



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**CONTAMINACIÓN POR MERCURIO EN LA INDUSTRIA MINERA  
MEXICANA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**JORGE FRANCISCO ZAVALA TAPIA**

**MÉXICO, D.F.**

**2011**





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.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** VICTOR MANUEL LUNA PABELLO  
**VOCAL:** NESTOR NOE LOPEZ CASTILLO  
**SECRETARIO:** GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ  
**1er. SUPLENTE:** JOSE AGUSTIN GARCIA REYNOSO  
**2° SUPLENTE:** SERGIO ADRIAN GARCIA GONZALEZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE INGENIERÍA. POSGRADO DE INGENIERÍA, CIRCUITO EXTERIOR S/N CIUDAD UNIVERSITARIA.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ.**

---

**SUSTENTANTE (S):**

**JORGE FRANCISCO ZAVALA TAPIA**

---

### **Esta tesis está dedicada a:**

María Teresa Tapia Romero madre y ejemplo en mi vida, siempre me enseñó a luchar sin importar lo que suceda a mi alrededor, mujer incomparable, siempre amable, que vivirá siempre en mi corazón, ella fue la razón y el motivo de la persona que soy.

Raúl Zavala Ramírez, hombre inteligente, siempre fuerte a la pérdida más grande que mi familia haya tenido. Trabajando para el futuro de su familia. Me ayudo a crecer y madurar, el mejor padre y un gran compañero.

Josue Zavala Tapia, mi hermano, compañero de grandes vivencias de gran humor y sin duda una vibra incomparable, padre de Alexander mi sobrino, mi pariente.

Alejandra Sánchez Pérez y Xally Yamil Zavala Sánchez, agradeciéndoles su cuidado y aliento, cuando sentía que no había fuerzas.

Brenda, Fabián y Gerardo Quintana Loredo, mi otra familia con la cual siempre eh contando y contare para cualquier circunstancia.

José Ramón Morales Marentes, a él y su familia que siempre me cobijaron y apoyaron como uno más en su familia.

María Karina Vázquez Reyes, que tuve su cariño de manera incondicional en el lapso de mi carrera, que estando a su lado me motivo a llegar lejos y a soñar lejos, por esos momentos de ocio de reflexión, de debates, por todo gracias.

Samantha Viviana Escalante Magno, por ese aliento y esas palabras que me ayudaron en el último esfuerzo, por su cariño, por todo.

Cindi Pamela Fonseca Hermsillo, a ella y a su familia, que siempre me acogieron como integrante más de esa hermosa familia y no importan los años que pasen, siempre contare con ellos.

Al señor Juan, a la señora Carmen, a Daniela, Nayeli, Gabriela y Eunice Loredo, por acogerme como un integrante más en su familia, por aceptarme en su casa en tantas veces, por su cariño.

A Hugo Rico, Gregorio Ortiz, Kipsain Barranco, Jessica Ventura, David Acevez, Citlali Hernández, Diana Gomora, Antonio (Chapo), Mariana Flores, Claudia Espinoza, Leonel Galicia, Emanuel Mayorga, Alberto Martínez, Diana Rojas, Por esa hermandad en mi carrera y que aun siempre los tengo presentes.

Amis amigos de la gran calle 49, Jesús, Manuel y Axel García, Gerardo Arredondo, Hernan Tamayo, Emanuel (V), Diego Romero, Carlos Quintana, Carlos Arredondo, Carlos Ivan (Gato), Ismael Nequis.

## Índice.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Índice.</b>   | <b>1</b>  |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS.</b>                                      | <b>4</b>  |
| <b>LISTADO DE FIGURAS.</b>   | <b>7</b>  |
| <b>LISTADO DE TABLAS.</b>  | <b>9</b>  |
| <b>RESUMEN</b>   | <b>13</b> |
| <b>CAPÍTULO 1</b>  | <b>15</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>  | <b>15</b> |
| <b>1.1 Planteamiento del problema.</b>                             | <b>16</b> |
| <b>1.2 Objetivo general.</b>                                       | <b>17</b> |
| 1.2.1 Objetivos específicos.                                       | 18        |
| <b>CAPÍTULO 2</b>  | <b>19</b> |
| <b>HISTORIA DE LA MINERÍA EN MÉXICO.</b>                           | <b>19</b> |
| <b>2.1 Historia de la minería en México.</b>                       | <b>19</b> |
| <b>2.2 Situación actual</b>  | <b>24</b> |
| 2.2.1 Producción de oro y plata en México a través del tiempo.     | 27        |
| 2.2.3. Producción de plata.  | 28        |
| <b>2.3. La producción de mercurio en México</b>                    | <b>28</b> |
| <b>CAPÍTULO 3.</b>   | <b>35</b> |
| <b>PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y TOXICOLÓGICAS DEL MERCURIO.</b>    | <b>35</b> |
| <b>3.1 Propiedades fisicoquímicas</b>                              | <b>35</b> |
| <b>3.2 Toxicidad del mercurio.</b>                                 | <b>38</b> |
| 3.2.1 Efectos del mercurio metálico en el ser humano.              | 43        |
| 3.2.2 Toxicidad del mercurio orgánico.                             | 45        |
| <b>3.3 Toxicidad del mercurio en el medio ambiente.</b>            | <b>51</b> |
| 3.3.1 Toxicidad para los Microorganismos.                          | 52        |
| 3.3.2 Mecanismos de Protección de los Microorganismos al Mercurio. | 53        |
| 3.3.3 Toxicidad para los Organismos Acuáticos.                     | 54        |
| <b>CAPÍTULO 4.</b>   | <b>56</b> |
| <b>CICLO DEL MERCURIO.</b>   | <b>56</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>4.1 Definición del ciclo del mercurio.</b>   | <b>56</b>  |
| 4.1.1 EL Ciclo natural del mercurio.  | 57         |
| 4.1.2 Ciclo antropogénico del mercurio.   | 58         |
| <b>4.2 El mercurio en la atmósfera.</b>   | <b>61</b>  |
| <b>4.3 El mercurio en suelos.</b>   | <b>63</b>  |
| <b>4.4 El mercurio en aguas terrestres.</b>   | <b>65</b>  |
| <b><i>CAPÍTULO 5.</i></b>   | <b>77</b>  |
| <b><i>EMISIONES DEL MERCURIO EN MÉXICO.</i></b>   | <b>78</b>  |
| <b>5.1. Fundición de metales ferrosos y no ferrosos.</b>  | <b>81</b>  |
| 5.1.1. Minería y refinamiento de oro.   | 83         |
| 5.1.2. Minería y refinación de mercurio.  | 86         |
| 5.1.3. Fundidoras primarias de plomo y zinc.  | 87         |
| 5.1.4. Fundidoras de metales ferrosos.  | 88         |
| <b>5.2 Procesos de Producción de Carbón y Coque.</b>  | <b>88</b>  |
| <b>5.3 Otros procesos industriales.</b>   | <b>89</b>  |
| <b>5.4 Resumen del inventario de emisiones atmosféricas de mercurio para el año 1999.</b>                                     | <b>90</b>  |
| <b>5.5 Emisiones en la actualidad (2004).</b>   | <b>92</b>  |
| <b>5.6 Evaluación de las emisiones de mercurio.</b>   | <b>95</b>  |
| <b>5.7 Sitios contaminados en México.</b>   | <b>98</b>  |
| <b><i>CAPÍTULO 6.</i></b>   | <b>100</b> |
| <b><i>LEGISLACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL.</i></b>   | <b>100</b> |
| <b>6.1. Legislación internacional.</b>  | <b>100</b> |
| <b>6.2 Declaraciones internacionales generales.</b>   | <b>100</b> |
| <b>6.3. Convenios internacionales.</b>  | <b>102</b> |
| <b>6.4. Legislación de la Unión Europea.</b>  | <b>103</b> |
| 6.4.1. Reglamentos sobre el medio ambiente.   | 103        |
| 6.4.2 Directivas.   | 103        |
| 6.4.3 Marco reglamentario de gestión de las sustancias químicas (REACH), Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos. | 107        |
| <b>6.5. Legislación en Estados Unidos de América.</b>   | <b>110</b> |
| 6.5.1 Agencia de Protección Ambiental (EPA)   | 110        |
| 6.5.2 Síntesis de la legislación ambiental.   | 111        |
| <b>6.6 Legislación nacional.</b>  | <b>114</b> |

|   |            |
|---|------------|
| 6.6.1 Normas Oficiales Mexicanas. _____   | 118        |
| <b>6.7 Impacto ambiental.</b> _____   | <b>129</b> |
| 6.7.1 Tipos de impactos ambientales. _____  | 129        |
| <b>6.8. La Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte.</b> _____ | <b>131</b> |
| <b>ANÁLISIS.</b> _____  | <b>133</b> |
| <b>CONCLUSIONES.</b> _____  | <b>136</b> |
| <b>ANEXOS.</b> _____  | <b>138</b> |
| ANEXO 1. _____  | 138        |
| ANEXO 2. _____  | 151        |
| ANEXO 3. _____  | 153        |
| <b>REFERENCIAS.</b> _____   | <b>156</b> |

## **LISTA DE ABREVIATURAS.**

|                |   |
|----------------|---|
| kg             | Kilogramos.   |
| INEGI          | Instituto Nacional de Estadística y Geografía.      |
| INE            | Instituto Nacional de Ecología.                     |
| PROFEPA        | Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.     |
| °C             | Grados Centígrados.                                 |
| mg             | Miligramos.   |
| m <sup>3</sup> | Metros Cúbicos.                                     |
| K              | Grados Kelvin.                                      |
| Pa             | Pascales.   |
| m              | metros.   |
| mol            | Moles.  |
| s              | Segundos.   |
| WHO            | World Health Organization.                          |
| PNUMA          | Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. |
| Ppb            | Partes por Billon.                                  |
| pg             | Picogramos.   |
| IPCS           | International Programme on Chemical Safety.         |
| DOC            | Dissolved Organic Carbon.                           |
| MeHg           | Metilmercurio.                                      |
| EtHg           | Etilmercurio.                                       |
| ng             | Nanogramos.   |



|          |  |
|----------|--|
| SECOFI   | Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.                 |
| IMMSA    | Internacional Metales de México S.A                          |
| IMCA     | Industria Mexicana de Cloro-Alcali                           |
| TM       | Toneladas Metricas.  |
| ANIQ     | Asociación Nacional de la Industria Química.                 |
| PEMEX    | Petroleos Mexicanos.   |
| CFE      | Comisión Federal de Electricidad.                            |
| EPA      | Environmental Protection Agency.                             |
| COREMI   | Consejo de Recursos Minerales.                               |
| DGMIC    | Direction Générale des Médias et des Industries Culturelles. |
| SEMARNAT | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.           |
| ONU      | Organización de las Naciones Unidas.                         |
| UE       | Unión Europea.   |
| RCRA     | Resource Conservation and Recovery Act.                      |
| CWA      | Clean Water Act.   |
| DBO      | Demanda Bioquímica de Oxígeno.                               |
| TSS      | Total suspended solids.                                      |
| NPDES    | National Pollutant Discharge Elimination System.             |
| SDWA     | Safe Drinking Water Act.                                     |
| UIC      | Underground Injection Control.                               |
| TSCA     | Toxic Substances Control Act.                                |
| CAA      | Clean Air Act.   |

|         |  |
|---------|--|
| NAAQSs  | National Ambient Air Quality Standards.                    |
| NESHAPs | National Emissions Standards for Hazardous Air Pollutants. |
| HAPs    | Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.                     |
| STPS    | Secretaría del Trabajo y Previsión Social.                 |
| SCT     | Secretaría de Comunicaciones y Transportes.                |

## LISTADO DE FIGURAS.

|  | <b>Páginas</b> |
|--|----------------|
| <b>Figura 2.1.</b> Participación del valor agregado bruto en valores básicos del sector industrial y de la industria minera en el total De 2004 a 2009 . | 25             |
| <b>Figura 2.2.</b> Volumen de la producción de oro en años seleccionados (Toneladas).  | 27             |
| <b>Figura 2.3.</b> Volumen de la producción de plata en años seleccionados (Toneladas).  | 28             |
| <b>Figura 2.4.</b> Principales yacimientos de mercurio en México.  | 31             |
| <b>Figura 4.1.</b> Entrada del mercurio en la naturaleza.  | 58             |
| <b>Figura 4.2.</b> Ciclo antropogénico del mercurio.   | 60             |
| <b>Figura 4.3.</b> Biotransformación del mercurio.   | 66             |
| <b>Figura 4.4.</b> Comportamiento del mercurio en las aguas terrestres.  | 67             |
| <b>Figura 4.5.</b> Ciclo acuático del mercurio.  | 68             |
| <b>Figura 5.1.</b> Emisiones de mercurio para el inventario de emisiones 2004.   | 94             |
| <b>Figura 5.2.</b> Emisiones de mercurio en el suelo por producción anual de oro (México).   | 97             |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 5.3.</b> Emisiones de mercurio en el aire por producción anual de oro (México). | 97  |
| <b>Figura 6.1.</b> Pirámide Jurídica de Kelsen.   | 115 |

## LISTADO DE TABLAS.

|  | <b>Páginas</b> |
|--|----------------|
| <b>Tabla 2.1.</b> México en la producción mundial de minerales, 2007.                              | 26             |
| <b>Tabla 2.2.</b> Principales Estados productores de mercurio en México.                           | 30             |
| <b>Tabla 2.3</b> Plantas que benefician jales para obtener mercurio como subproducto en Zacatecas. | 32             |
| <b>Tabla 2.4</b> Producción de mercurio en México.   | 33             |
| <b>Tabla 2.5.</b> Plantas que Benefician Jales en Zacatecas.                                       | 34             |
| <b>Tabla 3.1.</b> Propiedades del mercurio.  | 36             |
| <b>Tabla 3.2.</b> Algunos compuestos inorgánicos más comunes.                                      | 37             |
| <b>Tabla 3.3</b> Toxicidad de algunos compuestos inorgánicos de mercurio.                          | 41             |
| <b>Tabla 3.4</b> Síntomas por intoxicación crónica por mercurio.                                   | 47             |
| <b>Tabla 3.5</b> Alteraciones Digestivas.  | 48             |
| <b>Tabla 3.6</b> Alteraciones del sistema nervioso.  | 49             |
| <b>Tabla 5.1.</b> Emisión antropogénica de mercurio en los Estados Unidos de América (1998).       | 80             |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 5.2.</b> Producción Minera Total en México (ton/año).  | 82 |
| <b>Tabla 5.3.</b> Factor de Emisión por Metal y Total de Emisiones de Mercurio (kg).  | 83 |
| <b>Tabla 5.4.</b> Minas de Oro con Operaciones de Tostación/Fundición.  | 85 |
| <b>Tabla 5.5.</b> Producción secundaria de mercurio.  | 86 |
| <b>Tabla 5.6.</b> Producción Minera de Carbón y Estimación de Emisiones de Mercurio 1994-1998   | 89 |
| <b>Tabla 5.7.</b> Carbón Coquizado 1994-1999.   | 89 |
| <b>Tabla 5.8.</b> Emisiones atmosféricas estimadas de mercurio en México (1999).  | 91 |
| <b>Tabla 5.9.</b> Emisiones atmosféricas de mercurio en México por categoría de fuente 1999.  | 92 |
| <b>Tabla 5.10.</b> Inventario de emisiones de Mercurio 2004.  | 93 |
| <b>Tabla 5.11.</b> Porcentaje de emisiones por producción minera mexicana.  | 95 |
| <b>Tabla 5.12.</b> Factores preliminares de distribución por defecto sugeridos para la extracción a gran escala y el procesamiento inicial de oro (con métodos distintos de la amalgamación de mercurio). | 96 |
| <b>Tabla 5.13.</b> Emisiones de mercurio por extracción de oro en los años 2001 hasta 2010.   | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 6.1.</b> Cuatro principales documentos de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. | 101 |
| <b>Tabla 6.2</b> Algunas directivas en la Unión Europea.  | 104 |
| <b>Tabla 6.3.</b> Concentraciones permisibles en las emisiones de mercurio en la industria para la UE.            | 107 |
| <b>Tabla 6.4.</b> Criterio de emisiones en el agua USEPA.   | 113 |
| <b>Tabla 6.5.</b> Criterio de emisiones en el aire EPA.   | 113 |
| <b>Tabla 6.6.</b> Flujos recomendados en la industria según la EPA.   | 114 |
| <b>Tabla 6.7.</b> Descripción de las normas mexicanas que se refieren al mercurio.                                | 118 |
| <b>Tabla 6.8.</b> Límites Máximos Permisibles Para Metales Pesados y Cianuros.                                    | 123 |
| <b>Tabla 6.9.</b> Límites para las descargas de agua.   | 124 |
| <b>Tabla 6.10.</b> Referencia clasificación de tipo y grado de riesgo de algunas sustancias químicas.             | 124 |
| <b>Tabla 6.11.</b> Características de lixiviado que hace peligroso a un residuo por su toxicidad en el ambiente   | 125 |
| <b>TABLA 6.12.</b> Códigos de peligrosidad de los residuos (cpr).   | 125 |
| <b>Tabla 6.13.</b> Clasificación de residuos peligrosos.  | 126 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabla 6.14.</b> Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos. | 126 |
| <b>Tabla 6.15.</b> Límites permisibles de exposición de contaminantes en el ambiente laboral.               | 127 |



## **RESUMEN**

En este proyecto se llevará a cabo el estudio de la contaminación por mercurio en el medio ambiente tomando como factor principal la actividad minera mexicana, es por eso que se toma como principio el estudio de las propiedades fisicoquímicas del mercurio y la mayoría de sus compuestos generados de manera natural así como de forma industrial, el comportamiento del mercurio en el medio ambiente incluyendo desde las emisiones, el depósito, las transformaciones de este metal, todo esto incluido en el ciclo del mercurio incluyendo el ciclo natural y el antropogénico.

Cabe mencionar que se realizará una investigación a cerca de la historia de la minería en México por lo que se puede saber un poco, como se llevó a cabo la extracción de metales preciosos, desde los tiempos prehispánicos hasta la actualidad. Esta investigación mostrará que desde esa época existía una fuerte explotación de metales los cuales según se cree es posible que una parte de la contaminación de mercurio sea a través de la extracción de este metal, o de los metales como oro, plata, plomo, etc.

Se tomarán en cuenta las propiedades toxicológicas y así tratar de explicar el peligro que este metal y sus diferentes compuestos pueden ocasionar a los seres vivos incluyendo al ser humano. Además se consultarán las bases de datos de emisiones ya calculadas por entidades gubernamentales para comprender la contaminación real de mercurio en la republica mexicana y así saber cuáles son las actividades económicas con mayor generación de este compuesto y poder hacer una evaluación en la cual se tome como base la actividad minera mexicana, incluyendo todos sus sectores.

Finalmente se considerarán como referencia las legislaciones internacionales así como la legislación mexicana, consultando solamente aquellas normatividades en las cuales incluyan acción sobre el mercurio o algunos de sus compuestos, debido a que existe una cantidad impresionante de legislación acerca de compuestos peligrosos ya sea nacional o internacional, esto servirá

para saber las acciones que se llevan a cabo para evitar problemas a la salud y al medio ambiente por el elemento y compuestos ya mencionados.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

Durante muchos años, la extracción de mercurio a nivel nacional e internacional fue de una manera indiscriminada, además de las técnicas utilizadas para la extracción de oro y plata, lo cual daba como residuo el mercurio en estado natural [Hg (0)]. Esto dio como resultado la contaminación del medio ambiente y así como de la salud de los seres humanos, esto es porque se sabe de la extracción de este metal desde la antigüedad, por lo que no existían medidas adecuadas ni la cultura necesaria de los problemas ambientales y toxicológicos que este metal y sus compuestos que existen en la naturaleza ocasionan.

Recordando que el mercurio es uno de los metales más tóxicos que se conocen en la actualidad, debido a su reputación que tiene desde tiempos muy antiguos, tomando en cuenta que el mercurio puede ser ingerido por vía oral, respiratoria y en algunos casos cutánea, también se sabe que sus síntomas dependen de la dosis y vía por la que se ingiere, estos datos se encuentran mejor explicados en el capítulo 2 de este documento.

En la actualidad se han hecho diferentes estudios en los cuales se trata de describir de manera más comprensible el comportamiento y movimiento del mercurio en el medio ambiente, también de la identificación de las emisiones de este metal, ya sean las emisiones naturales o las emisiones antropógenas, estas emisiones ocasionadas por el ser humano han modificado el ciclo natural del mercurio, provocando una acumulación mayor de este metal en el medio ambiente, esto implica el daño ecológico, así como la acumulación en la flora y fauna, y por lo tanto, el consumo de mercurio en los seres humanos provocando intoxicaciones serias como en el caso más sonado de Minamata, Japón.

Después de conocer las serias consecuencias que provoca este metal es necesario saber y tener conciencia de las emisiones de mercurio que son emitidas en la industria mexicana y en especial conocer las principales fuentes

de contaminación para esta nación. Normalmente estas emisiones se descargan directamente a la atmósfera, aguas residuales, y al suelo. Esto genera un grave problema de acumulación en el medio ambiente y tenemos entendido que existe una normatividad en México adecuada, pero es necesario el control de emisiones en la industria minera para prevenir problemas como en el caso de Minamata.

### **1.1 Planteamiento del problema.**

El mercurio es un elemento químico que a temperatura ordinaria es un metal líquido de color plateado. El símbolo del mercurio es Hg que se deriva de la palabra griega hydrargyros, la cual significa "agua plateada" (Gaona, 2004). Los romanos llamaron al mercurio "Argentum Vivum", que significa "Quick Silver" o "plata líquida" debido a que era el único elemento conocido que era líquido a temperatura ambiente. El mercurio es conocido desde la antigüedad y ha sido utilizado por casi todas las culturas. Se le han atribuido poderes mágicos tanto para hacer el bien como para hacer el mal. Se le consideró también como una de las maneras de protegerse del "mal de ojo". Se creía que podía prevenir enfermedades tales como reumatismo, disentería y cólicos. Aristóteles recomendaba este elemento disuelto con saliva para tratar ciertas enfermedades de la piel (Gaona, 2004).

La historia del mercurio en la farmacología es muy extensa. Con el paso del tiempo el mercurio fue adquiriendo legendarios poderes mágicos que se extendieron a la medicina y se comenzó a usar como tratamiento para la sífilis (Sunderman, 1988). El mercurio fue también utilizado para tratar enfermedades de los ojos y la sangre. Más tarde se pensó que era peligroso consumir un elemento tan pesado, por lo que se recomendó su consumo disuelto con vino o leche.

En el siglo XVI, se fueron conociendo otros efectos adversos del mercurio, y comenzó a disminuir su uso. Para el año 1557, el francés Jean Fernel fue el primero en describir los síntomas y signos del envenenamiento con mercurio. Para ese entonces, el mercurio era utilizado en la medicina como antidiurético.

El mercurio fue la primera sustancia en ser objeto de legislación para controlar las enfermedades que causaba (D'itri et al, 1977).

La revolución industrial y tecnológica de los siglos XIX y XX trajo consigo un gran número de nuevas aplicaciones para el mercurio y muchos de sus compuestos, pero también otras tantas posibles vías de contaminación medioambiental y exposición ocupacional. La primera gran señal de alarma se dio con el desastre de la bahía de Minamata (Japón), donde una planta de cloruro de vinilo y acetaldehído estuvo liberando de manera incontrolada grandes cantidades de mercurio en sus aguas residuales durante el período 1953-1960. El resultado fueron un gran número de personas intoxicadas y muertas por la ingestión de pescado contaminado con metilmercurio. También en Niigata (Japón) se reportaron más de 100 intoxicados por metilmercurio. Años más tarde, entre 1971-1972, más de 400 personas murieron en Irak por intoxicación con metilmercurio. En ese caso, el origen del metilmercurio se encontraba en el grano que se había utilizado para confeccionar el pan, el cual había sido tratado con un fungicida basado en este compuesto organometálico de mercurio (Gaona, 2004).

Actualmente existen emisiones de mercurio, y muchas de estas emisiones son depositadas directamente en el medio ambiente ya que no es posible tratarlos de una manera efectiva, por lo que es necesario encontrar una solución ya sea científica o legislativa, y encontrar una manera efectiva de reducción de este contaminante y así evitar intoxicaciones como en situaciones en otros países.

### **1.2 Objetivo general.**

- Analizar la contaminación por mercurio debido a la actividad minera en México a través de datos nacionales publicados en fuentes oficiales.

### **1.2.1 Objetivos específicos.**

- Revisar la evolución de la minería en México consultando fuentes impresas, electrónicas y gubernamentales.
- Recordar los efectos toxicológicos del mercurio considerando estudios realizados en el mundo.
- Analizar el ciclo del mercurio enfocándolo en el medio ambiente.
- Evaluar las emisiones del mercurio en México considerando las diferentes actividades económicas incluyendo la minería mexicana.
- Realizar una revisión de la legislación nacional e internacional utilizando como referencia los países que lleven a cabo un control de la contaminación por mercurio en sus diferentes tipos de emisiones.

## **CAPÍTULO 2**

### **HISTORIA DE LA MINERÍA EN MÉXICO.**

#### **2.1 Historia de la minería en México.**

Ha sido costumbre iniciar el estudio de la minería mexicana o americana, con el periodo de la conquista española, considerando que es de poca o nula importancia la aportación indígena al proceso formativo de esta industria. En realidad existen abundantes indicios acerca de los conocimientos minero-metalúrgicos de los pueblos prehispánicos.

La arqueología, a través de diversas investigaciones, ha logrado el hallazgo de objetos que son testimonio del trabajo de los metales (oro, plata, cobre, estaño y plomo) para diversas finalidades: hachas, anzuelos, punzones, tubos, puntas de lanza, agujas y alfileres, todos hechos en general de cobre; joyas y otros objetos artísticos como pectorales, collares, pulseras, cascabeles, anillos, orejeras, etc., en los que se empleó de preferencia el oro con diferentes técnicas: martillado, repujado, filigrana, chapeado y moldeado por medio de la cera perdida. Se afirma que en el México prehispánico se utilizaron aproximadamente treinta y cinco minerales no metalíferos y catorce que sí lo son (Palacio de minería, 2011).

Sabemos que los metales y minerales empleados por los indígenas fueron recogidos y extraídos en explotaciones mineras formales, lo que implica un conocimiento mínimo de técnicas que se les niegan, y se pretende que les llegaron de Europa. Algunas explotaciones mineras indígenas han sido estudiadas por científicos mexicanos y extranjeros como lo fueron Tarayse en 1869 y Orozco y Berra en 1873 (Muñoz, 1986).

Consumada la conquista, los españoles concentraron sus esfuerzos en la extracción del oro. Utilizando esclavos e indios de encomienda como mano de obra, explotaron los placeres auríferos conocidos por los naturales. No parece que hayan sido muy abundantes los frutos de esta primera cosecha, pero gracias a ella dispusieron de un medio de cambio que les permitió iniciar tratos mercantiles con la Metrópoli y adquirir ganados, semillas y aperos de labranza para el aprovechamiento de la tierra. Montada en esa riqueza comenzó a marchar la economía neohispana, pues el oro atrajo a quienes lo buscaban indirectamente, es decir, a los comerciantes, los agricultores y los artesanos (Palacio de minería, 2011).

Hasta el siglo XVI, tanto en Europa como en Tenochtitlán, la plata fue un metal relativamente escaso. Europa lo obtuvo de sus explotaciones mineras en España y Grecia, mediante minas de poca profundidad: en México se pretende explicar la presencia prehispánica de la plata asegurando que fue obtenida; porque tenían minas y extraían minerales plumbo-argentíferos que beneficiaban por fundición, como afirma el padre Acosta: "El modo de labrar y beneficiar la plata que los indios usaron fue por fundición, que es derriendiendo aquella masa de metal al fuego, el cual echa la escoria por una parte y aparta la plata del plomo, y del estaño, y del cobre, y de las demás mezclas que tiene..."(Muñoz, 1986).

Estaba reservado a Bartolomé de Medina el descubrir, en 1552, la forma de aplicar la amalgamación a la recuperación directa de la plata a partir de sus minerales, lo que consiguió en la Hacienda de Purísima Grande de Pachuca, Estado de Hidalgo. Medina, sin embargo, declaró en su testamento de 1555 que "tuve noticia en España, de plática con un alemán, que se podía sacar plata de los metales sin fundición, ni afinaciones y sin otros grandes costos; y con esta noticia determiné venir a esta Nueva España ..", experimentando por largos años y logrando desarrollar el conocido proceso de «patio» que, aplicado universalmente a las minas descubiertas en el territorio mexicano permitió la



expansión poblacional que hizo posible dominar un territorio de casi cuatro millones de kilómetros cuadrados estableciendo "reales de minas" que crecieron y prosperaron hasta la fecha. Por más de dos siglos, hasta el año de 1784, el procedimiento de patio inventado por Medina fue de uso exclusivo en América; en ese año se estableció el primer "beneficio de mercurio" fuera del continente americano, en Schemnitz, Hungría por el barón Ignaz Von Born, quien pretendió inútilmente mejorarlo. Hasta 1843, que se introduce el método de Augustín en Mansfeld, Alemania, se inicia el cambio tecnológico en la minería y metalurgia de la plata. El método de Augustín es el primer procedimiento de lixiviación que resultó práctico: mediante una tostación clororante se formaba el cloruro de plata que era disuelto en agua, cementando la plata en cobre metálico, con recuperación del 85%. Pronto se vio que era mejor emplear hiposulfito de sodio en vez de sal común, y surgió el «Proceso Partera»; después, se llegará a los procesos de cianuración, empleados hasta la fecha, en combinación con la recuperación electrolítica de la plata contenida en solución (Muñoz, 1986).

Era muy grande la abundancia de plata, que en un año común la mina Jímmelsfiirt, la más abundante de Sajonia, dio 10,000 marcos (2,300 kg) de plata; la más rica de México, "La Valenciana", 360,000 (82,800 kg). La producción anual de Nueva España rindió diez veces más que la de todas las minas europeas.

La extracción media anual para fines del siglo XVIII y principios del XIX ascendía a dos millones y medio de marcos de plata (575,000 kg). Esta enorme riqueza se localizaba en unos cuantos lugares: en Guanajuato, Real del Catorce, Zacatecas, Sombrerete y Fresnillo; se extraía más del cincuenta por ciento del producto total, Guarisamey, Taxco, Bolaños, Real del Monte y Zimapan completaban, en la práctica, la íntegra producción de la Nueva España (Muñoz, 1986).

La producción anual de oro y plata alcanzada por Nueva España a principios del siglo XIX era de 14 millones de pesos. En 1810 llegó a 19 millones; en 1811 desciende a 10 y la siguiente anualidad a cuatro millones. En los años 18, 19 y 20 fue de 11, 12 y 10 millones, respectivamente; en 1821 decrece a seis millones. No es casual que las porciones extraídas observaran una proporción inversa a los éxitos del movimiento de independencia tanto de México como de España en contra de los franceses. Con base en las estimaciones del doctor Adolph Sotbeer, el monto de la producción en la primera decena de la centuria pasada llegó a 17,630 kg de oro y 5,538,000 kg de plata; de 1811 a 1820, sin embargo, sólo se extrajeron 10,310 kg de oro y 3, 120,000 de plata (Muñoz, 1986).

En los años siguientes a la independencia mexicana aunque la producción decayó no era por cierto despreciable. En el decenio de 1821 a 1831, el promedio anual obtenido para el oro fue de 976 kg y para la plata 264,800 kg. De 1831 a 1841 el producto medio anual del oro declinó hasta 864, pero el de la plata subió a 330,990 kg. Es en esta década cuando la producción total llegara a 8,640 y 3,309,900. Los lustros de la decena 1841- 1851 ascendieron su promedio anual tanto en el oro como en la plata: 1,994 para el oro y 420,000 kg para la plata; lo producido en este lapso subió a 19,940 y 4,203,100 kg, respectivamente. Para el quinquenio 1851 a 1856 la extracción seguía un ritmo incrementado con un promedio anual de 2,010 en oro y 466,100 kg en plata; el total de estos cinco años llegó a la cifra de 10,050 y 2,330,500 kg (Muñoz, 1986).

La estrategia de inversión extranjera de Díaz, respecto a la minería dio frutos; en 1905 México ya ocupaba el segundo lugar mundial como productor de cobre, diez años atrás no figuraba en la lista de productores importantes. Ocupaba el séptimo lugar como productor de oro y el primero como productor de plata. La inversión minera había alcanzado la cifra de 250 millones de pesos en minas y fundiciones. .. (Ramírez, 2006).

En 1904 el gobierno federal captó 9 millones 500 mil pesos por contribuciones mineras. Mediante una propuesta de reforma monetaria aprobada en 1905, Díaz reduce las contribuciones mineras casi un 60%, México se tornó en el paraíso de los inversionistas extranjeros. Para los inversionistas mineros norteamericanos además de las bajas contribuciones, tenían otra ventaja: las muy favorables leyes mineras comparadas contra la de los Estados Unidos: México tenía una ley federal minera aplicable a todos los estados, contrastando con la de Estados Unidos en que cada estado dictaba sus propias leyes (Ramírez, 2006).

