a pH ácidos.

La oxidación de los sulfuros metálicos, en los jales, es generalmente muy limitada durante la operación y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que ha cesado la acumulación en el depósito y la porosidad en el mismo permite la difusión del oxígeno atmosférico. Se ha reportado que el espesor de la zona de oxidación en los jales inactivos es muy limitado (50 – 200 cm) debido a la formación de capas de baja permeabilidad que impiden el transporte vertical de los agentes oxidantes hacia niveles inferiores de los jales (ROMERO, 2004)

De acuerdo a las reacciones planteadas en las ecuaciones (1) – (6), se puede decir que la problemática derivada la oxidación de los sulfuros metálicos está asociada a la liberación al ambiente de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), protones ( $\text{H}^+$ ), arseniatos ( $\text{H}_n\text{AsO}_4^{3-n}$ ) y de los metales pesados principales, que forman parte de la composición de los sulfuros metálicos. En el caso del plomo, el producto de la oxidación de la galena ( $\text{PbS}$ ) es la anglesita ( $\text{PbSO}_4$ ), que es un mineral poco soluble a pH ácidos y neutros.

De los elementos que se pueden liberar durante la oxidación de los sulfuros metálicos, el S, Fe, Cu, Zn, Co, Ni, Se son elementos esenciales para la vida pero en altas concentraciones pueden ser tóxicos. En el caso del Pb, Cd y Ti no es conocido que realicen alguna función bioquímica y junto al As son considerados de naturaleza tóxica. Sin embargo, el que un elemento sea de naturaleza tóxica, no significa necesariamente que provoque daños al ambiente, los ecosistemas o a la salud, porque para que esto ocurra es necesario que se encuentre en una forma “disponible” que permita que se difunda en el ambiente alterando la calidad del aire, suelo y agua; así como que entre en contacto con los organismos acuáticos o terrestres. El daño que los metales y metaloides potencialmente tóxicos (MMPT) puedan causar a la salud o al ambiente en general depende de su biodisponibilidad, que está en función de la solubilidad de las fases minerales que contengan dichos elementos. La toxicidad de los MMPT varía ampliamente, aún para el mismo elemento, dependiendo de la especie química y mineralógica (ROMERO, 2004).

## Neutralización

A la capacidad de disminuir o eliminar la cantidad de ácido producido durante la oxidación de minerales de sulfuros se le conoce como neutralización, durante ésta se presentan dos fenómenos la disolución y la alteración de minerales.

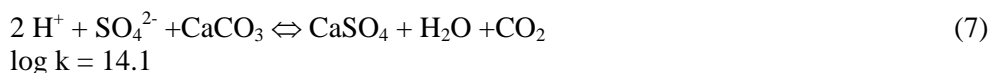
La oxidación de los sulfuros metálicos, en los jales, no siempre genera drenaje ácido (DA), ya que en la tendencia de los jales para generar DA es una función del balance entre los minerales productores potenciales de ácido (sulfuros) y los minerales consumidores potenciales de ácido (carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos).

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina “neutralización”. En general, cuando la capacidad consumidora de ácido en los jales (potencial de neutralización) excede al potencial de generación de ácido, se consumirán todos los protones y el agua que drene del depósito tendrá un pH cercano al neutro. El proceso de neutralización puede ocurrir por la disolución y alteración de ciertos minerales.

## Disolución

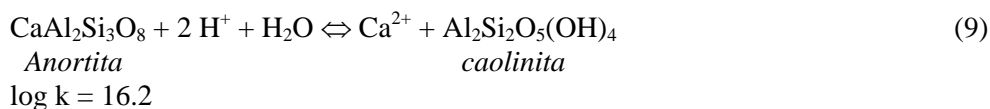
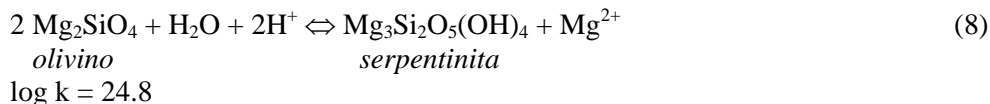
La disolución expresada químicamente “*es un proceso simple que envuelve la solución de minerales solubles, independientemente del pH*”. El agua, debido a su naturaleza polar es más efectiva para disolver sólidos. Los minerales más comunes que consumen protones ( $H^+$ ) al disolverse son los carbonatos y de ellos el más importante es la calcita ( $CaCO_3$ ), que tiende a neutralizar a las soluciones ácidas, llevándolas hasta un pH entre 6.0 y 8.0. Otros minerales carbonatados que contribuyen a la neutralización son dragonita ( $CaCO_3$ ), dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) y magnesita ( $MgCO_3$ ). También existen otros minerales que comúnmente están presentes en jales, que al disolverse consumen protones ( $H^+$ ): gibsita ( $Al(OH)_3$ ), goetita ( $\alpha FeOOH$ ), ferrihidrita ( $Fe(OH)_3$ ) y brucita ( $Mg(OH)_2$ ) (ROMERO, 2004).

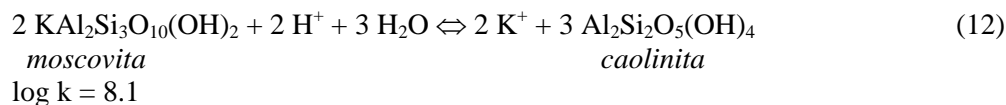
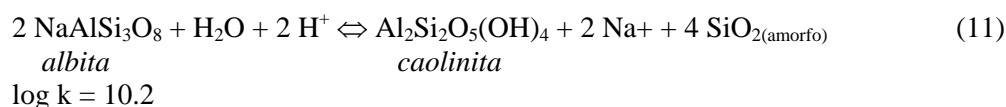
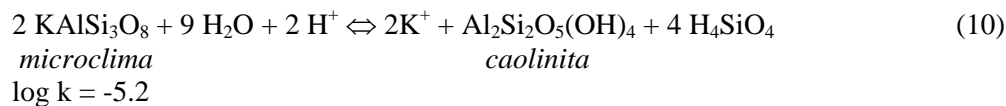
En la reacción (7) se ilustra el fenómeno de neutralización por la disolución de calcita que controla los productos de la oxidación de la pirita ( $H^+$  y  $SO_4^{2-}$ ), lo que da como resultado la precipitación de sulfato de calcio.



## Alteración de Minerales

Las reacciones de alteración de los minerales aluminosilicatados también consumen ácido ( $H^+$ ). De acuerdo a las constantes de equilibrio, los aluminosilicatos de Mg y Ca se alteran más rápidamente que los aluminosilicatos de Na y K, por lo que la contribución de estos últimos en el proceso de neutralización puede ser menos importante. La alteración de los minerales aluminosilicatados produce arcillas (montmorillonita, illita, caolinita) que juegan un papel importante en los procesos de retención de los MMPT.





### Precipitación y Sorción

En el control de la movilidad de los MMPT en jales destacan los procesos de precipitación y sorción (ROMERO, 2004).

- a) La precipitación de goetita ( $\alpha$ -FeOOH), lepidocrocita ( $\beta$ -FeOOH), ferrihidrita Fe(OH)<sub>3</sub>, jarosita (KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>) y yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) limita la movilidad del Fe y sulfatos liberados durante la oxidación de los sulfuros metálicos
- b) La formación de minerales secundarios insolubles como la cerusita (PbCO<sub>3</sub>) en ambientes alcalinos; y de anglesita (PbSO<sub>4</sub>) y beaundantita (PbFe<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)(SO<sub>4</sub>)(OH)<sub>6</sub>) en ambientes ácidos limita la movilidad del plomo. La movilidad del Pb en jales oxidados y ácidos está controlada por la coprecipitación en jarosita.
- c) La precipitación de novelita (CuS), limita la movilidad del Cu, la movilidad del cobre puede estar controlada por la coprecipitación o adsorción en jarosita y gohetita.
- d) El control de la movilidad del Zn en jales se da vía adsorción y coprecipitación en gohetita y jarosita.
- e) han observado que la precipitación de beaundantita “PbFe<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)(SO<sub>4</sub>)(OH)<sub>6</sub>”, en jales ácidos, controla la movilidad del arsénico. Así mismo ha sido ampliamente reportado el control de la movilidad de arseniatos por procesos de adsorción en superficies minerales como oxihidroxidos de Fe, arcilla y calcita.

La precipitación de los minerales secundarios, principalmente de Fe, puede ser el principal control de la dispersión de los MMPT ya que forman capas compactas que además de proporcionar estabilidad física al depósito, actúan como una zona de acumulación de los MMPT y no permite el avance del frente de oxidación hacia las partes inferiores del depósito.

- a) Capas cementadas (hardpans) formadas por yeso y fases sólidas de Fe de 10 – 15 y de 1 – 5 cm de espesor se encontraron a una profundidad de 25 cm a partir de la superficie en depósitos de jales de sulfuros metálicos en Québec y New Brunswick, Canadá. Así mismo, se reporta la formación de una capa cementada y muy compacta de unos 20 cm (de los 20 a los 40 cm de profundidad) en jales de sulfuros metálicos en Ontario, Canadá. En ambos casos, las capas cementadas actúan como una zona de acumulación de MMPT y restringen el movimiento de éstos a través del depósito.
- b) Las fases sólidas de Fe que precipitan en los jales de sulfuros metálicos, en depósitos de Suecia, se encuentran rellenando los poros intergranulares y cementan la matriz de los jales y forman capas compactas. Estas capas compactas actúan como una barrera que limita la difusión de O<sub>2</sub> (agente oxidante) a través de los jales y retiene los metales pesados. Estas capas cementadas se reportan a una profundidad de 30 cm a partir de la superficie y su espesor es de unos 50 cm.



### III.3 Formación de drenaje ácido de mina

Se conoce como *DAM* a las siglas de: “Drenaje Ácido de Mina”. Los ríos afectados por este tipo de contaminación se caracterizan por su acidez, así como por el alto contenido en sulfatos y metales pesados de sus aguas y por el contenido metálico de sus sedimentos. Los daños producidos varían desde problemas de alteraciones subletales para algunos individuos de los ecosistemas afectados en los casos de contaminación muy débil hasta la desaparición de la fauna fluvial, así como la pérdida de los recursos hídricos, al tornarse inservible el agua para el consumo humano, agrícola o industrial. Sin embargo, la importancia del drenaje ácido en nuestro caso de estudio radica en que éste es el mecanismo que permite la solubilización o lixiviación de los elementos metálicos tóxicos a partir de los jales.

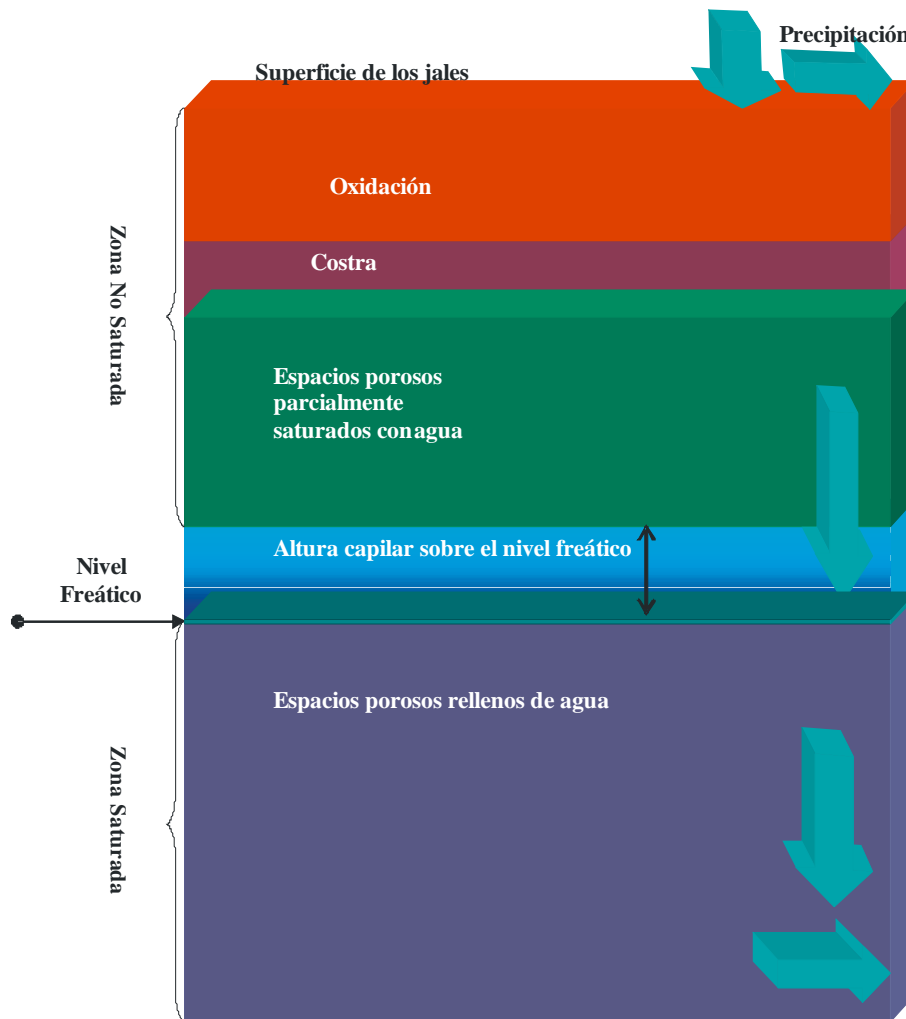
El *Drenaje Ácido* es el producto de un proceso de oxidación de los sulfuros minerales, que ocurre bajo la presencia de agua y oxígeno. En este proceso hay presencia de actividad bacteriana que ayuda a incrementar la velocidad de oxidación del mineral, la bacteria principal es la *Thiobacillus ferrooxidans* que actúa como un catalizador. El Drenaje Ácido de Mina es una contaminación inorgánica de múltiples factores que se produce a partir de cierto tipo de minerales que se encuentran expuestos al aire y al agua. Ocurre frecuentemente a partir de desechos de minas abandonadas de carbón o de diferentes sulfuros metálicos y en el interior de los jales. Se trata de una contaminación múltiple, ya que se producen drenajes fuertemente ácidos, con altas concentraciones de sulfato y con niveles elevados de metales pesados, principalmente hierro, manganeso y aluminio en forma de iones metálicos en solución y con precipitados de diferentes hidróxidos férricos. Debido a la alta cantidad de hierro oxidado, el drenaje ácido de la mina es a menudo amarillo a rojizo.

Las presas de jales son lugares ideales para la generación del drenaje ácido ya que el mineral molido tiene una gran superficie específica, se encuentra poco compactado y por consiguiente es muy permeable, esto provoca la percolación del agua de lluvia favoreciendo la oxidación de los sulfuros.

Esto se puede explicar mediante la figura 17, haciendo una subdivisión dentro de la presa de jales, en Zona No Saturada, la Altura Capilar y la Zona Saturada. Al haber precipitación pluvial el movimiento del agua hacia abajo es continuo, pasando por la zona no saturada y la altura capilar, pero de igual forma el flujo del agua puede ser horizontal por encima de la superficie para formar lo que se conoce como playa. Como el agua queda entre capas de fragmentos de jal se produce la oxidación de este originando la formación de una costra de óxido.

El drenaje ácido se generará cuando existe la presencia de:

- a) Sulfuros minerales (principalmente pirita, además de pirrotita, marcasita, calcopirita y esfalerita, entre otros)
- b) Agua o una atmósfera húmeda
- c) Un oxidante, particularmente el oxígeno del aire



**Figura 17.** Modelo Físico Esquemático para los jales  
(FUENTE: BERNARD, Dold; 1999)

El desarrollo del drenaje se puede resumir en los siguientes puntos:

**Etapa inicial:** Durante esta etapa se dan los procesos de oxidación que transforman los sulfuros en sulfatos con producción de ácido; estos procesos pueden ser químicos o "catalizados" por bacterias como la *Thiobacillus Ferroxidans*, en donde predominan las reacciones de oxidación química donde el  $O_2$  es el oxidante principal. Los sulfatos " $SO_4$ " y protones " $H^+$ " liberados por la oxidación de los sulfuros metálicos son consumidos por las reacciones de neutralización que se producen por la disolución y alteración de los minerales carbonatados, hidróxidos y aluminosilicatos que mantienen las condiciones desde neutras a alcalinas ( $pH > 7$ ). En esta etapa se propicia la precipitación de minerales secundarios que controlan la movilidad de los MMPT liberados durante la oxidación.

**Etapa intermedia:** Cuando se produce esta etapa se presentan reacciones secundarias entre los productos de las reacciones de oxidación y los restantes minerales presentes en la roca; así, el ácido generado disuelve metales pesados tales como plomo, zinc, cobre, arsénico, mercurio, cadmio, etc. Debido a que coexisten las reacciones de oxidación química y biológica. A medida que continúa la generación de DA y los minerales con potencial neutralizador se agotan o se vuelven inaccesibles, el pH del drenaje disminuye a 3.5 – 4.5 y la oxidación puede ser catalizada por el tipo de bacterias "*Metallogenium*" (Walsh and Mitchell 1972), y se producen condiciones favorables para el desarrollo de bacterias del género *Thiobacillus*.

**Etapa final:** En donde predominan las reacciones de oxidación biológica. La producción de  $H^+$  ocurre a mayor velocidad que la de  $OH^-$ ; el pH se vuelve más ácido y cuando el medio alcanza un  $pH < 3.5$  la oxidación es catalizada por microorganismos del género *Thiobacillus*: ferrooxidans y thiooxidans (USEPA 1994). De las reacciones de oxidación química (etapa inicial), a partir de los sulfuros de hierro, se produce hierro ferroso " $Fe^{2+}$ ", que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico " $Fe^{3+}$ " que reemplaza el  $O_2$  como el oxidante principal. En esta etapa la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en las etapas anteriores. Evangelou y Zhang (1995) reportan que la oxidación de los sulfuros metálicos catalizada por bacterias puede ser más rápida que la oxidación química hasta en seis ordenes de magnitud.

De esta forma la generación del drenaje ácido de mina conlleva dos subprocesos: El primero es el de producción (y almacenamiento) de solutos, que está afectado por agentes exteriores como: *temperatura, oxígeno presente, concentración y actividad bacteriana*, además de factores mineralógicos intrínsecos como el tipo y contenido de sulfuros, minerales neutralizantes y superficie de exposición. El segundo es el de su posterior extracción; este subproceso se rige por parámetros hidrológicos y estructurales como el volumen, intensidad y distribución temporal de la lluvia, tipo de circulación o drenaje, condiciones iniciales de la fuente, etc. La mayor o menor importancia de la producción de drenaje ácido de mina dependerá según lo anteriormente expuesto de la eficacia y sincronía de ambos subprocesos.

Los principales factores que determinan la velocidad de la generación del ácido son:

- a. pH
- b. Temperatura
- c. Contenido de oxígeno de la fase gaseosa, si la saturación es menor que 100%
- d. Concentración de oxígeno en la fase líquida
- e. Grado de saturación en el agua
- f. Actividad química de  $Fe^{3+}$
- g. Área superficial expuesta del sulfuro metálico
- h. Energía de activación química requerida para iniciar la generación del ácido
- i. Actividad biológica

Existen bacterias además de la *Thiobacillus ferrooxidans* que favorecen la oxidación de los sulfuros, donde existan las condiciones para su existencia habrá alguna bacteria presente, la tabla 3 muestra diferentes bacterias así como sus condiciones de crecimiento, que pueden estar presentes en sitios de deposición de sulfuros minerales y/o depósitos de jales, aunque la más común es la *Thiobacillus ferrooxidans*.

La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* produce la oxidación de la pirita, sin embargo, la bacteria puede acelerar la oxidación de sulfuros de antimonio, galio, molibdeno, arsénico, cobre, cadmio, cobalto, níquel, plomo y zinc.

**Tabla 3.** Bacterias de las menas sulfuradas y sus condiciones de crecimiento

<i>Microorganismo</i>	pH	Temp., °C	Aerobio	Nutrición
<i>Thiobacillus thioparus</i>	4.5-10	10-37	+	Autotrófico
<i>T. ferrooxidans</i>	0.5-6.0	15-25	+	"
<i>T. thiooxidans</i>	0.5-6.0	10-37	+	"
<i>T. neapolitanus</i>	3.0-8.5	8-37	+	"
<i>T. denitrificans</i>	4.0-9.5	10-37	+/-	"

<i>T. novellus</i>	5.0-9.2	25-35	+	“
<i>T. intermedius</i>	1.9-7.0	25-35	+	“
<i>T. perometabolis</i>	2.8-6.8	25-35	+	“
<i>Sulfolobus acidocalderius</i>	2.0-5.0	55-85	+	“
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	5.0-9.0	10-45	-	Heterotrópico

FUENTE: HIGUERAS, P. y OYARZUN, R.

Cuando en el proceso de generación de drenaje ácido el pH llega a niveles inferiores a 3.75 la actividad bacteriana es significativa, convirtiéndose en el principal factor que acelera el proceso. Los factores adicionales que determinan la actividad de la bacteria y la velocidad de asociación de la generación de ácido son:

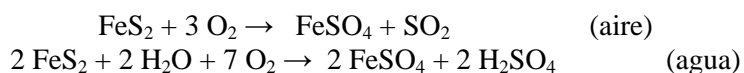
- ❖ Energía de activación biológica
- ❖ Concentración de amonía
- ❖ Densidad de población de la bacteria
- ❖ Concentración de fósforo
- ❖ Velocidad de crecimiento de la población
- ❖ Contenido de dióxido de carbono
- ❖ Concentración de nitrato
- ❖ Concentraciones de algunos inhibidores bacterianos

### ***Reacciones químicas y biológicas***

Dado que la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) es el principal generador de Drenaje Ácido de Roca (ARD), las reacciones químicas que ocurren en el proceso se describen considerando a este mineral como ejemplo, siendo similares para el resto de los sulfuros metálicos.

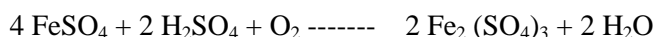
En la naturaleza la habilidad que tiene una formación rocosa para producir ácido es determinada por el contenido de minerales productores de ácido y de los consumidores del mismo; al proceso por el cual el ácido es consumido se le conoce como neutralización.

Las siguientes reacciones químicas describen la oxidación de la pirita hasta el producto de oxidación conocido como drenaje ácido. La oxidación de los sulfuros puede darse en presencia de aire o agua:

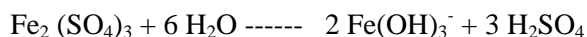


El sulfato ferroso en presencia de ácido sulfúrico y oxígeno se puede oxidar y producir sulfato férrico (soluble en agua).

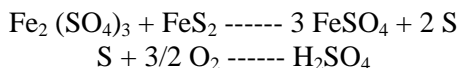
Cuando el pH se reduce en el microambiente en torno de los minerales sulfurados, la población de la bacteria acidofílica comienza a crecer, lo que provoca una caída todavía mayor en el pH.



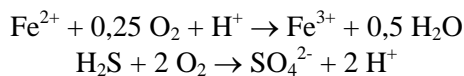
El ion férrico se combina con el radical hidróxido, produciendo hidróxido férrico que es insoluble en ácido y precipita dándole la coloración rojiza al drenaje ácido (DA).



