

01177

3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

A la Dirección General de Bibliotecas,  
entregada en formato electrónico e impreso a:  
J. de mi trabajo recepcional

PRE: Adriana Barcenasis

Salgado

19/06/03

METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DE EMISIONES Y  
TRANSFERENCIA DE MERCURIO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA (AMBIENTAL)

P R E S E N T A :

I.Q. ADRIANA BARCENAS SALGADO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. RINA AGUIRRE SALDIVAR



CIUDAD UNIVERSITARIA,

JUNIO 2003

A

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## **Agradecimientos**

A la Dra. Rina Aguirre Saldivar por permitirme formar parte de su grupo de trabajo y por el asesoramiento de esta tesis.

A la M.I. Ann Wellens Purnal por apoyarme en mis estudios de maestría, por su buena disposición en todo momento para concretar este trabajo y sobre todo por su amistad.

A los M.I. Vicente Fuentes Gea, M.I. José Luis Martínez Palacios y al Dr. Thangarasu Pandiyan, por su comentarios que enriquecieron este trabajo.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado durante la realización de mi maestría, lo cual me dio la oportunidad para dedicarme de tiempo completo a mis estudios y a la realización de esta tesis.

Al Programa de maestría y doctorado en Ingeniería por admitirme en este posgrado, y especialmente a la Facultad de Ingeniería por ofrecernos instalaciones adecuadas, de las cuales conservaré un grato recuerdo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# INDICE

	pág
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivo	4
1.3 Alcances y limitaciones	4
<b>Capítulo 2. Generalidades</b>	
2.1 Sistemas de administración ambiental	6
2.2 Registros de emisiones	8
2.2.1 Emisiones de fuentes puntuales y no puntuales	10
2.3 Métodos indirectos para la estimación de emisiones	11
2.3.1 Factores de emisión	11
2.3.2 Extrapolación	13
2.3.3 Balance de materiales	14
2.3.4 Cálculos de ingeniería	14
2.3.5 Modelos matemáticos	15
2.4 Evaluación de incertidumbre en la estimación de emisiones	16
<b>Capítulo 3. Contaminación por mercurio</b>	
3.1 Características generales	18
3.2 Ciclo del mercurio en la naturaleza	19
3.3 Extracción y aprovechamiento	22
3.3.1 Situación a nivel internacional	22
3.3.2 Extracción en México	24
3.3.3 Aprovechamiento en México	25
3.3.4 Importaciones y exportaciones	25
3.4 Legislación	26
3.4.1 Acuerdos internacionales	27
3.4.2 Legislación nacional	28
3.5 Áreas de oportunidad	29
3.5.1 Cambio de materia prima	30
3.5.2 Control de emisiones	31
3.5.3 Recuperación	32
<b>Capítulo 4. Fuentes de emisión</b>	
4.1 Identificación de fuentes de emisión de mercurio	33
4.2 Características de las fuentes de emisión en México	35
4.2.1 Producción de cloro y sosa cáustica	35
4.2.2 Producción de coque	37
4.2.3 Combustión de carbón	37
4.2.4 Quema de combustóleo, diesel y gas natural	38
4.2.5 Fundición primaria de plomo	40
4.2.6 Fundición primaria de cobre	41

4.2.7 Fundición primaria de zinc	42
4.2.8 Usos artesanales y culturales	42
4.2.9 Disposición de lámparas fluorescentes	42
4.2.10 Disposición de instrumentos de medición	43
4.2.11 Incineración de desechos médicos	45
4.2.12 Crematorios	45
<b>Capítulo 5. Metodología</b>	
5.1 Metodología de estimación	46
5.2 Resumen de metodología propuesta	53
<b>Capítulo 6. Estimación de emisiones de mercurio</b>	
6.1 Estimación de emisiones	54
6.1.1 Hoja de cálculo	54
6.1.2 Cálculos de emisiones para 1999 y 2002	55
6.2 Resultados	59
6.2.1 Análisis de resultados	60
6.2.2 Emisiones de mercurio en la República Mexicana	62
<b>Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones</b>	
7.1 Conclusiones	65
7.2 Recomendaciones	65
<b>Bibliografía</b>	67
<b>Anexo</b>	

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

Las nuevas políticas de desarrollo en el mundo promueven que los aspectos ambientales se traten en un contexto global, a través de convenios internacionales y regionales que fortalezcan políticas y sistemas de planificación ambiental.

Debido al proceso de apertura de los mercados de bienes y servicios, el tema ambiental está siendo incorporado como una variable fundamental de negociación económica internacional. Por esta razón, México ha adquirido compromisos internacionales que requieren de la formulación de políticas basadas en el entendimiento de la problemática ambiental, de manera más detallada y precisa.

La información ambiental es fundamental para el desarrollo de políticas y el establecimiento de objetivos y prioridades ambientales, así como para evaluar el desempeño de las políticas aplicadas. En este contexto, las autoridades ambientales mexicanas han implementado una serie de programas gubernamentales que tienen como objetivo la cuantificación de las emisiones contaminantes en el país, recabando la información por medio de formatos preestablecidos y la aplicación de metodologías de estimación indirecta.

Uno de los instrumentos es el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de México (RETC), el cual constituye un mecanismo de integración, análisis y manejo de información acerca de sustancias contaminantes y de sus fuentes de emisión.

Hasta el momento se han publicado dos informes de este registro (1997-1998 y 1998-1999) que integran la información correspondiente a los reportes de los sectores industriales de competencia federal en materia de emisiones a la atmósfera. Sin embargo, aún no se ha logrado integrar satisfactoriamente este registro debido a que los reportes se presentan de manera incompleta o con información errónea.

El RETC requiere información sobre sustancias consideradas de prioridad ambiental, de acuerdo con los criterios de toxicidad señalados en la NMX-AA-118-SCFI-2001, emitidas por fuentes puntuales y no puntuales.

El mercurio y sus compuestos se encuentran entre las sustancias consideradas dentro del RETC, ya que el análisis de su emisión por parte de la industria (reporte directo) y la evaluación indirecta de otras fuentes es de prioridad nacional.

Además de ser una sustancia considerada en el *RETC*, en la resolución 95/5 de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte que suscribieron Canadá, Estados Unidos y México, se consideró al mercurio como una sustancia de

atención prioritaria para Norteamérica debido a sus características tóxicas, persistentes y bioacumulables.

En México existen diferentes fuentes antropogénicas que emiten mercurio al ambiente. Entre las principales se encuentran la minería y fundición de metales, las plantas que producen gas cloro y sosa cáustica, la industria del cemento, los procesos de combustión en termoeléctricas y carboeléctricas, y la volatilización del mismo en los tiraderos de basura en los que se han desechado productos o equipo que lo contienen, entre otros.

El Instituto Nacional de Ecología (INE) de la SEMARNat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), elaboró un documento titulado, Diagnóstico del Mercurio en México (DMM), en el cual se estiman ocho fuentes de emisión de entre quince identificadas en ese mismo trabajo, por lo que es necesario complementar dicho trabajo, revisando las estimaciones realizadas y calculando algunas otras que se consideren de relevancia en México (INE, 2000c).

Dado lo anterior, en esta tesis se atiende la necesidad de establecer una metodología para estimar la emisión y transferencia de mercurio a nivel nacional, y elaborar una hoja de cálculo que permita integrar fácilmente estas estimaciones al RETC

## **1.2 Objetivo**

Establecer una metodología para la estimación de emisiones y transferencia de mercurio en México, mediante métodos de estimación indirectos.

Para cumplir con el objetivo de este trabajo se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Analizar el ciclo de vida del mercurio para determinar los tipos y fuentes de emisión
- Determinar las principales fuentes de emisión en México y su importancia para la elaboración del RETC
- Establecer una metodología para la evaluación de emisiones de mercurio en las fuentes de emisión seleccionadas
- Estimar emisiones a nivel nacional, para cada tipo de fuente por medio de la metodología propuesta, utilizando una hoja de cálculo en excel.

## **1.3 Alcances y limitaciones**

Los alcances de este trabajo son:

- Generar información preeliminar sobre las emisiones de mercurio en México y catalogar la contribución de las diferentes fuentes

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- Revisar los procesos productivos empleados en las fuentes seleccionadas y la normatividad ambiental nacional e internacional relacionada
- Establecer los métodos de estimación indirecta más adecuados para la estimación de emisiones de mercurio de las fuentes consideradas
- Análisis de los resultados para determinar la importancia de cada fuente
- Elaborar una hoja de cálculo para aplicar fácilmente la metodología propuesta, y estimar las emisiones de mercurio por actividad a nivel estatal o nacional.