- En México se otorgan los mismos derechos civiles a extranjeros y mexicanos en términos de negocios, los extranjeros pueden hacer denuncios y adquisición de títulos de minas, mientras que en los Estados Unidos hay que ser ciudadano americano para adquirirlos (Ramírez, 2006).
- En los Estados Unidos no existían límites de seguimiento del echado de la veta, un minero puede invadir otro terreno siguiendo su veta. En México se delimitan las labores subterráneas al diámetro de la denuncia en la superficie, lo cual no permite invadir otros terrenos (Ramírez, 2006).
- En los Estados Unidos se daba un plazo de 60 días a partir del denuncia, para hacer un tiro de exploración de 60 pies de ancho como mínimo sobre la veta e invertir por lo menos 100 dólares anuales como prueba de voluntad de trabajar, si esto no se cumple, se pierde el denuncia y pasa a dominio público (Ramírez, 2006).
- En México solo se pagan 6 pesos al año por denuncia, no hay que invertir ni iniciar tiro, solo es obligatorio hacer las mediciones y colocar mojoneras al igual que en los Estados Unidos (Ramírez, 2006).
- A partir de 1905 se derogan los impuestos sobre el ácido sulfúrico, sulfato de cobre, hiposulfitos, cianuros alcalinos, granalla, azufre, zinc y otros compuestos esenciales para las minas y fundiciones. Así como los derechos para la importación de maquinaria y equipo destinados a la minería o establecimientos metalúrgicos. El gobierno de Díaz también favoreció la

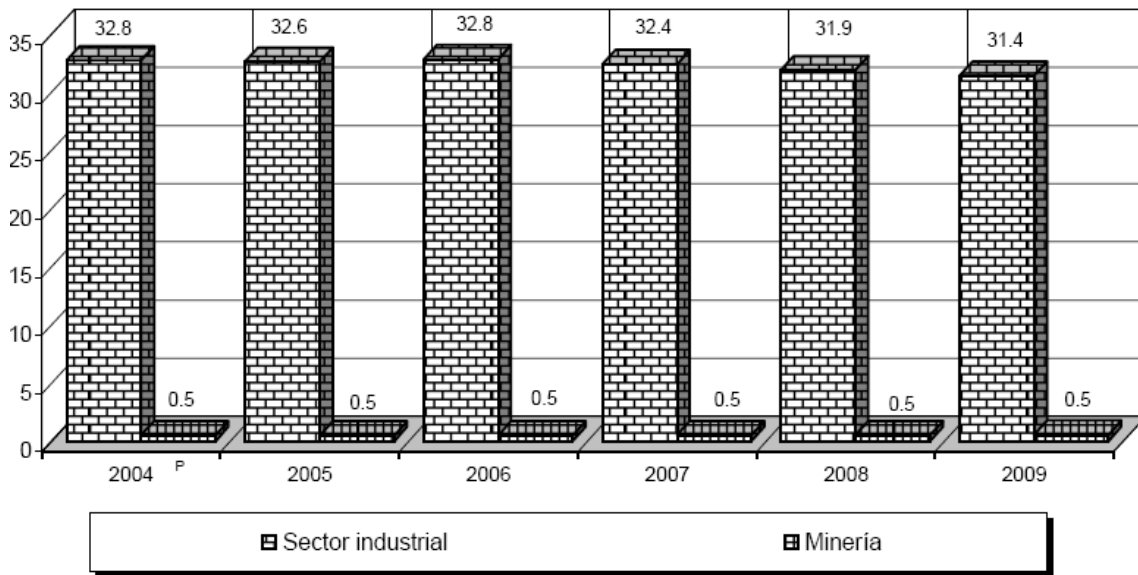
inversión en haciendas, industrias y comercio, mediante una política liberal que favoreció a unos cuantos.

Bajo las leyes fundadas en 1917, la actividad fue muy intensa en lo tocante al beneficio de la plata, el cobre y el plomo. Empero, por efectos de la gran depresión de 1928, en la industria de la plata hubo cierres y despidos. En el gobierno del General Lázaro Cárdenas se ofrecieron garantías adecuadas para el inversionista nacional, y sería 1935 el año de fundación de la Compañía Nacional Financiera y de Crédito Minero, S.A (UAM, 2011).

## **2.2 Situación actual**

Hoy, la actividad minera contribuye positivamente como generadora de divisas, mediante la exportación, manteniendo una balanza comercial superavitaria, conserva una aportación ascendente a la economía nacional y una notable participación en la producción mundial, como se muestra en la Figura 2.1, donde indica la participación de la minería en la economía mexicana a través de los años 2004 hasta el año 2009.

En el 2010, las entidades más importantes en esta actividad fueron, por orden de importancia y según su volumen de producción y participación del valor agregado bruto son: Zacatecas, Sonora, Chihuahua, Durango y Coahuila que produjeron alrededor de 85% del volumen de la producción nacional. Así 10 minerales, entre metálicos y no metálicos, 18 minerales de los casi 50 que se explotan en México, se ubicaban en una posición destacada, al estar entre los diez primeros lugares de la producción mundial como se indica en la Figura 2.2 (INEGI, 2010).



**Figura 2.1.** Participación del valor agregado bruto en valores básicos del sector industrial y de la industria minera en el total de 2004 a 2009

*Fuente:* INEGI, 2010.

Sin embargo, la minería mexicana ha afrontado en los tiempos recientes una serie de dificultades. A nivel nacional, éstas se derivaban de un marco jurídico complejo y excesivamente regulado, prácticas administrativas inoperantes y lentas, derechos fiscales que sobre agravaban a la producción, vastas áreas potenciales ociosas por diferentes causas, y una excesiva participación del sector público en áreas no estratégicas ni prioritarias. En el contexto internacional, se ha visto afectada por los bajos precios de los metales en el mercado, causados básicamente por la participación de otros países en la producción, aplicación de nuevas tecnologías que evitan el uso de metales tradicionales y el aumento en el reciclado de los mismos (INE 2000).

**Tabla 2.1.** México en la producción mundial de minerales, 2007.

| Minerales metálicos    | Producción                 | Lugar mundial |
|------------------------|----------------------------|---------------|
| Plata                  | 3,256 (toneladas)          | 2°            |
| Oro                    | 55,459(kilogramos)         | 9°            |
| Fierro                 | 7 (millones de toneladas)  | 13°           |
|                        |                            |               |
| Plomo                  | 140 (miles de toneladas)   | 5°            |
| Zinc                   | 458 (miles de toneladas)   | 6°            |
| Manganeso              | 119 (miles de toneladas)   | 8°            |
| Cobre                  | 238 (miles de toneladas)   | 12°           |
|                        |                            |               |
| Bismuto                | 854 ( toneladas)           | 3°            |
| Antimonio              | 74 ( toneladas)            | 6°            |
| Cadmio                 | 1,510 ( toneladas)         | 6°            |
| Molibdeno              | 10,167( toneladas)         | 6°            |
| Minerales no metálicos | Producción                 | Lugar mundial |
| Fluorita               | 1,045 (miles de toneladas) | 2°            |
| Barita                 | 158 (miles de toneladas)   | 6°            |
| Grafito                | 5 (miles de toneladas)     | 6°            |
| Yeso                   | 5,757 (miles de toneladas) | 7°            |
| Feldespato             | 348 (miles de toneladas)   | 10°           |
| Azufre                 | 1,114 (miles de toneladas) | 13°           |
| Fosforita              | 1,422 (miles de toneladas) | 13°           |

Fuente: SE, 2007

Con el fin de hacer posible un mayor aprovechamiento de los recursos minerales de la Nación, se liberaron a la explotación de los particulares áreas de reservas mineras nacionales, así como ciertos minerales que estaban reservados a la federación y se cambió el tipo de derechos que se cobraban por concesiones mineras, pasando de derechos por cantidad de mineral explotado a derechos por superficie concesionada. Estas dos acciones han

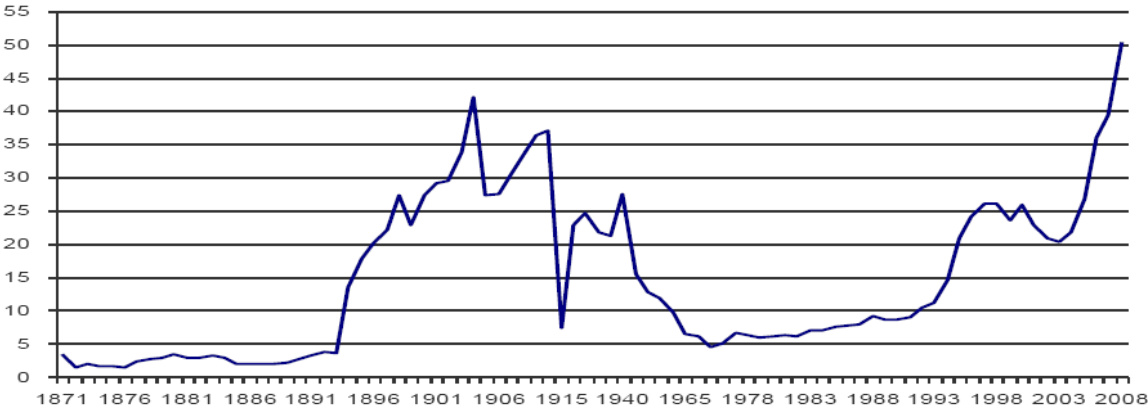
generado, por una parte, que el Gobierno Federal emita declaratorias de libertad de terrenos, para que éstos sean susceptibles de ser concesionados y por otra, que aquellos particulares que contaban con grandes superficies concesionadas sin explotar, desistan de ellas y le sean asignadas a quienes sí estén en posibilidades de hacerlo (INE, 2000).

**2.2.1 Producción de oro y plata en México a través del tiempo.**

Para una explicación más detallada, acerca de la extracción minera de los dos principales metales en México (oro y plata). Los cuales desde tiempos pasados han sido los metales con mayor demanda ya sea nacional e internacional. Se tienen las siguientes descripciones.

**2.2.2 Producción de oro.**

Respecto a la minería mexicana del oro, esta registró sus mayores volúmenes de producción en 1904 y el 2008, con 42 059 y 50 365 kg, en ese orden. A continuación se muestra en la Figura 2.2 que generaliza esta extracción, que abarca desde los años 1871 hasta los años 2008 (INEGI, 2010).

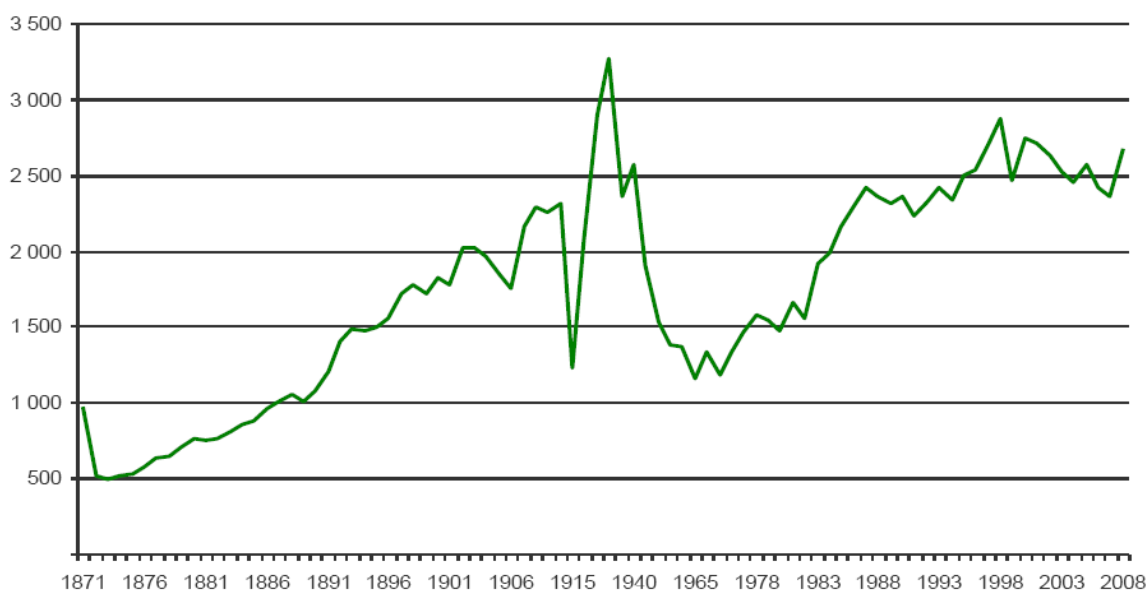


**Figura 2.2.** Volumen de la producción de oro en años seleccionados (Toneladas)

Fuente: INEGI 2010

### 2.2.3. Producción de plata.

En el caso de este mineral, también de gran importancia para la economía, se tiene que a partir 1871 ha habido un relativo ascenso en su producción: el mayor volumen se registró en 1930, con 3,272,288 kg, para descender abruptamente en 1965 a 1,152,857 kg, no obstante, se observa en la Figura 2.3 una recuperación en los últimos años (INEGI, 2010).



**Figura 2.3.** Volumen de la producción de plata en años seleccionados (Toneladas).

*Fuente: INEGI 2010.*

### 2.3. La producción de mercurio en México

Los minerales de mercurio se encuentran localizados principalmente en las siguientes entidades federativas (en particular en el noroeste y centroeste del territorio): Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato,



Hidalgo, Edo. de México, Morelos, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala y Zacatecas, ubicándose los principales yacimientos en los estados de: San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato y Guerrero (Yarto, 2004).

Se tienen registros de la producción de mercurio en México desde 1891, y en los últimos años ha mostrado la misma tendencia descendente que la producción mundial. Entre 1920-1929 su producción fue mínima y alcanzó su máximo de 1,118 toneladas en 1942; en 1991 se produjeron 340 toneladas de mercurio, mientras que en 1994 sólo 11 toneladas. A partir de 1995 no se tienen registros de su extracción minera (Yarto, 2004).

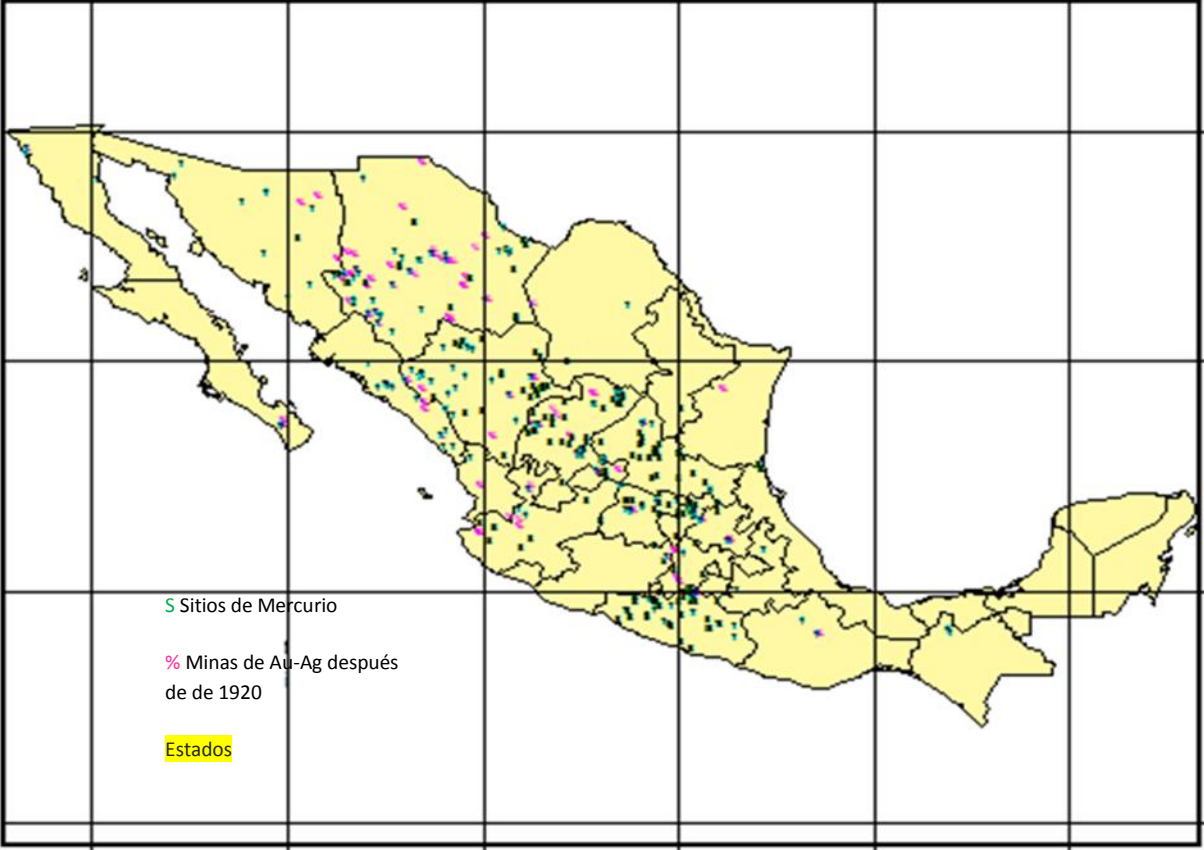
Durante los últimos años en que se produjo mercurio en nuestro país, ésta se realizó principalmente en los estados de Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas como se muestra en la Tabla 2.2 (Yarto, 2004).

**Tabla 2.2.** Principales Estados productores de Mercurio en México

| Estado          | Minas de mercurio | Minas que aun contienen mercurio | Total de minas |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|----------------|
| Colima          | 1                 | 0                                | 1              |
| Coahuila        | 2                 | 0                                | 2              |
| Chihuahua       | 28                | 3                                | 31             |
| Durango         | 27                | 9                                | 36             |
| Guanajuato      | 11                | 9                                | 20             |
| Guerrero        | 58                | 5                                | 63             |
| Jalisco         | 8                 | 1                                | 9              |
| México          | 4                 | 0                                | 4              |
| Michoacán       | 1                 | 0                                | 1              |
| Nuevo León      | 1                 | 0                                | 1              |
| Querétaro       | 23                | 3                                | 26             |
| San Luis Potosí | 25                | 3                                | 28             |
| Sonora          | 1                 | 0                                | 1              |
| Tamaulipas      | 6                 | 0                                | 6              |
| Zacatecas       | 53                | 4                                | 57             |
| Total           | 249               | 37                               | 286            |

Fuente: Giraldo, 2002.

Sin embargo, la producción secundaria de mercurio continúa, en particular, al recuperarlo como subproducto de la extracción de plata y oro a partir de jales mineros en el estado de Zacatecas, donde se producen alrededor de 20 toneladas anuales. Entre las plantas productoras de minerales metálicos registradas en la Cámara Minera de México, se aprecia la existencia de cuatro plantas que se dedican a producir mercurio (de manera secundaria) a partir del beneficio de minerales y de jales de mercurio, las cuales se encuentran ubicadas en los estados de San Luis Potosí, Durango y Zacatecas (Yarto, 2004).



**Figura 2.4.** Principales yacimientos de mercurio en México

Fuente: Giraldo, 2002.

Asimismo, se tiene conocimiento que hasta para el año 1992 operaban dos plantas más en el estado de Zacatecas que benefician jales por el proceso de

lixiviación, utilizando hiposulfito de sodio, para obtener oro y plata como producto y mercurio como subproducto, cuyos datos se muestran a continuación en la Tabla 2.3 (Yarto, 2004).

**Tabla 2.3** Plantas que benefician jales para obtener mercurio como subproducto en Zacatecas

| Nombre de la empresa                | Municipio            | Producto                                       | Subproducto        |
|-------------------------------------|----------------------|--|--------------------|
| Beneficiadora de Jales de Zacatecas | Guadalupe, Zacatecas | Precipitados de oro y plata (1 ton/mes)        | 1,207 kg de Hg/mes |
| Jales del Centro                    | Guadalupe, Zacatecas | Precipitados de oro, plata y cobre (2 ton/mes) | 690 kg de Hg/mes   |

Fuente: INE, 2001.

Debido a la reducción de los usos comerciales del mercurio tanto a nivel internacional como en México, y por la saturación del mercado nacional, se ha reducido su producción hasta haber dejado de producirlo desde 1995 a la fecha, esta producción se puede observar en la Tabla 2.4 (INE 2001).

**Tabla 2.4** Producción de mercurio en México.

| Año  | Producción Hg (Ton) |
|------|---------------------|
| 1985 | 394                 |
| 1986 | 185                 |
| 1987 | 124                 |
| 1988 | 345                 |
| 1989 | 651                 |
| 1990 | 735                 |
| 1991 | 340                 |
| 1992 | 21                  |
| 1993 | 12                  |
| 1994 | 11                  |
| 1995 | 0                   |
| 1996 | 0                   |
| 1997 | 0                   |
| 1998 | 0                   |
| 1999 | 0                   |

Fuente: INE, 2001.

La producción secundaria de mercurio mediante las beneficiadoras de jales es una de las pocas fuentes que integran mercurio al mercado de este metal a nivel nacional, además del que ingresa ilegalmente al país. En México existe una producción secundaria de mercurio por reprocesamiento de antiguos jales mineros en algunas ex haciendas de beneficio de metales en los estados de Zacatecas, Guanajuato y San Luis Potosí, en donde se usó el sistema de patio de amalgamación para la obtención de plata y oro. Hoy en día se usa un sistema de lixiviación para recuperar de estos jales mineros plata, mercurio y oro, siendo este último el de menor proporción. En el estado de Zacatecas se encuentran registradas 4 plantas en donde tan solo en 1996 se produjeron entre 30 y 33 toneladas de mercurio según la Procuraduría Federal de

Protección al Ambiente (PROFEPA), esto se puede observar en la Tabla 2.5. También en el estado de Zacatecas, en la Presa del Pedernalillo se ha encontrado mercurio en los sedimentos como resultado de la contaminación por jales mineros (INE, 2001).

**Tabla 2.5.** Plantas que Benefician Jales en Zacatecas.

| Razón social                                      | Productos   | Subproductos             |
|---|---|--------------------------|
| Jales de Zacatecas, S.A. de C.V.                  | Precipitado de Plata:<br>600-900 kg/mes           | Mercurio 350<br>kg/mes   |
| Beneficiadora de Jales de Zacatecas, S.A. de C.V. | Precipitado de Oro y Plata:<br>1 ton/mes          | Mercurio 1,207<br>kg/mes |
| Jales del Centro, S.A. de C.V.                    | Precipitado de Oro, Plata y Cobre:<br>2 ton/mes   | Mercurio 690<br>kg/mes   |
| Mercurio del Bordo, S.A. de C.V.                  | Precipitado de Oro, Plata y Mercurio: 0.5 ton/mes | Mercurio 518<br>kg/mes   |

Fuente: INE, 2001.

Otro factor que ha influido en la reducción del manejo de mercurio es la firma de acuerdos internacionales alcanzados durante la Convención de Estocolmo, así como por la formación de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, donde se crearon programas para el manejo adecuado de sustancias químicas de atención prioritaria, los cuales han servido para la disminución del uso de mercurio (INE, 2001).

## **CAPÍTULO 3.**

### **PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y TOXICOLÓGICAS DEL MERCURIO.**

#### **3.1 Propiedades fisicoquímicas**

De entre sus propiedades físico-químicas, mencionar que el mercurio tiene un número atómico de 80, un peso atómico de 200.59, una temperatura de fusión de  $-38.87\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una temperatura de ebullición de  $356.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El mercurio elemental es un metal pesado, de coloración blanca-plateada, y líquido a temperatura y presión ambiente. A  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  su gravedad específica es 13.456 y la presión de vapor  $0.16\text{ Pa}$  (The Merck Index, 2001).

El mercurio ocupa el lugar 67 en cantidad entre los elementos de la corteza terrestre y se encuentra en una abundancia de  $0.5\text{ ppm}$  (Kirk y Othmer 1967).

Así pues, la atmósfera saturada a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  contiene aproximadamente  $15\text{ mg/m}^3$ , valor 300 veces mayor que la concentración ocupacional (aire ambiente) máxima puntual permitida ( $0.05\text{ mg/m}^3$ ) o 1000 veces superior al nivel de exposición continua ( $0.015\text{ mg/m}^3$ ). La mayoría de mercurio que se encuentra en la atmósfera es mercurio elemental en forma vapor (Gaona, 2004).

A continuación se presenta la Tabla 3.1 con las principales características de este metal.

**Tabla 3.1.** Propiedades del mercurio.

|  |                              |
|--|------------------------------|
| Nombre, símbolo, número atómico                | Mercurio, Hg, 80             |
| Serie química                                  | Metal de transición          |
| Grupo, periodo, bloque                         | 12,6,d                       |
| Densidad, dureza Mohs                          | 13.531g/cm <sup>3</sup> ,1.5 |
| Apariencia                                     | Blanco plateado              |
| Estado de la materia Condiciones normales      | Líquido                      |
| Punto de fusión                                | 234.32K (-38.68°C)           |
| Punto de ebullición                            | 629.88 K (356.88°C)          |
| Entalpía de vaporización                       | 59,229 kJ/mol                |
| Entalpía de fusión                             | 2,295kJ/mol                  |
| Presión de vapor                               | 0.0002 Pa a 24K              |
| Velocidad a la que viaja el sonido en el metal | 1407 m/s a 293.15K           |

Fuente: The Merck Index, 2001.

El mercurio tiene siete isótopos estables (196, 198, 199, 200, 201, 202, 204) y cuatro isótopos radioactivos inestables (194, 195, 197, 203). Puede existir en tres estados de oxidación: Hg<sup>0</sup> (metálico), Hg<sup>+</sup> (mercurioso) y Hg<sup>2+</sup> (mercúrico), siendo sus propiedades muy diferentes en función del mismo. Las formas mercúricas y mercuriosas pueden formar un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos, aunque la forma mercuriosa es raramente estable bajo condiciones ambientales convencionales (Gaona, 2004).

Se presenta en la naturaleza bajo diferentes modalidades, ya sea en forma metálica, de vapor o gas, combinado con otros elementos (como cloro, azufre y oxígeno) para formar sales inorgánicas, o bien formando compuestos orgánicos (como el metilmercurio o el fenilmercurio), los cuales también pueden presentarse en forma de sales a través de procesos naturales, en los que pueden intervenir microorganismos: el mercurio inorgánico puede ser transformado en mercurio orgánico (Kirk, 1967).



Forma sales en dos estados de oxidación: mercurio (I) y mercurio (II). Las sales de mercurio (II) o mercúricas son mucho más comunes que las sales de mercurio (I). La mayoría de los compuestos inorgánicos de mercurio son polvos blancos o cristalinos, excepto el sulfuro de mercurio (también conocido como cinabrio) que es rojo y se torna blanco al exponerse a la luz (Kirk, 1967).

En la tabla 3.2 se presentan algunos de los compuestos inorgánicos de mercurio más comunes en la corteza terrestre (Yarto, 2004):

**Tabla 3.2.** Algunos compuestos inorgánicos más comunes.

|   |   |
|---|---|
| • HgCl cloruro mercurioso                                   | • HgCl <sub>2</sub> cloruro mercúrico                     |
|   | • HgO óxido mercúrico                                     |
| • Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> nitrato de mercurio     | • HgSO <sub>4</sub> sulfato de mercurio                   |
| • Hg(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> perclorato de mercurio | • Hg(CNO) <sub>2</sub> cianato de mercurio<br>(fulminato) |
| • Hg(OH) <sub>2</sub> hidróxido de mercurio                 | • HgS sulfuro mercúrico (cinabrio)                        |

Fuente: Yarto, 2004.

El mercurio también forma compuestos organometálicos. Estos se encuentran caracterizados por la unión del mercurio a uno o dos átomos de carbono para formar compuestos del tipo: RHgX y RHgR', en donde R y R' representan el sustituyente orgánico o cadenas de carbonos de longitud variable. Cabe destacar que el enlace carbono-mercurio es químicamente estable y no se rompe en presencia de agua ni ácidos débiles o bases. La estabilidad no se debe a la fuerza del enlace carbono-mercurio sino a la poca afinidad del mercurio por el oxígeno (Soria, 1999).

Desde el punto de vista toxicológico, los compuestos organometálicos más importantes son la subclase de los alquilvercuriales de cadena corta, en los

que el mercurio está unido al átomo de carbono de un grupo metilo, etilo o propilo (Soria, 1999).

Algunos de estos compuestos organometálicos (etil y propil mercurio) se utilizan en la industria y otros en la agricultura. Estos compuestos organometálicos son estables; sin embargo, algunos se descomponen fácilmente por acción de los organismos vivos, mientras que otros no pueden ser biodegradados (Soria, 1999). Es importante señalar que es en su forma elemental ( $\text{Hg}^0$ ) cuando el mercurio es más tóxico. Aunque no se conocen completamente todos los sitios de metilación del mercurio en el ambiente, se han identificado a los medios acuáticos como los más importantes (WHO, 1989). En orden de toxicidad, el metilmercurio y el fenil-mercurio son los compuestos de mayor preocupación por la facilidad de biodisposición que tienen en la cadena alimenticia (Soria, 1999).

### **3.2 Toxicidad del mercurio.**

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. Todas las investigaciones indican claramente que el mercurio puede constituir una amenaza para la salud humana y la vida silvestre. El riesgo viene determinado por los siguientes factores (Higuera et al, 2011):

- El tipo de exposición al mercurio.
- La especie de mercurio presente, ya que algunas son más tóxicas que otras, por ejemplo, las formas metiladas de mercurio.
- Los factores geoquímicos y ecológicos que influyen la forma de migración del mercurio en el medioambiente, y los cambios que puede sufrir durante dicha migración.

La mayor parte del mercurio presente en el medio ambiente (exceptuando la atmósfera) se encuentra en forma de sales mercúricas inorgánicas y compuestos organomercúricos.

Estos últimos vienen definidos por la presencia de un enlace C-Hg covalente. Así, los compuestos de mercurio más comunes en el medio ambiente son: las especies inorgánicas de Hg(II)  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Hg(OH)}_2$  y  $\text{HgS}$ ; los compuestos de metilmercurio  $\text{CH}_3\text{HgCl}$  y  $\text{CH}_3\text{HgOH}$ ; y, en menores proporciones, otros organomercuriales como dimetilmercurio o fenilmercurio (EPA, 2011).

Tanto el mercurio metálico, como sus sales orgánicas e inorgánicas son venenos protoplásmicos, fatales para humanos, animales y plantas. Los más tóxicos son los compuestos orgánicos y de ellos, los derivados alquilados.

Los factores que determinan los efectos tóxicos en humanos, son la velocidad y la cantidad absorbida, las propiedades fisicoquímicas de los compuestos y la susceptibilidad del individuo. El mercurio y sus compuestos pueden ingresar al cuerpo a través de la piel y los tractos gastrointestinal y respiratorio. En el caso del mercurio metálico la principal forma de entrar al organismo es en forma de vapor, la cantidad que se absorbe a través de la piel es mínima.

Los compuestos inorgánicos de mercurio, después de que han ingresado al organismo, son absorbidos y disociados por los fluidos corporales y la sangre, siendo distribuidos al plasma y eritrocitos. Los aril-compuestos y los alcoxi derivados se descomponen en iones mercurio y sufren el mismo proceso mencionado arriba. En cambio, los derivados alquilados se encontraron más en células sanguíneas que en plasma, probablemente por su gran estabilidad y su solubilidad peculiar.

Estos compuestos afectan el sistema nervioso central y se acumulan en el cerebro, siendo eliminados más lentamente del organismo que las sales inorgánicas y los aril y alcoxi derivados (Anexo 1).

Los compuestos alquilados tienen una vida media de eliminación de 50-60 días mientras que para los demás compuestos se tiene un valor de 30- 60 días. Estos valores dependen de la naturaleza del compuesto, la dosis, el modo y la velocidad de entrada al organismo.

Las sales solubles en agua producen severos efectos corrosivos en la piel y membranas mucosas, provocando náusea severa, vómito, dolor abdominal, diarrea con sangre, daño a los riñones y la muerte puede ocurrir en los siguientes 10 días.

Una exposición crónica provoca inflamación de la boca, salivación excesiva, pérdida de los dientes, daño a los riñones, temblores musculares, espasmos de las extremidades, cambios de personalidad, depresión e irritabilidad.

Generalmente, los compuestos de mercurio presentan bajas presiones de vapor, por lo que no contribuyen a la presencia de vapores tóxicos en áreas de trabajo, lo que si sucede con el mercurio metálico.

A continuación en la Tabla 3.3 se presenta la toxicidad del mercurio dependiendo de algunos de los diferentes compuestos inorgánicos de mercurio, su solubilidad, riesgos y control de exposición (Anexo 1).

**Tabla 3.3** Toxicidad de algunos compuestos inorgánicos de mercurio.

| Formula                         | Solubilidad en agua | Riesgos De acuerdo con The national MSDS Repository  | Daños a la salud   | Control de exposición   |
|---------------------------------|---------------------|--|--|---|
| HgCl <sub>2</sub> Sólido Blanco | 7.4 g/100ml         | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Salud: 4</li> <li>•Inflamable: 0</li> <li>• Contacto: 3</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inhalación: irritación en el tracto respiratorio, tos, dolor en el pecho, irritación de las mucosas</li> <li>• Ingestión: Muy toxico causa dolor abdominal y vómito, diarrea con sangre, problemas en el sistema nervioso.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• OSHA – concentración aceptable: 0.1 mg/m<sup>3</sup>.</li> <li>• ACGIH – metálico e inorgánico: 0.025 mg/m<sup>3</sup></li> <li>• ACHIH – índices biológicos: mercurio inorgánico en orina 35 ug/g de creatinina, mercurio total en sangre 15ug/L</li> </ul> |
| HgO Polvo naranja               | Insoluble en agua   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Salud: 4</li> <li>•Inflamable: 0</li> <li>• Contacto:3</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inhalación: irritación en el tracto respiratorio, tos, dolor en el pecho, irritación de las mucosas</li> <li>• Ingestión: Muy tóxico causa dolor abdominal y vómito, diarrea con sangre, problemas en el sistema nervioso.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• OSHA – concentración aceptable: 0.1 mg/m<sup>3</sup>.</li> <li>• ACGIH – metálico e inorgánico: 0.025 mg/m<sup>3</sup></li> </ul>  |

|   |  |   |   |   |
|---|--|---|---|---|
| <p>HgSO<sub>4</sub><br/>Gránulos<br/>cristalinos<br/>Blanco</p> | <p>Lábil en<br/>agua,<br/>descompone<br/>en ácido<br/>sulfúrico.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Salud: 4</li> <li>•Inflamable: 0</li> <li>•Contacto: 3</li> </ul>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inhalación: el HgSO<sub>4</sub> es especialmente tóxico por esta vía, severo daño a los tractos respiratorios.</li> <li>• Ingestión: la dosis letal es de 1.42 x 10<sup>-5</sup> gramos por kilogramo de peso en humanos. Causa ardor en las mucosas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• OSHA – concentración aceptable: 0.1 mg/m<sup>3</sup>.</li> <li>• ACGIH – metálico e inorgánico: 0.025 mg/m<sup>3</sup></li> </ul>  |
| <p>HgS sólido<br/>rojo</p>                                      | <p>Insoluble en<br/>agua</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Salud: 4</li> <li>•Inflamable: 0</li> <li>•Contacto: sin información</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy tóxico por inhalación, en contacto con piel o ingestión. Causa irritación en ojos e irritación en mucosas. Dañino al sistema nervioso central e hígado.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ACGIH – 0.1 mg/m<sup>3</sup> de acuerdo con las listas de mercurio arílico e inorgánico.</li> <li>• NIOSH – 0.05mg/m<sup>3</sup> (vapor, excepto organometálicos)</li> <li>• IDLH – 0.10mg/m<sup>3</sup> (sin considerar organometálicos)</li> <li>• OSHA – 0.1 mg/m<sup>3</sup> (para aril e inorgánicos de mercurio).</li> </ul> |

|                                   |                                      |   |   |  |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|
| <p>HgCl<br/>Sólido<br/>Blanco</p> | <p>Parcialmente soluble en agua.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>•Salud: 3</li> <li>•Inflamable: 0</li> <li>•Contacto: 3</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muy tóxico por inhalación, en contacto con piel o ingestión. Causa irritación en ojos e irritación en mucosas. Dañino al sistema nervioso central e hígado.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• OSHA – concentración aceptable: 0.1 mg/m<sup>3</sup>.</li> <li>• ACGIH – metálico e inorgánico: 0.025 mg/m<sup>3</sup></li> <li>ACHIH – índices biológicos: mercurio inorgánico en orina 35 ug/g de creatinina, mercurio total en sangre 15 ug/L</li> </ul> |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|

Fuente: Hojas de seguridad de cada compuesto.