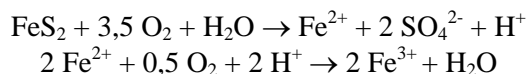
Pero el ion férrico también puede reaccionar con la pirita y producir más ácido



Esta es una bacteria acidófila (propia de ambiente ácido), con una fisiología basada en la fijación de carbono a partir del CO<sub>2</sub> atmosférico, siendo por lo tanto estrictamente autótrofa y más específicamente quimioautótrofa. La bacteria *T. ferrooxidans* obtiene su energía oxidando hierro o azufre:



De esta manera, la bacteria cataliza reacciones del tipo:

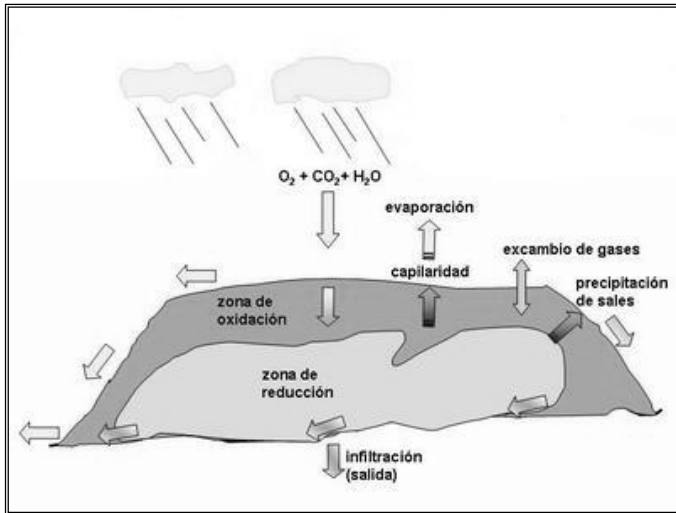


Estas reacciones se pueden dar con el resto de sulfuros metálicos, aunque con variaciones menores que implican otros productos más o menos solubles en cada caso. Para que las bacterias prosperen las condiciones ambientales deben ser favorables, por ejemplo la *Thiobacillus ferrooxidans* es más activa en agua con un pH alrededor de 3.2. Como resultado se obtienen aguas de pH muy bajo (2 - 3), cargadas con sales, sobre todo en sulfatos, en las que normalmente son más solubles los metales pesados como: Pb, Zn, Cu, As, Cd, etc. Una excepción importante a tener en cuenta es el mercurio, que en medio ácido sulfúrico es insoluble, debido a que el sulfato de mercurio es insoluble en agua, precipitando en formar de schuetteita

La acción concertada del aire, agua y bacterias no se detiene espontáneamente, más bien se potencia a si misma, debido a que va generando las condiciones de acidez que son favorables a la proliferación bacteriana.

### III.4 Lixiviación de elementos metálicos

Estrictamente hablando la lixiviación es la disolución de un metal o mineral en un líquido. Cuando la explotación y recuperación de los minerales de interés ya se realizó quedan los desechos comúnmente conocidos como jales, relaves, o colas, los cuales son almacenados en presas diseñadas para este fin (o sea presas de jales), lo que ocurre dentro de éstas es de interés debido a que al estar el jal en fracciones pequeñas (por debajo de la malla 150) los minerales contenidos tienen mayor área expuesta al entorno, por lo que la naturaleza mineralógica y el ambiente químico de los jales determinarán el comportamiento geoquímico de diferentes tipos de minerales (Figura 18). La solubilidad de los diversos metales, contenidos en los minerales que se encuentran en los jales, depende de la forma en la que éstos (minerales) están presentes. La solubilidad de muchas formas metálicas aumenta a medida que el pH disminuye hacia niveles por debajo del neutro (pH = 7). En dichos metales, la solubilidad aumenta con cada nivel de disminución en el pH. De manera inversa, a medida que el pH aumenta a lo largo de una ruta (debido a aumentos de nivel en el pH), algunos de los metales en solución pueden precipitarse. En ciertos casos, el drenaje contaminado también servirá como lixivante, promoviendo la disolución de los minerales oxidados que, por lo general, pueden ser inertes o presentar baja solubilidad. Por ejemplo, la generación de hierro férrico puede servir para oxidar ciertos minerales de uranio, aumentando así la solubilidad del uranio y su velocidad de lixiviación.



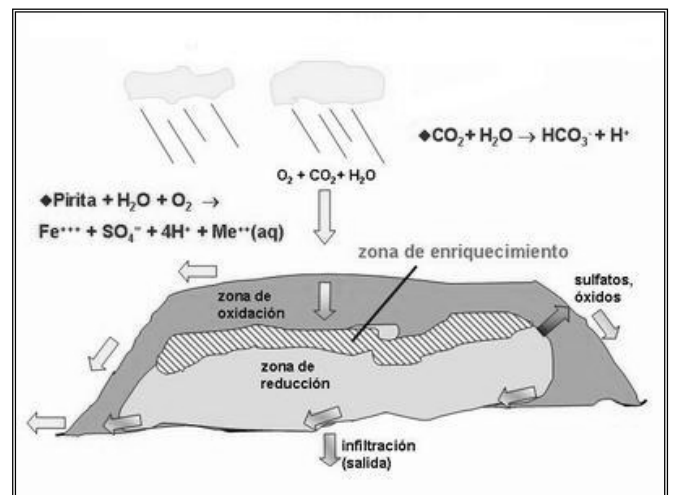
**Figura 18.** Ambiente Químico de los Jales  
FUENTE: <http://www.sgp.org.pe/julio05/W.Chavez.htm>

El ácido que se produce por medio de la oxidación de sulfuros, al formar parte del agua contenida en la presa de jales se encuentra bajo condiciones ácidas que es capaz de disolver metales pesados que se encuentran presentes (Figura 19) y en caso de que el agua salga de la presa puede causar la contaminación del suelo o de cuerpos superficiales o subterráneos de agua, estos últimos después de que el drenaje ácido se infiltre a través del suelo.

Las propiedades físicas que influyen en la solubilidad de los metales son el tamaño y forma de partícula, temperatura y presión de gases en los poros. Sin embargo; los factores químicos son más predominantes que las propiedades físicas en los procesos de movilización de los metales. Las propiedades físicas son importantes en la velocidad de migración del drenaje ácido y en las reacciones que ocurren alrededor del camino de migración. Las características incluyen:

- Condiciones climáticas
- Permeabilidad del desecho
- Disponibilidad de agua a través de los poros
- Presión del agua en los poros
- Mecanismo de movimiento

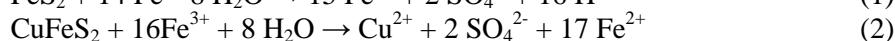
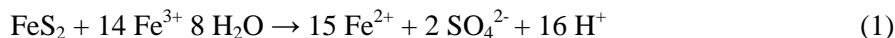
**Figura 19.** La Geoquímica en las Presas de Jales, influencia del aire y agua dentro de éstas.  
FUENTE: <http://www.sgp.org.pe/julio05/W.Chavez.htm>



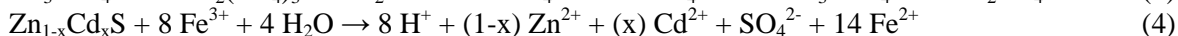
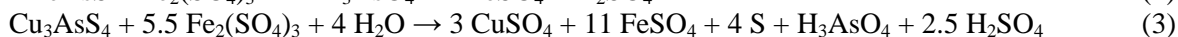
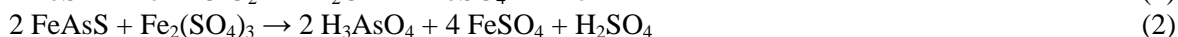
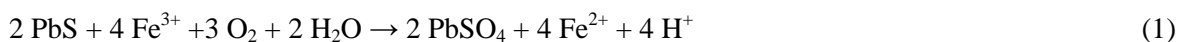
La velocidad de producción de sulfato férrico, incide de manera decisiva en la oxidación y lixiviación de sulfuros metálicos, de acuerdo con la siguiente reacción:



El cual actúa como un potente agente oxidante para minerales tales como la pirita (1) o calcopirita (2):



El problema ambiental derivado de estos procesos radica no sólo en la liberación de cationes relativamente inocuos como  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ , o en que aumente la acidez de las aguas. Aunque estos son dos problemas en sí, nos enfrentamos además a otro grave peligro para la salud humana y ambiental: el resto de los minerales sulfurados presentes en las presas de jales también se oxidan, liberando metales pesados de altísima peligrosidad tales como: el plomo (presente en galena, (1)), el arsénico (presente en arsenopirita, (2)) o enargita, (3), o el cadmio (presente en la fase de esfalerita, (4)):



### III.5 Toxicología de los elementos metálicos

Debido a que los jales representan un riesgo al medio ambiente por su contenido de elementos potencialmente tóxicos, en este apartado se tratará de la peligrosidad de los metales cuando son liberados y están expuestos.

Se ha hecho común el uso del término **metales pesados** para denominar a aquellos elementos químicos que poseen un peso atómico comprendido entre 63.55 y 200.59, (cobre y mercurio respectivamente) y que presentan un peso específico superior a 4 ( $\text{gcm}^{-3}$ ) (HIGUERAS, P. y OYARZUN, R.)

Los metales pesados pueden ser tóxicos, como cualquier otro elemento o compuesto. Una sustancia tóxica es aquella que tiene un efecto adverso sobre la salud. Para comprender esto es necesario establecer la definición de tóxico: *“Toda sustancia que introducida por alguna vía al organismo, tiene la capacidad potencial de producir un efecto nocivo, alterando las funciones vitales de las células, mediante modificaciones bioquímicas, alteraciones físicas o ambas, sin actuar de manera mecánica”*. Esta alteración de las funciones vitales puede reflejarse en cambios clínicos sobre un individuo o no. Dichos cambios pueden ser nocivos para la vida de ese individuo, o no, según el individuo, el cambio inducido y la intensidad de ese cambio.

La toxicidad de los metales depende en gran medida de la forma química en la cual sean introducidas en el organismo; por lo general los compuestos orgánicos de los metales son más tóxicos que los inorgánicos. El estado de oxidación puede determinar el carácter tóxico de un metal. Lo que hace tóxico a los metales pesados no son en general sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse y quizá más importante aún, el tipo de especie que forman en un medio determinado.

Los metales pesados pueden causar efectos ambientales que van desde la contaminación de cuerpos de agua (subterránea y superficial), aire o suelo, hasta la ocurrencia de daños sobre especies de flora y fauna (ecotoxicología) o sobre la salud humana (riesgo a la salud). El riesgo a la salud siempre ha acaparado el mayor interés sobre las investigaciones de los daños que ocasionan los metales pesados. Respecto al estudio de jales, en la gran mayoría de los casos se busca determinar el posible daño que puedan ocasionar a la salud de la población cercana a los depósitos.

Las vías de incorporación de los metales pesados a los organismos son las siguientes:

- Inhalación: Los cationes metálicos libres son absorbidos a través de los órganos respiratorios externos, los cuales pasan directamente a la sangre.
- Contacto dérmico: Los cationes metálicos libres son adsorbidos por la piel y luego pasivamente difundidos al torrente sanguíneo.
- Ingesta: Los metales son adquiridos durante la ingesta de organismos contaminados.

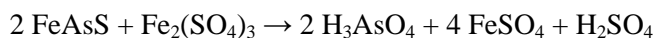
Por los alcances del presente trabajo y por las características de los jales utilizados para el trabajo experimental, a continuación se describen las características toxicológicas del plomo, arsénico, cadmio, níquel, selenio, hierro, cobre, zinc, plata y bario.

### *Arsénico*

Al arsénico se le encuentra en forma natural como mineral de cobalto, aunque por lo general está en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como Mn, Fe, Co, Ni, Ag o Sn. Son más de 200 especies minerales donde se encuentra presente el arsénico siendo: la arsenopirita (FeAsS), la enargita (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>), y la tennantita (Cu<sub>12</sub>As<sub>4</sub>S<sub>13</sub>) las más comunes; otros arseniuros metálicos son los minerales FeAs<sub>2</sub> (löllingita), NiAs (nicolita), CoAsS (cobalto brillante), NiAsS (gersdorfitita) y CoAs<sub>2</sub> (esmalta). Los arseniatos y tioarseniato naturales son comunes y la mayor parte de los minerales de sulfuro contienen arsénico. La As<sub>4</sub>S<sub>4</sub> (realgarita) y As<sub>4</sub>S<sub>6</sub> (oropimente) son los minerales más importantes que contienen azufre. El óxido, arsenolita, As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>, se encuentra como producto de la alteración debida a los agentes atmosféricos de otros minerales de arsénico. La solubilización de las formas sulfuradas de arsénico no es fácil, a menos que se encuentre en medio ácido. La reacción fundamental en medio ácido es:



Si además hay pirita en la mena, entonces el sulfato férrico producido actuará de la siguiente manera coadyuvando a la oxidación - lixiviación del arsénico:



El arsénico puede precipitar finalmente como FeAsO<sub>4</sub>.

El arsénico es uno de los elementos más tóxicos que pueden ser encontrados; debido a sus efectos tóxicos, los enlaces de arsénico inorgánico ocurren en la tierra naturalmente en pequeñas cantidades. Los humanos pueden estar expuestos al arsénico a través de: la comida, agua y aire. La exposición puede también ocurrir a través del contacto con la piel con suelo o agua que contenga arsénico. Los niveles de arsénico en la comida son bastante bajos, no es añadido debido a su toxicidad, pero los niveles de arsénico en peces y mariscos puede ser alta, porque los peces absorben arsénico del agua donde viven, esta es mayormente la forma de arsénico orgánico menos dañina, pero peces que contienen significantes cantidades de arsénico inorgánico pueden ser un peligro para la salud humana.

La exposición al arsénico puede ser más alta para la gente que trabaja con arsénico, que para gente que bebe significantes cantidades de vino, para gente que vive en casas que contienen conservantes de la madera y gente que viven en granjas donde el arsénico de los pesticidas ha sido aplicado en el pasado. La toxicidad varía según la sustancia (los compuestos trivalentes son más tóxicos que los pentavalentes). Las fases orgánicas son menos tóxicas. Inactiva todos los enzimas con puentes SH esenciales por su funcionamiento de potente veneno capilar. Muchos metales funcionan igual que el arsénico (SH de cisteína).



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. Las formas solubles del arsénico (por ejemplo, ácidos metil arsónico [MMA] y dimetil arsónico [DMA]) son fuertemente tóxicas. La ingestión de grandes dosis lleva a problemas gastrointestinales, cardiovasculares, disfunciones del aparato nervioso y finalmente a la muerte. Dosis bajas pero sostenidas (por ejemplo causas laborales) superiores a 0.75 mg m<sup>-3</sup> por año (por ejemplo, 15 años con concentraciones de 50 µg m<sup>-3</sup>) pueden llevar al desarrollo de cánceres.

La vida acuática y terrestre muestra una amplia gama de sensibilidades a las distintas especies arseniacales. En general las formas inorgánicas son más tóxicas que las orgánicas y el arsenito es más peligroso que el arsenato. Los arsenitos pueden fijarse a las proteínas, mientras que el arsenato afecta a la fosforilización oxidativa (en relación con el Ciclo de Krebs). Los organismos marinos contienen residuos arseniacales que van desde < 1 a 100 mg/kg, los cuales se encuentran como arsenoazúcares (en las algas) o arsenobetaina (en invertebrados y peces). Las plantas terrestres pueden acumular arsénico por captación a través de las raíces, o por adsorción de arsénico aerotransportado, en las hojas.

La exposición al arsénico inorgánico puede causar varios efectos sobre la salud, si se ingieren bajos niveles de arsénico inorgánico (de 300 a 30,000 ppb en comida o agua) se puede experimentar irritación del estómago e intestinos, con síntomas como: dolor estomacal, náusea, vómito y diarrea, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones. Es sugerido que la toma de significantes cantidades de arsénico inorgánico puede intensificar las posibilidades de desarrollar cáncer, especialmente: cáncer de piel, pulmón, hígado, linfa. Una gran dosis oral de arsénico inorgánico (cerca de 60,000 ppb en la comida o agua) puede producir la muerte.

A exposiciones muy altas de arsénico inorgánico puede causar infertilidad y abortos en mujeres, puede causar perturbación de la piel, pérdida de la resistencia a infecciones, perturbación en el corazón y daño del cerebro tanto en hombres como en mujeres. Finalmente, el arsénico inorgánico puede dañar el ADN. El arsénico orgánico no puede causar cáncer, ni tampoco daño al ADN. Pero exposiciones a dosis elevadas pueden causar ciertos efectos sobre la salud humana, como es lesión de nervios y dolores de estómago.

La sintomatología aguda es diarrea profusa (teñida de sangre), cólico intenso, deshidratación, debilidad, depresión, muerte en 1 a 3 días. La sintomatología crónica son: alteraciones nerviosas, lesiones cutáneas, cirrosis hepática y problemas circulatorios periféricos. El tratamiento consiste en: tiosulfato sódico, lavado gástrico, aceite mineral, antibióticos, analgésicos, fluidos y electrolitos, vitaminas

Concentraciones de arsénico en orina inferiores a 10 µg/l son considerados como normales, cuando sobrepasan los 100 µg/l hay que investigar la procedencia de dicho arsénico y superiores a 200 µg/l deben considerarse como valores tóxicos, debiendo tener en cuenta que desaparece a los pocos días de la exposición y que muchas veces una ingesta rica en arsénico, por ejemplo pescado, puede dar valores superiores a los mencionados anteriormente. Concentraciones en sangre > 100 - 500 µg/l se consideran tóxicas. Concentraciones de arsénico en cabello o uñas por encima de 5 mg/kg son patológicas y se pueden medir entre los seis a doce meses de la exposición.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, Environmental Protection Agency) ha determinado que el agua potable no puede contener más de 50 ppb de arsénico, los límites de exposición que establece la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA, Occupational Security Health Agency) para un trabajo de 8 horas son de 10 µg/m<sup>3</sup>.

### ***Bario***

Los compuestos de bario se obtienen de la minería y por conversión de dos minerales de bario. La barita, o sulfato de bario, es el principal mineral explotado y contiene 65.79% de óxido de bario. La witherita, algunas veces llamada espato pesado, es carbonato de bario y contiene 72% de óxido de bario. El metal reacciona con el agua más fácilmente que el estroncio y el calcio, pero menos que el sodio; se oxida con rapidez al aire y forma una película protectora que evita que siga la reacción, pero en aire húmedo puede inflamarse. El metal es lo bastante activo químicamente para reaccionar con la mayor parte de los no metales. El metal es dúctil y maleable; los trozos recién cortados tienen una apariencia gris-blanca lustrosa.

De forma natural los niveles de bario en el medio ambiente son muy bajos, entra al aire durante la extracción, purificación y producción de diversos compuestos; también entra al ambiente cuando se queman carbón y petróleo, existen algunos compuestos de bario que son fácilmente disueltos en agua y se encuentran en lagos, ríos y arroyos, por lo que los peces y algunos organismos acuáticos acumulan pequeñas cantidades de bario, altas cantidades de bario pueden sólo ser encontradas en suelos y en comida, como son los frutos secos, algas, pescados y ciertas plantas. La cantidad de bario que es detectada en alimentos y agua generalmente no es suficientemente alta como para llegar a ser concerniente a la salud. La gente con un gran riesgo a la exposición del bario con efectos adicionales sobre la salud son los que trabajan en la industria del bario. Los mayores riesgos para la salud que ellos pueden sufrir son causados por respirar aire que contiene sulfato de bario o carbonato de bario.

Muchos vertederos de residuos peligrosos contienen ciertas cantidades de bario. La gente que vive cerca de ellos posiblemente está expuesta a niveles dañinos. La exposición podrá entonces ser causada por: respirar polvo, comer tierra o plantas o beber agua que está contaminada con bario. También puede ocurrir por contacto en la piel.

La exposición de una persona al bario se da mediante:

Respirando aire, tomando agua y comiendo alimentos que contienen muy bajos niveles de bario.

Respirando aire con niveles más altos de bario si trabaja en industrias que producen o usan compuestos de bario.

Tomando agua proveniente de fuentes naturales de bario que contiene altos niveles de bario.

Respirando aire cerca de plantas que minan o procesan bario.

Los efectos del bario sobre la salud dependen de la solubilidad de los compuestos. Los compuestos de bario que se disuelven en agua pueden ser dañinos para la salud humana. La toma de gran cantidad de bario que es soluble puede causar parálisis y en algunos casos incluso la muerte.

Pequeñas cantidades de bario soluble en agua pueden causar en las personas: dificultad al respirar, incremento de la presión sanguínea, arritmia, dolor de estómago, debilidad en los músculos, cambios en los reflejos nerviosos, inflamación del cerebro y el hígado. Daño en los riñones y el corazón. No se ha demostrado que el bario cause cáncer en los humanos. No hay pruebas de que el bario pueda causar infertilidad o defectos de nacimiento.

La EPA permite una concentración de 2 partes de bario por millón de partes de agua potable (2 ppm), requiere que se le notifique en casos de descargas o derrames al medio ambiente de 10 libras de cianuro de bario o más. La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA), el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) y la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales de Gobierno (ACGIH) han establecido un límite de concentración máximo en el trabajo de 0.5 miligramos de compuestos solubles de bario por cada metro cúbico de aire ( $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ) durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas semanales. El límite de exposición a polvo de sulfato de bario en el aire establecido por la OSHA es de 5 a 15 miligramos de bario por metro cúbico de aire ( $5\text{-}15\text{ mg}/\text{m}^3$ ). Actualmente la NIOSH recomienda que un nivel de  $50\text{ mg}/\text{m}^3$  sea considerado como inmediatamente peligroso a la vida y la salud. Este nivel de exposición es probable que cause problemas de salud permanentes o incluso la muerte.

## *Cadmio*

El cadmio no se encuentra en estado libre en la naturaleza, entre los minerales de cadmio, la greenockita (CdS) es el más común. Este mineral se encuentra casi siempre asociado con la esfalerita (ZnS). De esta manera, el cadmio se recupera principalmente como un subproducto de la minería, fundición, y refinación del zinc y en menor grado de la del plomo y cobre. El cadmio puede ser encontrado principalmente en la corteza terrestre, este siempre ocurre en combinación con el zinc. El cadmio también existe en las industrias como inevitable subproducto de las extracciones de zinc, plomo y cobre. Después de ser aplicado éste entra en el ambiente mayormente a través del suelo, debido a que es encontrado en estiércoles y pesticidas. La ingesta de cadmio por los humanos tiene lugar principalmente a través de la comida, los alimentos que son ricos en cadmio (5 a 10% del cadmio presente) pueden en gran medida incrementar la concentración de cadmio en los humanos. Ejemplos son: patés, champiñones, mariscos, mejillones, cacao y algas secas.

Una exposición a niveles significativamente altos (25 a 60% del cadmio presente) ocurren cuando la gente fuma. El humo del tabaco transporta el cadmio a los pulmones. La sangre transporta al cadmio al resto del cuerpo donde pueden incrementarse sus efectos por potenciación del cadmio que está ya presente por comer comida rica en cadmio. Otra alta exposición puede ocurrir con gente que vive cerca de los vertederos de residuos peligrosos o fábricas que liberan cadmio en el aire y gente que trabaja en las refinerías del metal. Cuando la gente respira el cadmio éste puede dañar severamente los pulmones, esto puede incluso causar la muerte. El cadmio primero es transportado hacia el hígado por la sangre. Allí es unido a proteínas para formar complejos que son transportados hacia los riñones, el cadmio se acumula en los riñones, donde causa un daño en el mecanismo de filtración, esto causa la excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo y el consecuente daño de los riñones, lleva bastante tiempo antes de que el cadmio que ha sido acumulado en los riñones sea excretado del cuerpo humano.