Del mismo modo, las limitaciones de este trabajo son:

- Los resultados obtenidos serán una aproximación preliminar para el inventario de emisiones, ya que en México se carece de información detallada sobre los productos y actividades que incluyen mercurio o sus compuestos
- Este trabajo solo podrá considerarse completo cuando la metodología se aplique durante varios años consecutivos, actualizando los datos de entrada del método, y se corroboren en campo algunas de las estimaciones realizadas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## Capítulo 2 Generalidades

La producción industrial ha crecido de forma acelerada, principalmente a partir de la segunda mitad del siglo XX. Esto ha provocado el empleo de más recursos naturales para la producción de bienes de consumo que en toda la historia de la humanidad, ocasionando un incremento en el deterioro del ambiente, cuyas implicaciones se han extendido de locales a regionales o globales.

En este periodo, caracterizado por rápidos cambios en la población y globalización de la economía, se han presentado notables desequilibrios entre el crecimiento urbano y la capacidad de sustento del ambiente.

Es así como, durante la última década del siglo pasado, se ha suscitado un conjunto de presiones nacionales e internacionales para combatir la degradación ambiental. Ello ha dado como resultado que los asuntos ambientales se traten cada vez más en un contexto general y como parte de las políticas de desarrollo (PNUMA, 1999).

### 2.1 Sistemas de administración ambiental

Actualmente, la política y gestión ambiental en el ámbito internacional están basadas en dos acuerdos principales: la Primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente, realizada en 1972 en Estocolmo, la cual marca el inicio de una creciente sucesión de convenciones multilaterales en este campo; y la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992, en la que se reafirma la declaración de Estocolmo.

La declaración de Río está constituida por 27 principios y tiene como tema central el desarrollo sustentable. Los principios relevantes en materia ambiental son el tres y el diez. El principio tres establece que: "el derecho al desarrollo debe ejercerse en forma tal que responda equitativamente a las necesidades de desarrollo y ambientales de las generaciones presentes y futuras". El principio diez señala que: "el mejor modo de tratar las cuestiones ambientales es con la participación de todos los ciudadanos, en el nivel que corresponda. En el plano nacional, toda persona deberá tener acceso adecuado a la información sobre el medio ambiente de que dispongan las autoridades públicas, incluida la información sobre los materiales y las actividades que encierran peligro en sus comunidades, así como la oportunidad de participar en los procesos de adopción de decisiones..."

La **Agenda 21** es el documento más importante surgido de la conferencia de Río de Janeiro, abarca 40 diferentes sectores y temas que incluyen las medidas, planes, programas, estándares y el uso de instrumentos legales y económicos para la planificación y gestión ambiental. Esta agenda constituye uno de los

instrumentos más significativo en el campo ambiental, y actualmente se considera la guía de la gestión ambiental en todo el mundo (PNUMA, 1992).

Por ser México uno de los 178 países firmantes de la Agenda 21, se inicia en 1995 la etapa de gestión ambiental en este país, incorporándose por primera vez el concepto de desarrollo sustentable en la planificación nacional.

El Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000 fue uno de los planes adoptados para alcanzar este crecimiento, actualmente el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006 establece las estrategias para contener el deterioro del medio y reducir el uso irracional de los recursos naturales.

Hasta 1982, la política ambiental en México estaba orientada a la expedición de normas técnicas para controlar los problemas de salud derivados de la contaminación ambiental, siendo la Secretaría de Salubridad y Asistencia la entidad encargada de su expedición.

En 1988, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), define como asunto de alcance general en la nación la expedición de Normas Técnicas Ecológicas (NTE), definiéndolas como instrumentos de la política ecológica nacional. A partir de ese año, la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE, se dio a la tarea de elaborar dichas Normas, cuyo enfoque estaba dirigido hacia el *control al final de tubo*, tomando como base la mejor tecnología de control disponible y en consecuencia la elaboración de normatividad específica para el uso de dicha tecnología en los procesos productivos.

Posteriormente, en 1994, se crea la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), la cual incorpora el concepto de *desarrollo sustentable* tanto en la política ambiental como en el marco legal.

La agudización de algunos problemas de contaminación y la proliferación de esquemas de autorregulación ambiental a nivel internacional, proporcionaron un nuevo impulso a la normalización, vinculándola con otros instrumentos de regulación directa e instrumentos económicos, y promoviendo la divulgación de la información ambiental y la participación social.

En 1997 el INE (Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAP) comenzó a instrumentar el Sistema Integrado de Regulación y Gestión Ambiental de la Industria (SIRG), con elementos de coordinación e integración de criterios multimedios y un componente de simplificación administrativa (INE, 2000a).

Por otro lado, el principio diez de la Agenda 21, que establece el derecho a la información, se ha reflejado en acciones de instituciones internacionales como la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE), y la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA); las cuales, además del Convenio de Cartagena y el programa Frontera XXI, han promovido la creación del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes en México, para proporcionar al

sector privado, además de información ambiental, una herramienta para el desarrollo de esquemas voluntarios que procuren el mejoramiento ambiental a través de la minimización de residuos y el cambio hacia tecnologías más limpias (INE,1997).

## **2.2 Registros de emisiones**

Los registros de emisiones nacionales PRTR (por sus siglas en inglés Pollutant Release and Transfer Register), son inventarios que presentan en forma de base de datos información acerca de sustancias contaminantes de interés, que se emiten al ambiente (aire, agua o suelo) o se transfieren a otros sitios para su tratamiento o disposición final.

Los PRTR son instrumentos que se pueden emplear con diferentes propósitos: incrementar la conciencia del público y la industria sobre la clase y la cantidad de sustancias liberadas al ambiente o transportadas como residuos fuera de las instalaciones; alentar a la industria para que se evite la contaminación, disminuya la generación de emisiones y transferencias, y asuma su responsabilidad por el uso de productos químicos; mejorar la calidad del ambiente; vigilar la evolución de políticas implementadas; y auxiliar a los gobiernos en la identificación de prioridades ambientales.

Los PRTR en América del Norte son: el TRI (Toxic Release Inventory), para Estados Unidos de Norteamérica; el NPRI (National Pollutant Release Inventory), para Canadá; y el RETC para México. Las principales características de estos PRTR son:

- Su meta principal es atender el derecho público a la información
- Proporcionan un panorama de las emisiones y transferencia de contaminantes
- Elaboran inventarios a nivel de sustancias
- Informan por instalación (fuente de emisión)
- Consideran todos los medios ambientales (agua, aire y suelo)
- Su publicación es periódica
- Manejan una base de datos bien definida y estructurada a través de programas de cómputo.

Aunque los PRTR existentes presentan características comunes, la estructura de cada sistema refleja su origen y su historia, tendiendo a evolucionar para atender mejor los propósitos de cada país.

También se han establecido PRTR en otros países. El registro de contaminantes de Inglaterra y Gales (CRI, del inglés Chemical Release Inventory), integra los datos de residuos que se emiten al aire y agua a nivel de planta industrial. Se ha utilizado principalmente como un instrumento para la verificación del cumplimiento de autorizaciones.

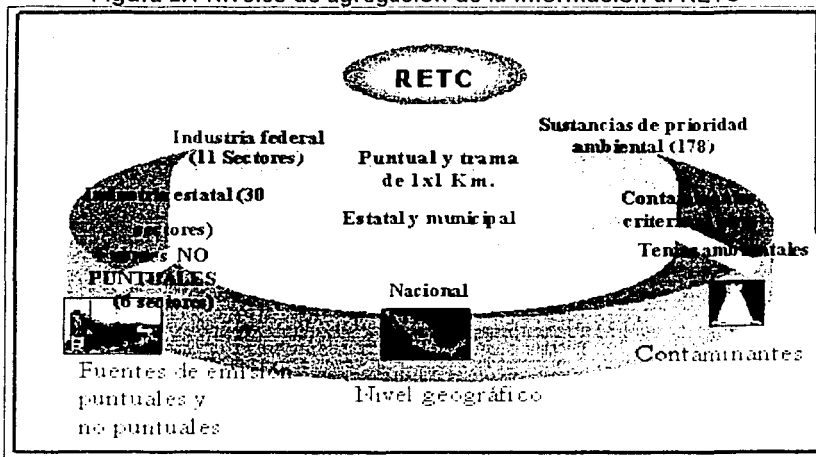
El PRTR de los Países Bajos inició con el propósito de compilar un panorama completo de las fuentes contaminantes al aire y actualmente se ha ampliado para incluir emisiones al agua. Este inventario no considera todavía la contaminación del suelo, ni las transferencias (CCA, 1998).

El RETC mexicano forma parte de un proyecto piloto apoyado por el Instituto de las Naciones Unidas para la Formación Profesional y la Investigación UNITAR (del inglés: United Nations Institute for Training and Research). La elaboración de la Propuesta Ejecutiva Nacional formulada por el Grupo Nacional Coordinador del RETC fue publicada por el INE en 1997.