### 3.2.1 Efectos del mercurio metálico en el ser humano.

El vapor o neblina de este metal irrita los ojos, las membranas mucosas y el tracto respiratorio superior. Puede causar reacciones alérgicas y disturbios del sistema nervioso.

Inhalación: Esta es la principal ruta de entrada al organismo de mercurio elemental, ya que vaporiza a temperatura ambiente y es absorbido por los pulmones. De aquí, es rápidamente absorbido y distribuido por la sangre. Aproximadamente 1 % del metal absorbido se almacena en el cerebro de mamíferos, donde puede permanecer por mucho tiempo, el resto se transporta a hígado y riñones donde es secretado a través de la bilis y la orina.

La inhalación de una concentración alta causa edema pulmonar agudo y neumonitis intersticial, la cual, puede ser fatal o generar tos persistente. Otros efectos son: salivación, dolor abdominal, dolor en el pecho, náusea, vómito y

diarrea. Se ha observado que conejos expuestos a una concentración de 28.8 mg/m<sup>3</sup> por 4 horas sufren daños severos en cerebro, hígado, riñones, corazón y colon.

Los síntomas de daños crónicos son: cambios en el comportamiento como depresión e irritabilidad, temblores y pérdida de apetito y peso. Los cambios de comportamiento son más marcados en trabajadores expuestos a niveles arriba de 0.05 mg/m<sup>3</sup>, mientras que los temblores se presentan a esta concentración y menores. Una vez que la exposición se evita, los signos de daño neurológico pueden presentarse de vez en cuando, pero en la mayoría de los casos se agravan con el tiempo. También pueden pelarse las manos y pies en exposiciones crónicas sin embargo, esto es menos común.

Contacto con ojos: Los irrita.

Contacto con la piel: El mercurio se absorbe a través de la piel (en cantidades mínimas) causando los síntomas ya mencionados. Se ha informado de dermatitis por contacto y sensibilidad a este metal en estudiantes de odontología. En estudios con voluntarios se observó que la velocidad de entrada de los vapores de mercurio a través de la piel fue de 2.2% de aquella absorbida por pulmones, por lo que el peligro por absorción por la piel es mínimo.

Ingestión: En estudios con ratas solo se observó una pequeña cantidad de metal absorbido después de la ingestión.

Carcinogenicidad: A pesar de que se le asoció a problemas de glioblastomas, en estudios recientes se han tenido resultados negativos en cuanto a la carcinogenicidad del mercurio en humanos y animales de laboratorio.

Mutagenicidad: Se han observado resultados positivos de compuestos inorgánicos y orgánicos de mercurio en estudios con *Drosophilla melanogaster*.



En cuanto a humanos, se han reportado resultados positivos y negativos de aberración cromosomal, por lo que no es claro el efecto de este producto.

Peligros reproductivos: Se ha observado que el mercurio traspasa la placenta, en estudios con monos expuestos a vapores del metal. También se han reportado, en mujeres ocupacionalmente expuestas al mercurio, complicaciones en el embarazo, en el parto, bebés de bajo peso, disturbios en la menstruación, abortos espontáneos y en el caso de incidencia, malformaciones en el feto. En ratas se han encontrado, además, defectos en el cráneo de fetos provenientes de madres expuestas de manera crónica a vapores de mercurio.

También los compuestos organo-mercurados han provocado efectos embriotóxicos y teratogénicos, (Anexo 1).

### **3.2.2 Toxicidad del mercurio orgánico.**

El metilmercurio encontrado en los alimentos se absorbe casi en su totalidad en la corriente sanguínea y se disemina en todos los tejidos en alrededor de cuatro días. Sin embargo, no se alcanzan los máximos niveles en el cerebro hasta los 5-6 días. En los seres humanos, la relación entre los niveles de sangre y cabello es de 1:250, con importantes variaciones individuales. Existe una diferencia importante en la distribución del metilmercurio entre los componentes de la sangre y el plasma (cerca de 20:1 en humanos, monos y cerdos de guinea, 7:1 en ratones y >100:1 en ratas)

Dentro del organismo, el metilmercurio se transforma en mercurio inorgánico. Estudios realizados en seres humanos después de la ingestión oral de dosis elevadas de metilmercurio durante dos meses, encontraron los siguientes datos sobre su distribución en tejidos como mercurio inorgánico: sangre, 7%; plasma, 22%; leche materna, 39%; orina, 73% e hígado, 16-40% (PNUMA, 2008).

La excreción de mercurio en animales y seres humanos está directamente relacionada con el peso corporal y tiene una duración media biológica de 39-70 días (con un promedio de 50 días) en humanos que consumen pescado como parte de su dieta habitual. Las hembras en estado de lactancia presentan una vida media para la excreción de mercurio significativamente más baja. La duración media del mercurio en cabello es similar a la de la sangre, pero presenta variaciones más amplias (35-100 días, con promedio de 65 días) (PNUM, 2008).

En el caso de una exposición continua se predijo, mediante el uso de un modelo de compartimiento individual y una duración media de 70 días, que tomaría aproximadamente un año para que el cuerpo se regule y logre excretar la misma cantidad que ingiere y que la máxima cantidad acumulada sería de 100 veces la ingestión diaria promedio. La validez de este modelo está respaldada por estudios de trazado de dosis individuales de metilmercurio en peces y por los resultados de análisis de cabello en individuos con alto índice de ingestión de metilmercurio. Los valores promedio de referencia para mercurio total en medios utilizados como indicadores son: sangre, 8  $\mu\text{g/L}$ ; cabello, 2  $\mu\text{g/g}$ ; orina, 4  $\mu\text{g/L}$  y placenta, 10  $\mu\text{g/kg}$  de peso húmedo. Se ha observado que existe una relación directa entre los niveles de mercurio en sangre y la cantidad de pescado ingerido. En comunidades donde existe un consumo prolongado de 200  $\mu\text{g}$  de mercurio/día proveniente de pescado, se han encontrado niveles de mercurio en sangre de 200  $\mu\text{g/L}$  y en cabello de 50  $\mu\text{g/g}$  (IPCS, 1991).

En el accidente de Minamata se observó la muerte en la gente expuesta con niveles de concentración en un rango de 10 a 60  $\text{mg/kg}$ , así como neumonía, enfermedad no isquémica del corazón y seria afectación al sistema nervioso central, además bronconeumonía, alveolitos edematosos, alteraciones del ritmo cardíaco, gastritis, falla renal, dermatitis, gingivitis, delirio, coma, polineuropatías y fallas respiratorias. (PNUMA, 2008).

### 3.2.2.1 Síntomas por intoxicación crónica por mercurio.

Debido al grave problema que significa el mercurio en el organismo humano en la Tabla 3.4 se presentarán los síntomas por la intoxicación crónica por mercurio.

**Tabla 3.4** Síntomas por intoxicación crónica por mercurio.

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Fase de absorción o impregnación | Anorexia                                       |
|                                  | Astenia  |
|                                  | Pérdida de peso                                |
|                                  | Cafeleas                                       |
|                                  | Vértigo  |
|                                  | Insomnio                                       |
|                                  | Dolores parestesias en los miembros inferiores |
|                                  | Masticación dolorosa                           |

Fuente: Pedrero, 2011.

La Tabla 3.5 explica los síntomas que son debidos por la ingesta de mercurio en el ser humano.

**Tabla 3.5** Alteraciones Digestivas

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Nauseas, Vómitos y diarrea |  |
| Estomatitis mercurial      | Sialorrea                                |
|                            | Hipertrofia de las glándulas salivales   |
|                            | Gingivitis                               |
|                            | Ulceraciones de la mucosa bucal          |
|                            | Caída prematura de los dientes           |
|                            | Sensación de alargamiento de los dientes |
|                            | Ribete gingival                          |
|                            | Color pardusco                           |
|                            | Disgeusia                                |
|                            | Aliento fétido                           |

Fuente: Pedrero, 2011.

En la Tabla 3.6 se muestra las alteraciones del sistema nervioso del cuerpo humano, debido a la presencia del mercurio en el organismo.

**Tabla 3.6** Alteraciones del sistema nervioso.

|                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Eretismo mercurial                | Irritabilidad, tristeza, ansiedad |
|                                   | Insomnio                          |
|                                   | Temor                             |
|                                   | Pérdida de la memoria             |
|                                   | Debilidad muscular                |
|                                   | Sueño agitado                     |
|                                   | Susceptibilidad emocional         |
|                                   | Hiperescitabilidad o depresión    |
| Temblor (desaparece con el sueño) | Lengua                            |
|                                   | Labios                            |
|                                   | Párpados                          |
|                                   | Dedos de las manos                |

Fuente: Pedrero, 2011.

La clínica del sistema nervioso central suele aparecer cuando las concentraciones sanguíneas de mercurio son excesivamente altas. No obstante no es infrecuente encontrar un poco elevado el mercurio en personas con desarreglos en el ciclo sueño-vigilia, o en alteraciones anímicas tipo depresiones. En enfermedades graves del sistema nervioso, como por ejemplo la esclerosis en placa, etc (Pedrero, 2011).

### **3.2.2.2 Intoxicación crónica por mercurio orgánico.**

Interesan los compuestos que son utilizados en medicamentos, en fungicidas y los derivados de metilmercurio que se encuentran en el ambiente. Ingresan

fácilmente al organismo por las vías respiratoria, digestiva y dérmica. Una vez absorbidos se unen a otras sustancias orgánicas por medio de los grupos sulfhidrilos. Se acumulan en cerebro y demás órganos manteniendo incluso una concentración elevada en sangre. El metilmercurio se acumula en mayor proporción en hígado y cerebro, esto es debido a que los compuestos orgánicos por su liposolubilidad atraviesan con facilidad las membranas biológicas, pasando fácilmente la barrera hematoencefálica y la placenta. Una gran cantidad de este mercurio absorbido sufre un proceso de desmetilación que da origen a una alta concentración de mercurio inorgánico en riñón e hígado. La eliminación se efectúa a través de heces y orina. La vida media se ha calculado de 100 a 190 días (Gutiérrez M., 2011).

Síntomas por intoxicación por mercurio orgánico (Pedrero, 2011):

Comienzo insidioso, con un periodo prodrómico que varía de dos semanas a dos meses:

- Astenia
- Laxitud
- Apatía
- Miedo
- Depresión

Posteriormente aparece:

- Parestesia principalmente en áreas dístales de las extremidades, lengua y boca.
- Ataxia
- Disartria
- Parálisis motora
- Alteraciones sensoriales (diplopía, estrechamiento del campo visual y sordera).

### **3.3 Toxicidad del mercurio en el medio ambiente.**

Ambas formas del mercurio, la orgánica y la inorgánica, son referidas como teratogénicas y embriotóxicas en animales experimentales. En humanos, la exposición prenatal al metilmercurio ha sido asociada con daño cerebral. Otros organismos expuestos para los compuestos orgánicos del mercurio en los humanos son el sistema nervioso central y periférico y el riñón. En los animales, los efectos tóxicos también ocurren en el hígado, corazón gónadas, páncreas y tracto gastrointestinal. El mercurio inorgánico es generalmente un tóxico menos agudo que los compuestos orgánicos del mercurio, pero afecta al sistema nervioso central adversamente (Soria, 1999).

El mercurio es tóxico para microorganismos, menos el mercurio inorgánico, en una cantidad de 5 ppb, que el orgánico, 0.5 ppb, de ahí las aplicaciones del mercurio orgánico como fungicida. Las plantas acuáticas son afectadas por el mercurio inorgánico a concentraciones de 1 mg/L pero a muchas más bajas concentraciones por el orgánico y más en estado larval. La toxicidad es afectada por la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y contenido de sales. La concentración en los organismos marinos depende de la edad del espécimen y de su posición en la cadena alimenticia. Se suele encontrar en las branquias y aparatos digestivos aunque posteriormente se metaboliza y se acumula en el hígado y finalmente en las partes musculares. En la Cuenca del Mediterráneo se ha encontrado preferentemente en el salmonete de fango, mejillón y gamba de altura, (es decir los organismos más cercanos a los sedimentos marinos), y en el atún y pez espada (con posibilidad de acumulación por vida y peso). La contaminación con mercurio produjo la gran mortandad de peces y de pájaros que comen peces en Japón. Respecto a los organismos terrestres, las plantas son generalmente insensibles a los efectos tóxicos de los compuestos de mercurio. Los pájaros muestran una reducción en la alimentación y por tanto un bajo crecimiento. De todas maneras los efectos son similares a los producidos en el cuerpo humano; el empleo de fungicidas con derivados de metilmercurio condujo a la muerte de pájaros y de sus depredadores y

probablemente haya contribuido al declive de población de algunas especies de depredadores (Mendioroz, 2011).

### **3.3.1 Toxicidad para los Microorganismos.**

El mercurio en su forma inorgánica es tóxico para los microorganismos en un amplio rango de concentraciones. Se ha reportado que el mercurio inorgánico tiene efectos a concentraciones del metal en el medio de cultivo de 5 pg/L y los compuestos organomercuriales a concentraciones al menos 10 veces menores que ésta (WHO, 1989).

Sus efectos en el desarrollo y supervivencia son modificados por factores ambientales tales como la temperatura, intensidad de la luz, pH y la composición química del medio, así como por factores relacionados con la célula tales como la variación genética (WHO, 1989).

El mercurio es mucho más tóxico en su forma orgánica es decir como metilmercurio, esto debido probablemente a que su incremento en la superficie de absorción aumenta la disponibilidad a las células y la subsecuente toma del metilmercurio. Esto puede ayudar a explicar por qué la toxicidad de los compuestos orgánicos de mercurio se correlaciona inversamente con la densidad celular, es decir conforme el área superficial de las células totales en el cultivo se incrementa hay menor cantidad de mercurio disponible para ser tomado por la célula (WHO, 1989).

En los compuestos organomercuriales la parte que contiene el mercurio se opone al anión dissociable y es la que determina la toxicidad. Esto puede manifestarse de varias formas; por ejemplo, en el caso del fitoplancton se observa como inhibición en el crecimiento lo que puede originar reducción en la fotosíntesis. Por esta característica los compuestos organomercuriales se han utilizado como fungicidas (WHO, 1989).



### **3.3.2 Mecanismos de Protección de los Microorganismos al Mercurio.**

Wood, (1974) ha señalado seis mecanismos disponibles de protección para los microorganismos (y ciertos organismos superiores) que incrementan su resistencia a los iones metálicos en general y específicamente al mercurio. Estos mecanismos son de naturaleza bioquímica y generalmente le restan efectividad al ión mercurio en desordenar los procesos bioquímicos normales de la célula. Los mecanismos son:

A) Bombeo del flujo que remueve el ión metálico de la célula, proceso que requiere de energía.

B) Reducción enzimática a una forma elemental menos tóxica.

C) Quelación por polímeros intracelulares (aún no bien establecido para el caso del mercurio).

D) Unión del mercurio a las superficies celulares.

E) Precipitación de complejos inorgánicos insolubles, frecuentemente sulfuros y óxidos a la superficie celular, y

F) Biometilación, con el subsecuente transporte a través de la membrana celular por simple difusión. Este último mecanismo es el que transforma al mercurio más tóxico a formas de vida más duraderas.

El mercurio se une a las paredes de las células o a las membranas celulares de los microorganismos, aparentemente en un número limitado de sitios de enlace. Esto significa que los efectos están relacionados a la densidad celular así como a la concentración del mercurio en el sustrato. Estos efectos

frecuentemente son irreversibles y el mercurio a bajas concentraciones representa un gran riesgo a los microorganismos (Soria, 1999).

### **3.3.3 Toxicidad para los Organismos Acuáticos.**

Como se ha señalado previamente, los compuestos orgánicos del mercurio generalmente son más tóxicos a los organismos acuáticos que los compuestos inorgánicos.

Las plantas acuáticas sufren daños por el mercurio en el agua a concentraciones cercanas a 1 mg/L para el mercurio inorgánico, pero a concentraciones más bajas por los compuestos orgánicos del mercurio. Los invertebrados acuáticos presentan diferente susceptibilidad al mercurio (Soria, 1999).

Generalmente, los estados larvales son más sensibles que los adultos. La toxicidad del mercurio se incrementa con la temperatura y decrece con la dureza del agua, además es más alta en sistemas a refluo que en sistemas estáticos. Este efecto se debe primordialmente a la concentración presente del mercurio disponible para el organismo, la que es menor en los sistemas estáticos (Soria, 1999).

El LC50 (concentración letal) para 96 horas varía entre 33 y 400 pg/L para peces de agua dulce y es mayor para peces marinos. De cualquier forma, los compuestos orgánicos del mercurio son más tóxicos. Los efectos se observan más fácilmente en el agua dulce suave, ya que la toxicidad del metal es reducida en presencia de altas concentraciones de sal, debido posiblemente al stress que esto origina en el organismo (IPCS, 1991).

La toxicidad también se encuentra influida por la temperatura, oxígeno disuelto y dureza del agua. Niveles de 1 a 10 pg/L normalmente causan toxicidad

aguda para las etapas más sensibles de desarrollo de muchas especies diferentes de invertebrados acuáticos (IPCS, 1991).

Se han reportado una gran variedad de anomalías fisiológicas y bioquímicas después de que los peces han sido expuestos a concentraciones subletales de mercurio, a pesar de que el significado ambiental de estos efectos es difícil de evaluar. La reproducción también se afecta adversamente por el mercurio y sus compuestos (Soria, 1999).

#### **3.2.3.4 Toxicidad para los Organismos Terrestres.**

Las plantas generalmente son insensibles a los efectos tóxicos de los compuestos de mercurio. Las aves alimentadas con mercurio inorgánico muestran una reducción en la ingesta alimenticia y en consecuencia un crecimiento pobre. Se han reportado otros efectos más sutiles en: los sistemas enzimáticos, funciones cardiovasculares, parámetros sanguíneos, la respuesta inmune, función y estructura renal, así como en el comportamiento (Soria, 1999).

## **CAPÍTULO 4.**

### **CICLO DEL MERCURIO.**

#### **4.1 Definición del ciclo del mercurio.**

Se define como ciclo del mercurio el flujo continuo de mercurio entre atmósfera, tierra y agua. Este ciclo está basado en el comportamiento del Hg en los diferentes medios, en las reacciones químicas implicadas, así como en parámetros de transporte y su destino final. En cualquier punto de la Tierra, la cantidad de mercurio presente será función de:

- El ciclo global natural.
- El ciclo global perturbado por la actividad humana (Antropogéneo).
- Fuentes regionales de mercurio.
- Fuentes locales de mercurio.

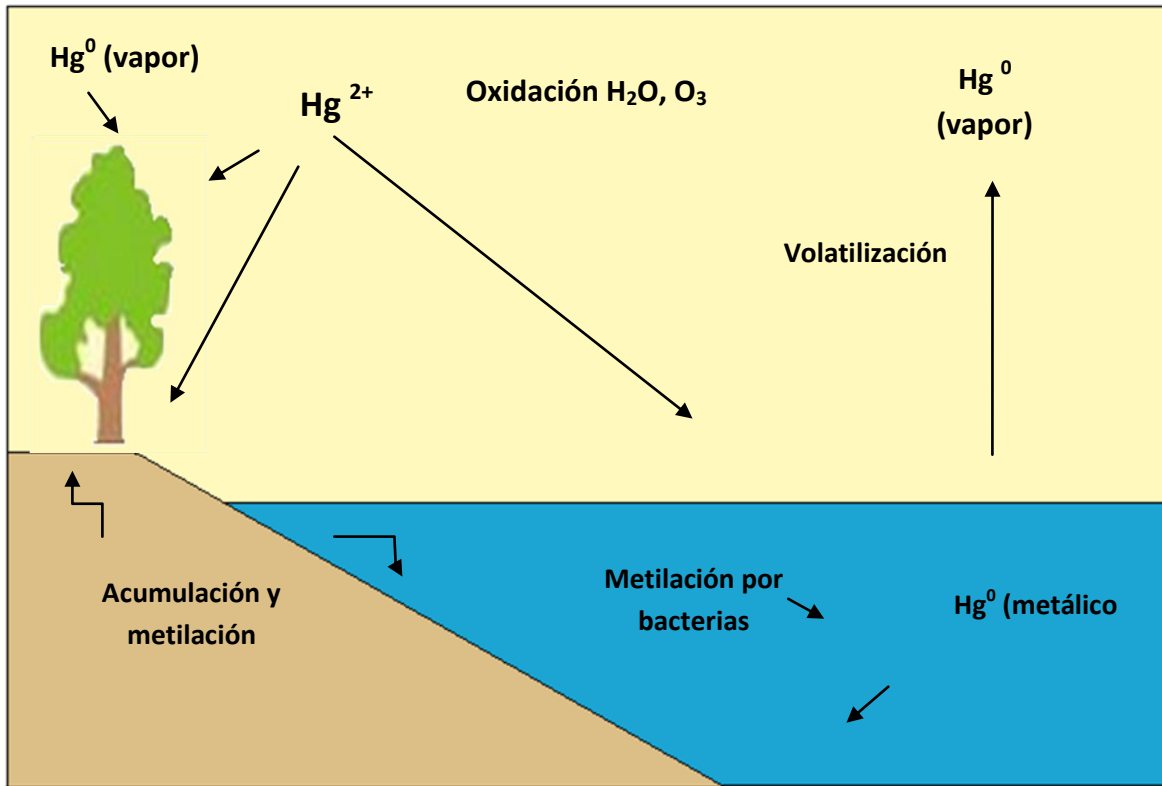
Igualmente, es necesario aportar datos acerca de la presencia antropogénica de mercurio en el medio ambiente. Debido a la gran movilidad del mercurio dentro de su ciclo, esta cuantificación se hace especialmente difícil.

Estudios recientes indican, por ejemplo, que de las aproximadamente 200,000 toneladas de mercurio emitidas a la atmósfera desde 1890, aproximadamente el 95% se encuentran en suelos terrestres, alrededor de un 3% en aguas oceánicas y un 2% en la atmósfera. También se estima que entre el 40 y el 75% del mercurio atmosférico actual tiene como origen fuentes antropogénicas (Mason et al, 1994).

#### **4.1.1 EL Ciclo natural del mercurio.**

En la Figura 4.1 podemos apreciar, la entrada del mercurio, es un ciclo básicamente atmosférico, y que la principal incorporación del mercurio a la atmósfera es debida al vulcanismo y al proceso de desgasificación del mercurio metal ( $\text{Hg}^0$ ), por sublimación. A partir de la atmósfera, se puede inhalar directamente, o se incorpora a las cadenas tróficas, mediante el ciclo del agua.

La contribución global de las fuentes geológicas a la atmósfera se ha estimado en 34,865 ton/año de las que la mayor parte procede de la evaporación de los océanos. El conjunto supone una cantidad en el ambiente en ningún modo peligrosa para la supervivencia de cualquier forma de vida; no obstante y localmente, como ocurre con lo emitido por los volcanes puede constituir un peligro. El mercurio es emitido a la atmósfera en forma de vapor elemental ( $\text{Hg}^0$ ), en donde se transforma a una forma soluble, probablemente  $\text{Hg}^{2+}$  y de donde retorna a la tierra con el agua de lluvia para dar origen a una concentración en la tropósfera, en los océanos y finalmente en los sedimentos marinos. El tiempo de residencia en la atmósfera del vapor de mercurio es de hasta 3 años mientras que el de las formas solubles es solamente de unas pocas semanas. El cambio de especiación del mercurio de inorgánico a orgánico (metilmercurio, principalmente) es el primer paso en el proceso de bioacumulación acuática. Puede ocurrir no enzimáticamente o a través de acción microbiana. El metilmercurio formado entra en la cadena alimentaria de las especies depredadoras en las que son acumulados tanto más cuanto mayor sea el peso y más larga la vida del organismo marino correspondiente (Mendioroz, 2011).



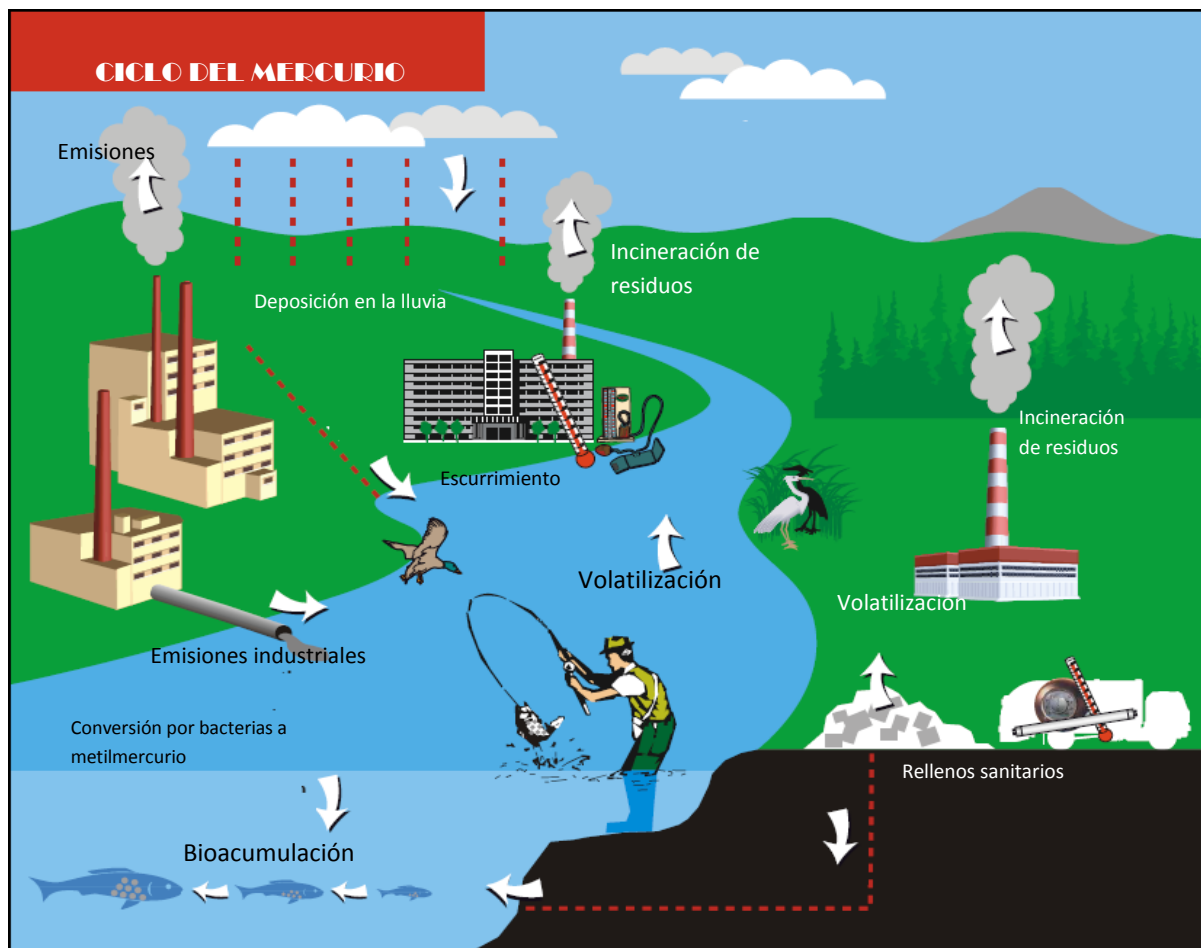
**Figura 4.1.** Entrada del mercurio en la naturaleza.

Fuente: S.Mendioroz, 2011.

#### 4.1.2 Ciclo antropogénico del mercurio.

En la Figura 4.2, se muestra un esquema de este ciclo, donde se puede ver que la incorporación del mercurio a las cadenas tróficas, por esta vía, es más variada que la anterior. El mercurio, puede entrar en un ciclo atmosférico, por los vertidos industriales atmosféricos o por la combustión de carbones, desde donde se introduce en las cadenas tróficas por el ciclo del agua, o bien se inhala directamente. También entra directamente en el ciclo del agua, mediante el vertido de residuos a las aguas de los ríos y mares, y a través de vertidos industriales o domésticos (alcantarillado). Por último, debido al uso agrícola del mercurio, está presente como contaminante del suelo, desde donde se incorpora a las cadenas tróficas.

El mercurio aportado al ciclo antropogénico, por las actividades del hombre es un orden de magnitud mayor al aportado por causas naturales, esto representa un elevado riesgo de toxicidad en áreas confinadas donde se desarrolla la correspondiente actividad. Las principales actividades que lo producen son, la propia minería del mercurio, la combustión de combustibles fósiles, petróleo, gas natural, carbón en las centrales térmicas y eléctricas, procesos metalúrgicos, metales y ácido sulfúrico, industria de cloro-alkali, incineración de residuos urbanos y, en menor cuantía, refinado de oro y producción de cemento (Krishnan et al, 1994).



**Figura 4.2.** Ciclo antropogénico del mercurio

Fuente: PNUMA, 2008.

Una vez oxidado, el 60% de mercurio atmosférico se deposita a la tierra y el 40% en agua, a pesar de que la tierra representa sólo el 30% de la superficie de la Tierra. La mayor proporción de mercurio sedimentado en la tierra probablemente refleja la proximidad de sus fuentes ya que la precipitación en el agua es tres veces menor en la tierra que en los océanos. En las aguas oceánicas, después de que se somete a un complejo conjunto de transformaciones químicas y biológicas, la mayor parte del Hg (II) se reduce a Hg<sup>0</sup> y vuelve a la atmósfera, sólo una pequeña fracción está permanentemente y es llevado hacia los sedimentos (Mason, 1994). Por lo tanto los inventarios de mercurio en la atmósfera y la superficie del agua de mar están estrechamente unidas por una precipitación efectiva (ciclo



impulsado por la volatilización) reacciones de oxidación y reducción. En los lagos, los mecanismos principales para la pérdida de mercurio son la sedimentación y la evaporación. En el caso de los suelos contaminados, el clima seco de la deposición de  $\text{Hg}^0$  (deposición > evaporación) se observa a veces, tres veces menos frecuente que la emisión neta (deposición < evaporación) (Morel, 1998). Los lugares contaminados, sin embargo, siempre muestran importantes niveles de emisión neta de Hg (Gustin et al, 1996).

#### **4.2 El mercurio en la atmósfera.**

Los procesos que definen el transporte y destino del mercurio en la atmósfera son básicamente las emisiones, la transformación y transporte en la atmósfera y la deposición.

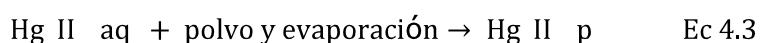
La emisión puede tener como origen procesos naturales o bien antropogénicos. Es importante remarcar que las emisiones naturales de mercurio tienen lugar principalmente en forma de mercurio elemental. En cuanto a las emisiones antropogénicas, éstas están dominadas por procesos industriales y fuentes de combustión de contenido variable en mercurio, pudiendo darse tanto en forma gaseosa ( $\text{Hg}^0$  u otras formas oxidadas) como en forma particular. En este segundo caso (forma particular), el mercurio suele encontrarse en alguna de sus formas oxidadas dada la elevada presión de vapor del mercurio elemental.

Una vez liberado a la atmósfera, el mercurio tiene un tiempo de residencia que varía bastante en función de la forma en la que se encuentre. Así, el  $\text{Hg}(0)$  tiene un tiempo de residencia medio de alrededor de un año, mientras que el mercurio oxidado [ $\text{Hg}(\text{II})$ ] tiene tiempos de residencia que oscilan entre horas y meses, ya que puede ser depositado con relativa facilidad tanto por vía húmeda como por vía seca (Gaona, 2004). Este tiempo es suficiente para que el mercurio atmosférico pueda distribuirse en todo el planeta antes de regresar a la tierra, lagos, mar y hielo. Como resultado, mientras que las principales emisiones de mercurio procedentes de fuentes puntuales se concentran en las

regiones industriales, la contaminación por mercurio es realmente global, que afecta a las zonas más remotas del planeta (Fitzgerald et al, 1998).