El cadmio se puede adquirir por dos vías: ingestión e inhalación. Sus efectos pueden ser divididos en dos categorías:

- **Agudos:** fiebre de vapores de metal (*metal fume fever*) causada por una exposición severa; los síntomas son equivalentes a los de la gripe; en 24 horas se desarrolla generalmente un edema pulmonar agudo, el que alcanza su máximo en 3 días; si no sobreviene la muerte por asfixia, el problema puede resolverse en una semana.
- **Crónicos:** la consecuencia más seria del envenenamiento por cadmio es el cáncer. Los efectos crónicos que primero se observan son daño en los riñones. Se piensa que el cadmio es también el causante de enfisemas pulmonares y enfermedades de los huesos (osteomalacia y osteoporosis). Los problemas óseos han sido observados en Japón (recordar también el problema con metilmercurio; Incidente Minamata), donde se les denominó como la enfermedad "*itai-itai*" (por consumo de arroz contaminado con cadmio; causa: irrigación). Otros problemas incluyen anemia, decoloración de los dientes, y pérdida del sentido del olfato (anosmia).

Por vía digestiva, ingestas de hasta 100 mg producen síntomas gastrointestinales, mientras que a partir de los 350 mg se considera que es potencialmente mortal. 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. Los trabajadores expuestos al cadmio han de ser controlados y no deben permitirse concentraciones de cadmio  $> 5 \mu\text{g}/\text{l}$  en sangre y  $> 5 \mu\text{g}/\text{g}$  de creatinina en orina. El TLV ambiental recomendado por la ACGIH es de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La EPA ha determinado que el agua potable no puede contener más de 5 ppb de cadmio, los límites de exposición que establece la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) son de 5.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## *Cobre*

El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos, la cantidad de concentración en la corteza terrestre del cobre es de  $45 \text{ ml/m}^3$  (45 ppm). El cobre así como la plata, el oro y el mercurio ocurre en la naturaleza como un metal libre, aunque también puede presentarse en óxidos, carbonatos y sulfuros minerales. Como óxido se conoce la cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y la melaconita ( $\text{CuO}$ ), en forma de carbonato e hidróxido el cobre se encuentra en la malaquita y la azurita. Los orígenes más importantes sin embargo, son sulfuros minerales como la piritita cuprífera ( $\text{CuFeS}_2$ ). Por ser un metal maleable y conductor es ampliamente empleado en la industria, varias sales de cobre han sido usadas como pesticidas y agentes colorantes, el cobre es la base de algunas aleaciones como la aleación berilio - cobre (1 a 2% de Be). El cobre es una sustancia muy común que ocurre naturalmente y se extiende en el ambiente a través de fenómenos naturales, los seres humanos usan ampliamente el cobre. Por ejemplo este es usado en industrias y en agricultura, la producción de cobre se ha incrementado en las últimas décadas y debido a esto han aumentado las cantidades de Cobre en el ambiente.

El cobre es un nutriente natural, todos los alimentos lo llevan, pero especialmente son ricos en Cu las legumbres, frutas, hígado, peces y ostras. El Cu aparece en los alimentos por diversas razones: tierras o aguas naturalmente ricas en Cu, contaminación por industrias o minas, abonos, utilización como pesticida (fungicida), utensilios de cobre (maquinaria, latas u otras). El Cobre es un elemento esencial ya que es un constituyente de algunas enzimas, su deficiencia está relacionada con algunos desórdenes en la dieta, lo que provoca anemia, depresión creciente, ataxia neonatal y daño en el desempeño reproductivo. La ceruplasmina, la cual actúa como un oxidante, es el mayor compuesto de cobre en el cuerpo y es esencial también para el crecimiento de las plantas. De este modo, la mayor parte de la comida contiene algo de cobre, los mariscos tienen altas concentraciones. El contenido normal del cuerpo es de 100 mg para un hombre de 70 kg (150 lb).

Para que se presenten daños ocasionados por el cobre es necesario que los organismos estén expuestos a altas concentraciones por periodos prolongados; el cobre tiene gusto metálico y produce sequedad en la boca, dolores abdominales, dispepsia, diarreas, colapso y muerte. El hígado tiene una capacidad limitada de acumular Cu, cuando comienza el cuadro es limitante. El Cu oxida las membranas de las células y hay lisis y hemólisis y libera hemoglobina hacia la meta hemoglobina. Primero inicia sin sintomatología, después produce insuficiencia hepática y después insuficiencia renal.

La exposición profesional al cobre puede ocurrir en el ambiente de trabajo; el contacto con cobre puede llevar a adquirir la gripe conocida como la fiebre del metal, esta fiebre pasará después de dos días y es causada por una sobre sensibilidad. Exposiciones de largo periodo al cobre pueden irritar la nariz, la boca y los ojos y causar dolor de cabeza, de estómago, mareos, vómitos y diarreas. Una toma grande de cobre puede causar daño al hígado y los riñones e incluso la muerte. No ha sido determinado aún si el cobre es cancerígeno.

La EPA ha determinado que el agua potable no puede contener más de 1.3 mg/l de cobre, los límites de exposición que establece la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) son de  $0.2 \text{ mg/m}^3$  y  $1 \text{ mg/m}^3$  para polvo y vapor (según la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales de Gobierno, ACGIH), el nivel límite permisible de exposición es de  $0.1 \text{ mg/m}^3$  para fundiciones de cobre (en el vapor generado por la fundición) y  $1 \text{ mg/m}^3$  para polvo (partículas finas de metal) y vapor (aereosoles de cobre soluble). La tabla de nutrición y comida del Instituto de Medicina ha desarrollado una recomendación dietaria de 340  $\mu\text{g/día}$  para niños de 1 a 3 años, 440  $\mu\text{g/día}$  para niños de 4 a 8 años, 700  $\mu\text{g/día}$  para niños de 9 a 13 años, 890  $\mu\text{g/día}$  para niños de 14 a 18 años, y 900  $\mu\text{g/día}$  para adultos.

## ***Hierro***

El hierro es un metal abundante en la corteza terrestre, el mineral de hierro más común es la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de la cual se obtiene por reducción con carbón; la limonita, ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) es otro mineral de hierro importante. Otras formas de minerales de hierro comercial son: la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y la taconita Las piritas, ( $\text{FeS}_2$ ), y la cromita, ( $\text{Fe}(\text{CrO}_2)_2$ ), se explotan como minerales de azufre y de cromo, respectivamente. El hierro se encuentra en muchos otros minerales y está presente en las aguas freáticas. Todos los tejidos del cuerpo contienen hierro. En concentraciones normales, el peso en el cuerpo es cerca de 4 g, el cual es altamente concentrado en las células de glóbulos rojos como hemoglobina. El 67 % del hierro total está contenido en la hemoglobina y el 2 % es almacenado (principalmente en el hígado) como hemosiderina en caso de consumo excesivo.

La absorción oral del hierro es fisiológicamente controlada, el sitio principal para limitar la absorción del hierro es la mucosa intestinal, en este mecanismo hemostático, la forma trivalente del hierro es absorbida por la mucosa gastrointestinal y convertida a forma divalente y atacada por la ferritina. El paso de la ferritina dentro del flujo sanguíneo es convertido y transferido a la forma trivalente para ser almacenado como ferritina o hemosiderina. La absorción del hierro por el tracto gastrointestinal puede depender de secreciones hepáticas y del páncreas. Del total de 15 a 18 mg de hierro que se ingieren al día con una dieta de 2,500 a 3,000 calorías, sólo un 5-10% es absorbido.

Cuando se exceden los límites naturales que acepta, el cuerpo humano provoca una limitante para el crecimiento. La sintomatología tarda desde minutos a pocas horas en presentarse: gastroenteritis hemorrágica, diarrea. En 24-48 horas produce convulsiones, shock, debilidad, cianosis. En un mes produce necrosis aguda del hígado, muerte por coma y hepatitis.

Para contrarrestar los efectos adversos del hierro, se hace un lavado gástrico (bicarbonato sódico) IV y suero glucosado. Los antidotos son el ferrocianuro de sodio (preferentemente) u óxido de magnesio.

La DL50 en animales de experimentación es de 150 - 200 mg/kg de Fe elemental. La dosis letal más baja descrita en la infancia es de 600 mg. La dosis tóxica es de 20 - 60 mg/kg de Fe elemental: 20 - 30 mg/kg produce: vómitos, dolor abdominal y diarrea. En concentraciones > 40 mg/kg se presenta coma, discrasia sanguínea. La dosis potencialmente letal > 60 mg/Kg.

Los límites de exposición para óxidos de hierro son de 5 mg/m<sup>3</sup> y de 1 mg/m<sup>3</sup> para sales solubles de hierro (según la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales de Gobierno, ACGIH), el nivel límite permisible de exposición para óxidos de hierro es de 10 mg/m<sup>3</sup> (según la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional OSHA).

## ***Mercurio***

La forma principal de mercurio en la naturaleza es el cinabrio ( $\text{HgS}$ ) y constituye la mena principal para la obtención de este metal. Otras formas minerales incluyen la cordierita ( $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{Cl}_2$ ), la livingstonita ( $\text{HgSb}_4\text{S}_8$ ), y formas supergénicas tales como el mercurio nativo ( $\text{Hg}^0$ ), el silomelano ( $\text{HgCl}_2$ ) y la schuetteita ( $\text{Hg}_3(\text{SO}_4)\text{O}_2$ ).

El mercurio posee una de las peores reputaciones entre los metales pesados. El incidente de la Bahía de Minamata (Japón, años 50s-60s) bastó para que este elemento infundiese alarma pública en todas las regiones del mundo donde podía haber fuentes de contaminación relacionadas con éste. Consideraciones económicas aparte, todas las investigaciones indican claramente que el mercurio puede constituir una amenaza para la salud humana y la vida silvestre. Ahora bien, el riesgo viene determinado por los siguientes factores:

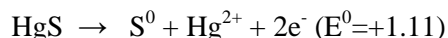
- El tipo de exposición al mercurio.
- La especie de mercurio presente (algunas son más tóxicas que otras).
- Los factores geoquímicos y ecológicos que influyen la forma de migración del mercurio en el medio ambiente y los cambios que puede sufrir durante dicha migración.

De todas las especies de mercurio conocidas, la más peligrosa es sin duda el metilmercurio (CH<sub>3</sub>Hg). Aunque la forma exacta en que se produce la metilación del mercurio se desconoce, se sabe que en el proceso intervienen bacterias que participan en el ciclo SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - S<sup>2-</sup>. Estas bacterias, que por lo tanto contendrán metilmercurio, son consumidas por el peldaño superior de la cadena trófica o bien lo excretarán. En este último caso el metilmercurio puede ser rápidamente adsorbido por el fitoplancton y de ahí pasar a los organismos superiores. Debido a que los animales acumulan metilmercurio más rápido de lo que pueden excretarlo, se produce un incremento sostenido de las concentraciones en la cadena trófica (biomagnificación). Así, aunque las concentraciones iniciales de metilmercurio en el agua sean bajas o muy bajas, los procesos biomagnificadores acaban por convertir el metilmercurio en una amenaza real para salud humana.

El metilmercurio daña al organismo de las siguientes maneras:

- Afecta al sistema inmunológico
- Altera los sistemas genéticos y enzimáticos
- Daña el sistema nervioso: coordinación, sentidos del tacto, gusto y visión.
- Induce un desarrollo anormal de los embriones (efectos teratogénicos), los embriones son 5 a 10 veces más sensibles a los efectos del mercurio que un ser adulto.

El cinabrio, aunque es una forma relativamente estable de mercurio, puede también sufrir transformaciones que resultan en especies indeseables. Así, en medio ácido y oxidante tenemos:



Esta reacción pone en solución al mercurio, el que puede así formar complejos con la materia orgánica. No obstante, en un medio alcalino oxidante el mercurio precipitará como óxido:



Lo que en principio parece una forma más o menos estable, mientras el sistema mantenga la alcalinidad y condiciones oxidantes.

La máxima concentración de mercurio en orina admitida para los trabajadores expuestos a dicho metal es de 35 µg/g creatinina. El TLV es de 25 µg/m<sup>3</sup>.

### *Níquel*

Generalmente no se encuentra como un metal puro, está extremadamente distribuido en la naturaleza y ocurre como una concentración de 80 ml/m<sup>3</sup> (80 ppm) en la corteza terrestre. Se encuentra en yacimientos de sulfuros, arseniuros y arseniatos de níquel, silicatos y otros minerales como morenosita, annabergita y zaratita. El níquel es empleado principalmente en: electrónica, monedas, baterías, comida procesada, como aleante en herramientas; también es empleado como un catalizador en la hidrogenación de grasas y aceites.

El níquel es un elemento bastante abundante, constituye cerca de 0.008% de la corteza terrestre y 0.01% de las rocas ígneas. En algunos tipos de meteoritos hay cantidades apreciables de níquel, y se piensa que existen grandes cantidades en el núcleo terrestre. Dos minerales importantes son los sulfuros de hierro y níquel,

pentlandita y pirrotita  $(Ni, Fe)_xSy$ ; el mineral garnierita,  $(Ni, Mg)SiO_3 \cdot nH_2O$ , también es importante en el comercio. El níquel se presenta en pequeñas cantidades en plantas y animales. Está presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, el petróleo y en la mayor parte del carbón.

La ingesta en humanos normalmente es de 300 a 600  $\mu g$  de níquel por día. La cantidad presente normalmente en el cuerpo es menos de 10 mg. En ocasiones el níquel se encuentra como un contaminante en la comida procesada y relativamente grandes cantidades ocurren en vegetales, leguminosas y granos.

La mayor parte del níquel ingestado es excretado en las heces, pero una pequeña cantidad es absorbida y puede ser excretada en la orina, la bilis y el sudor. Existe poca información a partir de estudios con animales sobre los efectos de inhalar sustancias con contenidos de níquel. Pocas sustancias con contenidos de níquel, incluyendo el polvo de níquel y carbonil de níquel, han producido cáncer en experimentos con animales después de la inhalación o inyección. Estudios epidemiológicos de fundiciones de níquel y refinерías han mostrado un incremento en cáncer de pulmón y carcinoma de las cavidades nasales en trabajadores.

El níquel provoca problemas pulmonares (por la vía inhalatoria) y dermatitis de contacto (por vía cutánea (por ejemplo joyeros)). Es un carcinógeno.

Por la vía digestiva es rara, cuando se presenta la sintomatología es: náuseas, vómitos, dolor abdominal y gastritis hemorrágica. El retraso de los síntomas puede ocurrir de 12 a 36 horas e incluye la dificultad para respirar, dolor experimentado durante la inhalación, tos seca, debilidad y dolor muscular, escalofríos y dolor en el pecho. La neumonitis intersticial puede ser detectada por rayos X; puede ocurrir calentura, cianosis e incremento de calor, problemas con el hígado.

Frecuentemente se requieren de 2 a 3 meses para la recuperación, pero los efectos del envenenamiento por níquel pueden ser experimentados por muchos años. La muerte puede ocurrir debido a fallas en la respiración, edema cerebral o hemorragia.

Los límites de exposición son de 0.35  $mg/m^3$  para níquel (según la Conferencia Americana de Sanitarios Industriales de Gobierno, ACGIH) de 1  $mg/m^3$  para metal y compuestos solubles, determinados con base en el contenido de níquel (según la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional OSHA).

### ***Plata***

La plata se presenta en pequeñas cantidades en áreas pequeñas, algunas veces se encuentra en la naturaleza como elemento libre (plata nativa) o mezclada con otros metales. Sin embargo, la mayor parte de las veces se encuentra en minerales que contienen compuestos de plata, la cantidad de concentración sobre la corteza terrestre es de 1  $ml/m^3$  (1 ppm), su principal mineral es la argentita, otros minerales en los que se encuentra son la cerargirita o cuerno de plata y varios minerales en los cuales el sulfuro de plata está combinado con los sulfuros de otros metales, la plata también se obtiene como un subproducto de cobre, plomo y otros metales en su refinación.

Grandes dosis tomadas de nitrato de plata causan irritación gastrointestinal debido a su acción cáustica. La exposición crónica profesional a la plata puede causar "argiria" local que se caracteriza por la formación de manchas azul grisáceo en la piel o en los ojos.

Las sales solubles de plata, especialmente el nitrato de plata ( $AgNO_3$ ), son letales en concentraciones de hasta 2 g. Los compuestos de plata pueden ser absorbidos lentamente por los tejidos corporales, con la consecuente pigmentación azulada o negruzca de la piel (argiria).

*Contacto con los ojos:* Puede causar graves daños en la córnea si el líquido se pone en contacto con los ojos.

*Contacto con la piel:* Puede causar irritación de la piel. Contacto repetido y prolongado con la piel puede causar dermatitis alérgica.

*Peligros de la inhalación:* Exposición a altas concentraciones del vapor puede causar mareos, dificultades para respirar, dolores de cabeza o irritación respiratoria. Concentraciones extremadamente altas pueden causar somnolencia, espasmos, confusión, inconsciencia, coma o muerte.

El líquido o el vapor pueden irritar la piel, los ojos, la garganta o los pulmones. El mal uso intencionado consistente en la concentración deliberada de este producto e inhalación de su contenido puede ser dañino o mortal.

*Peligros de la ingestión:* Moderadamente tóxico. Puede causar molestias estomacales, náuseas, vómitos, diarrea y narcosis. Si el material se traga y es aspirado en los pulmones o si se produce el vómito, puede causar neumonitis química, que puede ser mortal.

*Órganos de destino:* La sobre exposición crónica a un componente o varios componentes de la plata tiene los siguientes efectos en los animales de laboratorio:

- ❖ Daños renales
- ❖ Daños oculares
- ❖ Daños pulmonares
- ❖ Daños hepáticos
- ❖ Daños cerebrales

La sobre exposición crónica a un componente o varios componentes de la plata se supone que tiene los siguientes efectos en los humanos:

- ❖ Anormalidades cardíacas
- ❖ Se ha informado de la relación entre sobre-exposiciones repetidas y prolongadas a disolventes con daños cerebrales y del sistema nervioso permanentes.
- ❖ La respiración repetida o el contacto con la piel de la metil-etil-cetona puede aumentar la potencia de las neurotoxinas tales como el hexano si la exposición tiene lugar al mismo tiempo.

### ***Plomo***

El plomo se encuentra presente en un gran número de minerales, siendo la forma más común el sulfuro de plomo (galena: PbS). También son comunes, aunque en orden decreciente, la cerusita (PbCO<sub>3</sub>) y la anglesita (PbSO<sub>4</sub>). Las partículas finas de plomo (10-100 µm) pueden ser extremadamente peligrosas por las siguientes razones: 1. Se adhiere más fuertemente a la piel. 2. Es más soluble que las partículas gruesas en el tracto gastrointestinal. 3. Es fácilmente absorbible a través del sistema respiratorio.

El plomo es un metal carente de valor biológico, es decir, no es requerido para el funcionamiento normal de los seres vivos. Debido a su tamaño y carga, el plomo puede sustituir al calcio (Pb<sup>2+</sup>: 0.84 Å; Ca<sup>2+</sup>: 0.99 Å) y además de manera preferente, siendo su sitio de acumulación los tejidos óseos. Esta situación es particularmente alarmante en los niños, que debido a su crecimiento incorporan altas cantidades de calcio. Altas dosis de calcio hacen que el plomo sea "*removido*" de los tejidos óseos, y que pase a incorporarse al torrente sanguíneo. Una vez ahí puede inducir nefrotoxicidad, neurotoxicidad, e hipertensión. Niveles de plomo en la sangre de 0.48 µg/l pueden inducir en los niños:

- ❖ Daño durante el desarrollo de los órganos del feto.
- ❖ Daño en el sistema nervioso central.
- ❖ Reducción de las habilidades mentales e iniciación de desordenes del comportamiento.
- ❖ Daño en las funciones del calcio (anteriormente discutido).

A su vez, niveles del orden de 1.2 µg/l pueden inducir:



- ❖ Descenso del coeficiente intelectual (CI). Problemas de desarrollo cognitivo y del comportamiento.
- ❖ Déficits neurológicos que pueden persistir hasta la adolescencia.
- ❖ Elevación de los umbrales auditivos.
- ❖ Peso reducido en recién nacidos. Desarrollo cognitivo temprano anormal.

En adultos que trabajan en ambientes expuestos a la contaminación con plomo, el metal puede acumularse en los huesos, donde su vida media es superior a los 20 años. La osteoporosis, embarazo, o enfermedades crónicas pueden hacer que éste plomo se incorpore más rápidamente a la sangre. Los problemas relacionados con la sobre exposición al plomo en adultos incluyen:

- ❖ Daño en los riñones.
- ❖ Daño en el tracto gastrointestinal.
- ❖ Daño en el sistema reproductor.
- ❖ Daño en los órganos productores de sangre.
- ❖ Daños neurológicos.
- ❖ Abortos.

La dosis letal de plomo absorbida es de unos 0.5 gramos. El riesgo de intoxicación crónica se considera a partir de 0.5 mg/día. La concentración máxima permisible en el aire, en los puestos de trabajo es de 0.15 mg/día.

### *Selenio*

La abundancia de este elemento, ampliamente distribuido en la corteza terrestre, se estima aproximadamente en  $7 \times 10^{-5}\%$  por peso, encontrándose en forma de seleniuros de elementos pesados y en menor cantidad, como elemento libre en asociación con azufre elemental. Sus minerales no se encuentran en suficiente cantidad para tener utilidad, como fuente comercial del elemento y por ello los minerales de sulfuro de cobre seleníferos son los que representan la fuente primaria.

Los seres humanos pueden estar expuestos al selenio en varias formas diferentes. La exposición al selenio tiene lugar, bien a través de la comida o el agua; o bien cuando están en contacto con tierra o aire que contiene altas concentraciones de selenio. Esto no es muy sorprendente, porque el selenio se da naturalmente en el medio ambiente de forma muy amplia y está muy extendido. La exposición al selenio tiene lugar principalmente a través de la comida, porque el selenio está presente naturalmente en los cereales y la carne. Los humanos necesitan absorber ciertas cantidades de selenio diariamente, con el objeto de mantener una buena salud. La comida normalmente contiene suficiente selenio para prevenir las enfermedades causadas por su carencia. La toma de selenio a través de la comida puede ser más elevada de lo normal en diversos casos, porque en el pasado se aplicaron muchos fertilizantes ricos en selenio en los cultivos. Las personas que viven cerca de lugares donde hay residuos peligrosos experimentarán una mayor exposición a través del suelo y del aire. El selenio procedente de cultivos y de lugares donde hay residuos peligrosos acabará en las aguas subterráneas o superficiales por irrigación. Este fenómeno hace que el selenio acabe en el agua potable local, de forma que la exposición al selenio a través del agua aumentará temporalmente. Las personas que trabajan en las industrias de este metal como industrias recuperadoras de selenio e industrias de pinturas también tienden a experimentar una mayor exposición al selenio, principalmente a través de la respiración. El selenio es liberado al aire a través de la combustión de carbón y aceite. Las personas que comen muchos cereales que crecen cerca de las industrias pueden experimentar una mayor exposición al selenio a través de la comida. La exposición al selenio a través del agua potable puede ser aumentada cuando el selenio de la eliminación de residuos peligrosos termina en los pozos de agua. La exposición al selenio a través del aire suele ocurrir en el lugar de trabajo.