La información básica del RETC es la siguiente:

- Datos anuales de emisiones al aire, agua, suelos y transferencias de contaminantes detallados por especie química particular y por tipo de establecimiento, sector económico y región geográfica (ver figura 2.1)
- Ubicación geográfica, datos generales, características operativas y de prevención y control de la contaminación de las fuentes de emisión; y datos de fuentes de área o no puntuales (como operaciones agrícolas, transporte, minería y servicios)

Figura 2.1 Niveles de agregación de la información al RETC



Fuente: INE, 2000(b)

El RETC se apoya principalmente en dos herramientas de regulación ambiental establecidas para la industria en México: la Licencia Ambiental Unica (LAU) y la Cédula de Operación Anual (COA). La LAU concentra en un sólo trámite todos los permisos y licencias relacionados con el aprovechamiento de agua y descargas de aguas residuales, emisiones a la atmósfera, generación de residuos peligrosos y estudios de impacto y riesgo ambiental para industrias nuevas. La COA es un

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

instrumento de reporte anual para industrias en operación, mediante el cual se actualiza la información de emisiones contaminantes, y al igual que la LAU tiene un enfoque multimedia.

Para elaborar la lista de sustancias que son reportadas al RETC, se consideraron los listados de los PRTR de Norteamérica (TRI y NPRI), el inventario de Suecia (Swedish Sustent Project) y la lista propuesta por la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico (Hazardous Air Pollutants Inventory, OCDE), las sustancias incorporadas fueron seleccionadas tomando en cuenta criterios de toxicidad, persistencia y bioacumulación previamente establecidos. A la lista resultante se añadieron las sustancias señaladas en las Normas Oficiales Mexicanas y las que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (INE,1997). La lista final fue publicada en la NMX-AA-118-SCFI en abril del 2001.

La SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), a través de la Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes, es responsable de integrar la base de datos del RETC, incluyendo el almacenamiento y manejo de los datos que suministran las fuentes fijas de jurisdicción federal y las emisiones generadas por fuentes no puntuales, que se determinan mediante métodos indirectos de estimación (INE, 2000b).

### **2.2.1 Emisiones de fuentes puntuales y no puntuales**

En la integración del RETC se consideran todos los tipos de fuentes de emisión de contaminantes, clasificándolas en fuentes puntuales y fuentes no puntuales o de área.

En las fuentes puntuales se incluyen la industria de jurisdicción federal o estatal en materia de contaminación atmosférica, mientras que entre las fuentes no puntuales se incluyen actividades agrícolas y ganaderas, transporte, pequeña y mediana industria y establecimientos comerciales, minería y actividades extractivas, fuentes naturales, y servicios.

De acuerdo con la LGEEPA (artículos, 4º,5º,7º y 9º), son fuentes fijas de jurisdicción federal en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera los siguientes sectores industriales: petróleo y petroquímica, química, pinturas y tintas, metalúrgica, automotriz, celulosa y papel, cemento y cal, asbesto, vidrio, generación de energía eléctrica y tratamiento de residuos peligrosos.

Las emisiones provenientes de fuentes puntuales se reportan a nivel de cada establecimiento, a través de la Cédula de Operación Anual (COA), este reporte lo entregan las empresas a la SEMARNAT en el primer cuatrimestre de cada año y la información proporcionada es integrada directamente al RETC.

Las emisiones de fuentes no puntuales se incluyen también en el RETC, pero en ese caso no existe obligación de reporte directo como en el caso de la industria, por lo que son estimadas por la autoridad ambiental mediante métodos indirectos(INE, 1999).

### 2.3 Métodos indirectos para la estimación de emisiones

Los métodos indirectos de estimación se pueden emplear en el reporte de la COA, para los contaminantes cuya medición directa no es obligatoria, así como para el cálculo de las emisiones de fuentes no puntuales.

Los métodos para la estimación indirecta de emisiones son: factores de emisión, extrapolación, balance de materiales, cálculos de ingeniería y modelos matemáticos. El empleo de estos métodos es libre, aunque por sus características técnicas se recomienda seleccionarlos en el siguiente orden (INE, 1997):

Orden	Método
1	Medición directa o monitoreo
2	Factores de emisión
3	Extrapolación
4	Balance de materia
5	Cálculos de ingeniería
6	Modelos matemáticos

La medición directa siempre se considerará como el mejor método de estimación, sin embargo para las fuentes no puntuales en la mayoría de los casos es impráctica por razones económicas (número de fuentes a medir) o técnicas (movilidad y dispersión de las fuentes).

#### 2.3.1 Factores de emisión

Los factores de emisión son parámetros que relacionan la cantidad de contaminantes descargados al ambiente con la intensidad de la actividad realizada (*nivel de actividad*). Esta relación puede establecerse a través de una variable directa del proceso (estimación de gases de combustión a partir de *consumo de combustible*), o bien a través de una variable indirecta (estimación de gases de combustión a partir de *número de obreros de la planta*).

Los parámetros indirectos son los más empleados en el caso de las fuentes no puntuales, ya que generalmente no se conocen las variables directas de cada una de las fuentes; por ejemplo, la estimación de gases de combustión no puede realizarse a partir del consumo de combustible en cada uno de los automóviles de una zona urbana, por lo que se emplea una variable indirecta como el parque vehicular.

La forma general para el cálculo de las emisiones, empleando un factor de emisión, es:

$$E = NA * FE \left[ 1 - \frac{ER}{100} \right] \quad (2.1)$$

en donde: **E** es la emisión estimada; **NA** el nivel de actividad, **FE** el factor de emisión y **ER** la eficiencia promedio del equipo de control de emisiones expresada en porcentaje.

Si el factor de emisión fue desarrollado considerando la operación de un equipo de control, la eficiencia de este equipo se considera dentro del factor de emisión **FE**, y la ecuación toma la siguiente forma general:

$$E = NA * FE \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 también corresponde al caso en el cual no existe equipo de control, **ER=0**. Esta ecuación supone una relación directa entre la emisión y nivel de actividad, por lo que un factor de emisión puede considerarse como un modelo matemático simple.

Algunos factores de emisión consideran más de un parámetro relacionado con el nivel de actividad, incrementándose la exactitud de los mismos con el número de variables involucradas para su determinación (INE,1999). Para seleccionar este método se debe considerar que:

- Los factores de emisión son susceptibles a variaciones locales, por lo que su aplicabilidad se define en términos de la similitud entre las condiciones del caso de estudio y aquellas en las que se desarrollaron.
- Los factores de emisión, por ser desarrollados a partir de datos obtenidos de una serie de pruebas o mediciones, no tienen todos la misma confiabilidad. La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) (2000), establece cinco niveles de confiabilidad para los factores de emisión:
  - A. Excelente. Desarrollado a partir de datos de pruebas clasificadas como I, correspondientes a un gran número de instalaciones escogidas de una población al azar. El tipo de fuente de emisión esta suficientemente especificada, de manera que la variabilidad dentro de la población muestreada tiende a minimizarse.
  - B. Superior del promedio. Desarrollado a partir de datos de pruebas clasificadas como I, de un número razonable de instalaciones. Sin embargo no es muy clara la forma de muestreo, es decir, no es evidente que fueron tomadas al azar. La categoría de la fuente esta suficientemente especificada de manera que la variabilidad dentro de la población tiende a minimizarse.

- C. Promedio. Desarrollado a partir de datos de pruebas clasificadas como I y II, de un número razonable de instalaciones. Sin embargo no es muy clara la forma de muestreo, es decir, no es evidente que fueron tomadas al azar. La categoría de la fuente esta suficientemente especificada de manera que la variabilidad dentro de la población tiende a minimizarse.
- D. Inferior del promedio. Desarrollado a partir de datos de pruebas clasificadas como I y II de un pequeño número de fuentes. Se infiere que estas muestras no representan una muestra aleatoria. Puede haber evidencia de una variabilidad de los valores dentro de la misma población de datos.
- E. Pobre. Desarrollado a partir de datos de pruebas clasificadas como III y IV de un pequeño número de fuentes. Se infiere que estas muestras no representan un muestreo aleatorio. Puede haber evidencia de una variabilidad de los valores dentro de la misma población de datos.

Los tipos de prueba a que hace referencia esta clasificación son: I, cuando se hace un número de pruebas en el mismo punto de emisión con una metodología autorizada, de tal manera que se puede validar estadísticamente el factor obtenido; II, cuando se realizan pruebas con una metodología aceptada, pero que no se cuenta con resultados suficientemente detallados para una validación adecuada; III, las pruebas se realizan con una metodología nueva o no autorizada según la normatividad vigente, o bien hubo falta de información; y IV, pruebas realizadas con una metodología no aceptada, pero que puede ser usada para establecer el orden de magnitud de la emisión.

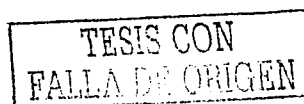
### **2.3.2 Extrapolación**

La extrapolación puede usarse para calcular emisiones indirectamente o para verificar las estimaciones de emisiones calculadas con otros métodos. Se puede realizar a partir de los datos de toda una población, una muestra de datos, o de un solo dato. Este método se puede utilizar para estimar las emisiones de fuentes no puntuales cuando:

- Las fuentes de emisión son similares (procesos, materias primas y productos)
- Las condiciones socioeconómicas entre las regiones geográficas a comparar son iguales
- Se tienen datos representativos de las fuentes consideradas

El método se recomienda cuando se tienen datos de la misma población y estos han sido validados estadísticamente (USEPA, 2000).