En contraste con el mercurio inorgánico, el mercurio elemental no es susceptible a ninguno de los principales mecanismos de deposición seca, a la vez que presenta una muy baja solubilidad en agua. Sin embargo, el mercurio elemental puede ser depositado a través de una serie de mecanismos que implican su conversión a mercurio inorgánico en las propias gotas de agua de las nubes (Gaona, 2004). El regreso de mercurio de la atmósfera a la superficie de la Tierra se produce principalmente a través de la precipitación húmeda de disolución de Hg (II). La adsorción de mercurio en los aerosoles, tales como el hollín también promueve su deposición, especialmente sobre la tierra (Mason et al, 1993), donde los aerosoles son abundantes.

Algunos de estos mecanismos se expresan en las ecuaciones Ec. 4.1 - Ec. 4.4



Aunque el Hg (II) producido por el ozono pueda ser devuelto a la forma Hg (0) a partir de la reacción con sulfito, la segunda de las reacciones (Ec. 1.2) tiene una cinética mucho más rápida por lo que el resultado final es la acumulación de Hg(II). Este tipo de mecanismos abren una vía a la posible deposición del mercurio elemental presente en la atmósfera (Gaona, 2004).

Por lo que se puede decir que la especie predominante en la atmósfera terrestre es la especie del mercurio  $\text{Hg}^{2+}$ , formada a partir de otras especies de mercurio, como el dimetilmercurio, el HgO o el propio Hg metal, en diferentes

procesos químicos de oxidación. Las reacciones de oxidación en fase gas del  $\text{Hg}^0$  con las especies  $\text{O}_3$ ,  $\text{Cl}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  a veces pueden ser importantes, aunque existen grandes incertidumbres con respecto a sus cantidades (Seigneur, 1994). Algunos de los  $\text{Hg}$  (II) producidos en la atmósfera se vuelve a reducir también por los mecanismos de participación del ion  $\text{SO}_3$  como el reductor, o fotorreducción de  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  (Xiao et al, 1994.).

### **4.3 El mercurio en suelos.**

Una vez depositadas en el suelo, las especies de  $\text{Hg}$  (II) están sujetas a un amplio abanico de reacciones químicas y biológicas. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, contenido en ácido húmico, etc.) son normalmente favorables para la formación de compuestos inorgánicos de  $\text{Hg}$  (II) como  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  y compuestos inorgánicos de  $\text{Hg}$  (II) complejados con aniones orgánicos. Sin embargo, no está todavía claro si el  $\text{Hg}$  en sedimentos se encuentra en forma de  $\text{HgCl}_2$  o  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  cuando se encuentra complejado por sustancias orgánicas, o bien en la formas menos reactivas de  $\text{HgS}$  o  $\text{HgO}$  (con una menor tendencia a la metilación que las anteriores). Aunque algunos compuestos inorgánicos de  $\text{Hg}$  (II) son bastante solubles (y en consecuencia, móviles), suelen formar complejos con la materia orgánica (sobretudo ácidos fúlvicos y húmicos) y arcillas de los suelos. Este comportamiento limita en gran medida la movilidad del mercurio en los suelos, haciendo que éstos actúen como grandes reservas de mercurio antropogénico.

Una parte del  $\text{Hg}$  (II) puede sin embargo ser adsorbido por ligandos orgánicos solubles u otras formas de carbono orgánico disuelto (DOC) facilitando la partición del mercurio hacia la fase acuosa (Gaona, 2004).

Otra especie de mercurio presente en proporciones muy pequeñas en suelos y sedimentos, pero de gran importancia debido a su toxicidad y capacidad para la bioacumulación, es el metilmercurio. Si bien avanzaremos que su formación viene dada principalmente por varios procesos microbianos actuando sobre

compuestos de Hg (II), y que su proporción media respecto al total de mercurio presente en suelos y sedimentos suele ser inferior al 1%.

Como en el caso de las especies de Hg(II), el metilmercurio presenta una gran afinidad por la materia orgánica, hecho que limita su movilidad en el medio ambiente.

Por lo que se puede intuir que el flujo de mercurio en el suelo terrestre es muy bajo debido a su gran afinidad que tiene con los elementos C y S. Así el mercurio aparece en varios tipos de minerales pero el más común es el cinabrio (HgS) (Morel et al, 1998).

Generalmente, los suelos orgánicos tienen mayores cantidades de mercurio que los minerales debido principalmente a la gran capacidad de creación de enlaces del humus con el mercurio. Esta fuerte afinidad del mercurio por la materia orgánica parece incrementarse con la acidez del suelo (Lodenius et al, 1989).

Por su parte Schuster (1991) describe de forma más extensa el tema y cita más superficies a las que se puede adsorber el mercurio, éstas son los oxihidróxidos de Fe y los minerales de la arcilla que tendrán mayor o menor capacidad de absorción dependiendo de factores como el pH. Otro factor que puede afectar a la adsorción sobre las distintas superficies mencionadas es la presencia en exceso de algunos elementos (Schuster, 1991).

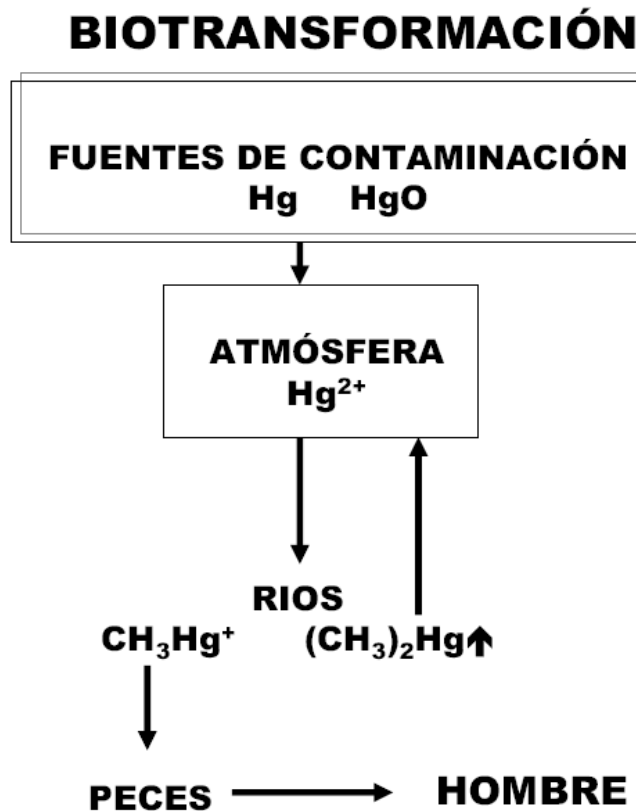
Por ejemplo, la presencia en el suelo de un exceso de  $\text{Cl}^-$  parece decrecer la absorción del  $\text{Hg}^+$  sobre las partículas minerales (incluidos los óxidos de Mn) y sobre la materia orgánica debido a la alta estabilidad de los compuestos de Hg-Cl cuya absorción es muy pobre. Por lo que el riesgo de movilización del mercurio por los suelos es poco probable.

#### 4.4 El mercurio en aguas terrestres.

Tenemos que la distribución del mercurio en las aguas terrestres es mucho más extensa que en las dos pasadas por lo que se tratará de dar una explicación lo más corta y entendible, ya sea de las reacciones que se llevan a cabo, así como el comportamiento del mercurio en el agua.

Existen una serie de vías a partir de las cuales el mercurio puede entrar en el dominio de las aguas terrestres. Hg (II) y metilmercurio pueden ser depositados directamente desde la atmósfera por vía húmeda o seca sobre cuerpos de agua terrestre; Hg (II) y metilmercurio también pueden ser incorporados a las aguas terrestres por acción de la lluvia (Hg complejado a suelo/humus en suspensión o a DOC); por otro lado, este lavado y arrastre de mercurio desde el suelo a las aguas terrestres puede realizarse a partir de corrientes de agua subterránea. Normalmente, las concentraciones de Hg total y de metilmercurio correlacionan positivamente con la concentración de DOC en el agua de los lagos. Hg<sup>0</sup> también puede ser producido en aguas terrestres a partir de la reducción de Hg (II) por los ácidos húmicos presentes en suelos o sedimentos. Igualmente, la demetilación del metilmercurio puede llevarse a cabo en presencia de luz solar. Una parte (pequeña) de este Hg<sup>0</sup> permanecerá disuelto mientras que la mayoría pasará a la atmósfera por volatilización.

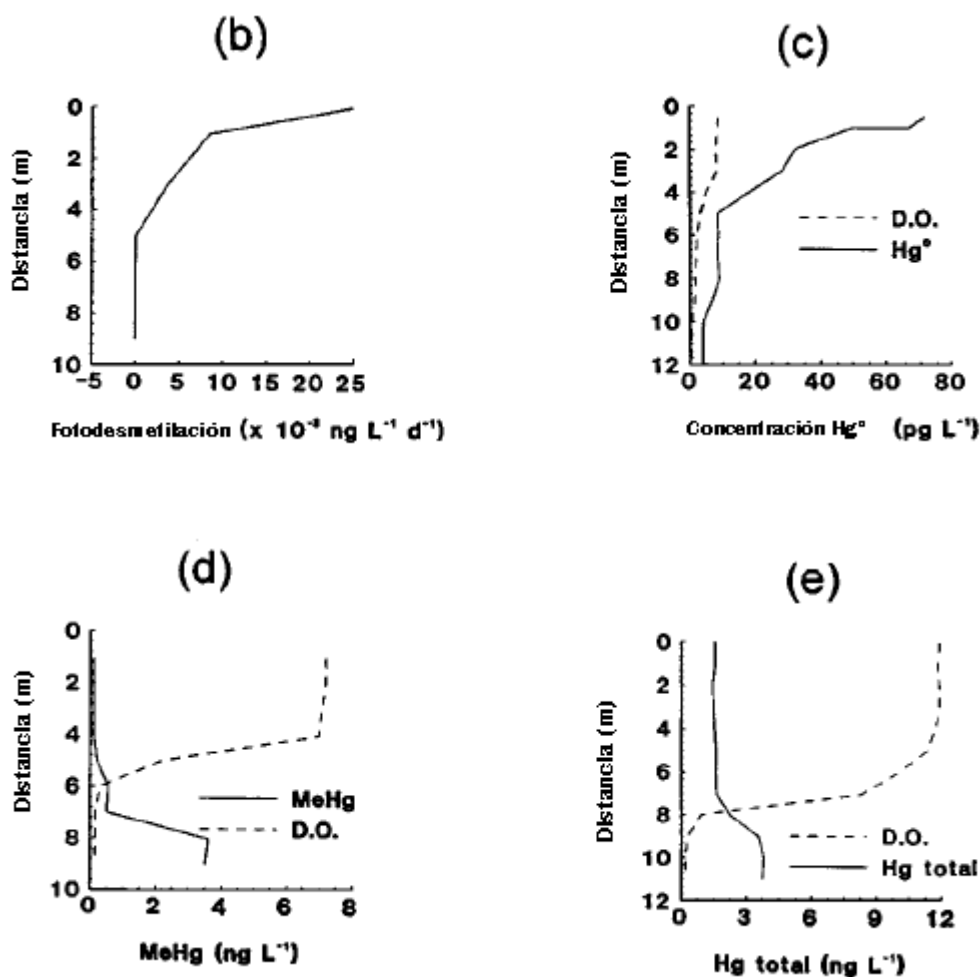
El mercurio es biotransformado, en especial en el agua de los ríos por microorganismos, e incorporado a las cadenas tróficas como metilmercurio, muy tóxico. En la Figura 4.3, se muestra un esquema simple de los procesos de biotransformación del mercurio. En la atmósfera, la especie predominante es la de Hg<sup>2+</sup>, formada a partir de otras especies de mercurio, como el dimetilmercurio, el HgO o el propio Hg metal, en diferentes procesos químicos; mientras que en el agua, como hemos dicho, se biotransforma a metilmercurio. (Doadrio, 2011).



**Figura 4.3.** Biotransformación del mercurio.

Fuente: Doadrio, 2011.

Disuelto el Hg se distribuye entre varios compuestos químicos: mercurio elemental que es volátil, pero relativamente no reactivo, un número de especies de mercurio (Hg (II)), y el mercurio orgánico, principalmente de metilo (MeHg), dimetilo (Me<sub>2</sub>Hg), y algunos de etilo (EtHg) mercurio. En general, y particularmente en los sistemas de estratificación, las concentraciones de Hg<sup>0</sup> son mayores cerca de la interfase aire-agua, mientras que los niveles de Hg total y MeHg son mayores cerca de los sedimentos (ver Figura 4.4). Es probable que se corresponda con el límite fracción inorgánica de Hg (II). Según los cálculos termodinámicos, el mercurio divalente en las aguas superficiales, Hg (II), no está presente como ion libre Hg<sup>2+</sup> (Morel et al, 1998).

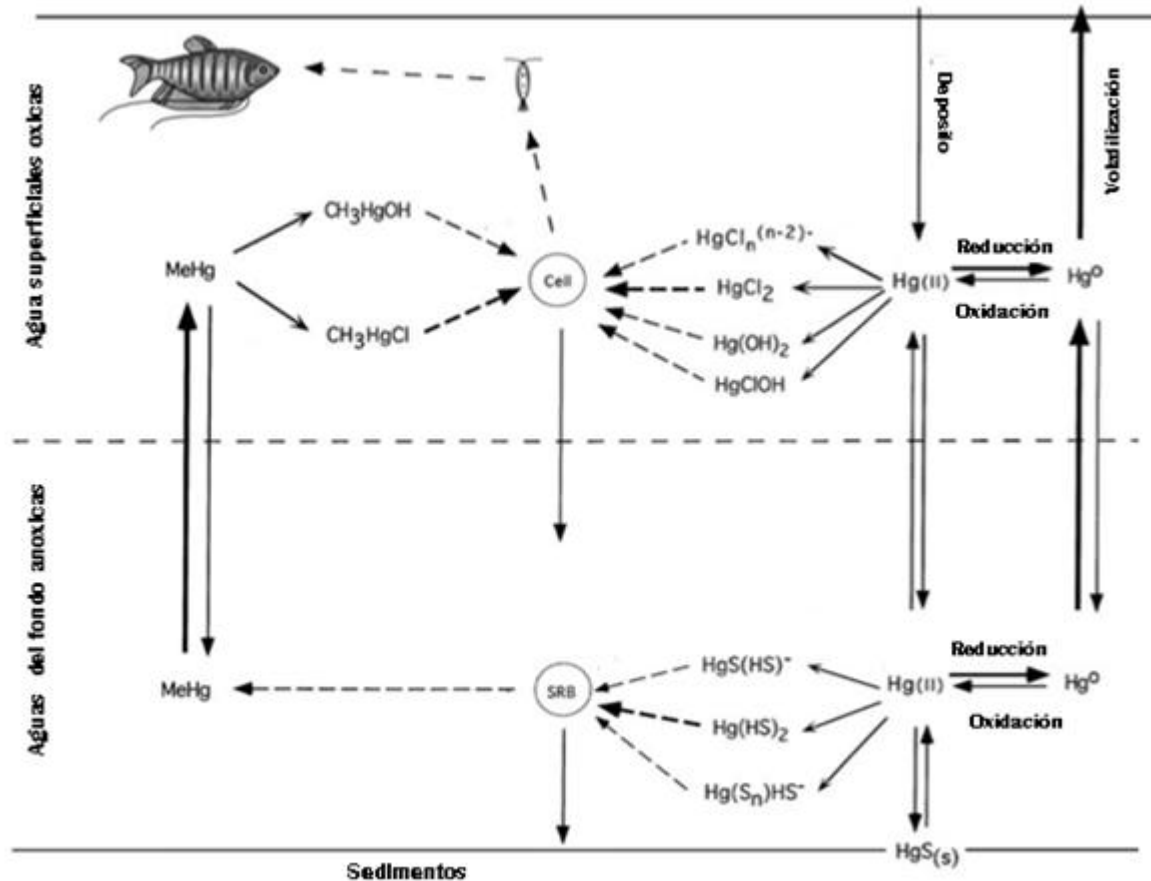


**Figura 4.4.** Comportamiento del mercurio en las aguas terrestres.

Fuente: Morel, 1998.

#### 4.4.1 Reacciones llevadas a cabo en las aguas terrestres.

En la Figura 4.5 se apreciarán las diferentes etapas de oxidación, así como de reducción del mercurio (II), y el mercurio elemental, y así tratar de explicar el cómo se lleva a cabo. Esta explicación se llevara a cabo en las siguientes etapas de reacción del mercurio descritas en los subtítulos posteriores.



**Figura 4.5.** Ciclo acuático del mercurio.

Fuente: Francois Morel, 1998.

#### 4.4.1.1 Reducción del mercurio Hg (II) a Hg (0).

Este proceso es llevado a cabo por bacterias mercurio-resistentes. La resistencia de estas bacterias frente al mercurio proviene de sus características genéticas, ya que disponen en su cadena de ADN de un operón que les permite realizar los procesos necesarios para transformar el Hg (II) a Hg (0), que al ser insoluble puede ser expulsado. Dicho operón recibe el nombre de mer-Operón. Un operón es un conjunto de genes, cada uno de los cuales tiene una función concreta dentro de un mismo proceso, como sería en este caso la transformación de Hg (II) en Hg (0). Dentro del mer-Operon hay un gen que se encarga de fijar el ion Hg (II), otro que favorece el transporte al interior de



la célula a través de la membrana celular, otro que fabrica el encima que cataliza la reacción y otro que posibilita el transporte del ion Hg (II) al punto óptimo donde tendrá lugar su transformación a Hg (0) (Herrero, 2007).

Al reducir la concentración de Hg (II), estas bacterias están haciendo disminuir la toxicidad del mercurio, ya que eliminan gran parte del sustrato del proceso de metilación tienden a eliminar el metil-mercurio mediante este proceso indirecto.

Existe otro tipo de bacterias que también realiza la transformación entre Hg (II) y Hg (0).

Se trata de las bacterias *Thiobacillus acidophilus*, que oxidan el hierro al mismo tiempo que reducen el mercurio en un mismo proceso redox (Morel, 1998).

En experimentos realizados con estas bacterias (Takeuchi, 1999), se observó que en un suelo contaminado con mercurio (1,5 ng/g) y en condiciones ácidas y de presencia de Fe (II), en 10 días se transformó un 54% del mercurio, y en 30 días la transformación había llegado hasta el 92%. Debido a este experimento es posible llevar a cabo este proceso biológico de reducción del mercurio y ser aprovechado como mecanismo de biorremediación.

La reducción microbiana a través de la inducción de la reductasa *mer* probable que explica estos datos. Por el contrario, los experimentos que muestran el predominio de los mecanismos de fotoreducción se llevaron a cabo en el Hg (II) de concentración de 3.20 pM, por debajo del umbral para la inducción de la reductasa. La eficiencia de la fotorreducción depende de los niveles de reducibles Hg (II) y la longitud de onda de la radiación y la intensidad. Cuando está presente en altas concentraciones, DOC parece actuar como un inhibidor competitivo de la radiación solar, la radiación UV del barrido antes de que pueda fotoreducirse Hg (II). Como resultado, el aumento de las tasas de fotorreducción se han observado en, bajo DOC lagos claros (Morel, 1998).

Parte de la dependencia de la luz de la reducción puede ser consecuencia de la actividad fotosintética del fitoplancton y cianobacterias. Ben-Bassat y Mayer señaló que la reducción de Hg (II) a Hg (0) fue acelerada por la iluminación de las células de *Chlorella*. En su estudio, la formación de Hg<sup>0</sup> disminuyó en concreto con la inhibición de la fotosíntesis.

En las concentraciones de mercurio natural en la gama baja (pM) picomolar, la reducción de lo que parece ser efectuada principalmente por procesos fotoquímicos, mientras que en aguas contaminadas, cuando la concentración de mercurio superior a 50 pM, reducción microbiana a través de la reductasa Mera probable que se convierte en el mecanismo predominante de Hg (II) de reducción (Herrero, 2007).

#### **4.4.1.2 Oxidación del mercurio.**

La oxidación del mercurio Hg (0) a Hg (II) es un proceso que se lleva a cabo tanto en la atmósfera como en ambientes acuáticos y terrestres.

De los mecanismos que dirigen esa misma transformación en ambientes acuáticos o terrestres se conoce bastante poco.

No obstante se ha visto que algunas bacterias son capaces de realizar este proceso, principalmente la *Eschericia coli*, por medio de encimas bacterianos del tipo de las hidroxidrasas. En ambientes terrestres se ha observado en este mismo sentido la actividad de otras bacterias como las *Bacillus* y las *Streptomyces* (Smith et al, 1998).

Hasta hace muy poco, se pensaba que la oxidación de Hg (0) a Hg (II) en aguas naturales puede ser insignificante o inexistente. Sin embargo, los últimos datos obtenidos muestran que esto no puede ser verdad en agua de mar. La presencia de altas concentraciones de cloruro y de las superficies de las partículas adecuadas catalizan la oxidación de Hg (0) por el oxígeno, dando lugar a tasas tan altas como 10% por hora en agua de mar natural (Yamamoto

M., 1996.). Esta oxidación puede ser más importante en las zonas costeras, donde la materia de partículas cargadas es mayor. Hay que señalar que una superficie efectiva de la catálisis de oxidación Hg (0) es el de mercurio líquido.

#### **4.4.1.3 Metilación del mercurio.**

Debido al caso de intoxicación por metilmercurio, al ingerir pescados contaminados por este compuesto en Minamata Japón (años 60), se llevaron a cabo una serie de experimentos que demostraron la capacidad de algunos microorganismos para pasar el mercurio inorgánico a metil-mercurio. Jensen y Jernelöv (1969) demostraron que en ambientes anóxicos de sedimentos de lagos se producía la metilación del ión Hg (II), y que dicho proceso podía ser inhibido mediante la esterilización, con lo cual tenía que estar relacionado con algún tipo de actividad bacteriana.

Inicialmente las hipótesis se focalizaron en un tipo de bacterias anaerobias llamadas metanógenas, ya que solo se conocía un posible donante de grupos metilo, el metilcorrinoide (metil B12), compuesto que interviene en el metabolismo de este tipo de bacterias. No obstante, se fueron encontrando otros organismos que eran capaces de metilar el ión mercurio, concretamente la bacteria formadora de esporas *Clostridium Cochlearium* y el hongo *Neurospora crassa*. En el primer caso, la reacción era similar a la propuesta para el caso de las metanógenas pero sin la participación de encimas y en el segundo la metilación era fruto de un proceso "incorrecto" de síntesis de metionina (Herrero, 2007).

Fue definitivamente en los años 80 cuando las bacterias metanógenas dejaron de ser consideradas como las principales responsables del proceso de metilación por medios biológicos. Dicho cambio se produjo como consecuencia de un experimento llevado a cabo por Compeau y Bartha, en el que añadiendo un inhibidor de la actividad metanogénica, el ácido 2-bromuroetano sulfónico, no solo no se reducía la metilación sino que se veía estimulada. Por el contrario añadiendo molibdeno, que es un inhibidor específico de las reacciones de

reducción del sulfato, se anulaba completamente la producción de mercurio orgánico (Compeau, 1985). Este experimento señalaba claramente a las bacterias sulfatorreductoras como las responsables principales del proceso de metilación del mercurio por encima de las metanógenas.

Posteriores investigaciones sobre estas bacterias reflejaron que no todas las bacterias sulfatorreductoras metilaban el mercurio en la misma medida. El proceso se daba en mayor grado en aquellas bacterias que usaban acetato en su metabolismo, los llamados oxidadores completos.

Además del tipo de bacterias, las condiciones ambientales también influyen en el proceso de metilación. Así, por ejemplo, en condiciones reductoras del hierro el proceso es suprimido, según se cree como consecuencia de la adsorción del sustrato Hg (II) por parte de los oxihidróxidos de hierro.

Por otra parte, si las bacterias sulfatorreductoras son las encargadas de llevar a cabo la metilación del mercurio, es evidente que la presencia de sulfato en el ambiente será determinante de cara a que esas bacterias puedan realizar su proceso de respiración, y será por tanto un factor limitante. Ciertamente, estudios hechos por Gilmour en los años 1991, 1992 y 1997 confirman que el proceso de metilación es posible en un cierto rango de concentraciones de sulfato, limitado inferiormente por el hecho de que las bacterias tengan suficiente para llevar a cabo su respiración, y por encima por la formación de sulfuro de mercurio, un compuesto insoluble que impide la formación del mercurio orgánico (Gilmour, 1992).

También se ha visto que el rango de pH óptimo para que las bacterias sulfatorreductoras lleven a cabo la metilación del mercurio que va entre 4 a 6.

Los mecanismos concretos en qué consiste la metilación del mercurio no son del todo conocidos. A partir de estudios realizados sobre la bacteria *Desulfovibrio desulfuricans* se propuso que el grupo metilo se originaba a partir

de la C-3 serian o bien a partir del acetilcoencima A, donde interviene el encima CODH, que será por tanto un regulador del proceso. Esta es la única explicación exacta que se ha dado a este proceso, aparte de la metilación originada por el proceso de síntesis de la metionina por parte de algunos hongos (*N.crassa*) (Choi, 1994).

Además existe otra forma orgánica del mercurio, esta es el dimetil-mercurio, que también tiene una toxicidad importante. Esta sustancia se ha observado en ambientes oceánicos y en costas tropicales, así como en las proximidades de algunos vertederos. La producción de dimetil-mercurio se da probablemente a partir de la interacción del metil-mercurio con el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S). La degradación de este compuesto se ve favorecida por ambientes ácidos y da lugar a metil-mercurio y metano. Se concluye, por tanto, que la presencia de dimetil-mercurio será más importante en ambientes alcalinos.

Sin embargo, este es un compuesto con características volátiles en ambientes acuáticos, que hacen más improbable su incorporación a la cadena alimenticia y disminuyen, por tanto, su toxicidad (Herrero, 2007).

#### **4.4.1.4 Desmetilación.**

Se trata del proceso mediante el cual las formas orgánicas del mercurio (principalmente el metilmercurio) pasan a las formas inorgánicas. Es demasiado importante contrastar que este proceso y el anterior para comprender el potencial de acumulación del metilmercurio en diferentes condiciones ambientales.

Los primeros experimentos sobre este tema tuvieron lugar a principios de la década de los 70 y en ellos se vio que una mayor degradación del metilmercurio estaba relacionada con una mayor presencia de microbios mercurio-resistentes. Además de ello, se descubrió el encima bacteriano que

catalizaba la degradación de gran parte de los compuestos de mercurio orgánicos.

Los procesos de desmetilación se pueden clasificar en dos tipos, en función de la sustancia de carbono obtenida como producto del proceso:

- Desmetilación reductiva: se obtiene  $\text{CH}_4$  como producto de la reacción. La llevan a cabo microorganismos mercurio-resistentes y el mercurio queda finalmente en forma de  $\text{Hg (0)}$ .

- Desmetilación oxidativa: se obtiene  $\text{CO}_2$  como producto de la reacción. La llevan a cabo bacterias metanógenas y sulfatorreductoras y el mercurio pasa de sus formas orgánicas a  $\text{Hg (II)}$ .

Recordemos que el ión mercurio  $\text{Hg (II)}$  es el sustrato del proceso de metilación mientras que la forma  $\text{Hg (0)}$  es muy insoluble y relativamente inocua. Por lo que es importante ver en qué condiciones se da una u otra vía, ya que una predomina en el proceso reductivo, indicando algunas condiciones desfavorables para la presencia de metilmercurio, mientras que es más factible que en la vía oxidativa el mercurio resultante  $[\text{Hg(II)}]$  será susceptible de ser metilado de nuevo (Morel et al, 1998).

Las investigaciones realizadas han demostrado que los dos factores más importantes en la elección de una u otra vía son la concentración total de mercurio y las condiciones aerobias o anaerobias del medio. Se ha visto que en condiciones aerobias y de altas concentraciones de mercurio la desmetilación se da en su forma reductiva mientras que en condiciones anaerobias y de bajas concentraciones del elemento el proceso es oxidativo. La máxima concentración de mercurio a la que se ha llegado a detectar la degradación del metilmercurio por su vía oxidativa es de 2300 ng/g. No obstante los límites entre una y otra vía están delimitados de una forma muy aproximada, y además hay otros factores que influyen en el proceso, como la presencia de algunas sustancias que pueden inhibir o estimular alguno de los dos caminos.

Por ejemplo, experimentos realizados por Marvin-Dipasquale y Oremland (1998) mostraron que la presencia de sulfatos y nitratos en los sedimentos potenciaban la vía oxidativa, ya que se observó un aumento en la relación entre CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en los productos de la desmetilación. Después de la metilación del Hg<sup>2+</sup>, las bacterias reductoras de sulfato de los sedimentos anóxicos como *Clostridium desulfuricans*, catalizan la reacción de formación del HgS, insoluble, a partir de H<sub>2</sub>S y Hg<sup>2+</sup>, lo que implica una disminución del Hg<sup>2+</sup> disponible en solución. Como paso previo a la formación del HgS, se forma el sulfuro de dimetilmercurio [(CH<sub>3</sub>Hg)<sub>2</sub>S]. Si estos sedimentos se airean, el HgS puede ser oxidado, principalmente por los thiobacillus, produciéndose Hg<sup>2+</sup>, que resulta metilado (Marvin-DiPasquale, 1998).

Ejemplificando el CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>, se ha comprobado que las bacterias reductoras de sulfato también pueden llevar a cabo una desmetilación oxidativa del metilmercurio, con producción de Hg<sup>0</sup> y la liberación de CO<sub>2</sub>, utilizando el CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup> de forma parecida a otros compuestos monocarbonados, como el metanol. Las bacterias metanógenas, por su parte, pueden reducir el metilmercurio a mercurio metálico, con producción de metano. En los sedimentos en los que están presentes estos tipos de microorganismos, se detecta la producción de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub> a partir del metilmercurio, siendo la actividad mayor en los sedimentos con elevados niveles de contaminación.

La reacción de hidrólisis de MeHg  $CH_3 - Hg^+ + H^+ \rightarrow CH_4 + Hg^{2+}$  es termodinámicamente favorable, pero obstaculizada cinéticamente y el metilmercurio (MeHg) es por lo tanto estable en solución acuosa. Sin embargo, el obstáculo de la cinética de esta reacción puede ser superada por fotoquímica o mecanismos enzimáticos, y el metilmercurio se ha demostrado para ser degradado por algunas bacterias y por la luz (Morel, 1998).

Algunos genes bacterianos *Mer*, donde MerB, por una ligadura organomercurial que confiere resistencia bacteriana a los compuestos organomercuriales. La enzima cataliza Mer B la reacción de hidrólisis se muestra arriba, dando lugar a la formación de Hg (II). El Hg (II) de iones

formados se reduce a  $\text{Hg}^0$  por el mercurio iónico reductasa Mer-A (Misra TK, 1992). No hay datos de campo directo para cuantificar la importancia de este mecanismo en la naturaleza, pero uno puede deducir de la participación de la reductasa de Mer A que se puede inducir en el agua contaminada sólo cuando la concentración de mercurio sea superior al 50 pM. El metilmercurio (MeHg) se ha demostrado que se fotodegrada en aguas óxicas en los lagos y agua de mar (Figura 10). La velocidad de reacción es de primer orden con respecto a la concentración de metilmercurio (MeHg) y la radiación solar, y no está asociada con la fase de partículas (Sellers, 1996). El oxígeno generado por reacciones fotoquímicas es probable responsable de esta degradación por lo que la fotodegradación es probablemente la principal vía de degradación para el metilmercurio en los cuerpos de agua con concentraciones de mercurio óxica baja (<50 pM) (Suda, 1993).

Estos ejemplos muestran la gran complejidad de los mecanismos que dirigen y regulan estos procesos, en los que aún queda mucho por descubrir para conseguir entenderlos y explicarlos correctamente.

#### **4.4.1.5 El mercurio en ambientes marinos.**

Para escribir correctamente la presencia y flujos de Hg en ambientes marinos, es necesaria una primera clasificación de estos ambientes en aguas costeras y aguas oceánicas.

Las aguas costeras están potencialmente afectadas en mayor grado por especies reactivas de Hg y mercurio particular liberados a la atmósfera por fuentes antropogénicas cercanas. Para algunos estuarios contaminados por Hg, la principal fuente de este contaminante puede llegar a ser la descarga acuática y no la deposición atmosférica. Las atmósferas cercanas a estas aguas costeras pueden contener también una mayor proporción de agentes oxidantes, dando lugar a ambientes más reactivos.



Los flujos de mercurio desde estas aguas costeras incluyen (por orden de significancia): sedimentación del Hg particular, flujo hacia el océano y evaporación a la atmósfera.

El mercurio (y en particular el metilmercurio) presenta una clara acumulación en las cadenas alimenticias costeras. Esta bio-acumulación puede ser separada en dos grandes subgrupos, como son la comunidad de micro-invertebrados presente en los sedimentos bénticos y la comunidad de fitoplancton y zooplancton (así como peces plantívoros y piscívoros) que reside en la columna de agua (Gaona, 2004).

En el caso de las aguas oceánicas, el aporte de Hg es mucho menor que el descrito para las aguas costeras. Para estas aguas, el aporte de Hg tiene lugar por deposición desde la atmósfera y por flujos desde las aguas costeras. Estas entradas de mercurio se presume ocurren principalmente en la fase mixta superior. Desde esta capa superior, el mercurio reactivo es transportado (normalmente en forma particular) a regiones o capas oceánicas más profundas donde la metilación ocurre (capas con menor contenido en oxígeno).

Además, las partículas que contenían el Hg van degradándose con la profundidad, liberando en consecuencia el Hg al agua. El mercurio es entonces transportado a la fase mixta (a profundidades inferiores a 100 metros), donde es incorporado a la cadena alimenticia. El metilmercurio, puede sin embargo ser también demetilado, dando lugar a mercurio elemental que satura las capas superiores y acaba finalmente volatilizándose a la atmósfera (Burton, 1971).