Puede provocar mareos, fatiga e irritaciones de las membranas mucosas. Cuando la exposición es extremadamente elevada, puede ocurrir retención de líquido en los pulmones y bronquitis. La toma de selenio a través de la comida es normalmente lo suficientemente grande como para satisfacer las necesidades humanas; la escasez raramente ocurre. Cuando hay escasez puede que las personas experimenten problemas de corazón y musculares. Cuando la toma de selenio es demasiado grande es probable que se presenten efectos sobre la salud. La gravedad de estos efectos depende de las concentraciones de selenio en la comida y de la frecuencia con que se tome esa comida. Los efectos sobre la salud, de las diversas formas del selenio, pueden variar de pelo quebradizo y uñas deformadas, a sarpullidos, calor, hinchamiento de la piel y dolores agudos. Cuando el selenio acaba en los ojos las personas experimentan quemaduras, irritación y lagrimeo. El envenenamiento por selenio puede volverse tan agudo en algunos casos que puede incluso causar la muerte. La sobreexposición a vapores de selenio puede producir: acumulación de líquido en los pulmones, mal aliento, bronquitis, neumonía, asma bronquítica, náuseas, escalofríos, fiebre, dolor de cabeza, dolor de garganta, falta de aliento, conjuntivitis, vómitos, dolores abdominales, diarrea y agrandamiento del hígado. El selenio es irritante y sensibilizador de los ojos y del sistema respiratorio superior. La sobre exposición puede resultar en manchas rojas en las uñas, dientes y pelo. El dióxido de selenio reacciona con la humedad para formar ácido selénico, que es corrosivo para la piel y ojos. Carcinogenicidad: La Agencia Internacional de la Investigación del Cáncer (IARC) ha incluido al selenio dentro del grupo 3 (el agente no es clasificable en relación a su carcinogenicidad en humanos.).

La intoxicación se manifiesta principalmente por cólico, meteorismo, diarrea, falta de coordinación, fiebre y disnea. En la intoxicación crónica (alkali disease) se observa: ataxia, ceguera parcial, parálisis, pérdida de pelo, deformación y desprendimiento de pezuñas o casco. El selenio tiene función como antioxidante. También puede proteger frente al mercurio.

La EPA y la FDA (Food and Drug Administration) establecen que la cantidad permitida de selenio en el agua potable no debe de exceder de 50 ppb de selenio total, la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) establece que el límite de exposición a compuestos de selenio en el aire para un periodo de 8 horas es de  $0.2 \text{ mg/m}^3$ .

### ***Zinc***

El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005 - 0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la blenda, marmatita o esfalerita de zinc (ZnS). Es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales, la deficiencia de zinc en la dieta humana deteriora el crecimiento y la madurez y produce también anemia. La insulina es una proteína que contiene zinc. El zinc está presente en la mayor parte de los alimentos, especialmente en los que son ricos en proteínas. En promedio, el cuerpo humano contiene cerca de dos gramos de zinc. Es un metal químicamente activo.

El zinc es una sustancia muy común que ocurre naturalmente, muchos alimentos contienen ciertas concentraciones de zinc, el agua potable también contiene cierta cantidad de zinc, la cual puede ser mayor cuando es almacenada en tanques de metal. Las fuentes industriales o los emplazamientos para residuos tóxicos pueden ser la causa del zinc en el agua potable llegando a niveles que causan problemas. El zinc es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Cuando la gente absorbe muy poco zinc pueden experimentar: una pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor y el olfato, así como pequeñas llagas y erupciones cutáneas. La acumulación del zinc puede incluso producir defectos de nacimiento.

Los seres humanos pueden manejar proporcionalmente grandes cantidades de zinc, demasiada cantidad de zinc puede también causar problemas de salud eminentes, como: úlcera de estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas y anemia. Niveles altos de zinc pueden dañar el páncreas y alterar el metabolismo de las proteínas y causar arterioesclerosis. Exposiciones al clorato de zinc intensivas pueden causar desórdenes

respiratorios. En el Ambiente de trabajo el contacto con zinc puede causar la gripe conocida como la fiebre del metal. Esta pasará después de dos días y es causada por una sobre sensibilidad. El zinc puede dañar a los niños que no han nacido y a los recién nacidos. Cuando sus madres han absorbido grandes concentraciones de zinc los niños pueden estar expuestos a este a través de la sangre o la leche de sus madres.

Produce náuseas, vómito, diarrea sanguinolenta, colapso y muerte. El zinc es un metal esencial con un margen terapéutico muy bajo (puede interferir con la absorción de cobre). Las intoxicaciones accidentales son raras, más frecuentes en suicidios.

La EPA recomienda que el agua potable contenga no más de 5 miligramos de zinc por litro de agua (5 mg/l). La EPA requiere que se le notifique de cualquier liberación al ambiente de 1,000 libras de zinc o más.

Para proteger a los trabajadores, la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA) ha establecido un límite de 1 miligramo por metro cúbico de aire (1 mg/m<sup>3</sup>) para vapores de cloruro de zinc y de 5 mg/m<sup>3</sup> para óxido de zinc (polvos o vapores) en el aire del trabajo durante jornadas de 8 horas diarias, 40 horas a la semana.

## CAPITULO IV

### MARCO NORMATIVO

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), entró en vigor en el año de 1988 y en ella se establecen una serie de lineamientos encaminados a la protección ambiental y a la conservación de los recursos naturales en el país. Respecto a las actividades de explotación y aprovechamiento de los recursos minerales, la ley hace el señalamiento de la alteración que puede ocasionar esta actividad en el equilibrio ecológico.

A partir de los lineamientos de la LGEEPA, se han establecido diversos criterios para la protección del ambiente en la realización de las actividades que involucra la minería. Estos criterios están señalados en los reglamentos en materia de impacto ambiental, en el de residuos peligrosos y en las normas oficiales mexicanas.

A continuación se hace un análisis del marco legal en materia de explotación de recursos minerales y en particular se centra la atención en los criterios que se han establecido en torno a la generación, manejo y almacenamiento de jales.

#### **IV.1 ASPECTOS DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE**

En el Artículo 5, fracción XIV de la LGEEPA, se establece que entre las facultades que tiene la Federación está la “regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, sustancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente”.

Como parte de la política ambiental que se establece en la misma ley, está señalado que “los recursos naturales no renovables deben utilizarse de modo que se evite el peligro de su agotamiento y la generación de efectos ecológicos adversos” (Artículo 15 fracción VIII).

El título tercero de la ley se refiere al aprovechamiento sustentable de los elementos naturales; el capítulo tercero se refiere a la exploración y explotación de los recursos no renovables en el equilibrio ecológico. En este apartado el Artículo 108 señala que para prevenir y controlar los efectos generados en la exploración y explotación de los recursos no renovables en el equilibrio ecológico e integridad de los ecosistemas, se emitirán normas oficiales mexicanas que permitan:

- I.- El control de la calidad de las aguas y la protección de las que sean utilizadas o sean el resultado de esas actividades, de modo que puedan ser objeto de otros usos;
- II.- La protección de los suelos y de la flora y fauna silvestres, de manera que las alteraciones topográficas que generen esas actividades sean oportuna y debidamente tratadas; y
- III.- La adecuada ubicación y formas de los depósitos de desmontes, relaves y escorias de las minas y establecimiento de beneficio de los minerales.

En materia de impacto ambiental la actividad minera se ha considerado dada la capacidad que tiene para ocasionar modificaciones en los elementos ambientales. El Artículo 28 de la ley establece que “la evaluación

del impacto ambiental es el procedimiento mediante el cual las autoridades de gobierno establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos en el ambiente”. Este artículo señala de manera general las actividades que requerirán para su realización autorización previa en materia de impacto ambiental por parte de las autoridades de gobierno; en la fracción III se menciona la exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación en los términos de la Ley Minera.

## **IV.2 ASPECTOS DEL REGLAMENTO DE LA LGEEPA**

### **IV.2.1 En materia de impacto ambiental**

Tomando en consideración que la prevención y el control de los desequilibrios ecológicos y el deterioro del ambiente, son indispensables para preservar los recursos naturales de la nación y asegurar el bienestar de la población, se establece en el reglamento de la LGEEPA en materia de impacto ambiental lo siguiente:

El Artículo 5 hace una referencia detallada de las actividades que requieren autorización en materia de impacto ambiental.

El inciso L) de este artículo se refiere a la “exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la federación” y consta de tres fracciones que son las siguientes:

- I. Obras para la explotación de minerales y sustancias reservadas a la federación, así como su infraestructura de apoyo;
- II. Obras de exploración, excluyendo las de prospección gravimétrica, geología superficial, geoelectrica, magnetotelúrica, de susceptibilidad magnética y densidad, así como las obras de barrenación, zanjeo y exposición de rocas, siempre que se realicen en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos o templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinares, ubicadas fuera de las áreas naturales protegidas, y
- III. Beneficio de minerales y disposición final de sus residuos en presas de jales, excluyendo las plantas de beneficio que no utilicen sustancias consideradas como peligrosas y el relleno hidráulico de obras mineras subterráneas.

De esta última fracción queda clara la importancia que tiene la disposición de jales, al ser necesaria la autorización por parte de las autoridades ambientales correspondientes, previa presentación de una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA). De acuerdo con el artículo 9, los promoventes (interesados) deberán presentar ante la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales una MIA, en la modalidad que corresponda, para que ésta realice la evaluación del proyecto de la obra o actividad respecto de la que se solicita autorización.

Las manifestaciones de impacto ambiental se podrán presentar en las siguientes modalidades:

- I.- Regional
- II.- Particular

En el caso de la MIA que se requiere para la construcción de una presa de jales y en general para la mayoría de obras de una operación minera, la modalidad que se solicita es la Particular.

## IV.2.2 En materia de residuos peligrosos

Este reglamento establece los lineamientos que deben seguirse en materia de generación, manejo, almacenamiento, disposición y reutilización de residuos, de acuerdo con lo estipulado en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Entre las definiciones que este reglamento considera y que son de interés para el caso de los jales están las siguientes:

**Almacenamiento:** Acción de retener temporalmente residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección, o se dispone de ellos.

**Confinamiento controlado:** Obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos, que garantice su aislamiento definitivo.

**Confinamiento en formaciones geológicas estables:** Obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos en estructuras naturales impermeables, que garanticen su aislamiento definitivo.

**Jales:** Residuos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.

**Presa de jales:** Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de jales.

De lo anterior se puede entender que inicialmente, cuando fue promulgada la LGEEPA y el reglamento en materia de residuos peligrosos, los jales fueron considerados como residuos peligrosos, aún cuando en la legislación de los Estados Unidos de América, los jales se consideraban en una categoría separada como residuos especiales, de alto volumen y baja peligrosidad.

Sin embargo, el artículo 20 del reglamento establece que “queda exceptuado de lo dispuesto en los artículos 15, 16, 17, 18 y 19 fracción III, el almacenamiento de jales. Estos residuos deberán almacenarse conforme a lo que dispongan las normas técnicas ecológicas correspondientes”. En los artículos que hace referencia se establecen las condiciones que deben reunir los sitios (cerrados y abiertos) para el almacenamiento de residuos peligrosos.

Finalmente el artículo 36 del reglamento se refiere a que “La disposición final de los residuos peligrosos generados en la industria minera se efectuará en presas de jales y de conformidad con lo dispuesto en las normas técnicas ecológicas correspondientes”. En esta parte del artículo hay una contradicción al hacer referencia de la peligrosidad de los residuos de la industria minera, que aunque no lo especifica con claridad, se refiere a los jales, pues dice que deben ser almacenados en presas de jales.

Este mismo artículo continua “Las presas de jales podrán ubicarse en el lugar en que se originen o generen dichos residuos, excepto arriba de poblaciones o de cuerpos receptores ubicados a una distancia menor de 25 kilómetros que pudieran resultar afectados”.

## IV.3 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-ECOL-1993

La NOM-052-ECOL-1993, establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Esta norma fue desarrollada a partir de las disposiciones de la LGEEPA y sustituyó a la norma técnica ecológica expedida anteriormente para residuos peligrosos. Esta norma establece que los residuos en cualquier estado físico son peligrosos por presentar alguna de las siguientes características: a) corrosivo, b) reactivo, c) explosivo, d) tóxico, e) inflamable, o f) biológico infeccioso. Para determinar estas características se realiza una prueba de extracción al residuo, con el procedimiento que se indica en la NOM-053-ECOL-1993. En la Tabla 4 se especifican las condiciones para que un residuo cumpla con alguna de las características descritas.

**Tabla 4.** Características que hacen a un residuo peligroso

CARACTERÍSTICAS	DEFINICIÓN
Corrosividad	Un residuo se considera peligroso por su corrosividad cuando en estado líquido o en solución acuosa presenta un pH sobre la escala menor o igual a 2.0, o mayor o igual a 12.5. En estado líquido o en solución acuosa y a una temperatura de 55 °C es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 1020), a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año.
Reactividad	Un residuo se considera peligroso por su reactividad cuando bajo condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera), se combina o polimeriza violentamente sin detonación. En condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera) cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo - agua) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos. Bajo condiciones normales cuando se ponen en contacto con soluciones de pH; ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N), en relación (residuo - solución) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos. Posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de HCN/kg de residuo o 500 Mg. de H <sub>2</sub> S/Kg. de residuo. Es capaz de producir radicales libres.
Explosividad	Un residuo se considera peligroso por su explosividad cuando tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del di nitrobenzeno. Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm <sup>2</sup> de presión.
Toxicidad al ambiente	Un residuo se considera peligroso por su toxicidad al ambiente cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la norma oficial mexicana NOM-053-ECOL-1993, el lixiviado de la muestra representativa que contenga cualquiera de los constituyentes listados en las tablas 5, 6 y 7 (anexo 5) en concentraciones mayores a los límites señalados en dichas tablas.
Inflamabilidad	Un residuo se considera peligroso por su inflamabilidad cuando en solución acuosa contiene más de 24% de alcohol en volumen. Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60°C. No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25°C y a 1.03 kg/cm <sup>2</sup> ). Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.
Biológico infecciosas	Un residuo con características biológico infecciosas se considera peligroso cuando el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección. Cuando contiene toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.

*FUENTE: NOM-052-ECOL-1993*

Además la norma incluye un listado de residuos considerados como peligrosos y los separa por giro industrial y por proceso. En este listado se incluyó en el Giro No. 9 a los residuos de la minería y específicamente se señalan los jales la concentración de minerales de antimonio, cobre, plomo y zinc. En la Tabla 5 se presenta la descripción de estos residuos como aparece en la norma.

**TABLA 5.** Clasificación de residuos peligrosos por giro industrial y proceso

NO. DE GIRO	GIRO INDUSTRIAL Y PROCESO.	CLAVE CRETIB	RESIDUO PELIGROSO	NO. INE
<b>9.</b>	<b>MINERIA</b>			
9.1	Extracción de Antimonio.	(T)	Jales y colas provenientes de la concentración del mineral.	RP9.1/01
9.2	Extracción de Óxidos de Cobre.	(T)	Residuos provenientes de la concentración del mineral a través de lixiviación por cementación de fierro seguido por precipitación del fierro.	RP9.2/01
		(T)	Residuos provenientes de la concentración del mineral por el proceso de lixiviación por vertido seguido por precipitación del fierro.	RP9.2/02
		(T)	Residuos provenientes del proceso de lixiviación in situ seguida por precipitación del fierro.	RP9.2/03
9.3.	Extracción de Pirita de Cobre.	(T)	Jales de la concentración del mineral por las técnicas de flotación y lixiviado en tina.	RP9.3/01
		(T)	Residuos provenientes de la concentración del mineral mezclados con óxidos de cobre usando la técnica de precipitación del fierro.	RP9.3/02
9.4	Extracción del Plomo Zinc.	(T)	Jales provenientes de la concentración de los sólidos por flotación.	RP9.4/01

*FUENTE: NOM-052-ECOL-1993*

También la norma establece los límites permisibles que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, en particular hace referencia a los metales pesados Ag, As, Ba, Cd, Cr (VI), Hg, Ni, Pb y Se, de los cuales algunos como la Ag, As, Ba, Cd, Hg, Ni y Pb se pueden encontrar en los jales.

Como se mencionó anteriormente, para determinar si un residuo es peligroso por su toxicidad, se realiza una prueba de extracción de acuerdo con la NOM-053-ECOL-1993 y en el extracto se analiza la concentración de los elementos metálicos mencionados y se expresa en mg/l; si la concentración de alguno de los elementos es superior al límite permisible indicado en la Tabla 6, entonces el residuo es peligroso por su toxicidad.



**Tabla 6.** Características del lixiviado (PECT) que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente.

<i>NO. DE INE</i>	<i>CONSTITUYENTES INORGANICOS.</i>	<i>CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/l)</i>
C.1.01	ARSENICO	5.0
C.1.02	BARIO	100.00
C.1.03	CADMIO	1.0
C.1.04	CROMO HEXAVALENTE	5.0
C.1.05	NIQUEL	5.0
C.1.06	MERCURIO	0.2
C.1.07	PLATA	5.0
C.1.08	PLOMO	5.0
C.1.09	SELENIO	1.0

FUENTE: NOM-052-ECOL-1993

Finalmente en términos generales y de acuerdo con lo señalado en esta norma, los jales sí eran considerados como residuos peligrosos, esto hasta hace algunos años cuando a mediados de la década de 1990 se comenzó a trabajar en una norma que regulara la disposición de los jales. Este proceso llevó muchos años pues fue hasta el año 2004 cuando entró en vigor una norma para evaluar la peligrosidad de los jales.

#### IV.4 NOM-141-SEMARNAT-2003.

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, establece los requisitos para caracterizar los jales y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.

Esta norma fue elaborada de acuerdo con lo dispuesto en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y hace las siguientes consideraciones de importancia:

- ❖ Los residuos provenientes de plantas de beneficio de minerales producen impactos significativos sobre el medio ambiente, por lo que se hace necesario su control
- ❖ Las presas de jales son uno de los sistemas para la disposición final de los residuos sólidos generados por el beneficio de minerales contemplados en el Reglamento de la LGEEPA en materia de residuos peligrosos, y deben reunir condiciones de máxima seguridad, a fin de garantizar la protección de la población, las actividades económicas y sociales y, en general, el equilibrio ecológico
- ❖ Los jales provenientes del beneficio de antimonio, de óxidos de cobre, de pirita de cobre, de plomo y de zinc, se encuentran listados como peligrosos en la NOM-052-ECOL-1993,
- ❖ El procedimiento establecido en la NOM-053-ECOL-1993 para llevar a cabo la prueba de extracción para la determinación de los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, NO es aplicable a los residuos mineros.

El objetivo de esta norma “*establece las especificaciones para la caracterización del jal y la caracterización del sitio, así como los criterios para la mitigación de los impactos ambientales por la remoción de la vegetación para el cambio de uso de suelo. Asimismo señala especificaciones y criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyectos, construcción, operación y postoperación de presas de jales, y para el monitoreo*”.

Como la industria minera se efectúa en áreas donde se encuentran localizados los yacimientos minerales, la operación conjunta se lleva a cabo en una misma área, para el caso de los jales como desechos sólidos, éstos se almacenan en espacios cercanos al lugar donde son generados, por esta razón se creó esta norma debido a que no pueden ser tratados como cualquier residuo debido a su composición y que al final permanecen almacenados en espacios diseñados para tal efecto sin tener contacto con otros agentes, por los posibles y/o probables problemas ecológicos y el riesgo que pueden representar para el ambiente en caso de falla de las presas, por lo que esta norma propone y dispone la elaboración de estudios a fondo en cuanto a la caracterización del sitio final de disposición.

Para este efecto, la norma especifica que deberán ser reportados los cambios que se vayan a realizar en el área como el del uso del suelo y cauces en terrenos forestales y zonas federales, también establece que se deben realizar las caracterizaciones del jal y del sitio, así como tomar en cuenta, la preparación del sitio, el proyecto, la construcción y operación, así como la postoperación y el monitoreo del sitio de disposición de los jales.

El inciso 5.2 de la norma se refiere a la caracterización del jal. Este inciso señala que las muestras de jal deben ser tomadas directamente en el área de almacenamiento o de las pruebas metalúrgicas realizadas al inicio de la operación minera. La peligrosidad de un jal se determina por dos características; su capacidad para liberar en forma soluble elementos potencialmente tóxicos o por su capacidad de generar drenaje ácido.

El inciso 5.2.1 establece que para determinar la toxicidad de los jales se aplica la prueba de extracción de los constituyentes tóxicos, de acuerdo con la prueba de extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> (indicados en los Anexos 1 y 5 de la norma). Si la concentración en el extracto de uno o varios de los elementos listados en la Tabla referente a los constituyentes tóxicos en el extracto PECT de la NOM-052-ECOL-1993, es superior a los límites permisibles señalados en la misma, los jales son peligrosos por su toxicidad.

El inciso 5.2.2 señala que para determinar si los jales son generadores potenciales de ácido, se deba aplicar la prueba modificada de Balance Ácido Base (indicada en el Anexo 1 y 5 de la norma),. En caso de que la relación Potencial de Neutralización (PN)/Potencial de Acidez (PA), sea menor a 1.2, se consideran generadores potenciales de ácido.

En el presente trabajo, se realizaron estas pruebas de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma para evaluar la peligrosidad de las muestras de jales.

La **caracterización del sitio** se realiza para la identificación de elementos del ambiente y biota que sean susceptibles a daño por el depósito de los jales, para esto se deben llevar a cabo diversos estudios como:

- ❖ *Aspectos Climáticos*, conocer la zona hidrológica, la precipitación media anual, la tormenta máxima observadas durante 24 horas, velocidad, dirección y frecuencia de los vientos; esto para prevenir daños a la cortina o derrames de excedencias.
- ❖ *Aspectos Edafológicos*, conocer la textura, conductividad eléctrica y pH del suelo donde se planea ubicar la presa.
- ❖ *Aspectos Geotécnicos*, tomando en especial consideración la estructura geológica general, determinando sus propiedades mecánicas como permeabilidad y resistencia; existencia de fisuramiento tomando en cuenta su orientación, amplitud, separación y profundidad; la existencia y presencia de intemperismo y el grado de éste; así como reconocer la región sísmica donde se ubique o pretenda ubicar la presa.
- ❖ *Aspectos Hidrológicos*, Superficiales y Subterráneos, para el caso superficial es necesario conocer la subcuenca hidrológica donde se encuentra la presa, el volumen medio anual del escurrimiento de la cuenca de interés, determinar el área de inundación de la subcuenca, y principalmente determinar la calidad del agua de

los cuerpos superficiales con base en los parámetros físicos y químicos: pH, conductividad, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, grasas y aceites, sólidos disueltos totales, cianuro total, coniformes fecales y metales como plomo, cadmio, cobre, zinc. Para el caso subterráneo, determinar la presencia de acuíferos y su vulnerabilidad.

❖ *Biodiversidad y ecosistemas frágiles o únicos*, identificar las especies listadas en la NOM-059-SEMARNAT-2001, así como la ubicación de ecosistemas frágiles o únicos.

❖ *Potencial de Daño*, Identificar centros de población, cuerpos de agua superficiales, ecosistemas frágiles, especies en riesgo o áreas de suelos agropecuarios que puedan ser afectados en caso de derrame o fuga por falla parcial o total de la cortina contenedora.

Los criterios de *preparación del sitio* están basados en los estudios de caracterización, esto es que si se llegaran a encontrar elementos ambientales vulnerables o susceptibles de daño por el depósito de jales, será necesario llevar a cabo la preparación del sitio a manera de evitar daño alguno o si existiera mitigarlo.

❖ Debe incluir medidas de prevención o control a la contaminación cuando, el jal resulte peligroso, se encuentre un acuífero vulnerable, así como aprovechamientos hidráulicos subterráneos a 500 metros alrededor del perímetro de la presa.

❖ Debe evitarse que el agua de la presa cuando se recircule entre en contacto con cuerpos naturales de agua.

❖ Identificar la flora, previo al desmonte y conservarla para su posterior resembrado. Siendo el desmonte y despalle realizados en forma gradual para evitar que la fauna se desplace hacia las zonas pobladas.