### **2.3.3 Balance de materiales**

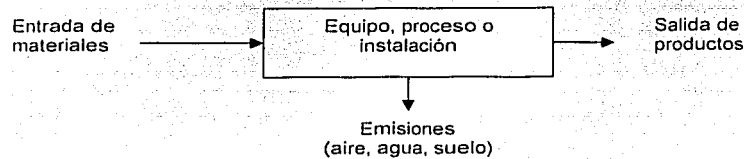




Es un método útil para estimar emisiones totales de diferentes categorías de fuentes o para desarrollar factores de emisión.

El método consiste en contabilizar las entradas y salidas de un proceso, bajo el supuesto que las emisiones son iguales a la diferencia entre la cantidad de materiales que entra y la que sale como producto.

**Figura 2.2 Diagrama de balance de materiales**



Para realizar un balance de materiales se debe disponer de información relacionada con los flujos de entrada y salida, así como su composición. Las entradas del proceso incluyen materias primas, materiales de consumo indirecto como agua o aire; las salidas incluyen los productos y las emisiones pueden ser al aire, agua o suelo.

Los balances pueden realizarse para un equipo, proceso o instalación completa, debiendo considerarse que:

Se requiere del conocimiento del proceso y las reacciones involucradas,

- El método no es aplicable en los casos en que el material reacciona para formar otros compuestos, a menos que dichos procesos estén bien caracterizados.
- como las emisiones se calculan por la diferencia entre el material que entra y el que sale, un pequeño error en la medición de la entrada puede generar un error mucho mayor en el cálculo de la emisión.
- Los balances pueden ser inapropiados cuando los valores de la emisión son muy pequeños comparados con la cantidad de otros materiales en el proceso (SEMARNAT, 2001).

#### **2.3.4 Cálculos de ingeniería**

Los cálculos de ingeniería se basan en aplicaciones de principios y criterios de ingeniería correlacionados matemáticamente. Por ejemplo, condiciones de equilibrio fisicoquímico de fases, propiedades físicas y químicas de las sustancias, variables y constantes de reacciones químicas, correlaciones y especificaciones de diseño.

La aplicación de este método requiere del conocimiento técnico del proceso, de las reacciones que se llevan a cabo y, sobretodo, de experiencia profesional.

Existen tres tipos básicos de cálculos de ingeniería:

- Empleo de correlaciones de diseño desarrolladas, por ejemplo, para pérdidas de tanques, pérdidas por el manejo de materiales y descargas de procesos de tratamiento de agua,
- Uso de especificaciones de diseño de equipo, tal como velocidad y eficiencia de remoción. Estos cálculos son frecuentemente usados para estimar emisiones al aire de fuentes puntuales provenientes de equipo anticontaminante; las especificaciones de equipo pueden ser valores derivados de mediciones directas durante la operación y proporcionados por el fabricante, también pueden ser valores promedio publicados para diferentes tipos de equipo y procesos en operación,
- Uso de las propiedades fisicoquímicas y condiciones de proceso. Estos datos son frecuentemente usados para estimar la concentración de una sustancia presente en una emisión. Por ejemplo, la presión de vapor de una sustancia puede ser relacionada con la ecuación de los gases ideales para estimar su concentración en el aire (SEMARNAT, 2001).

### **2.3.5 Modelos matemáticos**

Los modelos matemáticos son una representación aproximada de la realidad por medio de una expresión matemática. Esta expresión se apega más a la realidad mientras mayor número de variables considere, por lo que un modelo preciso requiere de una gran cantidad de información y su empleo pocas veces es posible (Soto, 2001).

Para la elección de este método se debe considerar que:

- requiere del conocimiento del proceso y reacciones,
- necesita, generalmente, de más información que el uso de factores de emisión,
- los datos requeridos dependen del modelo seleccionado,
- la exactitud de la estimación depende de la precisión de los datos de entrada del modelo y de la estructura matemática del mismo.

## 2.4 Evaluación de incertidumbre en la estimación de emisiones

En un inventario de emisiones, al igual que en cualquier conjunto de datos, hay incertidumbre en los valores presentados, debido principalmente a deficiencias relacionadas con la adquisición de la información, la representatividad de la muestra, el equipo de muestreo y la técnica de estimación.

Existen diferentes métodos para evaluar la incertidumbre; estos pueden ser cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos (Charles et al, 1998).

Los *métodos cualitativos* generalmente emplean declaraciones categóricas como "presente/ausente" o "pasa/falla", para clasificar los datos examinados, sin asociarlos con un rango de probabilidad. Los métodos cualitativos tienen la ventaja de ser aplicables a cualquier conjunto de datos y de no requerir muchos recursos para su implementación (Ellison, 2002).

A través de los *métodos semicuantitativos* se clasifican datos, uno con respecto a otro. Generalmente son empleados como métodos de verificación; en el caso de inventarios para establecer su confiabilidad respecto a cierta aplicación específica. Estos métodos pueden utilizarse cuando no se dispone de datos detallados y resultan más apropiados que los métodos cualitativos cuando se requiere hacer una indicación de la confiabilidad de un dato en particular. Una desventaja en su uso es la difícil eliminación de inconsistencias lógicas en la clasificación de los datos, por ejemplo  $A > B$ ,  $B > C$ ,  $C > A$ .

La USEPA ha utilizado este sistema de clasificación para sus factores de emisión incluidos en el documento AP-42, el cual emplea letras de la A a la E para representar la confiabilidad de los factores de emisión de mayor a menor (ver sección 2.3.1). Otros datos ambientales también han sido clasificados empleando estos métodos: el sistema de clasificación para el reporte de inventarios de emisiones de gases invernadero y el DARS (The Data Attribute Rating System) que aun sigue en desarrollo (Charles et al, 1998).

Los *métodos cuantitativos* estiman estadísticamente la incertidumbre. Estos métodos difieren de los descritos anteriormente en que evalúan cuantitativamente el error asociado a los datos del inventario. Se emplean cuando la información que se maneja es de suficiente calidad o está suficientemente bien definida para poder especificar los valores como cantidades estadísticas, ya que en estos casos es posible construir una función de distribución que describa la variabilidad del parámetro dentro de un contexto determinado.

Los métodos cuantitativos pueden ser: estimación por expertos, propagación de error y simulación directa.

La *estimación por expertos* consiste en un análisis cuantitativo de la incertidumbre, empleando valores de los parámetros clave de la distribución estadística, definidos directamente por expertos; se emplea cuando no se dispone de información para estimar el parámetro de interés.

La *propagación de error* utiliza metodologías ampliamente aceptadas, para predecir la forma en la que la incertidumbre puede propagarse durante los cálculos de las emisiones; requiere información de los parámetros individuales implicados.

La *simulación directa* calcula la incertidumbre y límites de confiabilidad de los datos mediante muestreo estadístico, como el método de Monte Carlo o el de hipercuadrados latinos. En Canadá se utilizó recientemente esta metodología para evaluar la incertidumbre en la estimación de emisiones de gases invernadero (Charles et al, 1998).

En este trabajo, se utilizan los factores de emisión publicados por la EPA clasificados con un método semicuantitativo (USEPA, 2002). A pesar de que la confiabilidad de estos factores no está sustentada estadísticamente, se consideran actualmente la mejor técnica disponible para la estimación de emisiones.

## **Capítulo 3**

### **Contaminación por mercurio**

El mercurio es un contaminante ambiental que por sus características tóxicas a la salud humana ha cobrado gran interés, especialmente en la última década del siglo 20, cuando se ha demostrado, mediante mediciones, que la cantidad de mercurio liberada a la biosfera se está incrementando por emisiones antropogénicas.

En la actualidad existe un gran número de sitios contaminados por mercurio en el mundo. Actividades industriales como la minería han ocasionado la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos (Ebinghaus et al, 1999).

El mercurio tiene propiedades que no sólo representan un riesgo para la salud humana, también tienen efectos adversos en el ambiente. Tales características tóxicas han despertado interés y creado conciencia a nivel mundial, por lo que a finales de los años ochentas se iniciaron esfuerzos en cuanto a legislación y acciones voluntarias para limitar la producción y uso de este metal, desarrollando tecnologías que sustituyan la utilización del mismo.

#### **3.1 Características generales**

El mercurio es el único metal líquido a temperatura ambiente. Es soluble en soluciones oxidantes (ácido nítrico y ácido sulfúrico concentrado), y también presenta cierta solubilidad en agua (20 a 30  $\mu\text{g/L}$ ). Tiene una tensión superficial alta por lo que se le ha encontrado aplicación en la elaboración de instrumentos de medición. A temperatura ambiente el mercurio puede formar vapores incoloros e inodoros que se difunden rápidamente, su vaporización se incrementa en relación directa con el aumento de temperatura. En la tabla 3.1 se resumen algunas de las propiedades del mercurio.