## **CAPÍTULO 5.**

### **EMISIONES DEL MERCURIO EN MÉXICO.**

La mayor parte del mercurio presente actualmente en la atmósfera es producto de muchos años de emisiones provenientes de actividades antropogénicas. Es difícil estimar el componente natural de la carga total atmosférica, pero en todo el planeta hay indicios de que las emisiones antropogénicas de mercurio han generado índices de deposición actuales entre 1.5 y 3 veces mayores a los existentes en la época preindustrial. Además, dentro de las áreas industriales y en sus inmediaciones los índices de deposición han aumentado de 2 a 10 veces durante los últimos 200 años.

La aplicación del mercurio en la extracción de plata en las minas del "Nuevo Mundo" (México, Bolivia y Perú) por parte de los conquistadores españoles entre 1570-1820 posiblemente constituyó la mayor emisión antropogénica continuada de mercurio al medio ambiente. Se ha estimado un consumo medio de 468 Tm año<sup>-1</sup> de mercurio en las minas de plata, originando una emisión de 351 Tm año<sup>-1</sup>, lo que supone aproximadamente un 20% del total del Hg emitido por fuentes naturales (Cabañero, 2005).

Estudios recientes sitúan las emisiones antropogénicas en 2,000-4,500 Tm año<sup>-1</sup>, de las cuales cerca del 95% se depositan en la superficie terrestre, un 3% en las aguas y un 2% en el aire. Las fuentes antropogénicas más importantes que liberan Hg al medio ambiente son: la industria del cloro-álcali, la combustión de combustibles fósiles (principalmente carbón), la producción de cemento, la minería, actividades metalúrgicas y la incineración de desechos médicos y municipales. Stein y col. estimaron que aproximadamente el 80% de las emisiones antropogénicas de mercurio son emisiones de mercurio elemental a la atmósfera, principalmente de la combustión de combustibles fósiles, actividad minera e incineración de desechos. Un 15% se introduce directamente en el suelo a través de la aplicación de fertilizantes y fungicidas y el vertido de desechos municipales (ej. baterías y termómetros). El 5%

restante ocurre mediante el vertido de residuos industriales al agua (Cabañero, 2005).

Estudios realizados sobre las emisiones antropogénicas a la atmósfera en los países económicamente desarrollados (Tabla 5.1) indican que la mayor fuente de mercurio es la combustión. Sin embargo, en aquellos países donde hay explotaciones mineras de oro, ésta es la principal fuente de emisión de mercurio (Cabañero, 2005).

Las autoridades sobre el medio ambiente de algunos países consideran al mercurio como contaminante prioritario por sus conocidos efectos perjudiciales y son conscientes de los problemas que causan su uso y liberación al medio ambiente. Por ello, se han adoptado medidas internacionales encaminadas a abordar el problema mundial que supone el mercurio. Gracias a estos esfuerzos se han reducido las emisiones antropogénicas de algunas fuentes importantes en América y Europa. Además, en algunos países desarrollados se han disminuido las emisiones antropogénicas totales en la atmósfera durante la última década. Por ejemplo, en Canadá las emisiones se redujeron de 33 a 6 toneladas métricas entre 1990 y 2000.

**Tabla 5.1.** Emisión antropogénica de mercurio en los Estados Unidos de América

| Fuente de emisión   | Toneladas | % Total de emisiones | Especies de mercurio (%) |       |     |
|---|-----------|----------------------|--------------------------|-------|-----|
|   |           |                      | Hg°                      | Hg 2+ | Hgp |
| incineración residuos médicos   | 58.6      | 26                   | 20                       | 60    | 20  |
| desechos municipales  | 49.8      | 22                   | 20                       | 60    | 20  |
| Calderas de carbón, gas y aceite  | 48.5      | 22                   | 50                       | 30    | 20  |
| Calderas de plantas térmicas y otras Industrias   | 28.5      | 13                   | 50                       | 30    | 20  |
|   |           |                      |                          |       |     |
| Fundición metales   | 8.7       | 4                    | 85                       | 10    | 5   |
| Industria cloro-alcali  | 6.5       | 3                    | 70                       | 30    | 0   |
| Otras fuentes Puntuales   | 16.2      | 7                    | 80                       | 10    | 10  |
| Fuentes difusas<br>(Preparación amalgamas dentales, rotura lámparas fluorescentes, uso en laboratorios) | 6.9       | 3                    | 100                      | 0     | 0   |
| Total   | 223.7     | 100                  | 475                      | 230   | 95  |

Hg°= vapor mercurio elemental, Hgp= mercurio asociado a partículas.

Fuente: INE, 2001.

A pesar del endurecimiento de la legislación durante los últimos años y de la reducción de consumo mundial de mercurio (la demanda global es menos de la mitad de lo que era en 1980) se ha reducido la contaminación atmosférica ocasionada por la producción industrial, pero la contaminación de las aguas debido a la actividad minera sigue siendo significativa.

## **5.1. Fundición de metales ferrosos y no ferrosos.**

Para tratar de comprender de manera muy sencilla, las definiciones de un material ferroso, un material no ferroso y en qué consiste la fundición, por lo que se tienen estas breves definiciones.

Básicamente los metales ferrosos son los aceros que tienen un porcentaje de carbono en su composición. Según el porcentaje se dividen en dos grupos:

1. Aceros (con un porcentaje menor al de 1,98 % de carbono)
2. Fundiciones (con un porcentaje mayor al de 1,98 % de carbono (Sistemas en la fundición, 2011)).

Los metales no ferrosos incluyen a todos los metales excepto al hierro. Su utilización no es tan masiva como los productos férreos (acero, hierro, fundición), pero tienen una gran importancia en la fabricación de gran cantidad de productos.

Los metales no ferrosos y sus aleaciones, son en general resistentes a la corrosión atmosférica y la oxidación. Pero no es esta la única cualidad, que los hace recomendables para muchas aplicaciones, sino también la facilidad con que se moldean y mecanizan; la elevada resistencia mecánica en relación a su peso de algunas aleaciones; la gran conductividad térmica y eléctrica, y también su bella terminación desde el punto de vista decorativo.

Se denomina fundición al proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas consistentes en fundir un material e introducirlo en una cavidad, llamada molde, donde se solidifica.

La industria fundidora en México, forma parte de la Sociedad Mexicana de Fundidores y en 1999, según su Directorio Nacional existen 482 empresas fundidoras tanto de metales primarios como reciclados (secundarios), de las

cuales, 2 son micro con capacidad en toneladas por mes menor a 200, 194 son pequeñas con 200 a 500, 193 son medianas con 500 a 1000 y 93 son grandes con más de 1000 (INE, 2000).

Muchas de estas empresas se dedican a la fundición de diversos metales, se observa en los datos obtenidos que las empresas pequeñas se diversifican más en sus actividades, dedicándose algunas a la fundición de hasta 5 metales diferentes, mientras que las grandes son más especializadas en su actividad dedicándose a la fundición de 1 o 2 metales (INE, 2000).

Aún no existe un estudio sobre tipo de tecnología y combustible que utilizan; ni se cuenta con datos precisos de producción (Tabla 5.2); como tampoco se tiene conocimiento acerca de si su producción es primaria o secundaria, así como sobre sus emisiones de mercurio.

**Tabla 5.2.** Producción Minera Total en México (ton/año).

|       | 1995      | 1996      | 1997      | 1998      | 1999      | Total      |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Plata | 2,494,522 | 2,536,465 | 2,701,329 | 2,868,099 | 2,337,554 | 12,937,969 |
| Oro   | 20,902    | 24,083    | 26,032    | 25,938    | 22,285    | 119,240    |
| Cobre | 339,347   | 327,976   | 338,932   | 344,753   | 321,041   | 1,672,049  |
| Plomo | 179,741   | 167,115   | 180,349   | 171,611   | 125,956   | 824,772    |
| Zinc  | 354,673   | 348,329   | 377,861   | 371,899   | 321,205   | 1,773,967  |

Fuente: INE, 2000.

El proceso tradicional es la fundición en arena, por ser ésta un material refractario muy abundante en la naturaleza y que, mezclada con arcilla, adquiere cohesión y molde habilidad sin perder la permeabilidad que posibilita evacuar los gases del molde al tiempo que se vierte el metal fundido (Aleaciones ferrosas, 2011).

Se han considerado tres metales en cuyo proceso de producción puede estar involucrado el mercurio. No se estimaron los valores para oro y plata por no contar con factores de emisión, únicamente se presentan los datos de producción (ver Tabla 5.3). También es importante aclarar que el cálculo para

los otros tres metales, fue hecho con los datos gruesos de producción minera, sin distinguir tecnología utilizada ni valores de mercurio en los minerales.

**Tabla 5.3.** Factor de Emisión por Metal y Total de Emisiones de Mercurio (kg)

|       | Factor de emisión | 1995    | 1996    | 1997    | 1998    | 1999    | Total de Emisiones |
|-------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| Cobre | 0.1 g/ton         | 33.9    | 32.8    | 33.9    | 34.5    | 32.1    | 167.2              |
| Plomo | 3 g/ton           | 539.2   | 501.3   | 541.1   | 514.8   | 377.9   | 2,474.3            |
| Zinc  | 20 g/ton          | 7,093.5 | 6,966.6 | 7,557.2 | 7,438.0 | 6,424.1 | 35,479.4           |
| Total |                   | 7,666.6 | 7,500.7 | 8,132.2 | 7,987.3 | 6,834.1 | 38,120.9           |

Fuente: INE, 2001.

### 5.1.1. Minería y refinamiento de oro.

México es un gran productor de cobre, plata, plomo, zinc y oro y cuenta con importantes depósitos de mercurio. A menudo, estos metales se encuentran juntos en concentraciones variables, como compuestos de azufre, tales como CuS, PbS, ZnS y HgS (cinabrio). El mercurio está particularmente asociado con el oro y puede encontrarse dentro de la estructura cristalina del oro en muchos depósitos de este metal (Inventario, 2001 et al Geological Survey, 1997). El mercurio es considerado como un metal indicador de la presencia de oro por la industria de exploraciones de oro. En los Estados Unidos, la industria de extracción de oro es el mayor productor doméstico de mercurio. El mercurio se amalgama rápidamente con el oro y por esta razón, es utilizado como "esponja" en algunas operaciones simples de extracción de oro, cuando éste se encuentra finamente disperso en los minerales o en el suelo.

El mercurio tiene un punto de ebullición más bajo en comparación con el oro. Por esta razón, el mercurio es evaporado generalmente durante las etapas iniciales de refinación de este metal. En los Estados Unidos, en los casos en los que la concentración de mercurio es suficientemente alta como para hacer económicamente atractiva su recuperación, se emplean hornos de retorta para

evaporar el mercurio del mineral y capturarlo por medio de condensadores. Hasta hace relativamente poco, los condensadores era simples intercambiadores de calor de tubo y coraza, que utilizaban agua corriente como medio de enfriamiento. Como resultado de ello, un porcentaje importante del mercurio se escapaba del condensador y era emitido a la atmósfera. En minas de oro de mayor tamaño y más sofisticado, se emplean condensadores con refrigerantes para capturar el mercurio que se evapora en los hornos de tostación (INE, 2001).

De acuerdo con la Dirección General de Minas de SECOFI, en México no se ha producido mercurio en operaciones mineras desde 1995. El equipo de trabajo del proyecto concluyó que todo el mercurio en los minerales de oro es evaporado durante las operaciones de tostación y fundición para producir doré, o bien, el mercurio que se recupera y los lodos conteniendo mercurio son reciclados para recuperar los metales preciosos o son confinados en el sitio (INE, 2001).

Existen un gran número de pequeños mineros trabajando minerales de oro y plata en los Estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Querétaro y Guerrero. La mayoría de estas operaciones no están controladas por las autoridades estatales ni federales. Sin embargo, por lo general, los pequeños mineros no cuentan con procesos térmicos en sus operaciones mineras, sino que envían sus concentrados a cualquiera de las tres grandes fundidoras/refinerías de oro y plata que operan en el país. (INE, 2001). Como regla arbitraria, se supondrá que las operaciones mineras de oro que procesan más de 500,000 toneladas de concentrado o producen más de 400 kg de oro al año, cuentan con operaciones de tostación/refinación. En la Tabla 5.4 se muestra la lista de las minas de oro y plata que cumplen con el criterio anterior, la mayoría de las cuales están en la lista de SECOFI de las diez minas de oro más grandes de México.



**Tabla 5.4.** Minas de Oro con Operaciones de Tostación/Fundición

| Mina                                   | Localidad  | Producción de oro (Kg/año)   | Fuente       |
|--|------------|------------------------------|--------------|
| La Herradura Caborca,                  | Sonora     | 4,550 ( 2,292,000 mineral )* | Randolph '98 |
| La Ciénega Santiago P.,                | Durango    | 493,723 (mineral)            | Randolph '98 |
| La Colorada La Colorada,               | Sonora     | 2532 (1,275,500 mineral)*    | INE Sonora   |
| San Francisco Imuris,                  | Sonora     | 1920 (967,000 mineral)*      | INE Sonora   |
| El Cubo Guanajuato,                    | Guanajuato | 3,285,000 (mineral)          | Randolph '98 |
| San Felipe San Felipe                  | B.C.       | 1,000,000 (mineral)          | COREMI       |
| Las Torres-Cedros Guanajuato           | Guanajuato | 962,500 (mineral)            | D. Fitch     |
| Santa María de la Paz Villa de la Paz, | S.L.P.     | 730,000 (mineral)            | D. Fitch     |
| San Antonio San Dimas,                 | Sinaloa    | 715 (360,000 mineral)*       | Randolph '98 |
| San Martín Colón,                      | Querétaro  | 624 (314,000 mineral)*       | Randolph '98 |

\* Mineral en ton; se obtuvo por extrapolación de las cifras de La Colorada  
Fuente: INE, 2001.

Utilizando a las minas de Nevada como ejemplo para determinar las emisiones atmosféricas potenciales de mercurio en las operaciones mineras de oro en México, en base al volumen anual de mineral de oro que procesan, el mercurio se emite a razón de 0.965 g/ton de mineral. Aplicando este factor a las minas de oro de la Tabla 5.4, las emisiones de mercurio en las operaciones mineras de oro en México se estiman en 11.270 ton/año (INE, 2001).

### 5.1.2. Minería y refinación de mercurio.

El mercurio se extrae de jales de minerales de plata en los municipios de Guadalupe y Veta Grande en el Estado de Zacatecas. De acuerdo con SECOFI, estas son las únicas operaciones productoras de mercurio en México. Un total de 60.63 toneladas de mercurio fueron reportadas como recuperadas durante 1998. Esto es casi el doble de la producción secundaria de mercurio de 33.2 ton/año reportadas por el INE y PROFEPA en 1996 (INE, 2001). En 1999 solo se reportaron 29 toneladas de mercurio recuperadas de estos jales. El procesamiento de estos jales depende fuertemente de los precios de la plata en el mercado. El proceso de extracción de mercurio de estos jales no requiere actualmente de permiso del INE (ver Tabla 5.5).

**Tabla 5.5.** Producción secundaria de mercurio.

| Empresa   | Productos                                     | Subproductos         |
|---|---|----------------------|
| Jales de Zacatecas                                | S.A. de C.V. Precipitado de plata: 9 ton/año  | Mercurio 4.2 ton/año |
| Beneficiadora de Jales de Zacatecas, S.A. de C.V. | Precipitado de oro y plata: 8.4 ton/año       | Mercurio 10 ton/año  |
| Jales del Centro, S.A. de C.V.                    | Precipitado de oro, plata y cobre: 24 ton/año | Mercurio 8.3 ton/año |
| Mercurio del Bordo, S.A. de C.V.                  | Precipitado de oro, plata y Hg: 6 ton/año     | Mercurio 6.5 ton/año |

Fuente: INE, 2001

Para recuperar el mercurio de los concentrados de plata/mercurio producidos en las primeras etapas del proceso de refinación, se emplean hornos de retorta. El mercurio se atrapa en un condensador. El mercurio recuperado se vende principalmente a la empresa Philips fabricante de lámparas fluorescentes y a otros clientes en San Luis Potosí y Nuevo León.

La tasa de recuperación de mercurio se estima a partir del contenido promedio de Hg en los jales y en el fondo o colas de la recuperación (INE, 2001), en las

toneladas de jales procesadas y en las toneladas de mercurio recuperadas . Utilizando una producción secundaria de mercurio de 29 toneladas para 1999 y estimando una eficiencia promedio de condensación de 75% en el condensador de mercurio después del horno de retorta empleado para separar el oro y la plata del mercurio, las emisiones de mercurio de estas "Plantas de Beneficio" se estiman en 9.666 ton/año (INE, 2001).

### **5.1.3. Fundidoras primarias de plomo y zinc.**

México tiene una capacidad instalada de fundición primaria de plomo de 180,000 ton/año y de fundición primaria de zinc de 360,000 ton/año, (INE, 2001). El documento *Mercury Study Report to Congress* no identifica algún factor de emisión de mercurio de las fundidoras primarias de plomo y zinc de los EE.UU. y solamente indica que se sabe que la concentración de mercurio en los concentrados de plomo es relativamente baja. No se presentan las emisiones potenciales de mercurio de este tipo de fundidoras. Prácticamente todo el mercurio contenido en los concentrados de plomo o zinc sería emitido a la atmósfera debido a la naturaleza de los procesos de fundición de estos metales. En consecuencia, se necesita información de la concentración de mercurio en los concentrados de plomo y zinc que se procesan en México, para determinar si las emisiones de mercurio de estas fuentes son o no potencialmente importantes.

Las fundidoras cuentan con una planta de ácido sulfúrico para controlar y convertir las emisiones de SO<sub>2</sub> de los hornos de fundición y de los convertidores. Para estimar las emisiones de mercurio a la atmósfera de estas fundidoras primarias de zinc, se utilizan las cifras de concentrados procesados en 1999 (Inventario, 2001) y datos de concentración de mercurio (20-25 ppm en los concentrados de Pb y 5-10 ppm en los concentrados de Zn), obtenidos por comunicación personal (Inventario, 2001). Suponiendo una eficiencia de 98% en el sistema de control de la contaminación en las plantas de ácido de las fundidoras de Peñoles y de IMMSA, las emisiones de mercurio se estiman en 0.1893 ton/año para Peñoles y en 0.0183 ton/año para IMMSA. En estas

cifras no se consideran las emisiones fugitivas, las cuales, al menos en el caso de Peñoles, han hecho que esta planta exceda los límites máximos permisibles de SO<sub>2</sub> en el medio ambiente, tal como lo ha comprobado PROFEPA (INE, 2001).

#### **5.1.4. Fundidoras de metales ferrosos.**

La industria del hierro y del acero en México la componen cinco grandes productores y un grupo de varias empresas más pequeñas conocidas genéricamente con el nombre de "acerías". La producción total de acero en México en 1998 fue de 14,213,000 toneladas.

En 1999, México produjo 2,219,845 toneladas de coque, importó 292,929 toneladas y exportó 692 toneladas de coque, resultando en un consumo de 2,512,081 toneladas en ese año.

Para estimar las emisiones de mercurio de las fundidoras de metales ferrosos en México, se supone que el mercurio es emitido únicamente en los procesos de combustión durante la producción de hierro primario, "arrabio". Utilizando el factor de emisión de EPA para coque de  $2.724 \times 10^{-5}$  (INE, 2001), las emisiones de mercurio de las fundidoras de metales ferrosos en México se estiman en 0.086 ton/año.

#### **5.2 Procesos de Producción de Carbón y Coque.**

En México existen 2 tipos principales de carbón: térmico (ver Tabla 5.6), para combustión directa en carboeléctricas y coquizable (ver Tabla 5.7), para uso metalúrgico. No se han analizado los contenidos de mercurio en el carbón de México.

**Tabla 5.6.** Producción Minera de Carbón y Estimación de Emisiones de Mercurio 1994-1998.

| Año   | Producción de Carbón (ton/año) | Estimación de Emisiones (Kg Hg/año) |
|-------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1994  | 11,432,222.00                  | 1,557.07                            |
| 1995  | 11,800,258.00                  | 1,607.20                            |
| 1996  | 13,745,528.00                  | 1,872.14                            |
| 1997  | 12,707,443.30                  | 1,730.75                            |
| 1998  | 12,964,239.70                  | 1,685.99                            |
| Total | 62,649,691.00                  | 8,453.15                            |

Fuente: INE, 2000

**Tabla 5.7.** Carbón Coquizado 1994-1999.

| Año   | Producción de Carbón (ton/año) | Estimación de Emisiones (Kg Hg/año) |
|-------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1994  | 1,984,730                      | 54.1                                |
| 1995  | 2,147,602                      | 58.5                                |
| 1996  | 2,184,364                      | 59.5                                |
| 1997  | 2,139,376                      | 58.3                                |
| 1998  | 2,202,558                      | 60.0                                |
| 1999  | 2,219,845                      | 60.5                                |
| Total | 12,878,475                     | 351                                 |

Fuente: INE, 2000

### 5.3 Otros procesos industriales.

En México existen procesos industriales en los cuales se estima que son fuentes probables de mercurio pero debido al objetivo de este trabajo solo se mencionaran en la siguiente lista los cuales son mencionados en el inventario preliminar de emisiones 1999 del INE:

- Producción de Cloro-Alcali.
- Centrales Carboeléctricas.
- Quema de combustibles Fósiles.
- Generación de energía eléctrica.
- Combustión residencial de madera.
- Plantas de cemento.
- Plantas de cal.
- Incineración de residuos peligrosos.
- Incineración de residuos biológico-infecciosos.
- Plantas de negro de humo.

#### **5.4 Resumen del inventario de emisiones atmosféricas de mercurio para el año 1999.**

Para resumir las emisiones de mercurio hacia la atmosfera es necesario observar la Tabla 5.10. La cual indica el conteo final de emisiones para el inventario de emisiones de mercurio a la atmosfera, que se realizo para el año 2000.

La Tabla 5.10 indica las emisiones por cada una de las fuentes de emisión del mercurio a la atmosfera, y nos referimos solamente a la atmosfera debido a que en ese año solo se evaluó las emisiones directas a la atmosfera.

Y para la Tabla 5.11 se muestra el resumen de las emisiones de mercurio a la atmosfera por cada una de las actividades económicas ya mencionadas, tomando en cuenta que la minería se lleva el mayor porcentaje en emisiones.

**Tabla 5.8.** Emisiones atmosféricas estimadas de mercurio en México (1999).

| Fuente de emisión                              | Hg:<br>ton/año |
|--|----------------|
| Plantas termoeléctricas                        | 0.1263         |
| Plantas carboeléctricas                        | 0.7855         |
| Calderas comerciales/industriales              | 0.0954         |
| Combustión residencial de madera               | 1.168          |
| Minería y refinación de oro                    | 11.27          |
| Minería y refinación de mercurio               | 9.666          |
| Fundidoras de cobre                            | 1.543          |
| Fundidoras primarias de plomo y zinc           | 0.208          |
| Fundidoras secundarias de plomo y zinc         | ---            |
| Siderúrgicas                                   | 0.086          |
| Refinerías de petróleo                         | 0.68           |
| Plantas de cemento                             | 0.0105         |
| Plantas de cal                                 | 0.003          |
| Incineradores de residuos peligrosos           | 0.02           |
| Incineradores de residuos biológicoinfecciosos | 0.007          |
| Plantas de cloro-álcali                        | 4.902          |
| Plantas de negro de humo                       | 0.0183         |
| Plantas de celulosa y papel                    | 0.024          |
| Manufactura de coque                           | 0.055          |
| Lámparas fluorescentes                         | 0.229          |
| Termómetros                                    | 0.018          |
| Amalgamas                                      | 0.378          |
| Crematorios (no estimadas)                     | ---            |
| Total  | 31.293         |

Fuente: INE (2000).

**Tabla 5.9.** Emisiones atmosféricas de mercurio en México por categoría de fuente 1999.

| Categoría de fuente                            | Ton/año | %    |
|--|---------|------|
| Minería y refinación de oro y mercurio (Au/Hg) | 20.936  | 66.9 |
| Plantas de cloro-álcali                        | 4.902   | 15.7 |
| Procesos de combustión                         | 2.189   | 7    |
| Fundidoras de metales ferrosos y no ferrosos   | 1.892   | 6    |
| Refinerías de petróleo                         | 0.68    | 2.2  |
| Otras fuentes manufactureras                   | 0.667   | 2.1  |
| Incineradores de RP/BI                         | 0.027   | 0.1  |

Fuente: INE, 2000.

### **5.5 Emisiones en la actualidad (2004).**

En esta parte del trabajo se optó por introducir las emisiones de mercurio emitidas en México para el año 2004. Cabe mencionar que estos datos son obtenidos por el Taller de Análisis del Inventario de Emisiones de Mercurio en México. Realizado el 18 y 19 de Mayo del año 2010, y estos datos son obtenidos por diferentes fuentes y los cálculos no aparecen, por lo que no es posible explicarlos detalladamente.



**Tabla 5.10.** Inventario de emisiones de Mercurio 2004.

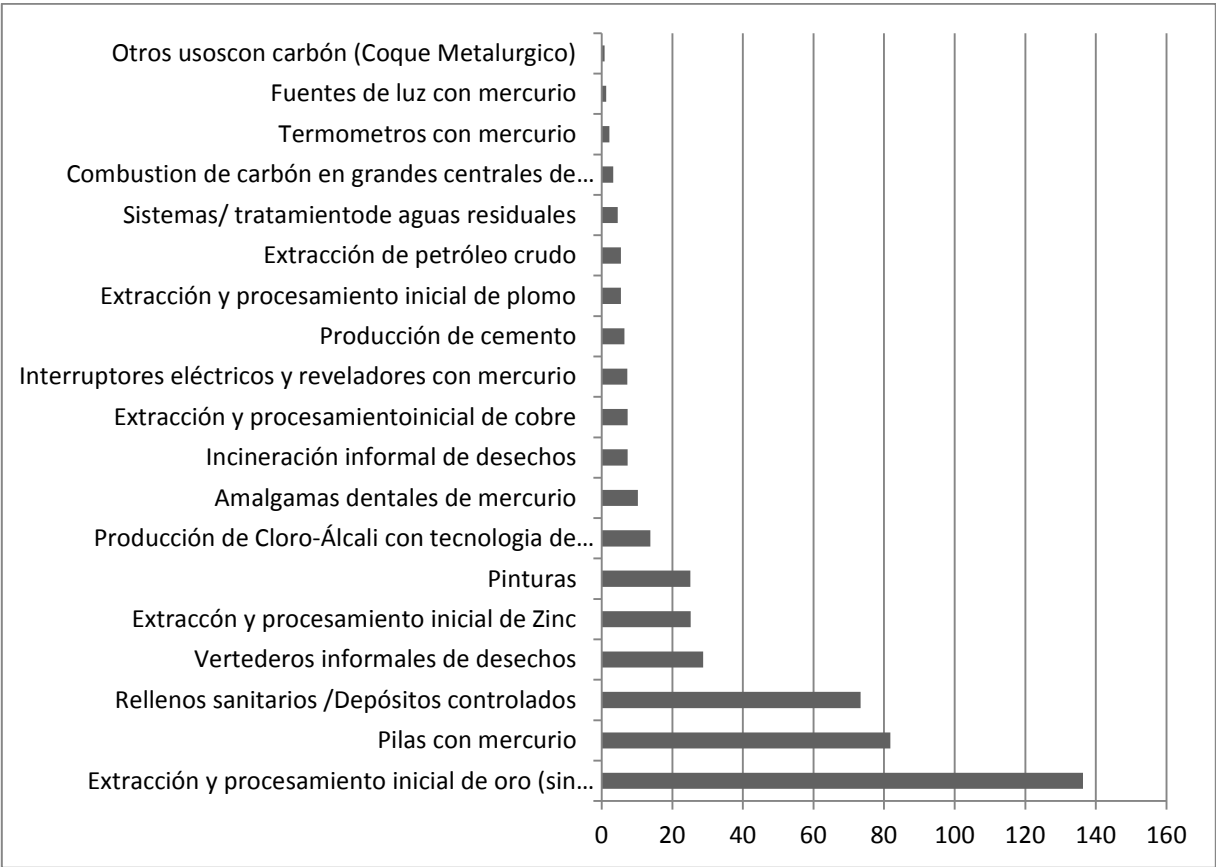
| Fuente  | Liberación Hg Mejor Aproximado 2004 (MAP)<br>(Mg) |      |        |          |          |        |
|---|---|------|--------|----------|----------|--------|
|   | Aire  | Agua | Suelo  | Residuos | Producto | Total  |
| Extracción y procesamiento inicial de oro (sin amalgación con mercurio) | 0.45  | 0    | 135.92 | 0        | 0        | 136.37 |
| Pilas con mercurio  | 0   | 0    | 0      | 81.76    | 0        | 81.76  |
| Rellenos sanitarios /Depósitos controlados                              | 0   | 0    | 0      | 73.36    | 0        | 73.36  |
| Vertederos informales de desechos                                       | 0   | 0    | 28.7   | 0        | 0        | 28.7   |
| Extracción y procesamiento inicial de Zinc                              | 2.52  | 0    | 7.57   | 7.57     | 7.57     | 25.23  |
| Pinturas  | 23.14   | 1.26 | 0      | 0.75     | 0        | 25.15  |
| Producción de Cloro-Álcali con tecnología de mercurio                   | 2.75  | 0.28 | 5.23   | 4.13     | 1.38     | 13.77  |
| Amalgamas dentales de mercurio  | 0.2   | 1.63 | 0      | 7.76     | 0.61     | 10.2   |
| Incineración informal de desechos                                       | 7.36  | 0    | 2.19   | 2.19     | 2.19     | 13.93  |
| Extracción y procesamiento inicial de cobre                             | 0.73  | 0    | 2.19   | 2.19     | 2.19     | 7.3    |
| Interruptores eléctricos y reveladores con mercurio                     | 2.17  | 0    | 2.89   | 2.17     | 0        | 7.23   |
| Producción de cemento   | 4.9   | 0    | 0      | 0        | 1.56     | 6.46   |
| Extracción y procesamiento inicial de plomo                             | 0.54  | 0    | 1.63   | 1.63     | 1.63     | 5.43   |
| Extracción de petróleo crudo  | 0   | 0    | 0      | 0        | 5.41     | 5.41   |
| Sistemas/ tratamiento de aguas residuales                               | 0   | 2.28 | 0.46   | 1.82     | 0        | 4.56   |
| Combustión de carbón en grandes centrales de energía (carboeléctricas)  | 2.96  | 0    | 0      | 0.33     | 0        | 3.29   |
| Termómetros con mercurio  | 0.22  | 0.65 | 0      | 1.3      | 0        | 2.17   |
| Fuentes de luz con mercurio   | 0.39  | 0    | 0.39   | 0.52     | 0        | 1.3    |
| Otros usos con carbón (Coque Metalúrgico)                               | 0.81  | 0    | 0      | 0        | 0        | 0.81   |

Fuente: SEMARNART, 2011.

En la Tabla 5.10 se puede apreciar de primera instancia, es que en la actualidad existe una gran cantidad de fuentes de emisiones de mercurio en México los cuales fueron calculados en el inventario de emisiones 2004. Debido a que no existen los cálculos exactos en los inventarios de emisiones de

mercurio correspondientes a los años 1999 y 2004. Y solo esta información la estamos utilizando como ejemplificación de las emisiones que se generan en el territorio nacional y se mencionan algunas actividades industriales que generan tales emisiones.

Así que se cree que no es posible realizar una comparación en las emisiones ya calculadas, pero si es posible analizarlas para saber en qué actividades se puede localizar la mayor generación de emisiones de mercurio, como se muestra en la Figura 5.1, que representa de manera visual de la Tabla 5.10, por lo que podemos decir que las actividades mineras en México son una fuente muy específica de emisiones de mercurio ya sea en sus diferentes tipos de emisión.



**Figura 5.1.** Emisiones de mercurio para el inventario de emisiones 2004.

Fuente: SEMARNART, 2011.

## 5.6 Evaluación de las emisiones de mercurio.

De acuerdo a los datos ya obtenidos en las fuentes consultadas, se llevo a cabo una evaluación en la minería mexicana teniendo como datos el r producción de mostraran en la tabla 5.11 donde aparecen el porcentaje de emisiones de mercurio por producción minera en los años 1999 y 2004.

**Tabla 5.11.** Porcentaje de emisiones por producción minera mexicana.

| Porcentaje de emisiones de mercurio por producción minera mexicana |                  |        |                            |      |       |            |      |            |
|--|------------------|--------|----------------------------|------|-------|------------|------|------------|
|  | Producción (ton) |        | % de emisiones de mercurio |      |       |            |      |            |
|  | 1999             | 2004   | 1999                       |      |       | 2004       |      |            |
|  |                  |        | Aire                       | Agua | Suelo | Aire       | Agua | Suelo      |
| Oro  | 22.2851          | 21.8   | 50.5719068                 | -    | -     | 2.06422018 | ?    | 623.486239 |
| Plomo  | 171610.1         | 110900 | 0.0001212                  | -    | -     | 0.00048693 | ?    | 0.00146979 |
| Zinc   | 371897.8         | 374400 | 5.5929E-05                 | -    | -     | 0.00067308 | ?    | 0.0020219  |
| Cobre  | 344755.5         | 352000 | -                          | -    | -     | 0.00020739 | ?    | 0.00062216 |

Fuente; SEMARNAT, 2011.

Donde el resultado de esta evaluación es que las emisiones por mercurio en el suelo en la producción de oro, es demasiada alta con un porcentaje de 623% por lo que, por cada tonelada de oro producida tenemos 6.23 toneladas de mercurio en el suelo así que podemos decir que en la actividad en la extracción y refinación de oro es la mayor fuente de emisiones de mercurio, por lo que es necesario una investigación más profunda para calcular las concentraciones en los sitios mineros y así hacer una evaluación más profunda en este tema.