❖ Es primordial que el sitio seleccionado para la presa sea capaz de soportar y almacenar el volumen de jales proyectado.

Los *criterios de proyecto* se basan en una serie de factores establecidos como:

❖ Estimación del volumen de almacenamiento, clasificación por tamaño y peso volumétrico de los jales.

❖ La cortina contenedora debe cumplir con el análisis de estabilidad propuesto dentro de la norma.

❖ Se deben contemplar los escurrimientos pluviales que aportan carga hidráulica, causados por la precipitación máxima probable.

❖ La cortina contenedora se debe formar por suelos y materiales definidos o con fragmentos de rocas.

Los *criterios de construcción operación* deben seguir los siguientes criterios establecidos:

❖ Debe evitarse la degradación de la calidad del agua subterránea y la afectación de las fuentes de abastecimiento subterráneo.

❖ Las arcillas agrietadas, grietas abiertas en la roca, depósitos de materiales de derrumbe incrustados y suelos permeables, que se encuentren en el área, deben corregirse o mejorarse.

❖ Para la colocación de los materiales de la cortina debe alcanzarse el grado de compactación y humedad que se estipulen en cada proyecto en particular.

❖ Para el caso de que los jales se transporten mediante gravedad debe asegurarse que no se producirán derrames ni infiltraciones.

❖ Los primeros jales depositados deben retenerse para que el agua contenida en ellos se clarifique.

❖ Los jales podrán ser utilizados en la construcción de la cortina contenedora, siempre y cuando el contenido de arenas mayores a 76  $\mu\text{m}$  (malla 200) sea igual o mayor al 15% y su contenido de sólidos sea igual o mayor a 50%.

❖ Para la clarificación del agua dentro de la presa de jales se debe tener un área suficiente dentro de la presa de jales, esto es para facilitar la extracción de esta ya clarificada. La playa debe ser amplia con el nivel del agua alejada del talud.

Los **critérios de postoperación** se basan en una serie de factores establecidos para el fin de la vida útil de la presa dentro de los cuales se considera:

- ❖ La implementación de medidas para evitar la emisión de partículas sólidas a la atmósfera, formación de escurrimientos o callamiento de la presa.
- ❖ En caso de que los jales sean potenciales generadores de ácido se tomarán las siguientes medidas:
  - Cubrir con material mineral o agua para evitar la formación del drenaje
  - Evitar el uso de especies vegetales que promuevan la generación del ácido.
  - Establecer medidas de tratamiento para el drenaje ácido para evitar daños en cuerpos de aguas, suelos y sedimentos.
- ❖ La superficie debe ser cubierta con el suelo recuperado durante la preparación
- ❖ Las especies vegetales empleadas deben ser originarias de la región

El **Monitoreo**, debe manejarse mediante un programa establecido de acuerdo con los siguientes elementos:

#### *Monitoreo de aguas subterráneas*

- ❖ Se deben construir y operar como mínimo dos pozos de monitoreo, uno aguas arriba y el otro aguas abajo.
- ❖ De deberá realizar un muestreo semestral durante la construcción y preparación del depósito y uno anual durante un periodo determinado a partir de la fecha del cierre definitivo de la presa de jales.
- ❖ Cada pozo deberá contar con un registro detallado que indique el número y clave de identificación, ubicación geográfica, el corte litológico, las características constructivas como el diámetro, la profundidad total y el proyecto de terminación.

#### *Monitoreo de aguas superficiales*

- ❖ Especificar los puntos de muestreo aguas arriba y aguas abajo.
- ❖ Deben llevarse a cabo dos análisis de la calidad del agua superficial, el primero al finalizar la temporada de lluvias y el segundo durante el estiaje.

## CAPITULO V. TRABAJO EXPERIMENTAL

### V.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Desde hace varios años se han realizado diversas investigaciones para estudiar la toxicología de los residuos mineros y el fenómeno de generación de drenaje ácido tanto en las mina como en los jales. A partir de los estudios realizados se han desarrollado diversas pruebas, denominadas estáticas, que permiten predecir el comportamiento de los jales a través del tiempo y bajo las condiciones ambientales normales.

Las pruebas permiten determinar si los jales en el futuro podrán generar acidez, y bajo estas condiciones, valorar la disolución de los elementos metálicos contenidos en los jales. Entre las pruebas estáticas que más se utilizan están la prueba ABA modificada (por sus siglas en inglés, Acid Base Accounting), Balance Ácido Base y el Método Sobeck para medir el potencial de neutralización de los jales.

De acuerdo con los resultados y previa comparación con las Normas Oficiales Mexicanas es posible establecer la peligrosidad de un jal, haciendo hincapié en que es necesario conocer la composición mineralógica del jal, así como la ubicación geográfica y geológica de la presa de jales, los factores climáticos que predominan en la zona y la región de localización. Esta información es de gran importancia puesto que si los jales resultan peligrosos por su toxicidad y/o por la generación de drenaje ácido, los factores de dispersión como la lluvia y el viento, así como las características ambientales del entorno, determinan el riesgo que los jales pueden representar para el ambiente o para la salud del hombre.

El marco normativo para el caso específico de los jales es la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción y postoperación de presas de jales, y la NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Aquí se describen las pruebas realizadas para determinar la peligrosidad de tres muestras de jales de acuerdo con los procedimientos establecidos en la NOM-141-SEMARNAT-2003. Las muestras fueron tomadas en tres regiones mineras del país; la muestra (A) corresponde a la mina Tizapa, en el Estado de México, la muestra (B) es de la mina Santa Bárbara, en el Estado de Chihuahua y la muestra (C) es de la mina Pilares, Nacozari en el Estado de Sonora.

### V.2 CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA NOM-141-SEMARNAT-2003

La norma establece, con el fin de determinar la peligrosidad de los jales, que quien o quienes los generen deberán proceder de acuerdo con los siguientes puntos:

- 1.- Aplicar la prueba de extracción de los constituyentes tóxicos que pueden estar presentes en los jales, de acuerdo con el método "Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>" (procedimiento que se describe en la misma norma). En el extracto obtenido se cuantifica la concentración de los elementos que se encuentran listados en la tabla referente al extracto PECT de la NOM-052-ECOL-1993; en caso de que la concentración de uno o varios de los elementos sea superior a los límites permisibles señalados en dicha tabla, los jales son peligrosos por su toxicidad.

2.- Determinar la potencialidad de generación de ácido de los jales, de acuerdo con la prueba modificada de Balance Ácido Base, en la que se establece la relación Potencial de Neutralización (PN) / Potencial de Acidez (PA) (esta prueba se describe en la misma norma). En caso de que la relación PN/PA sea menor a 1.2, entonces se considera que el jal es potencial generador de ácido.

### V.3 METODOLOGÍA

Las pruebas se realizaron de acuerdo a como lo marcan los Anexos Normativos 1 y 5 de la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. La Norma estipula que se debe realizar un muestreo en la zona para poder realizar la caracterización de los jales, una vez obtenida la muestra se procedió a la preparación de las muestras así como el equipo y los reactivos a emplear.

Para el propósito de este trabajo se tomaron 3 muestras diferentes de las zonas especificadas haciendo un compósito del muestreo general realizado en las presas correspondientes. El muestreo en las presas se realizó mediante zanjias con pala mecánica, de 90 cm de profundidad.

Cada muestra se preparó homogeneizándola de acuerdo con el método de cono cuarteo y reducción de tamaño en los casos requeridos, una vez hecha la preparación se procedió a la realización de las pruebas establecidas en la norma NOM-141, para esto primero se realizó la prueba de extracción de Metales y Metaloides en Jales con agua en equilibrio con  $\text{CO}_2$ , la prueba se llevó a cabo en un agitador de jarras de seis paletas, para poder sincronizar las muestras debido a que la prueba tiene una duración en tiempo de 20 horas aproximadamente, contando el tiempo de acondicionamiento y manejo de las muestras y reactivos, por ser una prueba que conlleva un riesgo en la operación y considerando cualquier imprevisto en cuanto a operación ya que si se empleaba un agitador solo se tendría que realizar en tres días consecutivos, se utilizó el agitador para poder realizar la prueba en un día con diferencias de tiempo para poder llevar cada muestra por separado. Una vez obtenido el extracto (extracto PECT) fue acidulado con ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) grado técnico, para evitar la posible precipitación y pérdida de los metales en solución, y poder realizar la cuantificación. La cuantificación de metales y metaloides en el extracto se hizo mediante la técnica de absorción atómica.

Después se realizó la prueba modificada de Balance Ácido Base para Jales que contienen sulfuros minerales, en esta prueba se obtuvo el *potencial de neutralización* para cuantificar la cantidad de carbonatos presentes en la muestra mediante la adición de ácido clorhídrico (HCl) a temperatura ambiente y agitación durante 24 hr., y posteriormente se obtuvo el *potencial de acidez* para cuantificar la cantidad de sulfuros mediante el azufre total menos los sulfuros que contiene la muestra. Con estos resultados se obtuvo la relación PN/PA para determinar si los jales son potenciales generadores de ácido.

#### V.3.1 Preparación de las muestras

La preparación se inició con la homogeneización de la muestra y el cuarteo. Se utilizó el método de cono cuarteo para que las muestras fueran lo más homogéneas posibles en cuanto a tamaño de partícula y composición; para la prueba modificada de Balance Ácido Base para Jales que contienen sulfuros minerales se redujo el mineral a  $-76 \mu\text{m}$  ( $-200$  mallas), aunque cabe hacer notar que únicamente la muestra del Nacozari requirió de reducción de tamaño puesto que las otras muestras estaban a  $-76 \mu\text{m}$  ( $-200$  mallas).

De cada muestra homogeneizada y cuarteada se pesaron 200 g de muestra, de los cuales entre 65 y 72 g aproximadamente fueron empleados para la prueba extracción de Metales y Metaloides en Jales con agua en equilibrio con  $\text{CO}_2$ .

Para realizar la prueba de extracción primero se tomó el tiempo de acondicionamiento del agua destilada con el CO<sub>2</sub> hasta que llegara al valor aproximado de 5.5 de pH, para esto se bombeó aire a un vaso de precipitados con 1,500 ml de agua destilada, al cual se le introdujo un potenciómetro para medir los cambios de pH, de esta prueba se determinó que el tiempo que tarda el agua en alcanzar el pH de 5.5 es de 30 min.

Para la prueba modificada de Balance Ácido Base para Jales que contienen sulfuros minerales, se emplearon 10 g aproximadamente para la determinación del potencial de neutralización y potencial de acidez.

Finalmente para la lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica se empleó un gramo aproximado por muestra.

**Observaciones generales** la muestra de jal perteneciente a Tizapa presenta coloración gris oscuro, se encuentra suelta, aunque hay terrones compactados, la granulometría de estos jales se encuentra por debajo de las 76 µm (malla 200). Los jales de Santa Bárbara presentan coloración café rojizo, estos jales se presentan sueltos, no hay compactación, están prácticamente secos, la granulometría que se aprecia se encuentra por debajo de las 76 µm (malla 200). En los jales de Nacozari se observa una coloración verde amarillenta, esta muestra se aprecia húmeda, el tamaño de partícula se aprecia grueso, este se encuentra por arriba de las 76 µm (malla 200).

### V.3.2 Extracción de los elementos metálicos solubles

Primero se evaluó el *Contenido de sólidos*, este se obtuvo como un procedimiento de verificación para calcular el porcentaje de humedad que retienen las muestras, puesto que estas se encuentran secas.

La fracción de sólidos se obtuvo de acuerdo a la siguiente relación:

$$FS = P_S / P_H$$

Donde:

FS: Fracción de sólidos

P<sub>S</sub>: Peso seco de las muestras

P<sub>H</sub>: Peso húmedo de las muestras.

En segundo lugar se llevó a cabo el procedimiento de extracción de la siguiente manera: El acondicionamiento del agua destilada se realizó mediante bombeo de CO<sub>2</sub> atmosférico (Figura 20).



**Figura 20.** Acondicionamiento del agua destilada con CO<sub>2</sub>

La agitación se realizó durante 18 horas continuas a 30 rpm en un agitador de jarras de 6 paletas PHILIPPS & BIRD, modelo: PB-700™ JARTESTER, iniciándose cada muestra a tiempos diferentes de la cual se obtuvieron las siguientes observaciones:

**A) Jal de Tizapa, Estado de México,**

La muestra de jal presenta coloración gris oscura, en parte se observa compacta y en parte se observa suelta, de estos jales se pesaron 70.0032 g de jal y se adicionaron a un vaso de precipitado con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> preparada en el momento, el pH inicial de los jales es de 6.0, el pH de agua es de 5.3 y el pH de la muestra de jal con el agua es de 4.0, el vaso fue tapado quedando una mínima abertura para permitir el paso del aspa. Esta pulpa se puso a agitar en un agitador de jarras (Figura 21) a 30 rpm durante 18 horas a temperatura ambiente, el pH final de la solución fue de 6.0. Durante la operación se pudo observar lo siguiente:

Una vez hecho el acondicionamiento del agua con CO<sub>2</sub> y logrando alcanzar el pH de 5.3 se adicionó al jal, pudiendo apreciar que al momento de hacer contacto con el agua, este presentó efervescencia y liberación inmediata de gases quedando la porción fina en suspensión.

El vaso se colocó en el agitador de jarras iniciando la agitación a 30 rpm, pasada media hora de agitación todas las partículas se sedimentaron, observándose el movimiento lento pero continuo del jal al momento de la agitación.

A mitad del tiempo de agitación se observó sobre la superficie una mínima cantidad de sólidos, el que se encuentra en el fondo aparentemente presenta cambio de color, el movimiento de la agitación es perceptible, aunque por el peso de las partículas no se manifiesta mucho.

Al término de la agitación las partículas observadas en la superficie del agua, permanecieron ahí, el agua se ve completamente clara, el sólido en su parte superior muestra una coloración café.



**Figura 21.** Agitación del Jal de Tizapa, Estado de México

**B) Jal de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua,**

Se pesaron 70.0027 g de jal y se adicionaron a un vaso de precipitado con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> preparada en el momento, el pH inicial de los jales es de 6.0, el pH de agua es de 5.4, el vaso fue tapado quedando una mínima abertura para permitir el paso del aspa. Esta pulpa se puso a agitar en un agitador de jarras (Figura 22) a 30 rpm durante 18 horas a temperatura ambiente. Durante la operación se pudo observar lo siguiente:

Una vez hecho el acondicionamiento del agua con CO<sub>2</sub> y logrando alcanzar el pH de 5.4 se adicionó al jal, pudiendo apreciar que al momento de hacer contacto con el agua, hubo efervescencia, producida por los carbonatos que lo conforman, la solución tomó una coloración café claro, quedando partículas suspendidas en la solución, el pH de la solución con la muestra fue de 8.6 al inicio de la agitación.



El vaso se colocó en el agitador de jarras iniciando la agitación a 30 rpm y con una diferencia de una hora 20 minutos con respecto a los jales de Tizapa. A la mitad de la agitación se observa que hay partículas en suspensión y no se observa una sedimentación completa, dándole un color amarillo café a la solución; se observa presencia de vapor sobre las paredes del vaso y hay presencia de partículas sobre el agua.

Al finalizar la agitación quedó el agua del mismo color, los sólidos del fondo presentan una coloración café mostrando la evidencia de la agitación formando dos pequeñas “montañas”. Se midió el pH final de la solución y este resultó de 6.5



**Figura 22.** Agitación del Jal de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua

### ***C) Jal de la Mina Pilares, Nacoziari, Estado de Sonora,***

Se pesaron 65.0012 g de jal y se adicionaron a un vaso de precipitado con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub> preparada en el momento, el pH inicial de los jales es de 4.0, el pH de agua es de 5.6, el vaso fue tapado quedando una mínima abertura para permitir el paso del aspa. Esta pulpa se puso a agitar en un agitador de jarras (Figura 23) a 30 rpm durante 18 horas a temperatura ambiente. Durante la operación se pudo observar lo siguiente:

Una vez hecho el acondicionamiento del agua con CO<sub>2</sub> y logrando alcanzar el pH de 5.6 se adicionó el jal, pudiendo apreciar que al momento de hacer contacto con el agua, se presentó una coloración amarilla en la solución y en la superficie se formaron burbujas de aire, el pH de la muestra de jal con el agua medido es de 3.2.

El vaso se colocó en el agitador de jarras iniciando la agitación a 30 rpm y con una diferencia de 35 minutos con respecto a los jales de Santa Bárbara. A la mitad del tiempo de agitación se observa espuma color amarillo canario, hay sedimentación pero no completa, el sólido del fondo presenta una coloración verde claro sobre su superficie, curiosamente al centro del recipiente se observa un cono pequeño más marcado que en los otros dos recipientes.

Al término de la agitación las partículas suspendidas en la solución permanecieron así, el agua no presenta mucho cambio, se observa clara aunque de color amarillo, el sólido del fondo presenta una coloración café. Al medir el pH de la solución se obtuvo un valor de 4.0.



**Figura 23.** Agitación del Jal de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora

En la Figura 24 se puede apreciar una vista de las tres muestras en el momento de su agitación y en donde se puede observar que la muestra de Tizapa (frasco de la derecha) se ha sedimentado quedando una mínima parte de partículas finas en suspensión, la muestra de Santa Bárbara (frasco al centro) se observan partículas en suspensión dándole una coloración café a la solución, en la muestra de Mina Pilares, Nacozari (frasco de la izquierda) se observa claramente la coloración amarilla de la solución.

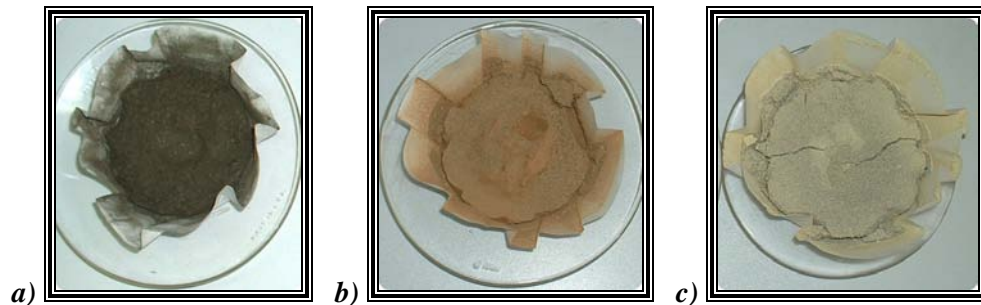
**Figura 24.** Vista de la Agitación de las tres muestras de Jal (a la izquierda se encuentra la muestra de Mina Pilares, Nacozari, en medio la muestra de Santa Bárbara y a la derecha la de Tizapa)



Al término de la agitación se hizo el filtrado de los extractos (Figura 25); éste se hizo al vacío con filtros Whatman 542 (2.5  $\mu\text{m}$ ). En general, en las tres muestras se obtuvo la solución completamente cristalina, la dos primeras muestras retuvieron mayor humedad que la tercera, en cuanto a apariencia física (Figura 26) no se observan grandes cambios en los sólidos de las muestras de jal de Tizapa, Estado de México y de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua, mientras que en la muestra del jal de Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora, se observan tonalidades más claras que la original, quedando el filtrado en capas formando estratos bien definidos de colores verdes y amarillo.



**Figura 25.** Filtrado



**Figura 26.** Residuos sólidos del filtrado a) jal de Tizapa, Estado de México, b) jal de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua, c) jal de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora

### V.3.3 Determinación de los elementos metálicos

En el extracto filtrado se hizo la determinación de los metales y metaloides mediante la técnica de absorción atómica por aspiración directa. Esta determinación se hizo de acuerdo con lo señalado en el Anexo Normativo 5 de la norma.

Para hacer la determinación se aciduló la solución del extracto con ácido nítrico, requiriendo cada muestra diferentes cantidades de  $\text{HNO}_3$ . La muestra de Tizapa requirió de 0.9 ml  $\text{HNO}_3$  para bajar de  $\text{pH} = 6.0$  a  $\text{pH} = 2$ ; la muestra de Santa Bárbara requirió de 2.4 ml  $\text{HNO}_3$  para bajar de  $\text{pH} = 6.5$  a  $\text{pH} = 2$ ; la muestra de la Mina Pilares, Nacozari requirió de 1.5 ml  $\text{HNO}_3$  para bajar de  $\text{pH} = 4$  a  $\text{pH} = 2$ .

Se prepararon tres soluciones estándar para realizar las lecturas de los elementos, previendo concentraciones elevadas se prepararon soluciones diluidas de cada mineral y extracto de 1:11, 0.1:10 y 2:7. Los elementos que se determinaron fueron cobre, plata, hierro, cadmio, plomo, níquel, zinc, bario, y selenio, el arsénico y mercurio se determinaron por generador de hidruros.

### V.3.3.1 Concentración total

La concentración total se mide a partir del sólido preparado expresado en mg/kg., para el cual la digestión del jal se realizó por medio de la disolución de un gramo aproximado de jal con 10 ml de ácido clorhídrico (HCl) y 10 ml de ácido fluorhídrico (HF) esta mezcla se puso en evaporación en una parrilla, al quedar el sólido se agregó nuevamente 10 ml de ácido clorhídrico (HCl) y 10 ml de ácido fluorhídrico (HF) y se volvió a poner en evaporación, se agregaron 5 ml de ácido clorhídrico (HCl) y 5 ml de ácido fluorhídrico (HF) más y nuevamente se llevó la mezcla a evaporación, los sólidos resultantes se disolvieron con ácido clorhídrico (HCl).

### V.3.3.2 Concentración de elementos solubles

La concentración de elementos solubles se mide a partir del extracto obtenido expresado en mg/l. Este extracto fue acidulado con ácido nítrico para preservar los elementos en forma soluble.

### V.3.4 Prueba de Balance Ácido – Base (ABA)

Esta prueba tiene como propósito caracterizar la peligrosidad de los jales por su reactividad, consiste en definir el balance entre los minerales potenciales generadores de ácido y los que son potencialmente consumidores de ácido, para esto es necesario obtener el potencial de neutralización y el potencial de acidez por separado.

#### V.3.4.1 Determinación del potencial de acidez

El objetivo en esta prueba es cuantificar la cantidad de sulfuros mediante el azufre total menos los sulfatos que contiene la muestra.

La determinación del Potencial de acidez se hizo de acuerdo con lo señalado en la Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. En ésta se establece que se tiene que determinar la cantidad de azufre total y la cantidad de azufre en forma de sulfatos, para lo cual se aplican las normas NMX-B-400-1970 y NMX-B-021-1982.

a) Para determinar el *azufre total* se empleó la **NMX-B-400-1970**, Que establece el Método de Análisis Químico para la determinación Gravimétrica de Azufre en minerales de Hierro.

Para realizar esta prueba se convino usar solo el 25 % de las cantidades requeridas tanto en muestras como en reactivos, debido a que el  $\text{HCl}_4$  es muy reactivo.

El método se aplicó de la siguiente manera: a 1.1425 g de jal se le adicionó ácido clorhídrico y se colocó en una parrilla a calor suave durante 30 minutos; posteriormente se le agregó ácido perclórico, lo que provocó una reacción inmediata de liberación de gases cuya evidencia fue una pequeña nube rojo intensa y fuerte olor picante; el vaso se puso nuevamente en la parrilla por 15 minutos y después se dejó enfriar.

Una vez frío se enjuagaron las paredes y cubierta del vaso, se colocó en una parrilla a calor suave por 10 min., se dejó enfriar un poco y se agregaron ácido clorhídrico (HCl) y granalla de Zn; se cubrió el vaso y se llevó nuevamente a calor suave hasta reducir el Fe. Esta solución se filtró en un vaso de precipitados de 400 ml, lavando posteriormente con HCl caliente.