Se han realizado estudios bajo condiciones controladas de presión y temperatura en los que se demuestra que el mercurio es estable en condiciones estándar, pero en condiciones críticas su comportamiento es impredecible. A altas temperaturas o cuando se mezcla con materiales incompatibles (acetileno, amoníaco, cloro, dióxido de cloro, metal azida, carburo de sodio, halógenos, oxidantes fuertes u otros metales) su reactividad aumenta.

**Tabla 3.1 Propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas del Hg**

Propiedades	Valor
Símbolo químico	Hg
Número atómico	80
Peso atómico	200.59
Estados de oxidación	+1,+2
Olor	Inodoro
Apariencia	Líquido plateado, reflejante
pH	7 (a 25°C)
Punto de ebullición (°C)	356.9
Punto de fusión (°C)	-38.8
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	13.5 (a 20°C)
Presión de vapor (mm Hg)	0.002 (a 25°C)
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	13.5 (a 20°C)
Calor latente de fusión	2.8 cal/g
Calor de vaporización	73.26 Kcal/kg (a 20°C)
Calor latente de evaporación	64.99 cal/g
Tensión superficial (dinas/cm <sup>2</sup> )	480.3
Conductividad térmica (cal/cm <sup>2</sup> cm/s)	0.0201
Solubilidad en agua (µg/L)	20 - 30 a 20°C
Coefficiente de partición suelo-agua Kd	Hg <sup>0</sup> : 1000 Hg(II): 50000 Metilmercurio: 3000

Fuente: Kirk, 1980.

El mercurio tiene gran capacidad para formar compuestos orgánicos (como metilmercurio, etilmercurio y fenilmercurio) y compuestos inorgánicos (como cloruro mercurioso y mercúrico); y tiende a formar aleaciones o amalgamas, de excelente resistencia a la corrosión, con casi todos los metales, a excepción del hierro (Kirk,1980). En la tabla 3.2 se presentan las constantes de velocidad de reacción.

**Tabla 3.2 Constantes de velocidad de transformación química**

Constante de velocidad (días)	Suelo acuático	Columna de agua	Sedimentos bentónicos
Volatilización de Hg	0.082	0.10	0
Oxidación	0	0	0
Reducción	0.000025	0.0075	0.000001
Metilación	0.00005	0.001	0.0001
Dimetilación a Hg (I)	0.0025	0.015	0.002
Mer metilación a Hg <sup>0</sup>	0	0	0

Fuente: USEPA, 1997a.

El mercurio metálico se encuentra en la naturaleza, pero en muy bajas concentraciones. En suelos no contaminados las concentraciones van de 30 a 500 ppb, las rocas pueden contener de 10 a 20000 ppb, las aguas superficiales de 0.1 ppb, como mercurio total, y en agua de mar se puede hallar en promedios de 0.1 a 1.2 ppb.

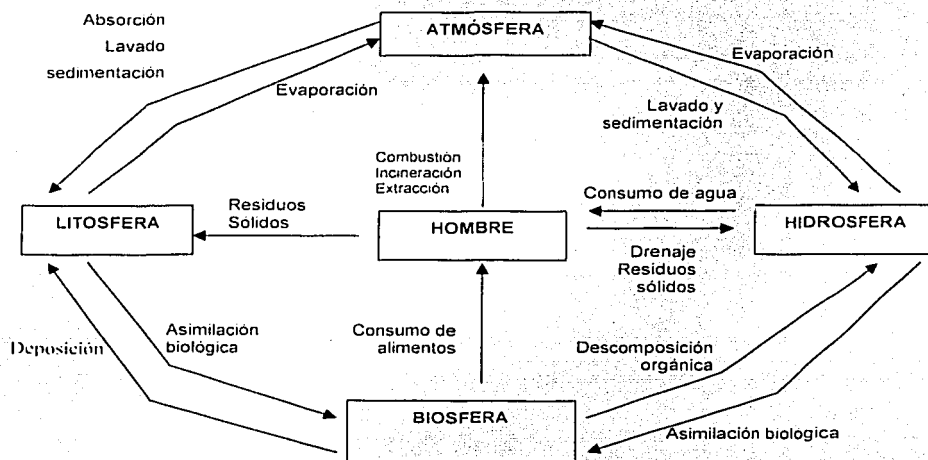
También se le encuentra combinado con azufre, formando más de una docena de diferentes compuestos minerales. Comercialmente, el compuesto más importante es el Cinabrio HgS (86% de mercurio y 14% azufre), del cual se extrae mercurio virgen (de apariencia brillante y con una pureza superior al 99.9%) por procedimientos de minería.

Debido a que el mercurio tiene un volumen de expansión uniforme y una tensión superficial alta, es utilizado en barómetros, termómetros y otros instrumentos de medición (Kirk,1980).

### 3.2 Ciclo del mercurio en la naturaleza

El mercurio y plomo difieren de la mayoría de los metales pesados en su mecanismo de contaminación del aire. Como se observa en la figura 3.1, no solo los procesos de combustión, incineración y extracción arrojan mercurio a la atmósfera, también una gran cantidad de mercurio metilado escapa de los sedimentos a través del agua (Horne, 1978).

Figura 3.1 Ciclo del mercurio en el ambiente



Fuente: modificación de Horne 1978.

El mercurio puede pasar fácilmente a diferentes estados y especies (compuestos) dentro de su ciclo, por lo que una vez que es emitido o liberado a la biosfera se mueve constantemente entre la superficie de la tierra y la atmósfera (UNEP, 2002).

La transformación del mercurio en diferentes compuestos influye en su transportación dentro y entre los diferentes medios (agua, suelo, aire), siendo un factor que determina que tan lejos de la fuente de emisión puede depositarse el mercurio (UNEP,2002).

La mayor parte del mercurio en agua, suelo, sedimentos y biota se encuentra como sales mercúricas (cloruro,  $HgCl_2$ , hidróxido,  $Hg(OH)_2$  y sulfuro,  $HgS$ ), como

compuestos organomercurícos (metilmercurio,  $\text{CH}_2\text{Hg}$ , e hidróxido de metilmercurio) y en pequeñas cantidades como dimetilmercurio y fenilmercurio.

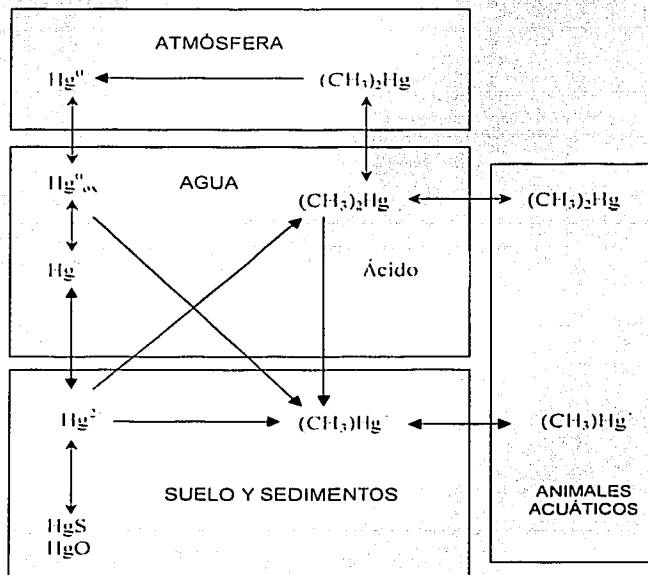
El mercurio puede existir en tres diferentes estados de oxidación:  $\text{Hg}^0$  (metálico),  $\text{Hg}^+$  (mercuroso) y  $\text{Hg}^{2+}$  (mercúrico), las cuales son intercambiables en el ambiente (ver figura 3.2).

En estado libre, el  $\text{Hg}^0$  existe en pequeñas proporciones. Debido a su fuerte afinidad por los grupos  $-\text{SH}$  (sulfhidrilo o mercaptanos), al intercambio iónico y absorción en minerales y materiales sedimentarios se encuentra en forma de cinabrio,  $\text{HgS}$  que puede pasar a  $\text{Hg}^{2+}$  por acción microbiana.

El mercurio elemental emitido a la atmósfera es oxidado a  $\text{Hg}^{2+}$ , formando compuestos como  $\text{HgO}$  y  $\text{HgCl}_2$ . El mercurio no oxidado puede ser transportado a largas distancias debido a su baja solubilidad en agua, mientras que los compuestos producidos por oxidación son más solubles y tienen una alta velocidad de depositación, por lo que el  $\text{Hg}^{2+}$  es adsorbido directa por las plantas o se deposita sobre el suelo por vía húmeda o seca (UNEP, 2002).