De acuerdo con los datos obtenidos se realizo una evaluación en la producción de oro y así obtener un cálculo aproximado de las emisiones de mercurio en los últimos años. Esto se obtuvo con la referencia del "Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de mercurio" del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, donde en la Tabla 5.12 nos indica un factor preliminar de liberación de mercurio para los Estados Unidos de Norteamérica, pero lo tomamos como referencia para así hacer una proyección de las emisiones de mercurio para el suelo y para el aire.

**Tabla 5.12.** Factores preliminares de distribución por defecto sugeridos para la extracción a gran escala y el procesamiento inicial de oro (con métodos distintos de la amalgamación de mercurio).

|   | Aire | Agua | Tierra |
|---|------|------|--------|
| Kg de Hg liberado por tonelada métrica de oro producido | 20   | ?    | 6000   |

Fuente: PNUMA, 2008.

Notas: Únicamente con base en datos nacionales de Estados Unidos; puede asociarse a incertidumbres sustanciales.

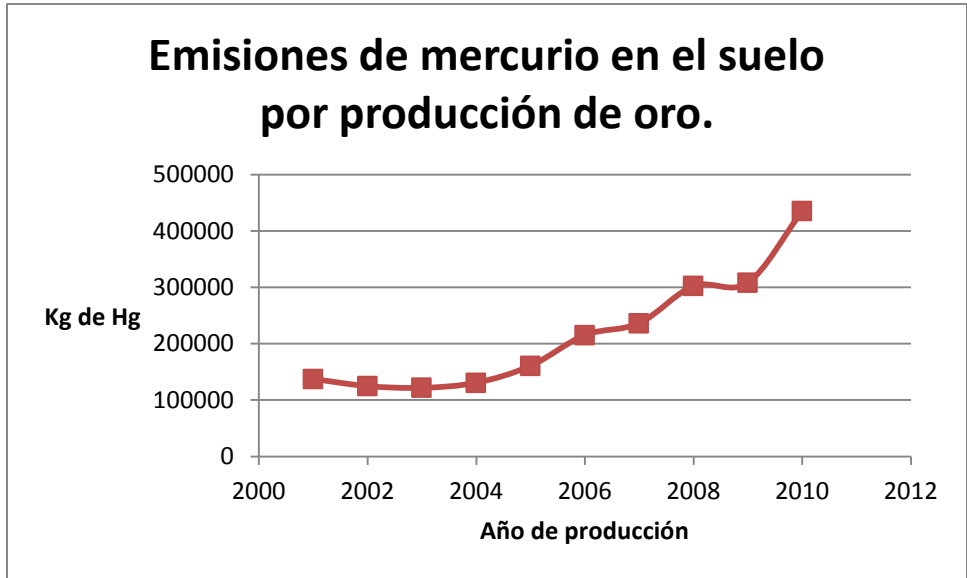
Y así se obtuvieron los datos en la tabla 5.13 en los cuales nos muestra las emisiones de mercurio por extracción de oro en el aire y suelo, los datos en el agua son desconocidos.

**Tabla 5.13.** Emisiones de mercurio por extracción de oro en los años 2001 hasta 2010.

| Producción de oro en los años 2001-2010 |                         |   |      |        |
|---|-------------------------|---|------|--------|
| Año                                     | Producción de oro (ton) | Proyección de emisiones según (UNEP) (kg de Hg) |      |        |
|   |                         | Aire  | Agua | Suelo  |
| 2001                                    | 22.9                    | 458   | ?    | 137400 |
| 2002                                    | 20.8                    | 416   | ?    | 124800 |
| 2003                                    | 20.3                    | 406   | ?    | 121800 |
| 2004                                    | 21.8                    | 436   | ?    | 130800 |
| 2005                                    | 26.8                    | 536   | ?    | 160800 |
| 2006                                    | 35.9                    | 718   | ?    | 215400 |
| 2007                                    | 39.4                    | 788   | ?    | 236400 |
| 2008                                    | 50.4                    | 1008  | ?    | 302400 |
| 2009                                    | 51.4                    | 1028  | ?    | 308400 |
| 2010                                    | 72.6                    | 1452  | ?    | 435600 |

Fuente: SE, 2011.

Los resultados se pueden interpretar mejor en las siguientes graficas donde se cree que tiene una tendencia del tipo exponencial de acuerdo a la producción anual de oro y las emisiones de mercurio en el medio ambiente.



**Figura 5.2.** Emisiones de mercurio en el suelo por producción anual de oro (México).

Fuente; SE, 2011.



**Figura 5.3.** Emisiones de mercurio en el aire por producción anual de oro (México).

Fuente; SE, 2011.

## **5.7 Sitios contaminados en México.**

En datos obtenidos por la PROFEPA, Delegación Zacatecas en diciembre de 1996, en la Laguna la Zacatecana con una extensión aproximada de 120 hectáreas y a escasos 10 Km de la ciudad de Zacatecas, existen 4 plantas (Jales de Zacatecas, S.A. de C.V., Beneficiadora de Jales de Zacatecas, S.A. de C.V., Jales del Centro, S.A. de C.V. y Mercurio del Bordo, S.A. de C.V.), que benefician jales por el proceso de lixiviación con hiposulfito de sodio y que se encuentran aguas abajo de la presa en cuestión. La separación de los valores (oro, plata como productos y mercurio como subproducto, principalmente), mediante un proceso térmico, en el cual se condensa el mercurio. Cabe señalar que los jales que benefician estas plantas y los jales depositados en la laguna tienen el mismo origen, es decir, en el Distrito de Zacatecas, el producto de los 3 principales grupos de vetas, Veta Grande, San Bernabé y La Cantera fue procesado, hasta en 48 haciendas de beneficio situadas en la Serranía de Zacatecas, haciendas que laboraron por 300 años hasta principios del presente siglo, tiraban los desechos en los cauces de los arroyos siendo arrastrados hacia los valles por las lluvias, formando en estos, depósitos muy importantes, llegando como en el caso de la presa del Pedernalillo, a 5 millones de toneladas de materia mineralizada, conteniendo principalmente estos jales un promedio de 60 g de plata y 180 g de mercurio por tonelada, que haciendo los cálculos correspondientes nos da un total de 300 toneladas de plata y 900 toneladas de mercurio (INE, 2001).

Los resultados de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNM) muestran niveles de mercurio en varios cuerpos de aguas superficiales, cercanos al límite máximo recomendado de 0.001 mg/L. Se han detectado niveles de mercurio entre 0.5 y 1.0 ug/L en el río San Juan en Querétaro y en los ríos Tula, Tepeji, El Salto y Afajayucan en Hidalgo y en el río Salado en Coahuila (Yarto, 2004).

Varios estudios independientes también han detectado la presencia de mercurio en aguas superficiales. Investigadores de la Universidad Nacional

Autónoma de México realizaron varios estudios en la cuenca del río Coatzacoalcos, en la costa del Golfo de México, en el estado de Veracruz, y detectaron niveles de mercurio entre 3.0 y 63.0 ug/L en aguas superficiales y de 0.062 a 57.94 ug/L en sedimentos. También se encontraron niveles de mercurio entre 0.2 y 0.4 ug/L en las aguas superficiales de las lagunas Del Carmen, Machona y Mecoacan en Tabasco, en la laguna Atasta en Campeche y en las lagunas de Tampamachopo y Mandinga en Veracruz (Yarto, 2004).

En un estudio realizado por el Cinvestav en 1994, fueron identificadas tres cuencas como contaminadas con mercurio: 1) la cuenca del río Coatzacoalcos, el cual fluye por más de 220 kilómetros desde Oaxaca hasta el Golfo de México, en Veracruz, con niveles de mercurio hasta de 0.38 mg/l en la laguna Pajaritos 2) la cuenca del río San Juan que cubre partes de los estados norteños de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, hasta su desembocadura en el río Bravo en la frontera de México con los EE.UU. La concentración más alta de mercurio detectada fue de 11 ug/L; y 3) el sistema Lerma-Chapala-Santiago, y una de las cuencas más importantes del país que recibe las descargas de zonas industriales a su paso por varios estados hasta la presa Alzate en el Estado de México. En esta cuenca se han detectado niveles de mercurio de hasta 0.0021 ug/L. Estudios más recientes de la Universidad de Guadalajara confirman la presencia en esta última región, de mercurio y metales pesados como cadmio y plomo (Yarto, 2004).

## **CAPÍTULO 6.**

### **LEGISLACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL.**

#### **6.1. Legislación internacional.**

Los problemas ambientales traspasan las fronteras y exigen una eficaz cooperación internacional para su resolución. Por otra parte muchos espacios naturales, aunque estén situados en países concretos, han sido declarados patrimonio de la Humanidad. Todo esto ha motivado que en el campo ambiental haya desde declaraciones y convenios internacionales hasta legislación estatal y municipal.

#### **6.2 Declaraciones internacionales generales.**

Hay muchas Declaraciones Internacionales cuya finalidad es plantear los principios generales que deben inspirar las acciones de los Estados y de la sociedad para lograr una mejor protección del ambiente. Algunas de estas por su especial interés histórico son:

- Declaración de Estocolmo de las sobre el Medio Ambiente Humano. Es de 1972 e insiste en el derecho del hombre a vivir en un medio de calidad y en su "solemne obligación de proteger y mejorar el medio para las generaciones presentes y futuras". También resalta la importancia de la educación en asuntos ambientales.

- Carta Mundial de la Naturaleza aprobada en sesión plenaria de las NNUU en 1982. Hace especial hincapié en la preservación del patrimonio genético: asegurar un nivel suficiente en todas las poblaciones de seres vivos en todo el mundo, concediendo especial protección a los más singulares o a los que se encuentran en peligro. Por otra parte insiste en la necesidad de no desperdiciar los recursos naturales y de tener en cuenta la capacidad a largo plazo de los sistemas naturales para sustentar las poblaciones.



- Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, aprobada por la Conferencia de la ONU reunida en Río de Janeiro en 1992. En esta conferencia se consolida y se proclama a nivel internacional la idea de "desarrollo sostenible" y se aprobaron cuatro documentos:

**Tabla 6.1.** Cuatro principales documentos de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.

| Documento.   | Descripción.   |
|--|--|
| - Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo | Es un documento Cuenta con 27 principios, y por una breve descripción, podemos decir que este documento se dedica al desarrollo sostenible de los países, siempre y cuando se respeten los derechos de una vida saludable en armonía con la naturaleza.  |
| - Convención marco de la ONU sobre el Cambio Climático       | El objetivo de la Convención es lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático.   |
| - Convenio sobre la Diversidad Biológica                     | Los objetivos del presente Convenio son la conservación de la diversidad biológica, la utilización sostenible de sus componentes y la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos, mediante, entre otras cosas, un acceso adecuado a esos recursos y una transferencia apropiada de las tecnologías pertinentes, teniendo en |

|             |  |
|-------------|--|
|             | cuenta todos los derechos sobre esos recursos y a esas tecnologías, así como mediante una financiación apropiada.  |
| - Agenda 21 | Es el Plan de Acción que los estados deberían llevar a cabo para transformar el modelo de desarrollo actual, basado en una explotación de los recursos naturales como si fuesen ilimitados y en un acceso desigual a sus beneficios, en un nuevo modelo de desarrollo que satisfaga las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras. |

Fuente: ONU, 2011.

### **6.3. Convenios internacionales.**

Los convenios internacionales tratan temas concretos que afectan a todos o a varios países. Hay muchísimos dedicados a temas medioambientales y, a modo de ejemplo, citamos algunos:

- Convenio de Ramsar: Protege los humedales por su gran importancia como hábitats para las aves acuáticas.
- Convenio de Berna: Sobre la conservación de la fauna y de la flora salvajes y de sus hábitats naturales en Europa.
- Convenio de Bonn: Sobre la conservación de especies migratorias.
- Convenio de Washington (CITES): Sobre el comercio internacional de especies amenazadas de la flora y la fauna silvestres.
- Convenio de Ginebra: La adopción provisional de las directrices sobre mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales; la decisión de favorecer al Fondo para el Medio Ambiente Mundial
- Convenio de Viena: Sobre la protección de la capa de ozono.

- Convenio de Basilea: Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación.
- Convenio de Río: Sobre la diversidad biológica
- Convenio Marco de las ONU sobre el Cambio Climático (Río de Janeiro)

#### **6.4. Legislación de la Unión Europea.**

Los temas ambientales tienen un gran peso en la Unión Europea y da idea de su importancia el que alrededor de la tercera parte de lo que se legisla se refiere a este tema. Los tres tipos más importantes de disposiciones comunitarias son los Reglamentos, las Decisiones y las Directivas. Los Reglamentos y las Decisiones se aplican directamente en todos los países miembros, mientras que las Directivas son de obligado cumplimiento pero es cada uno de los países el que tiene que hacer sus leyes concretas para aplicar la Directiva en su propio territorio. Las Directivas son el instrumento normativo más utilizado en el campo medioambiental.

Hay varios cientos de normativas europeas sobre impacto ambiental, protección de la atmósfera, calidad de las aguas, regulación de vertidos, conservación de la naturaleza, gestión de residuos, etc.

##### **6.4.1. Reglamentos sobre el medio ambiente.**

Desde inicios de los años setenta, Europa mantiene un fuerte compromiso en favor del medio ambiente: la protección de la calidad del aire y el agua, la conservación de los recursos y de la biodiversidad, la gestión de los residuos y de las actividades con efectos perjudiciales son algunos de los ámbitos de la actuación europea, tanto en los Estados miembros como internacionalmente.

##### **6.4.2 Directivas.**

Una Directiva europea indica los objetivos que deben lograr los Estados miembros de la Unión Europea, dejándoles elegir los medios para hacerlo. La Directiva puede ir dirigida a uno, varios o todos los Estados miembros. Para que los principios en ella establecidos surtan efecto para los ciudadanos, el

legislador nacional debe adoptar una norma de derecho interno que conforme el ordenamiento jurídico nacional a los objetivos de la Directiva.

La Directiva fija una fecha límite para la transposición al Derecho nacional. Los Estados miembros cuentan con un margen de maniobra que permite tener en cuenta sus peculiaridades nacionales. La transposición tiene que realizarse dentro del plazo que marca la Directiva (UE, 2011).

En la unión europea se encargan del cuidado del medio ambiente tomando en cuenta la gestión de los residuos peligrosos incluyendo al mercurio y protegiendo al medioambiente de la contaminación del agua, atmosférica, y el suelo, por lo que algunas de estas directivas se explicaran en la tabla 6.2, y tomando en cuenta que la cantidad de directivas es muy alta solo nombraremos algunas.

**Tabla 6.2** Algunas directivas en la Unión Europea.

| <b>Directiva.</b>  | <b>Descripción.</b>   |
|--|---|
| Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos   | Establece normas comunitarias para la eliminación de residuos peligrosos de los países registrados en la U.E.   |
| Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación. | La prevención y el control integrados de la contaminación se refieren a las actividades industriales y agrícolas con un elevado potencial de contaminación, nuevas o existentes |
| Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2006, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas          | La presente Directiva es aplicable a los residuos que resultan de la extracción, el tratamiento y el almacenamiento de recursos minerales y de la explotación de canteras.      |

|  |   |
|--|---|
| <p>Directiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2001 sobre los límites nacionales de emisión de determinados contaminantes atmosféricos.</p>                  | <p>La Directiva se inscribe por primera vez, límites máximos nacionales de emisión para ciertos contaminantes.</p>  |
| <p>Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas</p>                 | <p>Establece normas de calidad ambiental relativas a la presencia, en las aguas superficiales, de sustancias o grupos de sustancias identificadas como prioritarias en razón del riesgo significativo que presentan para el medio acuático, o a través de él, y de otros contaminantes determinados.</p>  |
| <p>Directiva 80/68/CEE del Consejo, del 17 de diciembre de 1979, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas</p> | <p>La Directiva actual tiene por objeto impedir el vertido de determinadas sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulables en las aguas subterráneas.</p> <p>Se excluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• los vertidos de efluentes domésticos que provengan de algunas viviendas aisladas;</li> <li>• los vertidos que contengan sustancias reguladas por la Directiva 80/68/CEE en cantidades o concentraciones muy pequeñas;</li> <li>• los vertidos de materias que contengan sustancias radiactivas.</li> </ul> |

|   |  |
|---|--|
| <p>Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril 1999, relativa al vertido de residuos</p> | <p>Enumera las distintas categorías de residuos (residuos municipales, peligrosos, no peligrosos, inertes) y se aplica a todos los vertederos, definidos como emplazamientos de eliminación de los residuos mediante el depósito de los residuos en la superficie o bajo tierra. Los vertederos se clasifican en tres categorías:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• vertederos para residuos peligrosos;</li> <li>• vertederos para residuos no peligrosos;</li> <li>• vertederos para residuos inertes.</li> </ul> |
|---|--|

Fuente: UE, 2011.

#### **6.4.2.3.1 Directiva 84/156/CEE.**

Esta directiva indica los valores límites y a los objetivos de calidad para los vertidos de mercurio de los sectores distintos de la electrólisis de los cloruros alcalinos donde indica los valores de mercurio vertidos al agua. La tabla 6.3 indica las concentraciones permisibles en la UE.

**Tabla 6.3.** Concentraciones permisibles en las emisiones de mercurio en la industria para la UE.

|  | Sector industrial                             | Rango de concentraciones (mg/L) |
|--|---|---------------------------------|
| Industrias químicas que utilicen catalizadores de mercurio                       | Producción de cloruro de vinilo               | 0.05-0.1                        |
|  |   | 0.1-0.2 g/kg producido          |
|  | Otras producciones                            | 0.05-0.1 mg/L                   |
|  |   | 5-10 g/kg producido             |
| Fabricación de catalizadores de mercurio para la producción de cloruro de vinilo |   | 0.05-0.1 mg/L                   |
|  |   | 0.7-1.4 g/kg producido          |
| Fabricación de compuestos orgánicos y no orgánicos de mercurio                   |   | 0.05-0.1 mg/L                   |
|  |   | 0.05-0.1 g/kg producido         |
| Fabricación de baterías primarias que contengan mercurio                         |   | 0.05-0.1 mg/L                   |
|  |   | 0.03-0.05 g/kg producido        |
| Industria de los metales no ferrosos   | Establecimientos de recuperación del mercurio | 0.05-0.1 mg/L                   |
|  | Extracción y refinado de metales no ferrosos  | 0.05-0.1 mg/L                   |

Fuente: UE, 2011.

#### **6.4.3 Marco reglamentario de gestión de las sustancias químicas (REACH), Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos.**

De acuerdo al Reglamento (CE) nº 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 18 de diciembre de 2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH), por el que se crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos

La Unión Europea (UE) ha puesto en marcha el sistema REACH, un sistema integrado de registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y preparados químicos, y crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos. REACH obliga a las empresas que fabrican e importan sustancias y preparados químicos a evaluar los riesgos derivados de su utilización y a adoptar las medidas necesarias para gestionar cualquier riesgo identificado. La carga de la prueba de la seguridad de las sustancias y preparados químicos fabricados o comercializados recae en la industria.

#### **6.4.3.1 Ámbito de aplicación.**

El ámbito de aplicación del Reglamento abarca todas las sustancias fabricadas, importadas, comercializadas o utilizadas, como tales o en forma de mezclas.

Quedan excluidas del ámbito de aplicación del Reglamento:

- las sustancias radiactivas;
- las sustancias que se encuentran sometidas a supervisión aduanera y que están en depósito temporal, en una zona franca o en un depósito franco con el fin de volverse a exportar, o en tránsito;
- las sustancias intermedias no aisladas;
- el transporte de sustancias peligrosas; y
- los residuos.

Además, las normas relativas al registro, a los usuarios finales, a la evaluación y a la autorización no se aplicarán a las sustancias utilizadas en los medicamentos para uso humano o veterinario, ni a los productos alimentarios ni a los piensos (incluidos los aditivos) siempre que se incluyan en el ámbito de aplicación de la normativa comunitaria en materia de medicamentos o alimentos.



#### **6.4.3.2 Registro.**

El registro constituye el elemento fundamental del sistema REACH. Las sustancias químicas fabricadas o importadas en cantidades de una tonelada anual o superiores deben registrarse obligatoriamente en una base de datos central gestionada por la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos. No podrá fabricarse ni comercializarse en Europa ninguna sustancia que no esté registrada.

La obligación de registro se aplicará a partir del 1 de junio de 2008, pero en el caso de algunas sustancias, que deben ser objeto de un registro previo, se pondrá en marcha un régimen transitorio, que en algunos casos durará hasta el 1 de junio de 2018.

No obstante, algunos grupos de sustancias (enumerados en el Reglamento) están exentos de la obligación de registro, como por ejemplo:

- los polímeros (no obstante, sí deben registrarse los monómeros que componen los polímeros);
- determinadas sustancias cuyo riesgo estimado es mínimo (agua, glucosa, etc.);
- determinadas sustancias que existen en la naturaleza y cuya composición química no se ha modificado;
- las sustancias utilizadas en el ámbito de la investigación y el desarrollo, en determinadas condiciones.

El registro exige que la industria (fabricantes e importadores) proporcione información relativa a las propiedades, utilidades y precauciones de uso de las sustancias químicas (expediente técnico). Los datos requeridos son proporcionales a los volúmenes de producción y a los riesgos presentados por la sustancia (por ejemplo, pruebas amplias de toxicidad relativas a las sustancias fabricadas o importadas en cantidades superiores a 1000 toneladas). Por otra parte, las solicitudes de registro referentes a sustancias importadas o fabricadas en cantidades de 10 toneladas anuales o superiores

deben enumerar los riesgos vinculados a estas sustancias, así como los diferentes escenarios de exposición posibles y las medidas de gestión de estos riesgos (informe sobre la seguridad química).

Un registro menos exigente se aplica a los productos intermedios aislados que permanecen en la planta, siempre que se fabriquen en condiciones estrictamente controladas, y a los productos intermedios aislados que se transportan y utilizan bajo control estricto en cantidades inferiores a 1000 toneladas. En estos casos, solamente se exigen la clasificación, las medidas de gestión de los riesgos y la información ya disponible acerca de las propiedades. Si se transportan más de 1000 toneladas de esta sustancia, se solicita una información más amplia.

La Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos se encarga de administrar la base de datos, recibir los expedientes de registro y elaborar guías técnicas dirigidas a ayudar a los fabricantes e importadores, así como a las autoridades competentes, en la aplicación de estas disposiciones. Durante los once primeros años de aplicación del sistema REACH, se espera que se registren cerca de 30 000 sustancias ya comercializadas. Además, se prevé que aproximadamente un 80% de las sustancias registradas no necesiten ningún trámite más.

## **6.5. Legislación en Estados Unidos de América.**

### **6.5.1 Agencia de Protección Ambiental (EPA)**

La misión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos es la de proteger la salud de los humanos y la del medio ambiente. Desde 1970, la EPA ha estado trabajando por un ambiente más limpio, más saludable, para el pueblo estadounidense.

El EPA dirige las ciencias ambientales de la nación, así como también los esfuerzos investigativos, educativos y de evaluación.

Desarrollando y cumpliendo con las regulaciones ambientales: La EPA trabaja para desarrollar y hacer cumplir regulaciones que implantan leyes ambientales establecidas por el Congreso de los EUA. La EPA es responsable por investigar y establecer estándares nacionales para una variedad de programas ambientales, y delegar a estados y tribus las responsabilidades para otorgar permisos, supervisar y hacer cumplir los acatamientos. Donde los estándares nacionales no son cumplidos, la EPA puede emitir sanciones y tomar otras medidas para asistir a los estados y tribus a alcanzar los niveles deseados de calidad ambiental.

Realiza investigaciones ambientales: En los laboratorios localizados a través de la nación, la agencia trabaja para evaluar las condiciones ambientales, también para identificar, entender y solucionar problemas ambientales actuales y futuros; integrar el trabajo de socios científicos tales como naciones, organizaciones del sector privado, instituciones universitarias y otras agencias; así como proporcionar liderazgo en atender el surgimiento de problemas ambientales, también en avances científicos y tecnológicos.

### **6.5.2 Síntesis de la legislación ambiental.**

Las siguientes leyes y organizaciones de empleadores ayudan a proteger la salud humana y el medio ambiente. La EPA se encarga de aplicar en su totalidad o una parte de cada uno.

Ley de Conservación y Recuperación de Recursos:

La Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) de 1976 que enmendó la Ley de Eliminación de Desechos Sólidos, se dirige a las actividades de manejo de desechos sólidos y peligrosos.

- Ley del Agua Limpia:

El objetivo principal de la Ley Federal de Control de la Contaminación del Agua, comúnmente referida como la Ley del Agua Limpia (CWA), es

restaurar y mantener la integridad química, física y biológica de las aguas superficiales de la nación. Los contaminantes regulados bajo la CWA incluyen contaminantes de "prioridad", incluyendo diferentes contaminantes tóxicos; contaminantes "convencionales" como por ejemplo la demanda de oxígeno bioquímico (BOD), sólidos suspendidos totales (TSS), bacilos coliformes fecales, aceite y grasa, y pH; y contaminantes "no convencionales" incluyendo cualquier contaminante no identificado, ya sea como convencional o de prioridad.

- Ley del Agua Potable Segura:

La Ley del Agua Potable Segura (SDWA) autoriza a la EPA a establecer disposiciones para proteger la salud humana de los contaminantes en el agua potable. La ley autoriza a la EPA a desarrollar normas nacionales del agua potable y crear un sistema colectivo federal-estatal para asegurar la conformidad con estas normas. La SDWA también da instrucciones a la EPA para proteger las fuentes subterráneas de agua potable a través del control de la inyección subterránea de desechos líquidos.

- Ley de Control de Sustancias Tóxicas:

La Ley de Control de Sustancias Tóxicas (TSCA) otorgó a la EPA la autoridad para crear una estructura reglamentaria para recopilar los datos sobre los químicos con el fin de evaluar, valorar, reducir y controlar los riesgos que pudieran presentarse en razón de su fabricación, procesamiento y uso.

- Ley de aire limpio (CAA):

La Ley del Aire Limpio (Clean Air Act, CAA) y sus enmiendas, incluyendo las Enmiendas a la Ley del Aire Limpio (CAAA) de 1990, están diseñadas para “proteger y mejorar los recursos del aire de la nación con el fin de promover la salud y bienestar público y la capacidad productiva de la población”.

Al investigar a cerca de los límites permisibles en las emisiones de mercurio ya sea en el agua y el aire estos datos los encontraremos en la Tabla 6.4 donde nos indicara las emisiones permisibles de mercurio en el agua tomados de la USEPA, 1980.

**Tabla 6.4.** Criterio de emisiones en el agua USEPA.

| Medio |                 | Emisiones     |                 |
|-------|-----------------|---------------|-----------------|
|       |                 | Limite (mg/L) | Estándar (mg/L) |
| Agua  | Agua fresca     | 1             | 0.19            |
|       | Aguas costeras  | 1             | 0.11            |
|       | Agua de mar     | 1             | 0.14            |
|       | Agua para beber | 1             | 2               |

Fuente: USEPA, 1990.

En la Tabla 6.5 encontramos los límites permisibles de concentración de mercurio en la atmosfera según los datos obtenidos por la EPA.

**Tabla 6.5.** Criterio de emisiones en el aire EPA.

|          | Recomendado           | Limite              | Limite en combinación con otras sustancias |
|----------|-----------------------|---------------------|--|
| Mercurio | 0.2 mg/m <sup>3</sup> | 1 mg/m <sup>3</sup> | 1.8 mg/m <sup>3</sup>                      |

Fuente: EPA, 2011.

En la Tabla 6.6 tenemos los flujos recomendados para la industria tomados de datos de la EPA.

**Tabla 6.6.** Flujos recomendados en la industria según la EPA.

|                      |   | Flujo másico | Flujo másico (Ton/año) |
|----------------------|---|--------------|------------------------|
| PST                  | Sustancias inorgánicas contenidas en material particulado | 1 g/h        | 0.00876                |
|                      | Sustancias inorgánicas contenidas en gases ó vapores      | 10 g/h       | 0.0876                 |
| Sustancias orgánicas |   | 0.1 kg/h     | 0.876                  |

Fuente: EPA, 1990.

A continuación se mencionaran algunas de las normativas de México tratando de abarcar la industria minera mexicana.

### **6.6 Legislación nacional.**

En México existen una jerarquía con respecto al manejo de las leyes es por eso que es mejor explicarlo por medio de la Figura 6.1. Y esta figura trata de explicar que el documento más importante y en el que se rigen todas la leyes es la Constitución Mexicana, de la cual se toma como control para la realización de otras leyes referidas a algún tema tocado en la constitución. De ahí siguen los tratados internacionales debido a su importancia con los diferentes organismos internacionales. De ahí nos pasamos a las Normas Oficiales Mexicanas y las Normas Mexicanas (NMX) con un menor grado de jerarquía pero no menos importantes. Seguidos de las constituciones estatales y sus leyes que deben de ser regidas según el estado y sus necesidades.



**Figura 6.1.** Pirámide Jurídica de Kelsen.

Podemos decir que en la constitución mexicana existen artículos en los cuales es referido la protección del medio ambiente, como es en el caso del artículo 2 que habla del derecho de los indígenas y además de otras cosas del uso y disfrute de los recursos naturales siempre y cuando estos no sean aéreas estratégicas.

En el caso del artículo 4 de la constitución mexicana establece: "Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar". Adicionado mediante decreto publicado en el diario oficial de la federación el 28 de junio de 1999.

El artículo 25, párrafo primero, se indica que corresponde al estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que este sea integral y sustentable. Adicionalmente, el párrafo sexto señala: "Bajo criterios de equidad social y productiva se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicten el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente".

Conforme al párrafo tercero del artículo 27, la propiedad de las tierras y aguas corresponde a la nación, la cual puede transmitir las o concesionarlas a los

particulares para construir la propiedad privada, siendo posible imponer a estas últimas las modalidades que dicten el interés público. Asimismo, la nación está facultada para regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de cuidar de su conservación, y para dictar las medidas necesarias para "... ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; (y) preservar y restaurar el equilibrio ecológico...".

La fracción XVI, base cuarta, del artículo 73 faculta al Congreso de la Unión para revisar las medidas que el Consejo de Salubridad General adopte en materia de prevención y combate a la contaminación ambiental. Por otra parte, la fracción XXIX-G insta un sistema de concurrencias en materia ecológica, indicando que el Congreso puede "...expedir leyes que establezcan las concurrencias del gobierno federal, de los gobiernos de los estados y de los municipios en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico...".

Asimismo, catorce Constituciones estatales incorporan de manera explícita referencias al medio ambiente como un derecho humano. Es el caso de Aguascalientes (derecho a la protección de los recursos naturales, artículo 7o.); Baja California (derecho de toda persona a un medio ambiente sano, artículo 7o.); Coahuila (derecho a disfrutar de un medio ambiente adecuado, artículo 172); Colima (deber de las autoridades de proteger y conservar el medio ambiente y los recursos naturales de la entidad, artículo 1o.); Durango (derecho a vivir y crecer en un ambiente saludable, artículo 3o.); Estado de México (derecho a que las autoridades conserven los recursos naturales y prevengan y combatan la contaminación ambiental, artículo 18), y Morelos (derecho a la protección al ambiente y el equilibrio ecológico, artículo 85-D).



De igual modo existen referencias en las Constituciones de Nuevo León (derecho a un medio ambiente sano, artículo 3o.); Oaxaca (derecho a vivir en un medio ambiente sano, artículo 12); Puebla (deber del estado de observar las reglas de higiene pública y de la ecología para conservar un medio ambiente sano, artículo 121); San Luis Potosí (derecho a un ambiente sano, artículo 15); Veracruz (derecho a vivir en un ambiente saludable y equilibrado, y el derecho de acción popular en materia ambiental, artículo 8o.); Yucatán (derecho a un medio ambiente ecológicamente equilibrado y saludable, así como el acceso a la información estatal sobre medio ambiente, artículo 86), y Zacatecas (derecho a un medio ambiente adecuado y sano, artículo 30).

En México existe una ley secundaria, la cual siempre está en constante evolución. Esta ley secundaria a la que nos referimos es la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEGEEPA).

Al respecto, la LEGEEPA señala que “quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos de dicha afectación implique” (Artículo 15, fracción IV).

Cabe destacar que en la LEGEEPA se incluye de esta manera: “La prevención de las causas que los generan es el medio más eficaz para evitar los desequilibrios ecológicos” (artículo 15, fracción VI). Así mismo tenemos la Ley de Aguas Nacionales y La Ley General de Vida Silvestre, que protegen cada interés que son referidos en sus nombres de cada uno de estas leyes.

También se refiere que la soberanía sobre los recursos naturales y la obligación de no causar daño ambiental a otros Estados o áreas fuera de la jurisdicción nacional es un principio que posee dos vertientes: la primera, relativa al derecho soberano de cada Estado de aprovechar sus recursos conforme a sus propias políticas, y la segunda, entendida como deber de ciudadano respeto a bienes de terceros

### 6.6.1 Normas Oficiales Mexicanas.

La percepción de los riesgos del mercurio no ha sido muy amplia en México, y aún no se han desarrollado normas muy precisas en cuanto al manejo de productos específicos, sin embargo, hay elementos en las leyes que derivan de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que permiten regular este contaminante.

De las leyes y los reglamentos, se derivan las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son de aplicación federal y son redactadas con la participación de los diferentes sectores de gobierno, academia e industria y sometidas a consulta pública antes de su publicación definitiva; hasta la fecha se han publicado las normas listadas en la Tabla 6.7.

Algunas de las entidades encargadas de vigilar el cumplimiento de estas normas, es la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y cuenta con las oficinas generales en la Ciudad de México y representaciones en cada estado de la República Mexicana.