Después del filtrado, la solución fue diluida a 250 ml y llevada a ebullición agregando cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2$ ) en solución. Posteriormente se dejó sedimentar de un día para otro y al día siguiente se filtró con un filtro de poro cerrado usando pulpa (la pulpa se formó con un poco de papel filtro en partes pequeñas para recolectar el precipitado obtenido), este precipitado se lavó con una solución caliente de  $\text{BaCl}_2$  y HCl hasta eliminar el Fe, posteriormente se lavó con agua caliente hasta eliminar el  $\text{Cl}_2$ .

Ya que se hubo filtrado todo y no hay presencia de Fe y  $\text{Cl}_2$  en el filtro, el papel con el precipitado se llevó a un crisol de porcelana, se introdujo a una mufla durante 15 minutos para secar y carbonizar el papel, sin permitir que éste se inflame; pasado este tiempo se dejó enfriar en un desecador y posteriormente se pesaron los calcinados.

*b)* Para determinar el **azufre** que se encuentra *en forma de sulfatos*, se empleó la **NMX-B-021-1982**. Que establece el método de prueba que se debe de emplear para la determinación de las tres formas más comunes de azufre (sulfatos, piritas y azufre orgánico).

#### *1. Determinación del azufre de los sulfatos*

Se pesaron exactamente 2 gramos de jal y se pusieron en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, a este matraz se le agregó ácido clorhídrico (HCl) en pequeñas cantidades agitando constantemente para humedecer perfectamente la muestra, para ayudar al proceso se añadieron unas gotas de etanol. Una vez que estuvo perfectamente incorporado el jal con el ácido clorhídrico se colocó en una parrilla calentada ligeramente y se dejó hervir durante 30 minutos. Pasados los 30 minutos se filtró empleando un papel filtro de poro medio, y se recogieron los lavados en un vaso de precipitados. El residuo y el papel filtro se lavaron con suficiente agua, para asegurar que se transfirió todo el extracto de ácido clorhídrico al vaso.

#### *2. Determinación final del azufre de los sulfatos*

Se agregó en exceso 1 ml de HCl, calentándose hasta ebullición y se adicionó lentamente solución de cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2$ ) agitando constantemente, se dejó hervir ligeramente durante 15 minutos y se dejó reposar (manteniendo caliente la solución) por dos horas. Pasado este tiempo se filtró la solución empleando un papel filtro sin cenizas y fue lavado con pequeñas cantidades de agua caliente hasta asegurar que el papel filtro estuviera libre de cloruros.

El papel filtro húmedo conteniendo el precipitado de sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ) se colocó en un crisol de porcelana, y se introdujo a un horno para quemar totalmente el papel, en forma gradual evitando que se quemara con la flama, se dejó calcinar, una vez calcinado se dejó enfriar el crisol en un desecador y posteriormente se pesaron los calcinados

#### *Sulfato en el blanco*

Se hizo una determinación en blanco siguiendo el mismo procedimiento y usando (excepto la muestra de jal) las mismas cantidades de todos los reactivos.

### **V.3.4.2 Determinación del potencial de neutralización**

El objetivo en esta prueba es cuantificar la cantidad de carbonatos presentes en la muestra mediante la adición de HCl a temperatura ambiente y agitación durante 24 hr.

#### *a) Medición cualitativa de carbonatos:*

Se pesaron aproximadamente 1 g de cada muestra de jal y se colocaron en un vidrio de reloj, se agregaron unas gotas de agua para humedecerlas y liberar el aire contenido entre los poros, posteriormente a cada una se le adicionaron gotas de HCl (25%) y se observó el grado de efervescencia que presentaron, observándose que para la muestra de Tizapa existió un pequeño burbujeo, para la de Santa Bárbara fue mayor y en la de la Mina Pilares, Nacozi no hubo, por lo que las muestras se calificaron como **bajo**, **moderado**, y **nulo**, respectivamente.

**b) Medición del Potencial de Neutralización**

Para esta prueba se pesaron aproximadamente 2 g de las muestras de jal, se colocaron en los matraces y se les adicionó agua destilada, a cada muestra se le agregó al inicio la cantidad de HCl 1.0 N que se indica en tabla 7 (especificada en la NOM-141) de acuerdo al grado de reacción y se puso en agitación durante 2 horas y a temperatura ambiente, pasado este tiempo se adicionó otra cantidad de ácido de acuerdo a la misma tabla 9, y reiniciando la agitación por 22 horas más (Figuras 27, 28 y 29), pasado este tiempo se midió el pH resultante, y se agregó mas HCl para dar el valor de pH 2.0 – 2.5 y agitando 2 horas más, al finalizar se realizó una titulación con NaOH 0.1 N hasta obtener un pH final de  $\pm 8.3$ .

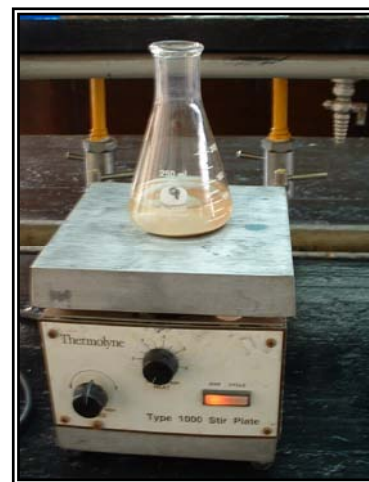
**Tabla 7.** Cálculo del volumen de HCl para determinar el PN

Grado de reacción (neutralización carbonatos)	HCl solución 1.0 N (ml)	
	“Tiempo 0”	“Tiempo 2 horas”
Nulo (Nacozari, Edo. De Sonora)	1.0	1.0
Bajo (Tizapa, Edo. De México)	2.0	1.0
Moderado (Santa Bárbara, Edo. De Chihuahua)	2.0	2.0
Fuerte	3.0	2.0

NOTA: Esta prueba se realizó dos veces debido a que la primera vez no se obtuvo el pH esperado, ya que al termino de las 22 horas de agitación las tres muestras presentaron un pH = 1.6, 1.5, 1.6, respectivamente, lo cual significa que hubo un exceso de ácido durante la prueba. Para la segunda prueba se decidió bajar la cantidad considerando las tres muestras como nulas y en lugar de adicionar 1.0 ml de HCl 1.0 N, se adicionó 0.25 ml de HCl 1.0 N.



**Figura 27.** Agitación de la muestra de Tizapa



**Figura 28.** Agitación de la muestra de Santa Bárbara



**Figura 29.** Agitación de la muestra de la Mina Pilares, Nacozari

### V.3.5 Análisis Mineragráficos

En vista de que la composición mineralógica es importante sobre todo si los jales contienen piritas o sulfuros en general, se determinó que era necesario conocer las composiciones de cada muestra, por lo que se decidió realizar un análisis mineragráfico para cada muestra.

Para cada muestra se obtuvo una lámina delgada y una briqueta, las cuales fueron analizadas mediante la técnica de Mineragrafía y petrografía, el equipo que se utilizó fue un microscopio de polarización AXIOLAP CARLSIESS, el analizador de imágenes es el KS-300, (este equipo se encuentra ubicado en el laboratorio 420 de Yacimientos Minerales) para los análisis se emplearon los aumentos de 10X, 25X y 50X,

## V.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran en resumen los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas para las tres muestras de jales.

### V.4.1 Concentración total de elementos metálicos

Los resultados de la determinación de la concentración total de metales y metaloides en las muestras de jales se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Concentración total de elementos metálicos contenidos en las tres muestras de jales

ELEMENTO	MÉTODO DE ABSORCIÓN	MUESTRA DE JAL (mg/kg)		
		TIZAPA	SANTA BÁRBARA	NACUZARI
Cu	Absorción Atómica	411.4	794.7	348.5
Ag		75.2	32.9	4.0
Fe		407,121.8	33,026.7	46,812.0
Cd		47.9	119.3	1.6
Pb		3,640.6	6,540.8	PDL D
Ni		30.2	PDL D	PDL D
Zn		5,936.3	11,518.2	76.1
Ba		PDL D	126.2	PDL D
Se		ND	ND	ND
As		Generador de Hidruros	445.1	229.8
Hg	ND		ND	ND

ND: No detectado

PDL D: Por Debajo del límite de detección

### V.4.2 Concentración de elementos metálicos solubles

Los resultados de la determinación de metales y metaloides solubles en los extractos obtenidos a partir de las muestras de jales, se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Concentración de elementos metálicos solubles contenidos en los extractos de las tres muestras de jales.

ELEMENTO	MÉTODO DE ABSORCIÓN	EXTRACTO (mg/l)		
		TIZAPA	SANTA BÁRBARA	NACOZARI
Cu	Absorción Atómica	0.7	0.04	13.3
Ag		PDL	PDL	PDL
Fe		36.0	PDL	99.4
Cd		0.7	0.09	PDL
Pb		2.7	PDL	PDL
Ni		0.5	PDL	PDL
Zn		70.8	2.3	10.9
Ba		PDL	PDL	PDL
Se	Generador de Hidruros	ND	ND	ND
As		5.6	1.3	1.5
Hg		ND	ND	ND

ND: No detectado

PDL: Por Debajo del límite de detección

Estos resultados se comparan con los límites permisibles señalados para metales y metaloides en la NOM-052-SEMARNAT-1993, para determinar si los jales son peligrosos. En la Tabla 10 se indican los límites permisibles de la norma mencionada.

**Tabla 10.** Características del lixiviado (PECT) que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente □

NO. DE INE	CONSTITUYENTES INORGANICOS.	CONCENTRACION MAXIMA PERMITIDA (mg/l)
C.1.01	Arsénico	5.0
C.1.02	Bario	100.00
C.1.03	Cadmio	1.0
C.1.04	Cromo Hexavalente	5.0
C.1.05	Níquel	5.0
C.1.06	Mercurio	0.2
C.1.07	Plata	5.0
C.1.08	Plomo	5.0
C.1.09	Selenio	1.0

□ Tabla tomada de la Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993

### V.4.3 Evaluación de la peligrosidad de los jales por su toxicidad

De acuerdo con los resultados obtenidos, en términos generales se observa que la concentración de metales y metaloides en los extractos está por debajo de los límites permisibles señalados en la NOM-052, a excepción del arsénico en los jales del Tizapa.



En el caso de los *jales de Tizapa, Estado de México*, éstos tienen un contenido total elevado de Cu, Fe, Cd, Pb y As, siendo el Cd, Pb y As los de mayor interés por sus características tóxicas y el riesgo que pueden representar para el ambiente.

Aún cuando hay presencia de Pb y Cd en los jales, éstos no están disponibles ya que en el extracto su concentración (2.7 y 0.7 mg/l, respectivamente) es inferior a los permitido en la NOM-052; aunque es interesante seguir el comportamiento del cadmio que está cercano al valor permisible. El plomo presenta una concentración importante que aunque no rebasa el límite si se logra lixiviar una parte del contenido en los jales. Sólo el arsénico presenta una concentración por arriba de los 5 mg/l que establece la norma.

Debido a la concentración del arsénico en el extracto se puede establecer que los jales de Tizapa, Estado de México **son peligrosos por su toxicidad al ambiente.**

Los *jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua* se tratan de minerales arcillosos que se encuentran ya oxidados, lo cual se aprecia por su coloración rojiza. A pesar de que estos jales presentan una concentración total importante de cadmio (119.3 mg/kg), plomo (6,540.8 mg/kg) y arsénico (229.8 mg/kg), la concentración soluble de estos elementos en el extracto, es inferior a los límites permisibles.

De acuerdo con los resultados, se puede establecer que los jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua **no son peligrosos por su toxicidad al ambiente.**

Los *jales de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora* provenientes de una región en donde la recuperación principal es el cobre, los elementos metálicos que predominan son: hierro, cobre y zinc; esto es explicable debido a la presencia de pirita, calcopirita y óxidos e hidróxidos de hierro. El contenido de elementos tóxicos como el cadmio y el arsénico es bajo, y en el caso del plomo está ausente.

La concentración de cadmio en el extracto está por debajo del límite de detección de la técnica analítica y en el caso del arsénico la concentración soluble es inferior a las concentraciones señaladas en la norma, por lo que se puede establecer que estos jales **no son peligrosos por su toxicidad al ambiente.**

#### V.4.4 Potencial de acidez

De las pruebas realizadas para determinar el potencial de acidez en las muestras de jales, los resultados del porcentaje de azufre total obtenidos se presentan en la tabla 11.

**Tabla 11.** Porcentaje de azufre total

MUESTRA	% S <sub>TOTAL</sub>
Tizapa	14.93
Santa Bárbara	0.14
Nacozari	2.93

De las pruebas para determinar el porcentaje de azufre en forma de sulfatos, los resultados se muestran a continuación en la tabla 12.

**Tabla 12.** Porcentaje de azufre contenido en forma de sulfatos

MUESTRA	% S <sub>SULFATOS</sub>
Tizapa	0.87
Santa Bárbara	0.07
Nacozari	0.66

El Potencial de Acidez (PA) expresado en Kg. de CaCO<sub>3</sub>/ton de jales, se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula

$$PA = \% S^{-2} * 31.25$$

$$\% S^{-2} = \% S_{TOTAL} - \% S_{SULFATOS}$$

Por lo tanto de acuerdo con los resultados obtenidos previamente el potencial de acidez (PA) se presenta en la tabla 13.

**Tabla 13.** Potencial de Acidez

MUESTRA	% S <sup>2-</sup>	PA
Tizapa	14.06	<b>439.37</b>
Santa Bárbara	0.08	<b>2.5</b>
Nacozari	2.27	<b>70.92</b>

#### V.4.5 Potencial de neutralización

Los resultados obtenidos en las pruebas para determinar el potencial de neutralización se resumen a continuación en las tablas 14 y 15.

**Tabla 14.** Adición de ácido clorhídrico 1.0 N y de hidróxido de sodio 0.1 N

MUESTRA	HCl solución 1.0 N (ml)				NaOH 0,1 N (ml)
	TIEMPO 0	TIEMPO 22	EXTRA	V <sub>f</sub>	
Tizapa	0.25	0.25	0.75	1.25	9.70
Santa Bárbara	0.25	0.25	1.50	2.00	10.00
Nacozari	0.25	0.25	0.50	1.00	12.00

**Tabla 15.** pH medido durante el tiempo de agitación

MUESTRA	pH			
	TIEMPO			NaOH 0,1 N
	INICIO	22	EXTRA	
Tizapa	6.0	4.10	2.10	8.50
Santa Bárbara	6.0	6.40	2.10	8.70
Nacozari	4.0	3.00	2.00	8.40

Para calcular el Potencial de Neutralización se empleó la siguiente fórmula:

$$PN = \frac{(V_f \text{ en ml de HCl}) - (0.1 * \text{Vol. en ml de NaOH})}{\text{Peso de la muestra (g)}} * 50$$

Por lo tanto de acuerdo con los resultados obtenidos el potencial de neutralización (PN) se muestra en la tabla 16.

**Tabla 16.** Potencial de Neutralización obtenido

MUESTRA	PN
Tizapa	<b>6.99</b>
Santa Bárbara	<b>24.99</b>
Nacozari	<b>-4.06</b>

#### V.4.6 Interpretación de la prueba de Balance Ácido – Base

En la NOM-141 se establece que si la relación PN/PA es mayor a 1.2 entonces los jales no son potenciales generadores de drenaje ácido, pero si la relación PN/PA resulta menor o igual a 1.2 entonces los jales serán potenciales generadores de ácido. El balance ácido-base para las tres muestras se presenta en la tabla 17.

**Tabla 17.** Relación Potencial de Neutralización / Potencial de Acidez (PN/PA)

MUESTRA	PN/PA
Tizapa	<b>0.02</b>
Santa Bárbara	<b>10.0</b>
Nacozari	<b>-0.06</b>

Para los *jales de Tizapa, Estado de México* cuya composición reportada en la muestra es de pirita, calcopirita y cuarzo, también hay presencia de esfalerita, galena y hematita - gohetita, la relación PN/PA resultó ser igual a 0.02 por lo tanto los **jales son potenciales de generar drenaje ácido.**

Para los *jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua*, compuestos por óxidos e hidróxidos de hierro, pirita y cuarzo, la relación PN/PA fue igual a 10.0 por lo tanto se trata de **jales que No son potenciales generadores de ácido.** lo que quiere decir que existe mayor cantidad de minerales neutralizadores que de minerales generadores de ácido.

Para los *jales de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora* los que se encuentran formados por cuarzo, pirita y calcopirita, la relación PN/PA es igual -0.06, en donde el resultado negativo se debió a que el potencial de neutralización se trata de un resultado negativo, lo que quiere decir que se tratan de jales con muy poca capacidad neutralizante y los **jales son potenciales de generar drenaje ácido.**

### V.4.7 Minerografía

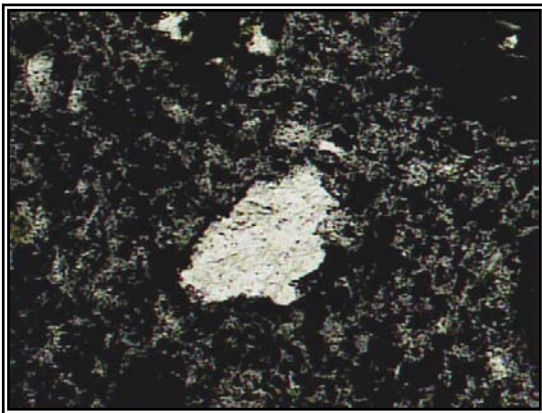
#### A) Jales de Tizapa, Estado de México

Estos jales están compuestos por partículas que van de angulosas a sub angulosas, y las conforman partículas mixtas de pirita, esfalerita, galena y calcopirita, así como mineral transparente. Hay presencia de monominerales de pirita y mineral transparente. También se encontró que hay minerales óxidos e hidróxidos de Fe como: hematita y goethita – limonita.

La proporción en que se encuentran los minerales es la siguiente:

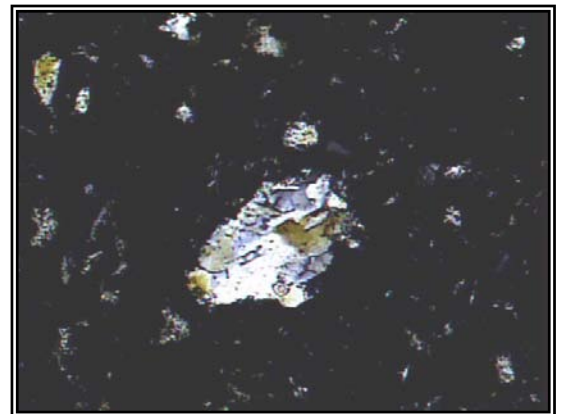
Mineral	%
Pirita	30
Mineral Transparente	65 (M.T. más resina)
Esfalerita	2
Galena	≤ 1
Calcopirita	≤ 1
Hematita, Goethita - Limonita	≤ 1

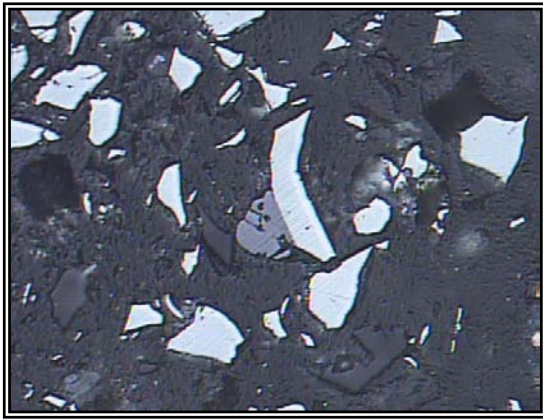
Siendo la pirita el principal mineral generador de drenaje ácido y dada la proporción en que se encuentra (30%), se confirma la capacidad que tienen estos jales para generar ácido.



**Figura 30.** En esta imagen se puede observar la presencia de cuarzo, la zona diseminada que se puede apreciar se trata material arcilloso, producto de alteración. *La imagen está tomada con luz paralela y aumento de 10x.*

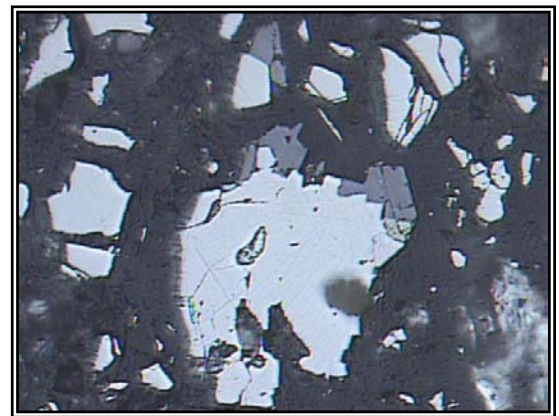
**Figura 31.** En esta imagen se observa una partícula de cuarzo policristalino, en una matriz arcillosa. *La imagen está tomada con aumento 10x y nicoles cruzados.*





**Figura 32.** En esta imagen se pueden observar partículas de pirita (coloración amarilla), galena y esfalerita, se identifican también partículas angulosas a sub angulosas, *la imagen está tomada con aumento de 50x y luz paralela.*

**Figura 33.** Aquí se pueden apreciar partículas minerales de esfalerita, calcopirita y pirita, *la imagen está tomada con aumento de 50x y luz paralela*



### ***B) Jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua***

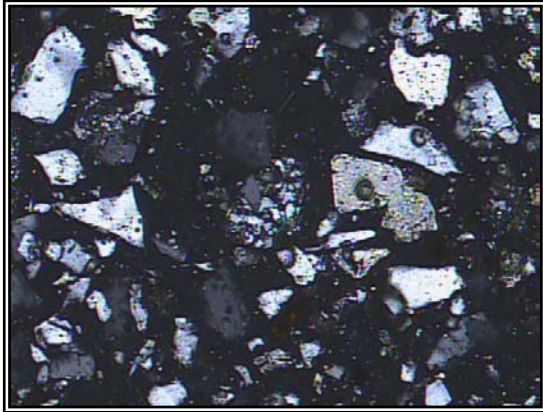
Después de analizar las briquetas y las láminas se observa que los jales corresponden a una zona de oxidación intensa, denotada por el color ocre intenso y la abundancia de óxidos e hidróxidos de Fe (hematita y goethita – limonita).

Estos jales están compuestos por partículas que van de angulosas a sub redondeadas, y las conforman partículas en su mayoría de mineral transparente, hematita, goethita – limonita y pirita, también se observa la presencia de pirita con reemplazamiento parcial a total por óxidos e hidróxidos de Fe, formando núcleos corroídos y sinuosos. Se pueden apreciar partículas monominerales de mineral transparente, óxidos e hidróxidos de Fe.