El ion  $\text{Hg}^{2+}$  puede pasar a monometil mercurio,  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , y éste a dimetil mercurio,  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ , por acción de microorganismos en sedimentos acuáticos, siendo ambas reacciones reversibles por efectos biológicos y/o fisicoquímicos.

Figura 3.2 Estados de oxidación del mercurio en el ambiente



Fuente: Horne 1978.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



El estado de equilibrio del ion mercurioso,  $Hg^+$ , depende del potencial redox; condiciones reductoras favorecen la formación mercurio metálico, y las oxidantes la de sulfuro de mercurio, pasando por el ion  $Hg^{2+}$ .

### 3.3 Extracción y aprovechamiento

El ciclo de mercurio en la naturaleza (figura 3.1) se puede alterar de manera adversa cuando se realiza un aprovechamiento extensivo por parte del ser humano, al grado de ocasionar contaminación en el ambiente local y en algunos casos global, lo cual a su vez puede tener efectos adversos en la salud humana.

Por lo tanto, para estimar la cantidad de mercurio presente en el ambiente, más que conocer sus fuentes naturales, es necesario identificar las fuentes antropogénicas de emisión y conocer la tendencia de extracción y aprovechamiento de este metal a nivel internacional y nacional.

#### 3.3.1 Situación a nivel internacional

En la actualidad, las principales minas de extracción primaria de mercurio en el mundo se localizan en Argelia, Ucrania y España. A principios de la década de 1990 a 2000, el mercado de mercurio sufrió un serio decaimiento y países como México, Italia y Turquía dejaron de producirlo por esta vía, aunque aún poseen importantes reservas mineras. La disminución en la extracción primaria es constante (tabla 3.3), cayendo casi en un 20% de 1995 a 1999 (USGS ,2000, 2002).

**Tabla 3.3 Extracción primaria mundial de mercurio (ton).**

<b>País</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>
Argelia	292	300	370	370	400
Kirjistan	170	580	611	620	620
España	1497	1049	1000	500	500
Otros países	861	961	745	830	800
<b>Total</b>	<b>2820</b>	<b>2890</b>	<b>2730</b>	<b>2320</b>	<b>2300</b>

Se estima que hay una reserva mundial de mercurio de 600,000 ton, distribuida principalmente en Kirjistan, Rusia, Eslovenia, España y Ucrania, la cual sería suficiente para un siglo más de continuar la tendencia actual de consumo.

Los mayores exportadores de mercurio son Europa occidental, Tajikistan, Kirjistan, Rusia, Ucrania y África, mientras que los mayores importadores son Europa del este, Asia y Sudamérica.

De la producción mundial de mercurio en 1996 (2,890 ton), Europa del oeste suministró la mayor cantidad (1,141 ton), siendo España el principal productor, proporcionando el 92% de las exportaciones totales de la región. Kirjistan,

Tajikistan, Rusia y Ucrania representaron la segunda fuente de suministro (785 ton), China produjo 508 ton y Argelia, único productor de África, 300 ton.

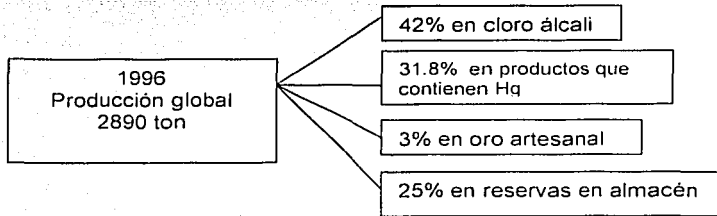
Gran cantidad del mercurio extraído es usado para la producción de cloro álcali (42% en 1996). En Europa del oeste se tiene la mayor capacidad instalada con tecnología de celdas de mercurio en el mundo, que en 1996 consumió 631 ton (figura 3.3).

Norteamérica, Europa occidental y el noroeste de Asia son las principales economías que utilizan productos elaborados con Hg.

A nivel internacional, tanto la extracción como el uso de mercurio han disminuido.

De 1990 a 1996 disminuyó en 33% la producción de cloro y sosa cáustica con celdas de mercurio, y en un 42% la elaboración de productos que contienen el metal.

**Figura 3.3 Usos a nivel global del mercurio en 1996**



Fuente: USGS, 2000.

Por otro lado, en el caso particular de los Estados Unidos, el suministro de mercurio durante el periodo de 1970 a 1998 mostró un comportamiento que puede ser explicado en tres periodos:

- 1) De 1970 a 1986, la extracción primaria y las importaciones fueron la principales fuentes de suministro a nivel nacional. La producción primaria disminuyó mientras que las importaciones aumentaron.
- 2) Durante el periodo 1986-1992, hubo un rápido decaimiento en el suministro de Hg, ocasionado por una legislación tendiente a eliminar o disminuir su uso en algunas aplicaciones; por ejemplo en la elaboración de baterías disminuyó 54% en 1986 y un 2% en 1992; mientras que para la fabricación de pinturas se logró una disminución del 16% en 1989 y su completa eliminación en 1992.
- 3) El periodo de 1983 a 1998 se caracteriza por un incremento neto en las importaciones, la no producción primaria, y una creciente producción secundaria soportada por una legislación encaminada al reciclamiento del mercurio (USGS, 2000).

Como se observa, la disminución en la producción y consumo del mercurio en ese país se relaciona directamente con la legislación adoptada por el conocimiento del riesgo que representa para la salud humana. Este tipo de legislación, enfocada a minimizar las emisiones de mercurio relacionadas con su uso, también se ha establecido en otros países.

En Holanda, a partir de 1996, se prohibió la disposición de desechos que contienen mercurio, con la finalidad de alentar el reciclaje de los mismos. Solo se permitirá el uso de mercurio en productos cuyo ciclo de vida pueda ser controlado. El gobierno propuso una reducción, para el año 2000, con respecto a las emisiones de 1985, de las emisiones al suelo, aire y agua en un 80, 50 y 70 por ciento respectivamente.

Suecia y Dinamarca han tomado acciones para reducir el uso del mercurio en aplicaciones no esenciales, ambos países han cerrado sus fronteras a la transferencia de desechos con Hg. En Suecia se emitió una ley que prohíbe la importación, manufactura y venta de los siguientes productos:

- Termómetros de vidrio, a partir del 1 de enero de 1992
- Otros termómetros, instrumentos de medición y dispositivos eléctricos incluyendo interruptores de nivel y termostatos, a partir del 1 de enero del 1993
- Contactos eléctricos para la transmisión continua de corriente, a partir del 1 de enero de 1995
- Para el año 2000, todos los productos restantes que lo contienen. Una excepción notable es la autorización para utilizar mercurio en la producción de cloro álcali, el cual está permitido hasta el 2010 (USGS, 2000)

### 3.3.2 Extracción en México

Los minerales de mercurio se encuentran en 12 de las 32 entidades federativas del país, en particular en las localizadas en el noroeste y centro del territorio. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística de Geografía e Informática (INEGI), la extracción de mercurio muestra un comportamiento irregular de 1985 a 1990 (ver tabla 3.4); posteriormente, y siguiendo la misma tendencia que en el resto del mundo, la actividad disminuye de manera clara (46% en 1991 con respecto al año anterior) cayendo dramáticamente en 1994 (11 toneladas). A partir de 1995 no se registra oficialmente producción primaria en México (SECOFI, 1999).

A pesar de que oficialmente ya no se reporta extracción primaria de mercurio, hay un número no conocido de pequeños mineros o *pepenadores* que la realizan de manera informal.

**Tabla 3.4 Extracción primaria de mercurio 1985-1998**

Año	Extracción (ton)
1985	394
1986	185
1987	124
1988	345
1989	651
1990	735
1991	340
1992	21
1993	12
1994	11
1995	NR

NR: no se reporta oficialmente

Fuente: SECOFI, 1999.

Por otro lado, en México existe producción secundaria de mercurio por reprocesamiento de antiguos jales mineros en algunas exhaciendas de beneficio de metales en Zacatecas, Guanajuato y San Luis Potosí, donde se usaba el sistema de patio de amalgamación para la obtención de plata y oro. Se estima que en el estado de Zacatecas se pudieran estar produciendo 20 toneladas anuales de este metal (INE, 2000c).

Hoy en día se usa un sistema de lixiviación para recuperar plata, mercurio y oro de jales mineros. En Zacatecas se encuentran registradas 4 plantas (tabla 3.5), que en 1996 produjeron más de 33 toneladas de mercurio, según la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (INE, 2000c).

**Tabla 3.5 Plantas que benefician jales en Zacatecas**

Plantas	Producción de mercurio (kg/mes)
Jales de Zacatecas, S.A. de C.V.	350
Beneficiadora de Jales de Zacatecas, S.A. de C.V.	1,207
Jales del Centro, S.A. de C.V.	690
Mercurio del Bordo, S.A. de C.V.	518

INE, 2000 C.