**Tabla 6.7.** Descripción de las normas que se refieren al mercurio.

| Norma.  | Descripción de la norma   |
|---|---|
| NOM-001-SEMARNAT-1996<br>"Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales" | Esta NOM establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales. Donde establece los límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros, donde el valor para el mercurio son descritos en la Tabla 6.8. |

|  |   |
|--|---|
| <p>NOM-002-SEMARNAT-1996</p> <p>“Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal”</p>                        | <p>Esta NOM tiene el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado. Donde en la Tabla 6.9 aparecen los límites máximos permisibles.</p> |
| <p>NOM-052-SEMARNAT-1993</p> <p>“Que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente”</p>        | <p>Esta Norma Oficial Mexicana establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales. En la tabla 6.11 se describen los compuestos de mercurio en esta norma.</p>  |
| <p>NOM-053-SEMARNAT-1993</p> <p>“Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente”</p> | <p>Esta norma oficial mexicana es de observancia en la generación y manejo de residuos peligrosos.</p>  |
| <p>NOM-098-SEMARNAT-2002</p> <p>“Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operaciones y límites de emisión de contaminantes”</p>   | <p>Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones de operación, así como los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones de incineración de residuos. El cual marca los límites máximos permisibles de emisiones de mercurio, los cuales son dados en la Tabla 6.14.</p>  |

|   |  |
|---|--|
| <p>NOM-141-SEMARNAT-2003</p> <p>“Que 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”</p>                     | <p>Esta Norma Oficial Mexicana 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 del suelo. Asimismo, señala especificaciones y criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales, y para el monitoreo.</p> |
| <p>NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004</p> <p>“Que establece criterios para la caracterización y determinación de concentraciones de remediaciones de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio</p> | <p>Esta Norma Oficial Mexicana es obligatoria para todas aquellas empresas que deban determinar la contaminación de un suelo con materiales o residuos que contengan arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio, vanadio y sus compuestos inorgánicos.</p>  |
| <p>NOM-155-SEMARNAT-2007</p> <p>“Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata”</p>   | <p>Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones para la caracterización del mineral lixiviado o gastado y del sitio, así como los requisitos de protección ambiental para las etapas de preparación del sitio, construcción, operación, cierre y monitoreo de los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata.</p>   |
| <p>NOM-002-SCT-2003</p> <p>“Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados”</p>   | <p>La presente NOM tiene como objetivo identificar y clasificar las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados, de acuerdo a su clase, división de riesgo, riesgo secundario, número asignado por la Organización de las Naciones Unidas, así como las disposiciones especiales a que deberá sujetarse su transporte y el método de envase y embalaje. Donde aparecen una gran variedad de sustancias que contienen</p>                             |

|   |  |
|---|--|
|   | mercurio.  |
| NOM-005-SCT-2008<br>"Información de emergencia para el transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos"  | La NOM tiene como objetivo establecer los datos y especificaciones que debe contener la Información de Emergencia para el Transporte de Sustancias, Materiales y Residuos Peligrosos, que indique las acciones a seguir para casos de incidente o accidente (fugas, derrames, explosiones, incendios, exposiciones, etc.), que debe llevar toda unidad de transporte, durante el transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos, en bolsa o carpeta-portafolios en un lugar accesible de la unidad, retirada de la carga.                              |
| NOM-010-STPS-1994<br>"Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente" | Esta NOM establece medidas para prevenir daños a la salud de los trabajadores expuestos a las sustancias químicas contaminantes del medio ambiente laboral, y establecer los límites máximos permisibles de exposición en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas que por sus propiedades, niveles de concentración y tiempo de exposición, sean capaces de contaminar el medio ambiente laboral y alterar la salud de los trabajadores. La Tabla 6.15 describe los límites de exposición para el mercurio. |
| NOM-018-STPS-2000<br>"Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo"   | Esta NOM establece los requisitos mínimos de un sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas, que de acuerdo a sus características físicas, químicas, de toxicidad, concentración y tiempo de exposición, puedan afectar la salud de los trabajadores o dañar el centro de trabajo. Donde tenemos en la Tabla 6.10 cada una de las clasificaciones que se les da a cada compuesto del mercurio, así como al mercurio metálico.   |

|  |   |
|--|---|
| <p>NOM-016-ZOO-1994</p> <p>"Análisis de mercurio en hígado, musculo y riñon de bovinos, equinos, porcinos, ovinos y aves, por espectrometría de absorción atómica"</p>   | <p>Esta NOM es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y tiene por objeto, establecer el método de prueba para la determinación de residuos de mercurio en hígado, músculo y riñon de bovinos, equinos, porcinos, ovinos y aves.</p>  |
| <p>NOM-090-ECOL-1994</p> <p>"Establece los requisitos para el proyecto, construcción y operación de presas de jales"</p>   | <p>Esta Norma Oficial Mexicana indica que debe de ser obligatoria para el generador de jales provenientes del beneficio de minerales metálicos y no metálicos, exceptuando a los minerales radiactivos.</p>   |
| <p>NOM-117-SSA1-1994</p> <p>"Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica"</p> | <p>Esta Norma Oficial Mexicana establece los métodos de prueba de espectrometría de absorción atómica para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio presentes en alimentos, bebidas, agua purificada y agua potable.</p>   |
| <p>NOM-118-SSA1-1994 "Materias primas para alimentos, productos de perfumería y belleza. colorantes y pigmentos inorgánicos"</p>   | <p>Esta Norma Oficial Mexicana establece las especificaciones sanitarias que deben cumplir los colorantes y pigmentos inorgánicos. Donde marca los límites máximos permisibles de la presencia de este metal.</p>   |
| <p>NOM-127-SSA1-1994</p> <p>"Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"</p>  | <p>Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional. Donde el limite permisible de la presencia del mercurio es de 0.001 mg/L.</p> |

Fuente: SEMARNART, STPS, SCT.

**6.6.1.1 NOM-001-SEMARNAT-1996.**

Los límites máximos permisibles de emisiones de mercurio dados en esta norma son los siguientes.

**Tabla 6.8.** Límites Máximos Permisibles Para Metales Pesados y Cianuros.

| Límites Máximos Permisibles Para Metales Pesados y Cianuros. |                    |      |                    |      |                             |      |                                   |      |                    |      |  |      |            |      |           |      |                    |      |                       |      |
|--|--------------------|------|--------------------|------|-----------------------------|------|-----------------------------------|------|--------------------|------|--|------|------------|------|-----------|------|--------------------|------|-----------------------|------|
| Parámetros<br>(mg/L)   | Ríos               |      |                    |      |                             |      | Embalses naturales y artificiales |      |                    |      | Aguas costeras                               |      |            |      |           |      | Suelo              |      |                       |      |
|  | Uso riego agrícola |      | Uso público urbano |      | Protección de vida acuática |      | Uso en riego agrícola             |      | Uso público urbano |      | Explotación pesquera navegación y otros usos |      | Recreación |      | Estuarios |      | Uso riego agrícola |      | Humedales naturales ( |      |
| Mercurio   | 0.01               | 0.02 | 0.005              | 0.01 | 0.005                       | 0.01 | 0.01                              | 0.02 | 0.005              | 0.01 | 0.01   | 0.02 | 0.01       | 0.02 | 0.01      | 0.02 | 0.005              | 0.01 | 0.005                 | 0.01 |

Fuente: NOM-001-SEMARNAT-1996.

### 6.6.1.2 NOM-002-SEMARNAT-1996.

En la tabla siguiente se establecen los límites máximos permisibles, para el contenido de mercurio en las aguas residuales.

**Tabla 6.9.** Límites para las descargas de agua.

| Límites Máximos Permisibles                           |                  |                 |             |
|---|------------------|-----------------|-------------|
| Parámetros (mg/L, excepto cuando se especifique otra) | Promedio Mensual | Promedio Diario | Instantáneo |
| mercurio total  | 0.01             | 0.015           | 0.02        |

Fuente: NOM-002-SEMARNAT-1996.

### 6.6.1.3 NOM-018-STPS-2000.

Para esta norma la Tabla 6.10 se da cada una de las clasificaciones para los compuestos del mercurio, así como para el mercurio metálico. Tomando en cuenta el anexo III.

**Tabla 6.10.** Referencia clasificación de tipo y grado de riesgo de algunas sustancias químicas.

| No. | Sustancia                                   | CAS       | NFPA |   |   |    | HMIS |   |     |     |
|-----|---|-----------|------|---|---|----|------|---|-----|-----|
|     |   |           | S    | I | R | RE | S    | I | R   | EPP |
| 238 | CIANURO DE MERCURIO                         | 592-04-1  | 3    | 0 | 0 |    |      |   |     |     |
| 608 | MERCURIO (arilos como Hg)                   | 7439-97-6 | 2    | 0 | 0 |    | 3    | 0 | 0 J |     |
| 609 | MERCURIO (Compuestos de alquilos) (como Hg) | 7439-97-6 | 2    | 0 | 0 |    | 3    | 0 | 0 K |     |

Fuente: NOM-018-STPS-2000.



#### 6.6.1.4 NOM-052-SEMARNAT-2005.

Se clasifican los tipos de desechos peligrosos en los procesos industriales, en los cuales aparasen algunos desechos con contenidos de mercurio, aquí se presentara en la Tabla 6.11, la concentración máxima permitida de los residuos que lo hace peligroso al ambiente.

**Tabla 6.11.** Características de lixiviado que hace peligroso a un residuo por su toxicidad en el ambiente

| Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto pect |              |                                       |
|---|--------------|---------------------------------------|
| No. CAS   | Contaminante | LMP (Limite Máximo Permisible) (mg/L) |
| 7439-97-6   | Mercurio     | 0.2                                   |

Fuente: NOM-052-SEMARNAT-1993

En la Tabla 6.12 clasifica el nivel de peligrosidad de los residuos pero para esto se explicara brevemente el cómo se clasifica cada sustancia con la siguiente tabla.

**TABLA 6.12.** Códigos de peligrosidad de los residuos (CPR).

| Características     | Código de Peligrosidad de los Residuos (CPR) |
|---------------------|--|
| Corrosividad        | C  |
| Reactividad         | R  |
| Explosividad        | E  |
| Toxicidad           | T  |
| Ambiental           | Te   |
| Aguda               | Th   |
| Crónica             | Tt   |
| Inflamabilidad      | I  |
| Biológico-Infecioso | B  |

Cuando se trate de una mezcla de residuos peligrosos de los Listados 3 y 4 se identificarán con la característica del residuo de mayor volumen, agregándole al CPR la letra "M".

Fuente: NOM-052-SEMARNAT-2005

Por lo que para la Tabla 6.13 tenemos la clasificación de los residuos peligrosos del desecho de productos químicos fuera de especificación o caducos.

**Tabla 6.13.** Clasificación de residuos peligrosos.

| No. CAS   | Nombre                      | CPR  | Clave |
|-----------|-----------------------------|------|-------|
| 7439-97-6 | Mercurio (todas las formas) | (Tt) | T151  |

Fuente: NOM-052-SEMARNAT-2005.

#### **6.6.1.6 NOM-098-SEMARNAT-2002.**

En esta norma se especifican los límites máximos permisibles para la incineración de residuos, además que se dan métodos analíticos en los cuales están todas las indicaciones con las cuales es posible analizar y detectar la presencia de mercurio en las emisiones. En la Tabla 6.14 tenemos los límites máximos permisibles en las emisiones de incineración de residuos.

**Tabla 6.14.** Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.

| Contaminante                  | Limite de emisión | Frecuencia de medición | Norma que aplica o método                           |
|-------------------------------|-------------------|------------------------|---|
| Mercurio (mg/m <sup>3</sup> ) | 0.07              | Semestral              | Espectrometría de absorción atómica con vapor frio. |

Fuente: NOM-098-SEMARNAT-2002.

### 6.6.1.7 NOM-010-STPS-1994.

La Tabla 6.15 describe los límites de exposición para el mercurio en el ambiente laboral de cualquier sector industrial.

**Tabla 6.15.** Límites permisibles de exposición de contaminantes en el ambiente laboral.

| Listado de los límites máximos permisibles de exposición a contaminantes del medio ambiente laboral |   |                                      |             |  |                   |  |                   |
|---|---|--------------------------------------|-------------|--|-------------------|--|-------------------|
| No.   | Sustancia   | No. CAS (Chemical Abstracts Service) | Connotación | LMPE-PPT (límite máximo permisible de exposición promedio ponderado en tiempo) |                   | LMPE-CT o Pico(límite máximo permisible de exposición de corto tiempo) |                   |
|   |   |                                      |             | ppm  | mg/m <sup>3</sup> | ppm  | mg/m <sup>3</sup> |
| 364   | Mercurio (Compuestos de alquilos) (como Hg)                       | 7439-97-6                            | Piel        | -  | 0.01              | -  | 0.03              |
|   | Mercurio. ( arilos como Hg)                                       | 7439-97-6                            |             | -  | 0.05              | -  | -                 |
|   | Mercurio. Humo (todas las formas inorgánicas incluyendo el metal) | 7439-97-6                            | A4          | -  | 0.05              | -  | -                 |

Fuente: NOM-010-STPS-1994.

Connotaciones.

A4: se refieren al apartado I.2 clasificación de cancerígenos;

Apartado 1.2.

A4 No clasificado como carcinógeno en humano.

Los datos son insuficientes para clasificar al agente en términos de su carcinogenicidad en humanos o en animales.

Piel: es una connotación que se agrega a algunos compuestos para identificar qué contaminante del medio ambiente puede ser absorbido a través de la piel, las membranas mucosas o los ojos en cantidades significativas, incrementando el riesgo por la exposición a ese contaminante del medio ambiente.

## **6.7 Impacto ambiental.**

Podemos definir el impacto ambiental como la "Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza". Un huracán o un sismo pueden provocar impactos ambientales, sin embargo el instrumento Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) se orienta a los impactos ambientales que eventualmente podrían ser provocados por obras o actividades que se encuentran en etapa de proyecto (impactos potenciales), o sea que no han sido iniciadas, como por ejemplo evaluar el impacto que se puede ocasionar en la apertura de una nueva mina de cualquier metal (SEMARNAT, 2011).

### **6.7.1 Tipos de impactos ambientales.**

Existen diversos tipos de impactos ambientales, pero fundamentalmente se pueden clasificar, de acuerdo a su origen, en los provocados por:

- El aprovechamiento de recursos naturales ya sean renovables, tales como el aprovechamiento forestal o la pesca; o no renovables, tales como la extracción del petróleo o del carbón.
- Contaminación. Todos los proyectos que producen algún residuo (peligroso o no), emiten gases a la atmósfera o vierten líquidos al ambiente.
- Ocupación del territorio. Los proyectos que al ocupar un territorio modifican las condiciones naturales por acciones tales como desmonte, compactación del suelo y otras.

Asimismo, existen diversas clasificaciones de impactos ambientales de acuerdo a sus atributos; por ejemplo:

- Positivo o Negativo: En términos del efecto resultante en el ambiente.
- Directo o Indirecto: Si es causado por alguna acción del proyecto o es resultado del efecto producido por la acción.
- Acumulativo: Es el efecto que resulta de la suma de impactos ocurridos en el pasado o que están ocurriendo en el presente.

- Sinérgico: Se produce cuando el efecto conjunto de impactos supone una incidencia mayor que la suma de los impactos individuales.
- Residual: El que persiste después de la aplicación de medidas de mitigación.
- Temporal o Permanente: Si por un período determinado o es definitivo.
- Reversible o Irreversible: Dependiendo de la posibilidad de regresar a las condiciones originales.
- Continuo o Periódico: Dependiendo del período en que se manifieste.

### **6.7.2 Procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental (PEIA).**

La evaluación de un estudio de impacto ambiental lo realiza la autoridad mediante un procedimiento de tipo técnico administrativo, hay tres opciones mediante las cuales puede presentarse dependiendo del control que se tenga sobre los impactos y la magnitud del área donde se pretende desarrollar un proyecto:

- a) Informe preventivo
- b) Manifestación de impacto ambiental modalidad particular
- c) Manifestación de impacto ambiental modalidad regional.

#### a) Informe preventivo

Requieren de presentar un Informe Preventivo y no una Manifestación de Impacto Ambiental en los siguientes casos:

I.- Existan normas oficiales mexicanas u otras disposiciones que regulen las emisiones, las descargas, el aprovechamiento de recursos naturales y, en general, todos los impactos ambientales relevantes que puedan producir las obras o actividades;

II.- Las obras o actividades de que se trate estén expresamente previstas por un plan parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que haya sido evaluado por la secretaría competente

III.- Se trate de instalaciones ubicadas en parques industriales autorizados en los términos de la presente sección.

En los casos anteriores, la Secretaría, una vez analizado el informe preventivo, determinará, en un plazo no mayor de veinte días, si se requiere la presentación de una manifestación de impacto ambiental en alguna de las modalidades o si se está en alguno de los supuestos señalados.

b) y c) Manifestación de Impacto Ambiental (MIA)

Se trata de un documento con base en estudios técnicos con el que las personas (físicas o morales) que desean realizar alguna de las obras o actividades previstas en el artículo 28 de la LGEEPA, analizan y describen las condiciones ambientales anteriores a la realización del proyecto con la finalidad de evaluar los impactos potenciales que la construcción y operación de dichas obras o la realización de las actividades podría causar al ambiente y definir y proponer las medidas necesarias para prevenir, mitigar o compensar esas alteraciones (SEMARNAT, 2011).

### **6.8. La Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte.**

Canadá, Estados Unidos y México crearon en 1994 la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), en cumplimiento al Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN) derivado del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). En octubre de 1997, el Equipo de Trabajo de América del Norte para la instrumentación del Plan de acción regional (PARAN) sobre mercurio solicitó al Consejo de la CCA la aprobación de la Fase I de un plan de acción regional para mercurio para proceder a una instrumentación preliminar de las actividades, basándose en los siguientes objetivos:

a) Reducir los niveles de mercurio en determinados entornos ambientales indicativos, así como los flujos entre ellos, para que se aproximen a los niveles y flujos naturales, y

b) Buscar la reducción, mediante enfoques de manejo del ciclo de vida en las fuentes de contaminación antropogénica de mercurio.

La meta del Plan de acción regional de América del Norte sobre el mercurio es lograr, mediante las iniciativas nacionales e internacionales adecuadas, la reducción de las emisiones antropogénicas de mercurio en el medio ambiente de esta región hasta llegar a valores atribuibles a los niveles y flujos generados por la naturaleza. Para alcanzarlo, las tres partes procurarán:

- Reducir las descargas de mercurio en determinadas actividades humanas. Esto incluye, entre otras medidas, disminuir las descargas de mercurio en fuentes de combustión, procesos comerciales, operaciones, productos y flujos de desechos.



## **ANÁLISIS.**

Se llevo a cabo una revisión acerca de la contaminación de mercurio en la industria minera mexicana, y se encontró que desde tiempos prehispánicos existen las técnicas de minería para la extracción de metales ya que fueron utilizados por personas de esa época, pero en la época de la nueva España existió una explotación intensiva de metales en los cuales se incluía el mercurio de manera directa e indirecta, por lo que la contaminación por mercurio existe desde esas épocas, así que podemos decir que existe una acumulación en el ambiente la cual es necesario llevar a cabo una investigación de campo para corroborar el daño producido y encontrar un modelo de acumulación, y así poder cuantificar este impacto en el medio ambiente.

También se busco en la literatura y fuentes electrónicas el peligro toxicológico que tiene el mercurio y se encontró que, para el ser humano el mercurio metálico es un metal altamente peligroso debido a que la exposición con este metal provoca una serie de síntomas que van desde problemas intestinales hasta llegar a tener problemas al sistema nervioso central y en exposiciones más prolongadas llegar hasta la muerte. Los compuestos de mercurio con mayor grado de peligro son los compuestos orgánicos del mercurio, como el metilmercurio debido a que en pequeñas cantidades los síntomas previamente descritos en el capítulo 3, se presentan con mayor rapidez.

Para el ciclo del mercurio en el ambiente existen dos tipos de ciclos, el ciclo natural y el ciclo antropogénico, este último con graves consecuencias debido a que ha aumentado la acumulación del mercurio en el medio ambiente, esto es debido a la actividades económicas generadas por el hombre, lo que se refleja principalmente en la contaminación ya sea en el agua, el suelo o en la atmósfera. Se encontró que el comportamiento del mercurio en diferentes ambientes varía, ya que existen reacciones de oxidación y reducción del mercurio en el agua por lo que provoca una conversión de mercurio elemental a

metilmercurio y de ahí existe una Bioacumulación en el ecosistema ya contaminado.

Para la contaminación en la tierra no existe mucho problema debido a que el mercurio tiene cierta afinidad con los materiales orgánicos por lo que se considera que no hay mucha movilidad del mercurio en el suelo.

Y para la contaminación en el aire tenemos que es el medio adecuado del mercurio para la acumulación en los ecosistemas aledaños y también se ha encontrado que hay mucha movilidad del mercurio ( $\text{Hg}^{2+}$ ) hasta zonas muy aledañas.

En las emisiones del mercurio en México toman en cuenta las diferentes actividades económicas y se dio una prioridad en la minería mexicana y lo que se obtuvo la información necesaria para poder tener una referencia de la situación de la contaminación en México y se puede decir que las propuestas de inventarios de emisiones dadas por la SEMARNAT, indican que en diferentes actividades en la república mexicana existen emisiones de mercurio, pero en especial en la minería mexicana y a ésta se refieren a la extracción y refinación de metales como el oro, se encontró que existe una relación de contaminación que por cada tonelada de oro obtenido, hay una emisión de mercurio de 6.23 toneladas al suelo, y debido a la producción de oro en México las emisiones de mercurio son muy grandes, así que recomienda poder realizar una investigación de campo y obtener las concentraciones en las emisiones en el aire, agua y suelos en las minas en uso y abandonadas de México.

Para las legislaciones internacionales se dio una revisión superficial en las legislaciones de la Unión Europea como en la de Estados Unidos de América, y en esto encontramos que hay una alarmante preocupación por este metal y existen normativas en las cuales tratan de controlar ya sean las emisiones, como el manejo y producción de este metal. En México se tienen normas oficiales, las cuales ayudan en el tema de protección de la contaminación por mercurio, y así tratar de controlar las emisiones de mercurio en el medio ambiente, estos límites de emisiones son muy bien elaborados en comparación con las normas internacionales

y así podemos decir que las normas tratan de controlar las emisiones de mercurio, lamentablemente es necesario un estudio más profundo en el tema de la minería mexicana y así tener datos aproximados de las concentraciones de mercurio en las zonas aledañas a las minas en especial a la extracción de oro.

## **CAPITULO 7.**

### **CONCLUSIONES.**

- Se ha analizado la contaminación por mercurio debido a la actividad minera en México a través de datos nacionales publicados en fuentes oficiales. Y después de llevar un análisis de cada uno de los capítulos se encontró que en México ha existido una actividad minera desde la era prehispánica, por lo que desde ese momento ha existido una contaminación por esta actividad, Y como se encontró en fuentes oficiales, existe una contaminación por mercurio en la actividad minera mexicana.
- Se ha revisado la evolución de la minería en México consultando fuentes impresas, electrónicas y dependencias gubernamentales. Y se encontró que desde la época de la colonia (siglo XVI) existió una explotación intensiva de metales preciosos en los cuales se incluía el mercurio de manera directa e indirecta.
- Se recordaron los efectos toxicológicos del mercurio considerando estudios realizados en el mundo y se explico su alto riesgo para la salud humana así como para la flora y fauna, expuesta a este metal.
- Se ha analizado el ciclo del mercurio enfocándolo en el ambiente y se encontró que existen dos tipos de ciclos para el mercurio, el ciclo natural y el ciclo antropogénico, este último con graves consecuencias debido a que ha aumentado la acumulación del mercurio en el medio ambiente, esto es debido a la actividades económicas generadas por el hombre, lo que se refleja principalmente en la contaminación ya sea en el agua, el suelo o en la atmósfera.

- Se ha evaluado las emisiones del mercurio en México, consultando las dependencias de gobierno, considerando la actividad minera mexicana. Se obtuvo la información necesaria para poder tener una referencia de la situación de la contaminación en México.
- Se ha realizado una revisión de la legislación nacional e internacional utilizando como referencia los países que lleven a cabo un control con la contaminación por mercurio en sus diferentes tipos de emisiones y se encontró que las legislaciones internacionales y nacional se tiene un buen control de emisiones del mercurio.

## **ANEXOS.**

### **ANEXO 1.**

#### **HOJA DE SEGURIDAD XXI MERCURIO Y SALES DE MERCURIO**

##### **GENERALIDADES:**

El mercurio es un metal líquido, inodoro, plateado, pesado y ligeramente volátil a temperatura ambiente, con un peso atómico de 200.59 g/mol. En estado sólido es blanco, dúctil, maleable y puede cortarse con un cuchillo. Su símbolo (Hg) se tomó de su nombre en latín: hydrargyrum, que significa plata líquida. Existen una gran cantidad de isótopos naturales de este elemento: 202 (29.8 %), 200 (23.13 %), 199 (16.84 %), 201 (13.22%), 198 (10.02 %), 204 (6.85 %) y 196 (0.146 %).

Se encuentra en la corteza terrestre en una concentración de 0.5ppm, en combinación con azufre, formando más de una docena de compuestos diferentes. De estos compuestos, el más importante de ellos comercialmente, es el sulfuro rojo HgS, conocido como cinabrio, el cual contiene 86.2 % de Hg y 13.8 % de azufre. El metal obtenido puede tener una pureza hasta del 99.9 % y si se desea una pureza mayor, se purifica por destilación múltiple o refinamiento electrolítico. A partir de este mineral es de donde se obtiene el mercurio metálico, principalmente.

Algunos otros minerales de mercurio son: la corderoita ( $\text{Hg}_3\text{S}_2\text{Cl}_2$ ), la livingstonita ( $\text{Hg Sb}_4\text{S}_7$ ), la montroidita (HgO), el calomel (HgCl) y el metacinabrio que es una forma negra de este último.

El uso, tanto del mercurio como del cinabrio, se remonta a muchos años atrás. En el siglo IV AC, Aristóteles usaba mercurio en ceremonias religiosas y el cinabrio se usó antes, como pigmento en la decoración de cuevas y del cuerpo. Los antiguos egipcios, griegos y romanos utilizaron mercurio para preparar cosméticos, medicamentos y para amalgamación. En el siglo XVI se empezó a usar para la extracción de plata mediante el método del "Patio", posteriormente se usó en la elaboración de instrumentos de medición, como se menciona más adelante, y para generar el fulminato de

mercurio, un detonador de explosivos. Todo esto llevó a la expansión de la industria del mercurio a partir de 1900.

Actualmente, sus usos son variados y numerosos y dependen principalmente del aprovechamiento de sus propiedades fisicoquímicas como volumen de expansión, conductividad eléctrica, toxicidad y habilidad para alearse con otros metales. Entre las aplicaciones de este metal se encuentran: como catalizador de oxidaciones orgánicas; en recubrimiento de espejos; en lámparas de arco para generar rayos UV y lámparas fluorescentes; en instrumentos como barómetros, termómetros, hidrómetros y pirómetros; en la extracción de oro y plata de sus minerales; en la generación de amalgamas; en rectificadores eléctricos; en la determinación de nitrógeno por el método Kjeldhal; como reactivo de Millon; como cátodo en electrólisis y electroanálisis; en pilas y en la manufactura de sales de mercurio, productos farmacéuticos, agroquímicos y pinturas. Desde luego muchos de estos usos han sido prohibidos en muchos países debido a su alta toxicidad, por ejemplo en pesticidas, productos de lavandería, cosméticos y pinturas.

Tanto el mercurio como sus sales tienen una gran resistencia a la biodegradación, por lo que se acumulan creando graves problemas de contaminación ambiental. Es por ello que existen reglamentaciones especiales para el manejo, producción y disposición de desechos, en países industrializados.

Los compuestos de mercurio son generalmente coloridos. Pueden ser insolubles en agua y son muy tóxicos por ingestión o inhalación de sus polvos.

NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN:

|   |  |
|---|--|
| Para mercurio metálico:<br>CAS: 7439-97-6<br>NIOSH: OV 4550000<br>NOAA: 1064<br>RTECS: OV4550000<br>El producto está incluido en: CERCLA. y<br>313<br>MARCAJE: CORROSIVO<br>Para disoluciones de sales de mercurio:<br>UN: 2024 | RCRA: U151<br>STCC: 4944325<br>NOM 114: Salud: 2 Reactividad:0<br>Fuego: 0<br>(Metálico)<br>UN:2809<br>NOAA : 3849 |
|---|--|

#### PROPIEDADES FÍSICAS:

El mercurio tiene una expansión de volumen uniforme en estado líquido, lo que, en conjunto con su alta tensión superficial y su inhabilidad de mojar el vidrio lo hace muy útil en instrumentos de medición.

Punto de fusión: -38.87 °C

Punto de ebullición: 357.72 °C

Densidad (g/ml) : 13.534 (25 °C), 13.546 (20 °C), 14.43 (en el punto de fusión), 14.193 ( a -38.8 °C, sólido) y 13.595 (0 °C)

Las ecuaciones generales para calcular la presión de vapor son:

de 0-150 °C:  $\log P = -3212.5/T + 7.15$

de 150-400 °C:  $\log P = -3141.33/T + 7.879 - 0.00019t$

P= presión de vapor en Kpa; T = temperatura en K; t= temperatura en °C.

Calor de vaporización (25 °C): 14.652 Kcal/mol

Tensión superficial (25 °C): 484 dinas/cm

Resistividad eléctrica (20 °C): 95.76 Nohm cm

E (acuoso) Hg/Hg<sup>2+</sup>: -0.854 V

Hg/Hg<sub>2</sub><sup>2+</sup>: 0.7961 V

Hg<sub>2</sub><sup>2+</sup>/Hg<sup>2+</sup>: 0.905 V

Coefficiente de expansión de volumen del líquido (20 °C): 182X10<sup>-6</sup>/ °C.

Calor latente de fusión: 11.8 J/g

Expansión de volumen:  $V_t = V_o(1 + 0.18182 \times 10^{-3} t + 0.0078 \times 10^{-6} t^2)$

Angulo de contacto de vidrio (18 C): 128



Distancia atómica: 3 nm  
Punto triple: 38.84168 °C  
Conductividad térmica: 0.092 W/cm<sup>2</sup> K  
Densidad crítica: 3.56 g/ml  
Temperatura crítica: 1677 °C  
Presión crítica: 558.75 mm de Hg  
Sistema cristalino: romboédrico  
Potenciales de ionización:  
1er electrón: 10.43 V  
2 electrón: 18.75 V  
3er electrón: 34.2 V  
Presión interna: 13.04 atm  
Índice de refracción (20 °C): 1.6-1.9  
Solubilidad en agua: 20-30 ng/L. Insoluble en agua y disolventes orgánicos.  
Coeficiente de temperatura de tensión superficial: -0.19 mN/m C  
Viscosidad (20 °C): 1.55 mPa s  
Entropía (S298): 76.107 J/mol  
Calor de fusión: 2297 J/átomo  
Calor de vaporización: 59149 J/átomo  
Mercurio líquido, 25-357 °C:  
Cp: 27.66 J/mol  
Mercurio gaseoso:  
Cp: 20.79 J/mol  
Calor latente de vaporización: 271.96 J/g  
Calor específico (J/g):  
    Sólido: 1.1335 (-75.6 °C); 0.141 (-40 °C) y 0.231 (-263.3 °C)  
    Líquido: 0.1418 (-36.7 °C) y 1.1335 (210 °C)

### **PROPIEDADES QUÍMICAS:**

Puro y a temperatura ambiente no se oxida, sin embargo al calentar cerca de su punto de ebullición, si lo hace, aunque lentamente, formando HgO.

Forma aleaciones con muchos metales, excepto hierro (solo a temperaturas muy altas) y con azufre se combina a temperatura ambiente.

Reacciona con  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  caliente, sin embargo, no lo hace con  $\text{HCl}$ , ni con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  frío o álcalis. Reacciona con disoluciones de amoníaco en presencia de aire para generar  $\text{Hg}_2\text{NOH}$  (base de Millon).

Reacciona explosivamente con tetracarbonil de níquel (con agitación); ácido peroxifórmico; dióxido de cloro (con agitación); 3-bromo-propino; metil-silano y oxígeno (con agitación) y disoluciones concentradas de perclorato de plata con 2-pentino o 3-hexino.

El óxido de etileno puede contener trazas de acetileno como contaminante, con el cual, el mercurio forma acetiluros capaces de detonar.

El mercurio entra en ignición en presencia de una corriente de cloro a 200-300 °C. Lo mismo sucede con el diyodo-fosfuro de boro en presencia de vapores de mercurio.

Este metal, reacciona violentamente con bromo o acetiluro de sodio. Con sodio, rubidio y potasio la reacción es violenta y exotérmica. La formación de amalgamas con calcio, también es violenta.

Algunos metales como  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$  o  $\text{Zn}$  precipitan el metal de disoluciones neutras o ligeramente ácidas de sales de mercurio.

Las sales mercúricas en presencia de  $\text{NaOH}$ , generan un precipitado amarillo de  $\text{HgO}$  y con disolución alcalina de yodo, dan  $\text{HgI}_2$ . Las sales mercurosas, por su parte, dan un precipitado negro con hidróxidos alcalinos y un precipitado blanco de calomel con  $\text{HCl}$  o cloruros solubles.

Mezclas de mercurio con acetileno, amoníaco, dióxido de cloro, metil-azida, cloratos, nitratos y ácido sulfúrico caliente pueden resultar explosivas.

En general es incompatible con halógenos y agentes oxidantes fuertes.