La proporción en que se encuentran los minerales es la siguiente:

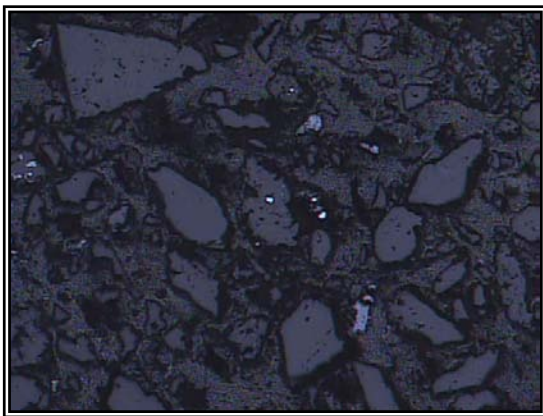
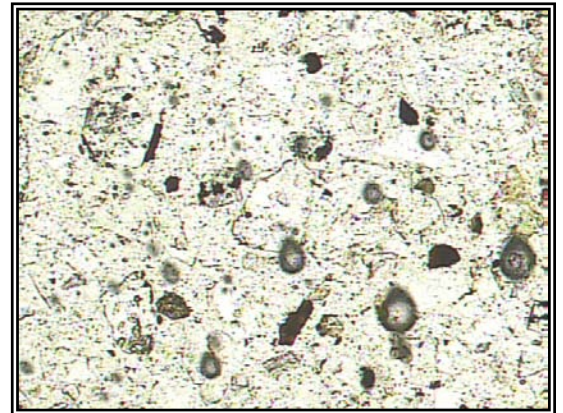
Mineral	%
Mineral Transparente	88
Hematita, Goethita – Limonita	10
Pirita	2

La baja proporción de pirita en estos jales también corrobora el hecho de que no sean generadores potenciales de ácido.



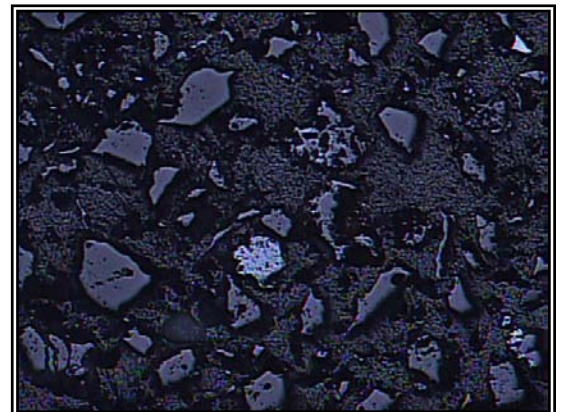
**Figura 34.** En esta imagen se aprecian partículas minerales de carbonato de calcio (calcita), así como facies inestables de cuarzo mono y policristalino, la imagen fue tomada con aumento de 25x y nicoles cruzados.

**Figura 35.** Esta imagen complementa a la anterior en donde se aprecia perfectamente el material arcilloso (zona punteada) que circunda al cuarzo, la imagen fue tomada con aumento 25x y luz paralela.



**Figura 36.** En esta figura se pueden apreciar partículas de pirita, sulfuros, óxidos, y óxidos diseminados con material transparente. En esta imagen se aprecia una pequeña partícula de pirita encapsulada en material transparente, la imagen fue tomada con aumento 50x y luz paralela.

**Figura 37.** En esta imagen se aprecian partículas minerales de hematita, en los bordes se alcanza a apreciar la alteración a hidróxidos de Fe, también se aprecian pequeñas partículas de pirita, esta imagen fue tomada con aumento de 50x y luz paralela



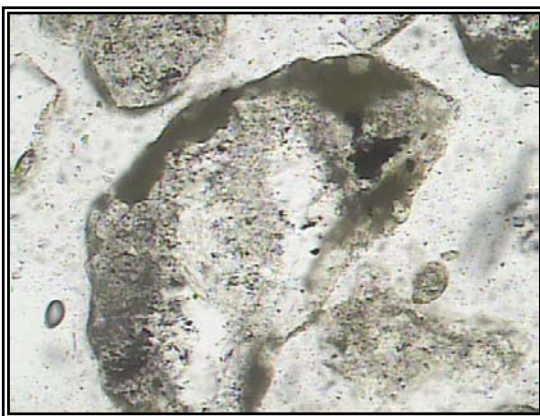
***C) Jales de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora***

Después de analizar las briquetas y las láminas se obtuvo que estos jales están constituidos por partículas que van de angulosas a sub redondeadas, y las conforman partículas monominerales de mineral transparente, óxidos e hidróxidos de Fe: pirita, calcopirita y partículas mixtas de mineral así como mineral transparente.

La proporción en que se encuentran los minerales es la siguiente:

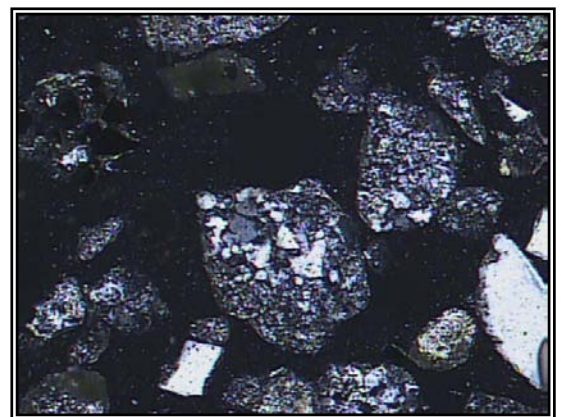
Mineral	%
Mineral Transparente	88
Óxidos e Hidróxidos de Fe	8
Pirita	4
Calcopirita	< 1

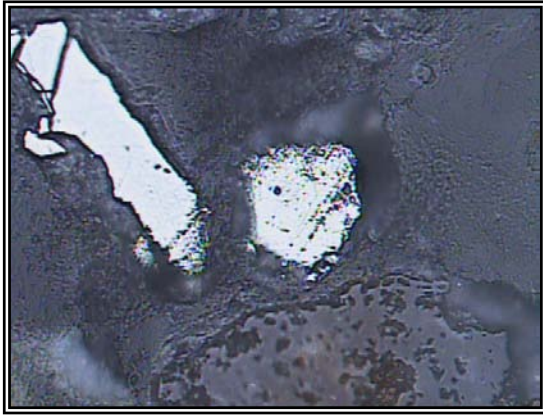
Aún cuando la proporción de pirita es ligeramente mayor a la reportada para los jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua, estos jales son potenciales generadores de ácido y esto se debe a la falta de minerales con capacidad de neutralización.



***Figura 38.*** Partícula de cuarzo con intercrecimiento de minerales, la zona punteada se trata de material arcilloso. *Esta imagen fue tomada con aumento de 10x y luz paralela.*

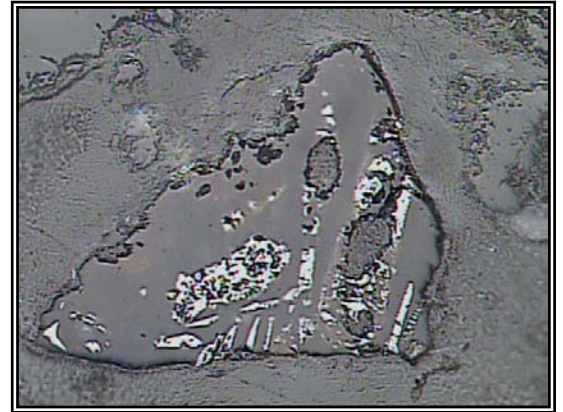
***Figura 39*** Aquí se aprecian partículas minerales de cuarzos mono y policristalinos, *esta imagen se tomó con aumento de 10x y nicoles cruzados.*





**Figura 40** La imagen muestra partículas de mineral sulfuroso, (pirita), en cuyo alrededor se aprecia alteración de pirita a goethita limonita, en la parte inferior derecha se observan hidróxidos de Fe. Esta imagen fue tomada con aumento de 50x y luz paralela.

**Figura 41.** En esta imagen se pueden apreciar partículas de hematita transformándose a goethita limonita, también se pueden observar óxidos e hidróxidos de hierro, la imagen se tomó con aumento de 50x y luz paralela.





## **CAPITULO VI.**

# **EVALUACIÓN DEL RIESGO POTENCIAL ASOCIADO A LAS MUESTRAS ANALIZADAS**

Después de haber realizado las pruebas para determinar la peligrosidad de las tres muestras de jales de acuerdo con la NOM-141-SEMARNAT-2003, a continuación se hace una evaluación cualitativa del riesgo potencial que estos jales representan para el ambiente.

Cada una de las presas donde se almacenan los jales analizados tienen características particulares, desde su ubicación geográfica hasta la forma como se ha hecho el almacenamiento; además, las condiciones ambientales del entorno determinan junto con la peligrosidad del jal, el riesgo potencial que éstos representan. De esta forma, se hará una descripción general de cada uno de los casos indicando los riesgos potenciales para el ambiente.

### **VI.1 JALES DE TIZAPA, ESTADO DE MÉXICO**

La Compañía minera que se encarga de explotar los yacimientos que se encuentran dentro del distrito es relativamente nueva, es decir la explotación de estos yacimientos es reciente (si se hace la comparación con otras minas que tienen muchos años en operación).

Los cuerpos mineralizados de la mina Tizapa se encuentran encajonados en una secuencia vulcanosedimentaria afectada por un metamorfismo de bajo grado en facies de esquisto verde, en el interior de la mina estos cuerpos se observan en forma de cuerpos lenticulares, sulfuros masivos y sulfuros diseminados, dispuestos concordantemente a la foliación de la roca encajonante la cual está compuesta localmente por una interdigitación de filitas grafiticas y esquistos de clorita, biotita, moscovita y cuarzo feldespáticos.

Estos yacimientos están compuestos principalmente de pirita, esfalerita, galena, arsenopirita y calcopirita con cantidades pequeñas de pirrotita, tetrahedrita, argentita. La roca encajonante se trata de una secuencia vulcano sedimentaria con metamorfismo de facies de esquisto verde, constituida por filita granítica con intercalaciones complejas de esquistos de clorita y moscovita y pizarra carbonosa. A excepción de la esfalerita, galena y argentita que son los principales minerales de mena, los demás minerales se encuentran presentes en los jales en mayores proporciones.

De acuerdo con el análisis minerográfico realizado se sabe que estos jales presentan una concentración de óxidos e hidróxidos de hierro como hematita, goethita – limonita del  $\leq 1$  %, de esfalerita 2 %, de galena  $\leq 1$ %, de calcopirita  $\leq 1$  %, de pirita del 30% y de mineral transparente 65 %, análisis que indica una descomposición de minerales primarios y abundancia de material silíceo manifestado como mineral transparente, también se observa una mínima presencia de mineral de mena cuyos fragmentos son muy pequeños. La alta proporción de pirita en el mineral explica la potencialidad de estos jales para generar drenaje ácido y esto conduce a la necesidad de tomar medidas preventivas para que a futuro se evite o se controle la generación de drenaje ácido.

Por otro lado, el clima de la zona es húmedo y con abundante precipitación, lo cual resulta importante porque este es un factor adicional que favorece la oxidación de la pirita; además de que la precipitación pluvial ocasiona la erosión de los jales y en un futuro esto puede representar un problema ambiental.

Las pruebas realizadas a los jales revelaron que en esta muestra hay presencia de Cu, Ag, Fe, Cd, Pb, Ni, Zn y As como elementos metálicos contenidos, aunque hay presencia de éstos 8 elementos se observa un contenido total elevado en la concentración de elementos metálicos solubles para el caso de Cu, Fe, Cd, Pb, Ni, Zn, As, siendo el Cd, Pb y As elementos de interés por estar listados en la NOM- 052 como elementos peligrosos, es importante señalar que aunque los tres se encuentran listados, el Pb y Cd en los jales, no están disponibles ya que en el extracto su concentración (2.7 y 0.7 mg/l, respectivamente) es inferior a lo permitido en la norma; aunque es interesante seguir el comportamiento del cadmio que está cercano a su valor permisible, en el caso del plomo éste presenta una concentración importante que aunque no rebasa el límite si se logra lixiviar una parte del contenido en los jales; sólo el arsénico presenta una concentración de 5.6 mg/l por arriba de los 5 mg/l que establece la norma.

**Tabla 18.** Comparación de los elementos metálicos totales y solubles con las cantidades máximas permitidas en la norma, para Tizapa, Estado de México.

ELEMENTO	CONCENTRACIONES		
	Elementos Metálicos Totales (mg/kg)	Elementos Metálicos Solubles (mg/l)	Máximas permitidas * (mg/l)
Cu	411.4	0.7	NA
Ag	75.2	-	5.0
Fe	407,121.8	36.0	NA
Cd	47.9	0.7	1.0
Pb	3,640.6	2.7	5.0
Ni	30.2	0.5	5.0
Zn	5,936.3	70.8	NA
As	445.1	5.6	5.0

\* Norma Oficial Mexicana: NOM-052-ECOL-1993

NA: No Aplica en la norma

En relación a la prueba de balance ácido - base estos jales presentaron un potencial de acidez (PA) de 439.37 y un potencial de neutralización (PN) de 6.99, lo que resulta una relación PN/PA = 0.0157, lo que indica la presencia de mayor cantidad de minerales capaces de generar ácido que de minerales capaces de neutralizar el ácido.

Por lo anteriormente expuesto los jales resultaron ser peligrosos por su toxicidad y por su potencial para generar ácido. Esta característica ocasiona que algunos de los elementos metálicos y metaloides que se encuentran en los jales, como es el caso del cadmio y del arsénico, puedan solubilizarse con el tiempo y puedan ser transportados por el agua. Aunque el arsénico es el único elemento que en el extracto estuvo por arriba de los límites permisibles señalados en la norma, la concentración de cadmio fue cercana al valor recomendado y esto señala que deberá ponerse atención a este elemento en el futuro.

Actualmente esta presa está en operación y no presenta problemas por la liberación de jales. La saturación de los jales con agua impide la oxidación de la pirita y por otro lado la dispersión de los jales. Se debe considerar también que la zona donde se ubica la mina, es una zona hidrológicamente muy importante (la cual pertenece a la región del río Balsas) por el caudal de los acuíferos con que cuenta y su importancia como fuente de abastecimiento para el Valle de México.

A continuación se presentan algunas fotografías en donde se pueden apreciar las condiciones de la presa de jales.



**Figura 42.** Vista de la presa en la que se observa la playa y el agua.

**Figura 43** Panorámica de la presa de jales del Estado de México





*Figura 44.* Toma de muestra en la presa de jales

## **VI.2 JALES DE SANTA BÁRBARA, ESTADO DE CHIHUAHUA**

La explotación de este yacimiento se remonta a tiempos de la colonia y el distrito minero comprende un raro sistema complejo de vetas de cuarzo sobre pizarra, con minerales sulfurados, siendo la composición principal de estos yacimientos: esfalerita, galena y calcopirita. Las diferentes clases de rocas que forman parte del yacimiento de Santa Bárbara son: pizarra, andesita, riolita, conglomerado, diabasa, basalto y sedimentos no consolidados como grava, cantos rodados y arenas derivados de la pizarra, caliza, riolita, así como de varios tipos de andesita, y basalto.

Los minerales primarios y secundarios identificados en el distrito son 3 de los cuales los que hacen posible la explotación comercial son los sulfurados de zinc, plomo y cobre. La distribución en orden de abundancia no es igual en todas las vetas, pero un promedio generalizado nos da el siguiente orden: esfalerita, galena y calcopirita, además se encuentran también marmatita, pirita, arsenopirita, oro nativo, argentita.

El mineral de ganga predominante es el cuarzo que frecuentemente se encuentra acompañado de silicatos de alteración como granate, diopsida, ortoclasa, hedenbergita, piroxenos, epidota y clorita; la calcita, fluorita, barita, pirita y arsenopirita, también se incluyen en la ganga. Los más importantes en orden de abundancia son: cuarzo, calcita, pirita y fluorita.

De acuerdo con el análisis minerográfico realizado se observó que estos jales presentan una concentración de óxidos e hidróxidos de hierro como hematita, goethita – limonita del 10%, de pirita del 2% y de mineral transparente 88 %, análisis que indica una descomposición de minerales primarios y abundancia de material silíceo manifestado como mineral transparente, además de que físicamente se observa la coloración rojiza típica de la oxidación. El bajo porcentaje de pirita reportado en este análisis confirma el bajo potencial para generar ácido que se determinó en las pruebas de laboratorio.

Pese a que la región en que se encuentra esta presa es seca con temperaturas elevadas y escasa precipitación pluvial, la presa de jales muestra evidencias de una fuerte erosión hídrica que ha formado grandes cavidades por el arrastre de los jales. Dado que esta presa seguramente es la más antigua de la zona, la forma como se almacenaron los jales no permitió la separación del material por el tamaño de partícula, lo cual hubiera permitido dar una mayor resistencia a la cortina de la presa.

Para el caso de estos jales provenientes de Santa Bárbara se encontró, de acuerdo a las pruebas realizadas, que hay presencia de elementos metálicos como Cu, Ag, Fe, Cd, Pb, Zn, Ba y As, a pesar de que estos elementos existen sólo el Cu, Cd, Zn y As se encuentran presentes como elementos metálicos solubles, de los cuales el Cd y el As se encuentran listados en la norma pero las cantidades reportadas se encuentran por abajo del límite permisible.

**Tabla 19.** Comparación de los elementos metálicos totales y solubles con las cantidades máximas permitidas en la norma, para Santa Bárbara, Estado de Chihuahua.

ELEMENTO	CONCENTRACIONES		
	Elementos Metálicos Totales (mg/kg)	Elementos Metálicos Solubles (mg/l)	Máximas permitidas * (mg/l)
Cu	794.7	0.04	NA
Ag	32.9	-	5.0
Fe	33,026.7	-	NA
Cd	119.3	0.09	1.0
Pb	6,540.8	-	5.0
Zn	11,518.2	2.3	NA
Ba	126.2	-	100.0
As	229.8	1.3	5.0

\* Norma Oficial Mexicana: NOM-052-ECOL-1993  
NA: No Aplica en la norma

En relación a la prueba de balance ácido - base estos jales presentaron un potencial de acidez (PA) de 2.5 y un potencial de neutralización (PN) de 24.99, lo que resulta una relación PN/PA = 10.0, lo que indica la presencia de mayor cantidad de minerales capaces de neutralizar el ácido que de minerales capaces de generar ácido. Además cabe hacer notar que estos minerales se encuentran oxidados por lo que su capacidad para generar ácido ha disminuido.

Es importante señalar que estos jales muestran evidencias de dispersión eólica, originada por los vientos predominantes y aunque existe una población muy cercana a la presa, esta no se ve afectada debido a que la dirección del viento arrastra las partículas en sentido opuesto, originando que los jales sean depositados sobre el suelo, pero por la misma capacidad neutralizante de los jales y las condiciones de óxido reducción en los suelos, estos no representan riesgo porque no disponen de elementos tóxicos.

De acuerdo con las pruebas realizadas, estos jales resultaron NO peligrosos por su toxicidad y NO generadores de drenaje ácido; esto representa una ventaja desde el punto de vista ambiental ya que aún cuando ha habido dispersión de los jales hacia un arroyo cercano, el cual es de temporal, éstos no representan riesgo para el ambiente; sin embargo, es importante considerar que hay cierta solubilidad de elementos como arsénico y cadmio, que si bien es inferior a los límites permisibles señalados por la norma, en otras condiciones ambientales pudieran liberarse en mayores concentraciones.

Se presenta una serie de fotografías en donde se pueden apreciar las condiciones que presentan los jales



**Figura 45.** Vista general de la presa en donde se observa una clara erosión pluvial, originada por el escurrimiento de agua por las laderas, también se puede observar el desprendimiento de una parte de la presa debido al agua

**Figura 46.** Esta es una vista panorámica de diferentes presas en la parte central baja de la fotografía se aprecia un río





**Figura 47.** Aquí se observa el arrastre de los jales por el cauce natural de un río seco.

**Figura 48.** En esta imagen se observan perfectamente las evidencias de erosión fluvial se trata de grandes grietas en las que cabe perfectamente una persona



### VI.3 JALES DE LA MINA PILARES, NACUZARI, ESTADO DE SONORA

Se tratan de jales antiguos, aunque la historia minera de la región se remonta al año de 1688, estos jales se produjeron en la primera mitad del siglo pasado. La apariencia de los jales en conjunto es de alteración por oxidación ocurrida con el correr de los años.

El yacimiento que se explotó en esta zona es del tipo brecha, con enriquecimiento supergénico originando cuerpos de sulfuros secundarios principalmente de calcosita. Las diferentes clases de rocas que se encuentran

en la unidad son lutita – andesita y pórfidos cupríferos. Las mineralizaciones en la zona consisten principalmente de cobre, en forma de sulfuros generalmente acompañados de plata y molibdeno; esfalerita, galena, azurita, especularita y cuarzo además de pirita, calcosita, calcopirita, malaquita, hematita y limonita.

De acuerdo con el análisis minerográfico realizado se sabe que estos jales presentan una concentración de óxidos e hidróxidos de hierro del 8 %, de pirita del 4 %, de calcopirita < 1 %, y de mineral transparente 88 %, análisis que indica una descomposición de minerales primarios. El contenido de pirita, aunque es bajo, justifica que estos jales sean potenciales generadores de ácido.

En la región donde se ubican los jales se conocen dos tipos de climas semicálido seco, cuya temperatura media anual es de 18°C a 22°C, con precipitación media anual de 300 a 500 mm., y templado semiseco, con una temperatura media anual de 16°C a 18°C, y precipitación media anual de 300 a 400 mm. En términos generales se trata de una zona árida en donde casi no llueve, pero hay presencia de vientos que han ido dispersando los jales alrededor de la presa.

En estos jales, provenientes de la mina Pilares, se encontró de acuerdo a las pruebas realizadas que hay presencia de elementos metálicos como Cu, Ag, Fe, Cd, Zn, y As; de estos elementos sólo el Cu, Fe, Zn y As se encuentran presentes como elementos metálicos solubles; el arsénico es el único que se encuentra listado en la NOM-052, aunque la cantidad soluble es baja y está por debajo del límite de la norma.

**Tabla 20.** Comparación de los elementos metálicos totales y solubles con las cantidades máximas permitidas en la norma, para Nacoziari, Estado de Sonora.

ELEMENTO	CONCENTRACIONES		
	Elementos Metálicos Totales (mg/kg)	Elementos Metálicos Solubles (mg/l)	Máximas permitidas * (mg/l)
Cu	348.5	13.3	NA
Ag	4.0	-	5.0
Fe	46,812.0	99.4	NA
Cd	1.6	-	1.0
Zn	76.1	10.9	NA
As	9.3	1.5	5.0

\* Norma Oficial Mexicana: NOM-052-ECOL-1993  
NA: No Aplica en la norma

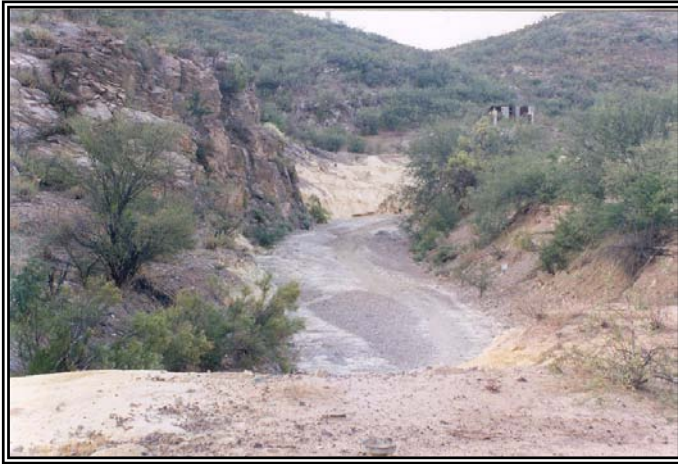
Con relación a la prueba de balance ácido - base estos jales presentaron un potencial de acidez (PA) de 70.92 y un potencial de neutralización (PN) de -4.06, lo que resulta una relación PN/PA = -0.06, lo que indica la presencia de mayor cantidad de minerales capaces de neutralizar el ácido que de minerales capaces de generar ácido. Además cabe hacer notar que estos minerales se encuentran oxidados por lo que su capacidad para generar ácido ha disminuido.