### 3.3.3 Aprovechamiento en México

No se cuenta con una base de datos que permita conocer con precisión qué tanto se emplea el mercurio en procesos y en productos de consumo, pero en general se pueden señalar los usos mencionados a continuación.

El mayor consumo de mercurio, generalmente de origen secundario, está relacionado con la producción de cloro y sosa cáustica, fabricación de lámparas, amalgamas e instrumentos de medición.

Al igual que ocurre en el resto del mundo, se ha ido reduciendo o eliminando su empleo para ciertos usos como agente biocida en pinturas y plaguicidas y en la producción de medicamentos, cosméticos y baterías (INE, 1996).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El mercurio es utilizado en la elaboración de productos farmacéuticos que son utilizados como diuréticos, antisépticos, fungicidas y antibacteriales (The Merck Index, 1990). Los medicamentos que contienen mercurio es en bajas concentraciones. En México se emplea principalmente en la medicina naturista (Barreto, 2002).

Además, existe producción artesanal aún no cuantificada que corresponde a un consumo de mercurio para usos no esenciales como artesanales y culturales (INE, 1996).

### 3.3.4 Importación y exportación

Las importaciones de mercurio en México han disminuido drásticamente a partir de 1992, con excepción de 1998 cuando hubo un incremento por seis compañías extranjeras que adquirieron 13.7 toneladas de mercurio, entre ellas dos fabricantes de tubos fluorescentes y una de restauraciones dentales (INE, 2000c).

De 1994 a 1998 solo se exportaron 12 toneladas de mercurio comparadas con las 603 de 1985 a 1989. La tabla 3.6 presenta la variación de las importaciones y exportaciones de 1985 a 1998, pudiéndose observar que a pesar de la situación mundial, México importó grandes cantidades de este metal en 1989 y 1992 (276.1 y 101.9 toneladas, respectivamente).

**Tabla 3.6 Importación y exportación de mercurio 1985-1998**

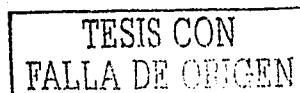
Año	Importación (ton)	Exportación (ton)
1985	7	92
1986	NR	154
1987	NR	121
1988	0.4	142
1989	276.1	91
1990	0.4	23.2
1991	2.15	0.3
1992	101.9	1.9
1993	40.5	0.3
1994	27.8	0.3
1995	5.78	0.3
1996	0.85	4
1997	0.87	7.0
1998	13.74	0.24

NR. no se reporta

Fuente: SECOFI, 1999

### 3.4 Legislación

Como se mencionó, existe una tendencia internacional para eliminar o minimizar el empleo de mercurio debido a los efectos negativos que tiene sobre la salud y el ambiente. Esta tendencia ha producido que las legislaciones locales en la materia sean el producto directo de los acuerdos internacionales, de entre los cuales es importante mencionar el siguiente:



### 3.4.1 Acuerdos internacionales

#### Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte

El Plan de Acción Regional de América del Norte (PARAN) sobre el mercurio, es una de las iniciativas surgidas al impulso del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN) suscrito por los gobiernos de Canadá, Estados Unidos y México, como parte del Tratado de Libre Comercio (TLC). Este acuerdo entró en vigor el primero de enero de 1994 y es el marco general dentro del cual se deben realizar y promover acciones de cooperación ambiental entre los tres países firmantes.

En términos del Acuerdo se creó la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) cuya meta es "promover la cooperación y la participación ciudadana para contribuir a la conservación, protección y mejoramiento del medio ambiente en los territorios de las Partes". El 13 de octubre de 1995, en su segunda sesión ordinaria celebrada en Oaxaca, México, el Consejo de Ministros de la Comisión aprobó la Resolución 95-5 sobre el Manejo Adecuado de las Sustancias Químicas que establece: *un grupo de trabajo integrado por dos funcionarios de alto nivel, elegidos por cada una de las Partes, cuyas responsabilidades se refieran a la reglamentación o gestión de sustancias tóxicas...*

En la Resolución 95-5, se dio instrucciones al Grupo de Trabajo para que recomendara: actividades concertadas para reducir los riesgos que presentan las sustancias químicas tóxicas, tomando en cuenta todo su ciclo de vida, y políticas y medidas de carácter reglamentario y no reglamentario para detectar y reducir la exposición a estas, sustituyéndolas por sustancias menos tóxicas para, en definitiva, eliminar gradualmente su uso.

Los planes de acción creados en virtud de la Resolución 95-5 reflejan el compromiso conjunto de las partes de trabajar en colaboración partiendo de acuerdos ambientales internacionales y de las políticas y leyes existentes, adoptando una perspectiva regional para las iniciativas internacionales vigentes o en proceso de negociación sobre las sustancias tóxicas, persistentes o bioacumulativas, promoviendo la cooperación con países de América del norte.

El mercurio, al igual que el diclorodifenil tricloroetano (DDT), el clordano y los bifenilos policlorados (BPCs), es una de las cuatro sustancias prioritarias señaladas como objeto de estos planes de acción.

El Plan de Acción Regional para el mercurio hasta ahora se dividió en dos fases, con el objeto de cumplir con los compromisos arriba mencionados. En la figura 3.4 se muestra la estructura de los acuerdos internacionales producto del TLC.

Los miembros del Programa Nacional de Deposición Atmosférica de Estados Unidos, junto con representantes de Canadá y México, propusieron la creación de una Red Americana de Deposición de Mercurio, la cual se extenderá desde América

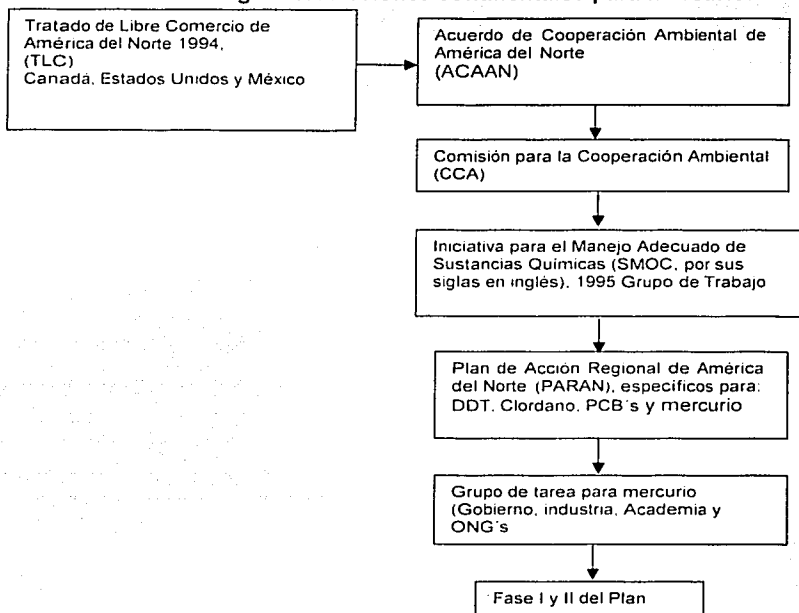
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

del sur a Canadá y cuantificará la exposición estacional y anual de los ecosistemas al mercurio atmosférico.

El objetivo es tener una base de datos continental de la concentración semanal y los flujos de mercurio para describir mejor las tendencias espaciales y temporales de los depósitos húmedos del mercurio. Esta red incluye entrenamiento, transferencia de tecnología y mediciones, para poder cuantificar la carga de mercurio en cada región, la integración de estas mediciones a programas de investigación y el desarrollo de una base de datos confiable.

La meta es expandir la red, aumentando número de sitios y la tecnología hacia otros países e incluir mediciones relevantes acerca de los depósitos secos del mercurio (INE, 2000d).

**Figura 3.4 Acciones continentales para mercurio.**



Fuente: INE, 2000d.

### 3.4.2 Legislación nacional

Las diferentes leyes y normas mexicanas incluyen disposiciones para apoyar la prevención y control de las emisiones de mercurio al ambiente, así como para establecer niveles máximos permisibles en el ambiente y productos de consumo. Sin embargo, la percepción de los riesgos del mercurio no se ha generalizado en

México, y aún no se han formulado normas lo bastante precisas para el manejo de productos específicos.

En la constitución política de los Estados Unidos Mexicanos existen leyes que regulan aspectos sobre el manejo del mercurio. De las leyes y los reglamentos se derivan las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son de aplicación federal y han sido redactadas con la participación de los diferentes sectores gubernamentales, académicos y la industria, y sometidas a consulta pública antes de su publicación definitiva. En la tabla 3.7 se citan esas leyes y normas referentes al manejo del mercurio.

La entidad encargada de vigilar el cumplimiento de las normas oficiales en materia de protección ambiental es la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA); sus oficinas generales están en la Ciudad de México y tiene representaciones en cada estado de la República.