#### **NIVELES DE TOXICIDAD:**

RQ:1

IDLH: 28 mg/m<sup>3</sup>

México:

CPT: 0.05 mg/m<sup>3</sup> como Hg vapor (absorción por la piel de todas sus formas)

CPT: 0.01 mg/m<sup>3</sup> como Hg (absorción por la piel para derivados alquilados)

CCT: 0.03 mg/m<sup>3</sup> como Hg (absorción por la piel para derivados alquilados)

Estados Unidos:

TLV TWA: 0.05 mg Hg /m<sup>3</sup> (como Hg)

TLV: 0.01 mg Hg/m<sup>3</sup> (para derivados alquilados)

Reino Unido

Francia:

Periodos largos: 0.05 mg/m<sup>3</sup> VME: 0.05 mg/m<sup>3</sup> (vapor)

Periodos cortos: 0.15 mg/m<sup>3</sup>

Alemania:

Suecia:

MAK: 0.1 mg/m<sup>3</sup> (0.01 ppm) Nivel límite: 0.05 mg/m<sup>3</sup> (vapor)

## **MANEJO:**

### **Equipo de protección personal:**

Evitar el contacto repetido o prolongado con la piel mediante el uso de equipo de protección apropiado como bata lentes de seguridad, guantes y, si la cantidad usada es grande, deben usarse además, respiradores adecuados. Es necesario, tener un buen sistema de ventilación. En el caso de trabajar constantemente con este metal o sus compuestos, es necesario portar detectores.

En áreas de trabajo donde se manejan grandes cantidades de mercurio, es necesario el uso de uniformes desechables (se evita la contaminación de ellos y la absorción por piel), máscaras desechables para absorber los vapores y recipientes que contengan el mercurio y sus derivados, bien aislados. Además, los pisos deben ser de materiales no porosos y lavarse regularmente con disoluciones diluidas de sulfuro de calcio. Los trabajadores deben bañarse diariamente y hacerse examinar periódicamente, incluyendo en el examen, análisis de sangre y orina.

Existen materiales sintéticos como policloruro de vinilo, poliuretano, hule de nitrilo, Viton, hule butílico y neopreno, los cuales son resistentes al mercurio y se usan para la elaboración de equipo de seguridad como guantes, delantales y botas.

Para trasvasar pequeñas cantidades de disoluciones de sales de mercurio, debe usarse pipeta, nunca aspirar con la boca.

Inhalación: Esta es la principal ruta de entrada al organismo de mercurio elemental, ya que vaporiza a temperatura ambiente y es absorbido por los pulmones. De aquí, es rápidamente absorbido y distribuido por la sangre. Aproximadamente 1 % del metal absorbido se almacena en el cerebro de mamíferos, donde puede permanecer por mucho tiempo, el resto se transporta a hígado y riñones donde es secretado a través de la bilis y la orina.

La inhalación de una concentración alta causa edema pulmonar agudo y neumonitis intersticial, la cual, puede ser fatal o generar tos persistente. Otros efectos son: salivación, dolor abdominal, dolor en el pecho, náusea, vómito y diarrea. Se ha observado que conejos expuestos a una concentración de 28.8 mg/m<sup>3</sup> por 4 horas sufren daños severos en cerebro, hígado, riñones, corazón y colon.

Los síntomas de daños crónicos son: cambios en el comportamiento como depresión e irritabilidad, temblores y pérdida de apetito y peso. Los cambios de comportamiento son más marcados en trabajadores expuestos a niveles arriba de 0.05mg/m<sup>3</sup>, mientras que los temblores se presentan a esta concentración y menores. Una vez que la exposición se evita, los signos de daño neurológico pueden presentarse de vez en cuando, pero en la mayoría de los casos se agravan con el tiempo. También pueden pelarse las manos y pies en exposiciones crónicas sin embargo, esto es menos común.

Contacto con ojos: Los irrita.

Contacto con la piel: El mercurio se absorbe a través de la piel (en cantidades mínimas) causando los síntomas ya mencionados. Se ha informado de dermatitis por contacto y sensibilidad a este metal en estudiantes de odontología. En estudios con voluntarios se observó que la velocidad de entrada de los vapores de mercurio a través de la piel fue de 2.2 % de aquella absorbida por pulmones, por lo que el peligro por absorción por la piel es mínimo.

Ingestión: En estudios con ratas solo se observó una pequeña cantidad de metal absorbido después de la ingestión.

Carcinogenicidad: A pesar de que se le asoció a problemas de glioblastomas, en estudios recientes se han tenido resultados negativos en cuanto a la carcinogenicidad del mercurio en humanos y animales de laboratorio.

Mutagenicidad: Se han observado resultados positivos de compuestos inorgánicos y orgánicos de mercurio en estudios con *Drosophilla melanogaster*. En cuanto a humanos, se han reportado resultados positivos y negativos de aberración cromosomal, por lo que no es claro el efecto de este producto.

Peligros reproductivos: Se ha observado que el mercurio traspasa la placenta, en estudios con monos expuestos a vapores del metal. También se han reportado, en mujeres ocupacionalmente expuestas al mercurio, complicaciones en el embarazo, en el parto, bebés de bajo peso, disturbios en la menstruación, abortos espontáneos y en el caso de incidencia, malformaciones en el feto. En ratas se han encontrado, además, defectos en el cráneo de fetos provenientes de madres expuestas de manera crónica a vapores de mercurio.

También los compuestos organo-mercurados han provocado efectos embriotóxicos y teratogénicos

#### **ACCIONES DE EMERGENCIA:**

Primeros auxilios:

En todos los casos, la ropa contaminada debe ser almacenada para su descontaminación posterior y la víctima debe permanecer en observación.

Uno de los antídotos usados en este caso de intoxicación es el Dimercaprol, sin embargo debe suministrarse por personal calificado pues, un exceso, puede ser mortal.

Inhalación: Transportar a la persona lesionada a un área bien ventilada. Si la respiración se ha detenido, proporcionar respiración artificial. Si la respiración es dificultosa, proporcionar oxígeno.

Mantener a la víctima sentada, abrigada y en reposo. Pueden presentarse convulsiones y pérdida de la consciencia.

Ojos: Lavarlos inmediatamente con agua corriente, por lo menos durante 15 minutos.

Asegurándose de abrir los párpados. No utilizar lentes de contacto al trabajar con este producto.

Piel: Lavar la zona afectada con agua y jabón. Eliminar la ropa contaminada, si es necesario. Otra opción es lavar con jabón ligeramente alcalino y una pasta de azufre y agua. Para asegurarse que no existen residuos del metal, puede utilizarse una disolución de sulfuro de sodio y rociarla sobre el área afectada, la aparición de una coloración café oscuro o rojizo es señal de presencia de mercurio. El mercurio residual, puede eliminarse con vinagre y después, lavar con agua oxigenada para eliminar el olor a sulfuro de hidrógeno.

Ingestión: Lavar la boca con agua. No provocar el vómito. Si la víctima está consciente dar a beber agua. Si se encuentra inconsciente, tratar como en intoxicación por inhalación.

En todos los casos de exposición, el paciente debe ser transportado al hospital tan pronto como sea posible.

Control de fuego:

Enfriar los contenedores afectados con grandes cantidades de agua. El agente extinguidor dependerá del tipo de material que se quema, ya que el mercurio no se quema o lo hace con dificultad. Usar agua para bajar el vapor, evitando que llegue a fuentes de agua y drenaje, pues los vapores de mercurio son muy tóxicos. Toda el agua contaminada debe almacenarse para su tratamiento posterior.

Las mismas acciones se llevan a cabo en el caso de que estén involucradas sales en estado sólido o como disoluciones de mercurio. En general, ni las disoluciones, ni los sólidos son inflamables o arden con dificultad, sin embargo pueden generarse vapores tóxicos al calentarse.

Fugas y derrames:

Debe utilizarse el equipo de seguridad adecuado como bata, guantes, lentes de seguridad y cubierta de zapatos. En caso de que la cantidad derramada sea grande, deberán usarse respirador y detectores de vapores de mercurio.

En el caso de derrames de mercurio metálico, lo importante es evitar que el mercurio derramado se evapore. Para ello existen dos formas de tratarlo: convertirlo en compuestos insolubles en agua y amalgamándolo.

En el primer caso, lo mas común es convertirlo a sulfuro de mercurio, espolvoreando azufre sobre el metal derramado. En el caso de la amalgamación, se mezcla con polvo de metales los cuales se mencionan mas adelante o bien, los productos comerciales disponibles para este efecto.

De manera general, debe mantenerse el material derramado, alejado de fuentes de agua y drenajes, para lo cual construir diques que lo contenga. Debe ventilarse el área y evacuarla.

En el caso de derrames pequeños existen diferentes métodos para recoger el material:

a) El metal se puede recoger al mezclarlo con cinc metálico en polvo o granulado, el cual se rocía con una disolución diluida de ácido sulfúrico formando una pasta. Esta pasta es especialmente útil para recuperar el

metal de fisuras o hendiduras. Una vez seca la pasta se barre y se coloca en bolsas especiales para su posterior tratamiento.

b) Cubriéndolo con una mezcla 50:50 de azufre e hidróxido de calcio en agua. Se deja por 12 horas, se recoge el sólido y se lava con agua la zona afectada. Puede usarse azufre solo.

c) Mediante succión con goteros y recogerlo en una bolsa de plástico. Desde luego esto solo se podrá hacer en caso de que el derrame sea solo de unas gotas como sucede cuando se rompen termómetros. En estos casos también debe descontaminarse el vidrio involucrado, por ejemplo con una disolución al 20% de sulfuro o tiosulfato de sodio.

d) Existen productos comerciales que contienen fierro entre otros materiales, que amalgama el mercurio derramado, de esta forma se recoge con un imán cubierto con una bolsa de plástico la cual sirve también, para almacenar el producto derramado.

También existen en el mercado lámparas especiales de halógeno para detectar pequeñas partículas del metal que no se detecten a simple vista. Para recoger derrames mayores, deben usarse limpiadores al vacío especiales y después lavar con disoluciones diluidas de sulfuro de calcio. También pueden usarse los productos comerciales mencionados arriba, aunque se recomienda contactar con personal especializado que oriente sobre la atención de la emergencia.

Existen varias opciones para adsorber los vapores de mercurio provenientes de reactores o tanques de almacenamiento:

a) Con carbón activado, el cual no es muy eficiente pero puede regenerarse

b) Mediante carbón activado que contiene azufre, sin embargo, este no puede regenerarse



c) Mediante el uso de dispositivos que contienen oro o plata, con los cuales el mercurio se amalgama fácilmente, una vez saturados, el mercurio se recupera fácilmente por calentamiento de estos dispositivos. También pueden utilizarse otros metales como cobre y cinc.

Un problema grave es la recuperación de mercurio de líquidos, una opción involucra el uso de carbón activado impregnado con plata. El líquido que contiene mercurio se pasa a través de una cama de este polvo, la cual se encuentra sobre soportes de níquel o polietileno. Otro método consiste en pasar la disolución por resinas de intercambio iónico del tipo de sales cuaternarias de amonio.

Por otro lado, en el caso de derrame en tierra, el mercurio derramado se queda en la superficie, pero se recomienda excavar más profundamente para asegurarse de recoger todo el material contaminado. El mercurio puede recuperarse, posteriormente por destilación o usando agentes amalgamadores a base de fierro. En este último caso la tierra se suspende en agua y se usa un magneto para agitarla, recuperándose el material derramado. También en este caso se puede usar el imán cubierto por una bolsa de plástico, como se mencionó arriba. Es necesario hacer pruebas a la tierra para asegurarse que se eliminó todo el mercurio derramado.

Para el caso de sales de mercurio:

Si el derrame es de compuestos de mercurio, cubrir con arena usando de 10 a 20 veces la cantidad.

En el caso de derivados orgánicos de mercurio, es mejor utilizar un sistema lavador de gases para recogerlos. Una opción eficiente y económica es utilizar disoluciones acuosas de hidróxido, hipoclorito o sulfuro de sodio, los cuales se recirculan a través del sistema lavador de gases hasta que la disolución se satura.

De manera general: no tocar, ni caminar sobre el material derramado y contener el derrame.

Si el derrame es de disoluciones, utilizar arena u otro absorbente no combustible y después de recoger el material, almacenarlo en un lugar

seguro. Si el derrame es grande, entonces deben de construirse diques para contenerlo e, igualmente, absorberlo.

Si el derrame es de sales en estado sólido: recoger el material derramado con palas y colocarlo en recipientes secos, evitando que se levante polvo.

En todos los casos, el material contaminado debe ser tratado adecuadamente, pues debe recordarse que tanto el metal como sus compuestos son altamente tóxicos.

Desechos:

Siempre debe utilizarse el equipo de protección adecuado como son: bata, lentes de seguridad, guantes de hule y, si la cantidad es grande, un respirador adecuado para vapores de mercurio.

El mercurio elemental puede ser recuperado y reusado.

Para el caso de sales solubles en agua: disolver el material en agua y acidular la disolución.

Precipitar el mercurio en forma de sulfuro y después neutralizar para asegurar la precipitación completa. El sólido se filtra, se trata y se manda a confinamiento. El filtrado debe tratarse con hipoclorito de sodio para eliminar el exceso de sulfuros y después desecharlo al drenaje.

Si las sales son insolubles, se procesan adecuadamente y se mandan a confinamiento.

## ANEXO 2.

**Tabla A.1.** Factores de Emisión de Mercurio.

| Productos  | Factor de Emisión Parcom Atmos (g/Mg) | Factor de emisión (Hg) (EPA)   |
|--|---------------------------------------|--|
| Plantas de sinterización                           | 0.02                                  |  |
| Producción de Coque                                |                                       | 6 X 10 <sup>-5</sup> lb/ton 2.724 X 10 <sup>-5</sup> Kg/ton              |
| Hornos de coque                                    | 0.03                                  | 6 X 10 <sup>-5</sup> lb/ton (2.724 X 10 <sup>-5</sup> Kg/ton)            |
| Producción primaria de Cobre                       | 0.1                                   | 0.1 g/Ton  |
| Producción primaria de Plomo                       | 3                                     | 3 g/Ton  |
| Producción primaria de Zinc                        | 20                                    | 20 g/Ton   |
| Producción secundaria de Zinc                      | 0.02                                  | 0.02   |
| Manufactura de Carbón Negro                        |                                       | 3 X 10 <sup>-4</sup> lb/ton 1.362 X 10 <sup>-4</sup> Kg/ton              |
| Carboeléctricas                                    | 0.25, 0.18                            | 0.15 g/Mg (3 X 10 <sup>-4</sup> lb/ton, 1.362 X 10 <sup>-4</sup> Kg/ton) |
| Combustión de carbón                               | 0.06                                  |  |
| Gas natural  | 5 µg/m <sup>3</sup>                   |  |
| Combustión de madera                               | 0-0.2                                 |  |
| Porcentaje en la incineración de residuos en polvo | 0.6                                   |  |
| Residuos Industriales Peligrosos                   | 3                                     |  |
| Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos          | 0.96                                  |  |
| Incineración de lodos activos                      | 1                                     |  |
| Industria de cloro-alkali                          | 3.1                                   | 41.2 g/ton (Méx) 4.071 g/ton (USA)                                       |
| Manufactura de Cemento Pórtland                    |                                       | 1.3 X 10 <sup>-4</sup> lb/ton 5.902 X 10 <sup>-5</sup> Kg/ton            |

|                       |  |   |
|-----------------------|--|---|
| Producción de Cemento | 0.275                                  | 0.087 g/ton (8.7 X 10 <sup>-5</sup> Kg/ton)<br>6.5 X 10 <sup>-5</sup> Kg/Mg (1.3 X 10 <sup>-4</sup><br>lb/ton, 5.902 X 10 <sup>-5</sup> Kg/ton) |
| Producción de vidrio  | 0.05                                   |   |
| Baterías              | -----                                  |   |
| Cremación             | 1.0Hg/body(Swit.)<br>0.6g/filling (UK) | 3.3 X 10 <sup>-3</sup> lb/cremación (1.5 X<br>10 <sup>-3</sup> Kg/cremación)  |
| Odontología           |  | 40 lb/ton 20 Kg/ton   |

**Fuente:** Emission Factors Manual Parcom-Atmos Emission factors for air pollutants. Netherlands, 1992. Locating and Estimating Air Emissions from Sources of Mercury and Mercury Compounds. EPA, 1997.

### ANEXO 3.

**Tabla 1.** Criterios de clasificación de grados de riesgo a la salud (modelo rectángulo).

| Clasificación | Descripción              |
|---------------|--------------------------|
| 4             | Severamente peligroso.   |
| 3             | Seriamente peligroso.    |
| 2             | Moderadamente peligroso. |
| 1             | Ligeramente peligroso.   |
| 0             | Mínimamente peligroso.   |

Fuente: NOM-018-STPS-2000.

**Tabla 2** Criterios de clasificación de grados de riesgo de inflamabilidad (modelos rectángulos y rombo).

| Clasificación | Descripción  |
|---------------|--|
| 4             | Sustancias que vaporizan rápida o completamente a presión atmosférica y a temperatura ambiente normal o que se dispersan con facilidad en el aire y que arden fácilmente   |
| 3             | Líquidos y sólidos que pueden arder bajo casi todas las condiciones de temperatura ambiente  |
| 2             | Sustancias que deben ser precalentadas moderadamente o expuestas a temperaturas ambientes relativamente altas, antes de que pueda ocurrir la ignición. Las sustancias en este grado de clasificación no forman atmósferas peligrosas con el aire bajo condiciones normales, pero bajo temperaturas ambiente elevadas o bajo calentamiento moderado, podrían liberar vapor en cantidades suficientes para producir atmósferas peligrosas con el aire. |
| 1             | Sustancias que deben ser precalentadas antes de que ocurra la ignición requieren un precalentamiento considerable bajo todas las condiciones de temperatura ambiente, antes de que ocurra la ignición y combustión.  |
| 0             | Sustancias que no se quemarán, éstas incluyen cualquier material   |

|  |   |
|--|---|
|  | que no se quemará en aire, cuando sea expuesto a una temperatura de 815.5°C (1,500°F), durante un periodo mayor de 5 minutos. |
|--|---|

Fuente: NOM-018-STPS-2000.

**Tabla 3.** Criterios de clasificación de grados de riesgo de reactividad (modelos rectángulos y rombo)

| Clasificación | Descripción   |
|---------------|---|
| 4             | Con facilidad son capaces de detonar o sufrir una detonación explosiva o reacción explosiva a temperaturas y presiones Normales.  |
| 3             | Sustancias que por sí mismas son capaces de detonación o descomposición o reacción explosiva, pero que requieren una fuente de iniciación o que deben ser calentadas bajo confinamiento antes de su iniciación. |
| 2             | Sustancias que sufren con facilidad un cambio químico violento a temperaturas y presiones elevadas.   |
| 1             | Sustancias que por sí mismas son estables normalmente, pero que pueden convertirse en inestables a ciertas temperaturas y presiones.  |
| 0             | Sustancias que por sí mismas son estables normalmente, aun bajo condiciones de fuego.   |

Fuente: NOM-018-STPS-2000.

**Tabla 4.** Criterios de clasificación de grados de riesgo a la salud (modelo rombo).

| Clasificación | Descripción   |
|---------------|---|
| 4             | Sustancias que bajo condiciones de emergencia, pueden ser letales.  |
| 3             | Sustancias que bajo condiciones de emergencia, pueden causar daños serios o permanentes.                                  |
| 2             | Sustancias que bajo condiciones de emergencia, pueden causar incapacidad temporal o daño residual.                        |
| 1             | Sustancias que bajo condiciones de emergencia pueden causar irritación significativa.                                     |
| 0             | Sustancias que bajo condiciones de emergencia, no ofrecen mayor peligro que el de los materiales combustibles ordinarios. |

Fuente: NOM-018-STPS-2000.

Guía de referencia clasificación de tipo y grado de riesgo de algunas sustancias químicas.

La guía presenta en orden alfabético las sustancias químicas, seguidas por el número CAS, los valores del sistema NFPA equivalente al modelo rombo en salud (S), inflamabilidad (I), reactividad (R) y riesgos especiales (RE); y por último los valores del sistema HMIS equivalente al modelo rectángulo; en salud (S), inflamabilidad (I), reactividad (R) y letra del equipo de protección personal (EPP) necesario.

## REFERENCIAS.

1. Acosta R. (2002) "Inventario de sitios en México con niveles altos de Hg". Acosta y Asociados. Presentado para el: "Taller sobre la situación del Mercurio en la región "La Zacatecana", INE/SEMARNAT-ZACATECAS/CCA.
2. Ben-Bassat D. y Mayer A. (1978) "Lightinduced Hg volatilization and O<sub>2</sub> evolution in Chlorella and the effect of DCMU and methylamine". *Physiol. Plant* 42:33-38.
3. Burton J. y Leatherland T. (1971) "Mercury in a Coastal Marine" *Environment Nature* 231, 440 - 442.
4. Cabañero O. (2005) "Acumulación-interacción de especies de mercurio y selenio en tejidos animales: desarrollo de nuevas metodologías de análisis". Madrid, Universidad Complutense De Madrid Facultad De Ciencias Químicas Departamento De Química Analítica. Madrid, pp 31-39.
5. Compeau G. y Bartha R. (1985) "Sulfate-reducing bacteria: principal methylators of mercury in anoxic estuarine sediment". *Appl. Environ Microbiol.* 50: 498-502.
6. COREMI. (2000) "Anuario Estadístico de la minería Mexicana", México.
7. Cho S., Chase T. y Bartha R. (1994) Enzymatic catalysis of mercury methylation by *Desulfovibrio desulfuricans* LS. *Appl Environ Microbiol.* April; 60(4): 1342-1346.
8. D'Itri F. y D'Itri M. (1977) "Mercury Contamination: A Human Tragedy", New York: John Wiley & Sons, 29-34.
9. Doadrio V. (2011) Ecotoxicología y acción toxicológica de mercurio. . Académico de Número de la Real Academia Nacional de Farmacia.



10. EPA. (1997) "Mercury Study Report to Congress, Volume II: An Inventory of Anthropogenic Mercury Emissions in the United States". USA.
11. EPA. (1997) "Mercury Study Report to Congress, Volume III, Fate and Transport of Mercury in the Environment", USA, 1997.
12. Fitzgerald W., Engstrom D., Mason R. y Nater E. (1998) "The case for atmospheric mercury contamination in remote areas". Environ. Sci. Technol. 32:1-12,
13. Gaona M. (2004) "El mercurio como contaminante global". Barcelona, España, Universidad Autónoma de Barcelona.
14. Gilmour C., Henry E. y Mitchell R. (1992) "Sulfate stimulation of mercury methylation in freshwater sediments", Environ Sci technol;26:2281-2287.
15. Gustin M., Taylor G., Leonard T. y Keislar R. (1996) "Atmospheric mercury concentrations associated with both natural and anthropogenic enriched sites, central western Nevada." Environ. Sci. Technol. 30:2572-79.
16. Gustin M., Taylor G. y Maxey R. (1997) "Effect of temperature and air movement on the flux of elemental mercury from substrate to the atmosphere". Geophys. Res. 102(D3):3891-98,.
17. Gutiérrez S. (2011) "Implicaciones de la intoxicación por mercurio".
18. Herrero C. (2007) "Estudio sobre la capacidad de resuspensión de las corrientes de densidad. Aplicación al caso del embalse de Flix". Cataluña, España, Universidad Politécnica de Cataluña.
19. Higuera P. y Oyarzun R. (2011) Mineralogía y geoquímica ambiental: Introducción al curso.
20. INE. (2000) "Diagnóstico del Mercurio en México", México.

21. INE. (2001) Inventario preliminar de emisiones de mercurio en México. México.
22. INEGI. (2010) Comunicado núm. 008/10 13 de enero de 2010 aguascalientes, ags. pp. 11-12.
23. IPCS. (1991) "Inorganic mercury". Geneva, World Health Organization, International Programme on Chemical Safety (Environmental Health Criteria 118).
24. Jensen S. (1969) "Biological Methylation of Mercury in Aquatic Organisms", *Nature*, 223, 753.
25. Kirk O. "Encyclopedia of Chemical Technology". John Wiley. Vol. 13. Second Edition. 1967.
26. Krishnan S., Gullett B. K. y Jozewicz, W, (1994) "Sorption of elemental mercury by activated carbons." *Environ. Sci. Technol.*, 28-81, 1506-1512.
27. Lindberg S., Kim K. y Munthe J. (1995) "The precise measurement of concentration gradients of mercury in air over soils: a review of past and recent measurements". *Water Air Soil Pollut.* 80:383-92.
28. Lindqvist O. (1991) "Mercury in the Swedish environment", *Water Air Soil Pollut*, 55:23-30, 278-294.
29. Lodenius M. y Autio S. (1989) "Effects of Acidification on the Mobilization of Cadmium and Mercury from Soils", *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, vol 18, no. 1-2, pp. 261-267.
30. Marvin D. y Oremland R. (1998) Bacterial methylmercury degradation in Florida Everglades peat sediment: *Environmental Science and Technology*, v. 32, p. 2556-2563.

31. Mason R. Fitzgerald W. y Morel F. (1994) "The biogeochemical cycling of elemental mercury: Anthropogenic influences" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 58, Issue 15, August 1994. Pp 3191-3198.
32. Mason R., Morel F. y Hemond H. (1993) "The role of microorganisms in elemental mercury formation in natural waters. In: Heavy Metals in the Environment" (J.O. Nriagu and R.P. Allan, eds.) Vol. 2 pp. 293-296.
33. Mendioroz. S. (2011) "Mercurio". Instituto de catálisis y petroquímica del CSIC. Canto Blanco. Madrid.
34. Merck & Co., Inc. The Merck Index, An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals, Décimo Tercera Edición, 2001.
35. Misra T. (1992) "Bacterial resistances to inorganic mercury salts and organomercurials". *Plasmid* 27:4-16.
36. Morel F., Kraepie I. y Amyot A. (1998) "The chemical cycle and bioaccumulation of mercury" *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29:543-66.
37. Mugica V. (2003) "Mercurio y metales tóxicos en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración", *Rev. Int. Contaminación del Ambiente*.
38. Muñoz J. (1986) "La minería en México. Bosquejo histórico". Quinto centenario, América: economías, sociedades, mentalidades, Madrid, pp 145-156.
39. Muro E. (2010) "La minería mexicana, su evolución, retos y perspectivas", Instituto de investigaciones Jurídicas, UNAM.
40. Organización Panamericana de la Salud. (2010) *Criterios de Salud Ambiental I, Mercurio*. Washington, D.C.
41. Pedrero R. (2011) "Mercurio".

42. PNUMA. (2010) "Estudio sobre los posibles efectos en la salud humana y el medio ambiente en América Latina y el Caribe del comercio de productos que contienen cadmio, plomo y mercurio".
43. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2008) "Modulo 2. Mercurio y la industria".
44. Ramírez A. (2006) "Situación de la minería mexicana a principios del siglo XX". Investigations Zentrum für Industrielle Anthropologie Austria- México.
45. Rasmussen P. (1994) "Current methods of estimating atmospheric mercury fluxes in remote areas". Environ. Sci. Technol. 28:2233-41.
46. SE. "Anuario estadístico de la minería mexicana". México, 2000.
47. SE. "Anuario estadístico de la minería mexicana". México, 2006.
48. SE. "Anuario estadístico de la minería mexicana". México, 2011.
49. Seigneur C., Wrobel J. y Constantinou E. (1994) "A chemical kinetic mechanism for atmospheric inorganic mercury". Environ. Sci. Technol. 28:1589-97.
50. SEMARNART. Inventario Preliminar de Emisiones Atmosféricas de Mercurio en México. 2011.
51. Sellers P., Kelly C., Rudd J. y Mac-Hutchon A. (1996) "Photodegradation of methylmercury in lakes". Nature 380:694- 97.
52. Smith T., Pitts K., McGarvey J. y Summers A. (1998) "Bacterial oxidation of mercury metal vapor, Hg(0)". Appl. Environ. Microbiol. 64, 1328-1332.

53. Schuster E. (1991) "The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption processes" – a review of the literature, *Water, Air and Soil Pollution*, 56, 667-680.
54. Soria P. (1999) "Cuaderno de Investigación No. 47: Metodología para la prevención de accidentes y daños a la salud y al ambiente ocasionados por mercurio o sus compuestos". CENAPRED.
55. Stumm W. y Morgan J. (1996) "Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters". New York: Wiley-Interscience.
56. Suda I., Suda M. y Hirayama K. (1993) "Degradation of methyl and ethylmercury by singlet oxygen generated from sea water exposed to sunlight or ultraviolet light". *Arch. Toxicol.* 67:365–68.
57. Sunderman F. (1998) "Perils of mercury". *Ann Clin Lab Sci*, 18:89–101
58. Takeuchi F., Negishi A., Maeda T y Kamimura K., (1999) "Insolation and some properties of thiobacillus ferrooxidans, strains with differing levels of mercury resistance from natura environments". *J. Biosci, Bioeng.* 88: 387-392.
59. USEPA. (1990) "Ambient Water Quality Criteria for Mercury". EPA 440/5-80-058. Washington, DC.:Office of Water Regulations and Standars.
60. Whalin L., Kim E. y Mason R. (2007) Factors "influencing the oxidation, reduction, methylation and demethylation of mercury species in coastal waters. *Marine Chemistry*". Volume 107, Issue 3, Pages World Health Organization. *Environmental Health Criteria 86, Mercury – Environmental Aspects*. Ginebra, 1989.
61. Xiao Z., Munthe J., Stromberg D. y Lindqvist O. (1994) "Photochemical behavior of inorganic mercury compounds in aqueous solution. In *Mercury Pollution—Integration and Synthesis*", ed. CJ Watras, JW Huckabee, pp. 581–592. Boca Raton, FL: CRC.

62. Yamamoto M. (1996) "Stimulation of elemental mercury oxidation in the presence of chloride ion in aquatic environments". *Chemosphere* 32:1217-24.
63. Yarto. R., Gavilán G. y Castro D. (2004) "La contaminación por mercurio en México". Instituto Nacional de Ecología. *Gaceta Ecológica*, julio-septiembre. No. 72. México. Pp. 22-34, 2004.

### **Hojas de seguridad.**

1. HOJA DE SEGURIDAD XXI MERCURIO Y SALES DE MERCURIO. Consultado en la página de facultad de química. [www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/21HG.pdf](http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/21HG.pdf). Consultado 23-marzo-2011.
2. Material safety data sheet mercury (ii) chloride. <http://avogadro.chem.iastate.edu/MSDS/HgCl2.htm>. Consultado 23-marzo-2011.
3. MSDS Number: M1521 MERCURIC OXIDE. <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/m1521.htm>. Consultado el 29-marzo-2011
4. Hoja de seguridad sulfuro de mercurio. [http://www.analytyka.com.mx/tabla%20periodica/MSDS/Hg/mercury\\_sulfide\\_red.htm](http://www.analytyka.com.mx/tabla%20periodica/MSDS/Hg/mercury_sulfide_red.htm) revisado el 27-marzo-2011.
5. Material Safety Data Sheet HgS Mercury(II) sulfide. <https://fscimage.fishersci.com/msds/94301.htm>. Consultada 29-marzo-2011
6. Hoja de seguridad del cloruro de mercurio. <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/m1573.htm> Consultado el 29-marzo-2011

### **Páginas WEB.**

1. "Aleaciones ferrosas y no ferrosas, materiales semiconductores y compuestos" <http://www.slideshare.net/miriamgil/aleaciones-ferrosas-y-no>

ferrosas-materiales-semiconductores-y-compuestos-presentation

Consultado el 17-Abril-2011.

2. Department of environmental conservation.  
[www.newmoa.org/prevention/topichub/22/mercury\\_cycle.pdf](http://www.newmoa.org/prevention/topichub/22/mercury_cycle.pdf). Consultado el 23 marzo de 2011.
3. EPA, Laws and Executive Orders.  
<http://www.epa.gov/lawsregs/laws/index.html> Revisión el 12-mayo-2011.
4. International Programme on Chemical Safety. 1991. Environmental Health criteria for Mercury Ginebra.  
<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc118.htm>. Consultado 3-abril-2011.
5. ONU, 2011Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo  
[www.cinu.org.mx/eventos/.../Declaración%20de%20Rio.doc](http://www.cinu.org.mx/eventos/.../Declaración%20de%20Rio.doc) Consultado el 14-mayo-2011.
6. Palacio de minería, Antecedentes de la minería, UNAM  
[http://www.palaciomineria.unam.mx/historia/epo\\_prehispanica.php](http://www.palaciomineria.unam.mx/historia/epo_prehispanica.php)  
Consultado el 10-febrero-2011.
7. Plantas químicas. <http://www.plantasquimicas.com/Inorganicos/pi46.htm>  
Consultado el 15- abril-2011.
8. Reglamento de la Ley Federal de Sanidad Animal.  
[www.senasica.gob.mx/?doc=3903](http://www.senasica.gob.mx/?doc=3903). Consultado el 18-mayo-2011.
9. SEMARNAT "Impacto ambiental"  
<http://www.semarnat.gob.mx/transparencia/transparenciafocalizada/impactoambiental/Paginas/impactoambiental.aspx> Consultado el 5-abril-2011
10. SEMARNAT. Normas Oficiales Mexicanas Vigentes ordenadas por materia.  
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes.aspx>. Consultado el 14-mayo-2011.
11. "Sistemas en la Función Productiva de las Organizaciones",  
<http://sifunpro.tripod.com/metal.htm>. Consultado 17- Abril-2011.

12. STPS. Marco jurídico.  
<http://www.stps.gob.mx/marcojuridico/noms.htm> Consultado 14-mayo-2011.
13. UAM, Metalurgia,  
<http://www.uam.mx/difusion/otras/metalurgia/metalurgia.html> Consultado el 4-febrero-2011.
14. Union Europea. Protección ambiental.  
[http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/index\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/index_es.htm).  
Consultado el 5-mayo-2011.
15. "Unión Europea"  
[http://ec.europa.eu/eu\\_law/directives/directives\\_es.htm](http://ec.europa.eu/eu_law/directives/directives_es.htm). Consultado el 3-abril-2011.