De las pruebas realizadas, estos jales resultan No peligrosos por su toxicidad, aunque si son generadores de ácido; una característica observada fue que el potencial de neutralización resultó con valor negativo, lo que indica una capacidad nula de los jales a la neutralización.

Las concentraciones de elementos metálicos en solución obtenidas fueron bajas, se observa disponibilidad de cobre, hierro, zinc y arsénico; este último en concentraciones inferiores a la establecida en la norma. Aunque hay lixiviación de arsénico, que es un elemento tóxico, las concentraciones en las que se libera no representan riesgo para el ambiente. Sin embargo, el principal problema de esta presa es que se encuentra asentada a un costado del cauce de un arroyo y con el tiempo los jales han sido arrastrados por el agua.



A continuación se presentan fotografías en donde se pueden apreciar las condiciones que presenta la presa de jales.



**Figura 49.** Vista del río con los jales sobre su cauce (arroyo).

**Figura 50.** Otra vista de los jales en donde se muestra su arrastre



**Figura 51.** Aquí se puede observar claramente la presa al fondo y el cauce del arroyo, en cuya superficie se ven los jales.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, permiten establecer las siguientes conclusiones:

A) Los *jales de Tizapa, Estado de México* provienen de un yacimiento que de acuerdo con la literatura contiene pirita, esfalerita, calcopirita, freibergita, pirrotita, y arsenopirita. A pesar del tiempo de explotación que tiene este yacimiento (en comparación con otras unidades mineras) los jales dentro de la presa se encuentran reducidos, de acuerdo con el análisis minerográfico los jales están compuestos por minerales de: pirita (30%), mineral transparente dentro del que se encuentra el cuarzo (65%), esfalerita (2%), galena ( $\leq 1$ ), calcopirita ( $\leq 1$ ), hematita, goethita – limonita ( $\leq 1$ ).

Estos jales presentan una concentración total de elementos metálicos de 411.4 mg/kg. de Cu, 75.2 mg/kg de Ag, 47.9 mg/kg. de Cd, 3640.6 mg/kg de Pb, 30.2 mg/kg de Ni, y 445.1 mg/kg de As. Y la concentración de elementos metálicos solubles contenidos en los extractos es de **0.7 mg/l de Cd**, 2.7 mg/l de Pb, 0.5 mg/l de Ni, **5.6 mg/l de As**, siendo el Cd, Pb y As los de mayor interés por sus características tóxicas y el riesgo que pueden representar para el ambiente.

Aún cuando se observa presencia de Pb y Cd en los jales, estos no se encuentran disponibles debido a que en el extracto la concentración de estos elementos es inferior al límite permisible señalado en la NOM-052-SEMARNAT-1993, la cual es para Pb de 5.0 mg/l y para Cd de 1.0 mg/l; aunque es interesante seguir el comportamiento del cadmio que está cercano al valor permisible. El plomo presenta una concentración importante que aunque no rebasa el límite si se logra lixiviar una parte del contenido en los jales. Sólo el arsénico presenta una concentración por arriba de los 5 mg/l que establece la norma. Debido a la concentración del arsénico en el extracto se puede establecer que los jales de Tizapa, Estado de México **son peligrosos por su toxicidad al ambiente**.

De la prueba Balance Ácido-Base se obtuvo que la relación PN/PA resultó ser igual a 0.0159 (menor a 1.2 que marca la norma) por lo tanto los **jales son peligrosos por su potencial de generación de ácido**.

Actualmente esta presa está en operación por lo que los jales están saturados con agua, lo que evita la oxidación de los jales, aunque la alta proporción de pirita en el mineral, reportada en el análisis minerográfico explica la potencialidad de estos jales para generar drenaje ácido; por esta razón es necesario tomar medidas preventivas para que a futuro se evite o se controle la generación de drenaje ácido en caso de que se presente. La presa no presenta ningún problema de inestabilidad en su conjunto ni ha presentado derrames de jales, por lo cual no ha ocurrido afectación alguna en el entorno.

B) Los *jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua* de acuerdo con el análisis minerográfico realizado tienen una composición de Mineral transparente dentro del que se encuentra el cuarzo (88%), Esfalerita (2%), Hematita, Goethita – limonita (10%), Pirita (2%). Además se trata de minerales que se encuentran ya oxidados delatado por su coloración rojiza, aunque la literatura establece que el yacimiento del cual provienen los jales está conformado por esfalerita, galena y calcopirita, además se encuentran también marmatita, pirita, arsenopirita, oro nativo, argentita. El mineral de ganga predominante es el cuarzo que frecuentemente se encuentra acompañado de silicatos de alteración como granate, diopsida, ortoclasa, hedenbergita, piroxenos, epidota y clorita, la calcita, fluorita, barita, pirita y arsenopirita, también se incluyen en la ganga. Los más importantes en orden de abundancia son: cuarzo, calcita, pirita y fluorita.

La concentración total de elementos metálicos que se obtuvo de estos jales resultó ser de 32.9 mg/kg de Ag, 119.3 mg/kg de Cd, 6540.8 mg/kg Pb, 126.2 mg/kg de Ba, y 229.8 mg/kg de As. Conjuntamente se encontró que la concentración de elementos metálicos solubles contenidos en los extractos es de 0.09 mg/l de Cd, y 1.3 mg/l de As. A pesar de que de que estos jales presentan una concentración total importante de cadmio, plomo y arsénico, la concentración soluble de estos elementos en el extracto, es inferior a los límites permisibles establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-1993, valores que son de 1.0 mg/l Cd, 5.0 mg/l Pb, y 5.0 mg/l As. De acuerdo con lo anterior se puede establecer que los jales de Santa Bárbara, Estado de Chihuahua **no son peligrosos por su toxicidad al ambiente**.

De acuerdo con la prueba Balance Ácido – Base realizada, la relación PN/PA fue igual a 10.37 (mayor a 1.2 señalado en la norma) por lo tanto los jales que **no son peligrosos por su potencial de generación de ácido**, lo que quiere decir que existe mayor cantidad de minerales neutralizadores que de minerales generadores de ácido.

A pesar de que se tratan de jales antiguos y haber manifestaciones de alteración y oxidación el bajo porcentaje de pirita presente confirma el bajo potencial de generar drenaje ácido, la región donde se encuentra localizada esta presa es seca con temperaturas elevadas y poca precipitación pluvial, por lo que el riesgo que estos jales representan al entorno es bajo, aun cuando hay evidencia de erosión hídrica en la presa la que forma grandes cavidades, igualmente se encontró dispersión de jales generada por la acción de los vientos predominantes de la zona. Sin embargo, la dispersión de los jales no representa riesgo para la contaminación de suelos y de agua.

C) Los *jales de la Mina Pilares, Nacozari, Estado de Sonora* por la literatura se sabe que provienen de un yacimiento con presencia de pirita, cuarzo, grosularita, calcita, fluorita y como mineral de alteración clorita. De acuerdo con el análisis minerográfico realizado a la muestra se sabe que los jales tiene una composición de Mineral transparente dentro del que se encuentra el cuarzo (88%), Hematita, Goethita – limonita (8%), Pirita (4%), Calcopirita (< 1).

Estos jales presentan una concentración total de elementos metálicos de 4.0 mg/kg de Ag, 1.6 mg/kg de Cd y 9.3 mg/kg de As. La concentración de elementos metálicos solubles contenidos en los extractos en general es baja, solo el As muestra una concentración de 1.5 mg/l, ya que el cadmio y el plomo están por debajo del límite de detección del equipo. El contenido de As es inferior al valor permisible que es de 5.0 mg/l, por lo que se puede establecer que estos jales **no son peligrosos por su toxicidad al ambiente**.

De la prueba Balance Ácido – Base la relación PN/PA resultó ser igual a -0.057 (menos a 1.2 que señala la norma), esto quiere decir que se tratan de jales con muy poca capacidad neutralizante y por lo tanto los **jales son peligrosos por su potencial para generar ácido**.

Por lo tanto aunque hay lixiviación de arsénico, elemento tóxico por naturaleza, las concentraciones en las que se libera no representan riesgo para la salud de la población, ya que no rebasan las concentraciones límites permisibles, mas sin embargo, el principal problema de esta presa radica en que se encuentra asentada a un costado del cause de un arroyo, y con el tiempo los jales han sido arrastrados por el agua, con lo que éstos por su capacidad de generar drenaje ácido pueden aumentar la acidez del agua del arroyo.

## RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de este trabajo se observaron algunos aspectos que permiten hacer las siguientes recomendaciones:

En vista de la importancia desde el punto de vista ambiental, que conlleva la generación del drenaje ácido y la consecuente liberación de elementos potencialmente tóxicos, tanto para la salud humana como al entorno, es recomendable el estudio de las presas de jales con el propósito de conocer el riesgo potencial que representan. Por otro lado, realizar estudios toxicológicos referidos a presas de jales ayudaría a comprender los mecanismos que originan daños a la salud a partir de los depósitos de jales. También son importantes los estudios para evaluar el impacto ambiental alrededor de las presas pues un estudio de este tipo da un enfoque general de la afectación ocasionada y de los posibles cambios que se puedan dar a futuro.

Aunque la normatividad ambiental no lo especifica, es conveniente realizar una caracterización mineralógica de manera conjunta con las pruebas indicadas, ya que mediante ésta se conocen los minerales que puedan llegar a causar drenaje ácido, así como de la misma manera permite conocer los minerales que pueden evitar o disminuir la acidez de los jales debido a su característica neutralizante

Se hace necesario resaltar que el diseño, construcción y operación, sin dejar de lado el abandono de las presas de jales, se lleven a cabo de acuerdo con lo indicado en la normatividad ambiental vigente ya que son medidas establecidas para garantizar la seguridad de las presas, esto es evitar que a futuro lleguen a fallar, principalmente en las zonas sísmicas ya que los sismos son un factor relevante para que se presente el fenómeno de licuefacción, o simplemente presenten cualquier tipo de falla, por tal motivo el control y monitoreo sobre las presas es importante.

Es conveniente evaluar las nuevas técnicas de disposición de jales ya que algunas de ellas permiten evitar o reducir riesgos al ambiente, como la posible generación de drenaje ácido. En el caso de la técnica de jales espesados es posible aplicarla en la mayoría de las operaciones mineras ya que su base es un cono que permite el control del agua tanto del escurrimiento natural de los jales como el escurrimiento del agua pluvial, disminuyendo el riesgo de falla.

Es importante señalar que aunque se cumpla la normatividad ambiental correspondiente, los resultados de esta se deben comparar con el entorno físico que los rodea ya que es importante ver los jales, las presas y el medio como un todo, puesto que si se toma cada uno por separado se puede llegar a conclusiones erróneas.

La reforestación o recubrimiento de las presas abandonadas, o en proceso de cierre, es una medida absolutamente necesaria para evitar los riesgos ambientales a futuro y para reincorporar estos sitios al ciclo ecológico.

## BIBLIOGRAFIA

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUAYO Camargo, Dr. Eduardo, CAIRE Lomelí, Ing. M. SC. Luis F. (1993); *Ingeniería, Industria, Gobierno y Medio Ambiente*; XX Convención AIMMGM; Octubre 27-30, 1993.
- ALPERS and BLOWES Ed.; *Environmental Geochemistry of Sulphide Oxidation*; ACS, Symposium Series 550.
- ASM Handbook Vol. 7; (1984); *Powder Metallurgy*; Toxicity of Metal Powders.
- BALLESTER, Antonio, Luis Felipe V., SANCHO José; *Metalurgia Extractiva, Volumen I Fundamentos*; Editorial Síntesis.
- BATEMAN, Alan M.; 1974; *Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico*; 4ª Impresión; Ediciones OMEGA, S.A.
- BERNARD, Dold (1999); *Mineralogical and Geochemical Changes of Copper Flotation Tailings in Relation to their Original Composition and Climatic Setting, Implication fFor Acid Mine Drainage and Element Mobility*; Geneve, University of Geneve, Section des Sciences de la Terre, 1999.
- CORTINAS De Nava, Cristina (1998); *Manejo Ambiental de los Relaves o Jales Mineros*; Gaceta Ecológica INE-SEMARNAP; México No. 49.
- DREVER, James I. (1977); *The Geochemistry of Natural Waters*; 3<sup>rd</sup> Ed; Prentice Hall.
- E. Petrascheck, Dr, Phil Walter; (1965); *Yacimientos y Criaderos Un estudio sucinto de los tesoros del subsuelo*; 2ª Ed.; Ediciones OMEGA, S.A.
- EXTON McKinstry, Hugo; (1974); *Geología de Minas*; 2ª Ed.; Ediciones OMEGA, S.A.;
- GARRELS, Robert M., CHRIST Charles L.; *Solutions, Minerals and Equilibria*; Freeman, Cooper & Company.
- GUNTER, Faure; (1998); *Principles and Applications of Geochemistry a comprehensive textbook for geology students*; 2<sup>nd</sup> Ed.; Prentice Hall.
- GUTIERREZ Ruiz, Margarita, SANTOS Jallath, José E. (1999); *Impacto Ambiental en el Entorno de un Depósito de Jales – Un Enfoque General*; en Seminario de Geotecnia y Manejo de Residuos Mineros, Sociedad Mexicana de Suelos, A. C.; Diciembre de 1999.
- HARTMAN, Howard L., KUTMANSKY, Jan M. (2002); *Introductory Mining Engineering*, 2<sup>nd</sup> Ed; John Wiley & Sons, Inc.
- INEGI, 1984; *Geología de la República Mexicana, Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*, 1993-1994, SEDESOL-INE.
- JUAREZ Badillo, Eulalio; RICO Rodríguez, Alfonso; (1985); *Mecánica de Suelos Tomo II Teoría y Aplicación de la Mecánica de Suelos*; 3ª Ed.; Editorial LIMUSA.
- JUAREZ Badillo, Eulalio; RICO Rodríguez, Alfonso; (1986); *Mecánica de Suelos Tomo I Fundamentos de la Mecánica de Suelos*; 3ª Ed.; Editorial LIMUSA.

- KELLY, Errol G.; SPOTTISWOOD, David J.; (1990); *Introducción al Procesamiento de Minerales*. Editorial LIMUSA, NORIEGA EDITORES
- KUNTZ, Federico (1992); *Legislación Ambiental para la Industria Minera*; Encuentro Hispano Mexicano sobre Geología y Minería, MEMORIAS, Palacio de Minería, México; Noviembre de 1992, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente*. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de Enero de 1988.
- Manual de Presas y Depósitos de Jales*, Editado por la AIMMGM, 1993, versión autorizada del Boletín No. 45 de la ICOLD.
- Monografía, Geológico - Minera del Estado de Chihuahua*, Consejo de Recursos Minerales.
- Monografía, Geológico - Minera del Estado de México*, Consejo de Recursos Minerales.
- Monografía, Geológico - Minera del Estado de Sonora*, Consejo de Recursos Minerales.
- Norma Oficial Mexicana, *NOM-052-ECOL-1993*.
- Norma Oficial Mexicana, *NOM-141-SEMARNAT-2003*. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de Septiembre de 2004.
- OROZCO Santoyo, Raúl V.(1999); *Algunas Reflexiones sobre Experiencias Mexicanas para Aumentar la Seguridad de los Depósitos de Residuos Mineros (Presas de Jales)*; en Seminario de Geotecnia y Manejo de Residuos Mineros, Sociedad Mexicana de Suelos, A. C.; Diciembre de 1999.
- RABONE, Philip (1975); *Concentración de Minerales por Flotación*; Comisión de Fomento Minero, 4ª Ed; México.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental*. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 7 de Junio de 1988.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos*. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 25 de Noviembre de 1988.
- ROMERO, Francisco Martín (2004); *Procesos Geoquímicos que controlan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos*. “El Fraile”, Taxco, Guerrero; Tesis Doctoral.
- ROSE, Arthur W.; HAWKES, Herbert E., and WEBB John S.; *Geochemistry in Mineral Exploration*; 2ª Ed.; ACADEMIC PRESS
- SARSBY, Robert (2000); *Environmental Geotechnics*; 1st Ed; Thomas Telford.
- SEGUNPTA, M.(1993); *Environmental Impacts of Mining, Monitoring, Restoration and Control*; Lewis Publishers.
- SOSA Sánchez, M. Eng. Francisco Juan (1992); *Análisis de los Procesos de Regeneración y Destrucción de Cianuro*; Curso “Innovaciones Minero metalúrgicas en la Recuperación de oro y plata”; Instituto Tecnológico de Saltillo, Centro de Graduados e Investigación, Saltillo, Coahuila: 26, 27 y 28 de Marzo de 1992.
- THORNTON, Iain, Ed.; (1983); *Applied Environmental Geochemistry*; Academic Press INC.
- VAN ARSDALE, George D.; (1965); *Hidrometalurgia de Metales Comunes*; 1ª Edición en Español; Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana.
- WEISS, N.L. Ed.; (1985); *SME Mineral Processing Handbook, Vol. 1.; Sec. 4 Gravity Concentration*; Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.; New York, N.Y.

WEISS, N.L. Ed.; (1985); *SME Mineral Processing Handbook, Vol. 1.; Sec. 6 Electrostatic and Magnetic Separation*; Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.; New York, N.Y.

YONG, Raymond N. (2001); *Geoenvironmental Engineering, Contaminated Soils, Pollutant Fate and Mitigation*;

## **PÁGINAS DE INTERNET**

*Acid Mine Drainage Experiments*, Departamento de química y geoquímica, Escuela de Minas de Colorado, Goleen, Colorado, [http://www.mines.edu/fs\\_home/jhoran/ch126/introduc.htm](http://www.mines.edu/fs_home/jhoran/ch126/introduc.htm)

*Acid Mine Drainage Prediction, Technical Document*, EPA 530-R-94-036 NTIS PB94-201829, December 1994, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Special Waste Branch. <http://www>.

*Acid Producing Potential of Mine Overburden*: [http://www.mines.edu/fs\\_home/jhoran/ch126/index.htm](http://www.mines.edu/fs_home/jhoran/ch126/index.htm)

*ATSDR*, Agency for Toxic Substances and Disease Registry; Division of Toxicology; Atlanta, GA. <http://www.atsdr.cde.gov/toxpro2.html>

BENEKERT, Annika and EURENIUS Jan; *Tailing Dam Constructions*; Safe Tailings Dam Constructions, Seminar in Gällivare, Sept. 19-21, 2001. <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdapp.html>

*Codisposición de relaves, opciones de disposición de relaves y diseño conceptual*. <http://technology.infomine.com/leachmine/papers2003/TailingsCo-DisposalSpanish-finalversion.pdf>

*Drenaje ácido de las minas (AMD)*. <http://www.esquelonline.com/~noalamina/drenaje.htm>

*Flotación como Proceso de Remoción de Contaminantes*, [http://www.aguamarket.com/temas\\_interes/033.asp](http://www.aguamarket.com/temas_interes/033.asp)

*Guía ambiental para el cierre y abandono de minas* <http://www.minem.gob.peru/archivos/dgaam/legislacion/guias/cierreabandono.pdf-Micr>

*Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de mina* <http://www.minem.gob.peru/archivos/dgaam/legislacion/guias/manedrenaje.pdf-Micr>

*Guía ambiental para el manejo de relaves mineros* <http://www.minem.gob.peru/archivos/dgaam/legislacion/guias/relaveminero.pdf-Micr>

*Guía ambiental para estabilidad de taludes* <http://www.minem.gob.peru/archivos/dgaam/legislacion/guias/guiaestabilidad.pdf-Micr>

HIGUERAS, P. y OYARZUN, R.; *Mineralogía y geoquímica ambiental*. <http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/>

HIGUERAS, P. y OYARZUN, R.; *Minería y medio ambiente*. <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/>

*Impactos ambientales* <http://www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/publicaciones/evats/huallaga/huallaga7.pdf#search='drenaje%20acido%20de%20las%20minas'>

*La enfermedad de los relaves, Davor Cotoras, BIOHIDRICA, Induambiente 20:26-7 (1996)* [http://www.biohidrica.cl/BIOHIDRICA\\_NPublicacion04.htm](http://www.biohidrica.cl/BIOHIDRICA_NPublicacion04.htm)

M. Romero, Francisco; ARMIENTA, María A.; y VILLASEÑOR, Lupita; *Evaluación de la peligrosidad potencial de jales mineros*; Contaminación por Actividad Minera GGA-06 <http://www.igeofcu.unam.mx/divulgacion/geonoticias/geonoticias72.pdf>;

**Metales Tóxicos,**

[http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/09ProdQui/120MetTox.htm#Metales tóxicos#Metales tóxicos](http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/09ProdQui/120MetTox.htm#Metales_toxicos#Metales_toxicos)

MILLS, Chris P. Eng. & Robertson, Andy P. Eng. *Acid rock drainage at enviromine*.  
<http://www.infomine.com/>

**Mineral Processing Wastes;** <http://www.epa.gov/>

**Minería de oro a cielo abierto y sus impactos ambientales,** AECO-AT, Costa Rica.  
[http://semueve.netfirms.com/doc\\_minas/impactos.htm](http://semueve.netfirms.com/doc_minas/impactos.htm)

Minería Transnacional de los Andes; SUMI MSc, lisa; **Los impactos ambientales de la minería: una guía comunitaria;** Consejo de Minería Ambiental de British Columbia.  
<http://andes.miningwatch.org/andes/espanol/guia/>

**Ministerio de energía y minas del Perú** [http://www.minem.gob.pe/dgaam/normas\\_tecdisamb.asp](http://www.minem.gob.pe/dgaam/normas_tecdisamb.asp)

**Netherton – Robinsky Associates Ltd;** CONVENTIONAL DISPOSAL vs. THICKENED TAILINGS DISPOSAL. <http://www.thickenedtailings.com/comparison.html>

**Netherton-Robinsky Associates Ltd;** An Alternative to Conventional Tailings Disposal.  
<http://www.thickenedtailings.com/introduction.html>

NILSON, Åke; **Safe Dam Constructions;** Safe Tailings Dam Constructions, Seminar in Gällivare, Sept. 19-21, 2001. <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdapp.html>

OYARZUN, R., **Métodos de explotación en minería subterránea;**  
[http://www.ucm.es/info/crismine/Geologia\\_Minera/Metodos\\_explotacion\\_subte.htm](http://www.ucm.es/info/crismine/Geologia_Minera/Metodos_explotacion_subte.htm)

**Properties of Tailings Dams** (Last Updated 30 Sep 2003)  
<http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdapp.html>.

**Safety of Tailings Dams,** (last updated 21 Aug 2004) <http://www.wise-uranium.org/mdas.html>

SÁNCHEZ, Luis Enrique, **Drenaje de minas a cielo abierto,** II CURSO INTERNACIONAL DE ASPECTOS GEOLÓGICOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL, CAPITULO 16, Departamento de Engenharia de Minas Escola Politécnica da Universidad de São Paulo.  
<http://www.unesco.org.uy/geo/campinaspdf/17drenaje.pdf>.

**Tailings – What are they;** <http://technology.infomine.com/tailingsmine/tails1.htm>

**Tailings Containment,** Best Practice Environmental Management in Mining.  
<http://www.eagov.au/industry/sustainable/mining/booklets/tails.html>

**Technical report design and evaluation of tailing dams,** August 1994, EPA530-R-94-038, NTISPB94-201845. <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdap.html>

**Waste disposal area; tailings storage facilities;** Newmont mining@martha  
[http://www.marthamine.co.nz/waste\\_disposal.html](http://www.marthamine.co.nz/waste_disposal.html).

**Water Quality Protection Guidelines No. 2, Mining and Mineral Processing,** Tailing Facilities 2000.  
<http://www.>

**What are Tailings?** <http://www.tailing.info/>

<http://www.sgp.org.pe/julio05/W.Chavez.htm>