Actualmente, está en proceso de aprobación el anteproyecto de norma, NOM-098-ECOL-99, que regula y establece los requisitos y especificaciones para la operación adecuada de incineradores y los límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera, descargas de aguas residuales y manejo de desechos sólidos producto de la incineración de residuos sólidos urbanos, residuos peligrosos, industriales no peligrosos y biológico-infecciosos, a fin de reducir sus posibles riesgos para la salud y el ambiente. En esta norma se establece, como límite máximo de emisión de mercurio  $0.07 \text{ mg/m}^3$  (INE, 2000c).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Tabla 3.7. Legislación del mercurio en México**

Ley	Reglamento	Normas Oficiales Mexicanas	Entidad responsable
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Reglamento de Residuos Peligrosos.	NOM-052-ECOL-1993 NOM-053-ECOL-1993	SEMARNAT, INE, PROFEPA
Ley de Aguas Nacionales	Reglamento de Aguas Nacionales	NOM-002-ECOL-1996 NOM-071-ECOL-1994	SEMARNAT, INE, PROFEPA
Ley General de Salud	Reglamento para el Control Sanitario de las Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios.	NOM-071-ECOL-1994 NOM-118-SSA1-1994	SSA
Ley Federal del Trabajo	Reglamento de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente del Trabajo.	NOM-010-STPS-1994	STPS
Ley Federal de Sanidad Animal		NOM-016-ZOO-1994	SAGAR
Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal	Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos	NOM-002-SCT2/1994	SCT
Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos	Reglamento de Armas de Fuego y Explosivos.	No existe un reglamento oficial mexicano. Sin embargo, el Art 41 indica que el fulminato de mercurio está sujeto a los reglamentos de la Secretaría de la Defensa Nacional	SEDENA
Ley de Industrias Mineras	Reglamento para las Actividades Mineras.	No existe un reglamento oficial mexicano. Sin embargo, el Art 41 indica que el fulminato de mercurio está sujeto a los reglamentos de la Secretaría de la Defensa Nacional	SECOFI

Fuente: INE, 2000 c.

### 3.5 Áreas de oportunidad

En este trabajo se definen como áreas de oportunidad aquellos aspectos (acciones o etapas de proceso) que pueden ser iniciados o modificados para lograr un objetivo ambiental (en este caso la disminución de emisiones de mercurio). Las áreas de oportunidad posibles en México son el cambio de materia prima, el empleo de equipo de control y la recuperación del metal.

#### 3.5.1 Cambio de materia prima

La tendencia mundial en el uso del mercurio en la fabricación de bienes de consumo apunta hacia su eliminación en muchos productos mediante su sustitución por otros materiales. Los principales sectores que han tomado en cuenta esta alternativa son: la fabricación de pilas, instrumentos de medición, pinturas, producción de cloro y sosa cáustica y la elaboración de amalgamas dentales.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En los Estados Unidos se restringió a partir de 1992 el contenido de mercurio en pilas alcalinas y se prohibió la venta de pilas de óxido de mercurio. La industria de las pilas ha sustituido el mercurio usado como aditivo en las pilas alcalinas por indio (excepto en las pilas botón de celda), y las pilas de mercurio-zinc son sustituidas por pilas de litio y níquel-cadmio.

En la producción electrolítica de cloro y sosa cáustica, las celdas de diafragma y de membrana reemplazan las celdas de mercurio.

Las amalgamas dentales están siendo sustituidas por resinas cerámicas, pero su costo es mayor.

Los compuestos orgánicos han reemplazado al mercurio como fungicida en las pinturas de látex.

En Estados Unidos, desde 1984 los termómetros digitales han venido reemplazando a los termómetros de mercurio en clínicas, hospitales y consultorios médicos, aunque éstos últimos siguen siendo utilizados en los hogares debido principalmente al alto costo de los digitales (EPA, 1997b).

### **3.5.2 Control de emisiones**

Como se mencionó en la sección 3.1, el mercurio tiene una volatilidad alta debido a su baja presión de vapor, la cual se incrementa al aumentar la temperatura. La mayoría de los procesos de manufactura que utilizan mercurio como materia prima involucran altas temperaturas, por lo que se requiere equipo de control para las emisiones de vapores y gases que se desprenden en los diferentes puntos del proceso.

En la fabricación de lámparas fluorescentes, el mercurio puede ser emitido durante la transferencia y reparación de las partes, en el proceso de inyección y por el rompimiento de lámparas, derrames y manejo de residuos. El mercurio emitido durante la producción puede disminuirse tomando diferentes medidas tales como: modificación del proceso (control de temperatura, por ejemplo) y extracción controlada de gases en las áreas de producción.

Las fuentes de combustión de carbón y combustóleo tienen zonas de calentamiento que operan a temperaturas superiores a los 1100 °C, por lo que el mercurio contenido en el carbón o combustóleo es evaporado fácilmente.

Los principales equipos de control usados para quemadores que utilizan carbón incluyen precipitadores electrostáticos, lavadores de gases y casas de bolsas.

En las unidades de combustión de diesel o combustóleo se utilizan colectores mecánicos antes del precipitador electrostático, para remover las partículas gruesas de la corriente.

En la fabricación de termómetros, las emisiones de mercurio producidas durante la purificación y transferencia de la materia prima son controladas con sistemas de ventilación local, reducción de temperatura y aislando las áreas de operación (EPA 1997b).

### **3.5.3 Recuperación**

Las mayores fuentes de reciclaje de mercurio son las amalgamas dentales, los residuos de lámparas fluorescentes, interruptores eléctricos y pilas, así como las plantas de refinación electrolítica.

El reciclaje de mercurio puede llevarse a cabo por tratamiento químico y/o tratamiento térmico. El más común es el tratamiento térmico, generalmente los residuos que contienen mercurio son reducidos en tamaño y calentados en retortas a temperaturas alrededor de 540 °C para vaporizar el mercurio; los vapores de mercurio son condensados por enfriamiento con agua y el elemento es purificado por destilación.

El tratamiento químico se aplica principalmente para corrientes de agua residuales. Para precipitar el mercurio metálico, el efluente puede ser tratado con borohidruro de sodio o hacerse pasar por una cama de polvo de zinc. Se pueden utilizar sistemas de intercambio de iones para recuperar mercurio iónico para reuso (EPA, 1997b).

Las alternativas de sustitución del mercurio en productos que lo contienen, así como los métodos de control de emisiones, mencionados anteriormente, pueden ser áreas de oportunidad en muchas de las fuentes de emisión en México. Para determinar las fuentes de mayor importancia en el país, en el siguiente capítulo se propone una metodología de estimación para cada fuente a considerar.

## Capítulo 4 Fuentes de emisión

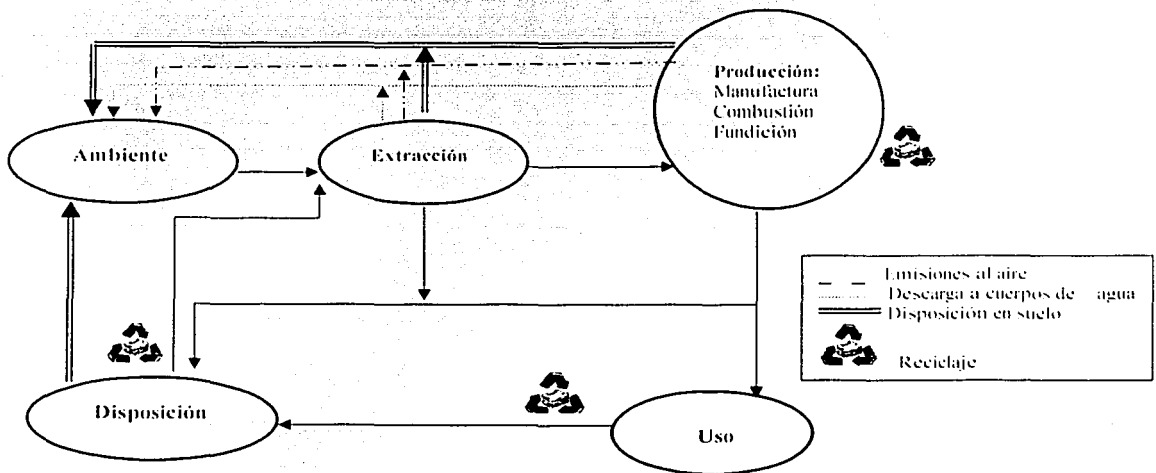
En este capítulo se hace una identificación de todas las posibles fuentes de emisión de mercurio, de éstas se seleccionan las que son consideradas de importancia en México. Posteriormente se hace una descripción breve de cada fuente seleccionada, resaltando sus posibles puntos de emisión y niveles de actividad en el país.

### 4.1 Identificación de fuentes de emisión de mercurio

Para identificar las fuentes de emisión de mercurio al ambiente, se realiza un análisis semejante al llamado ciclo de vida (figura 4.1). El ciclo de vida del mercurio se compone de cinco etapas: en la primera el metal se encuentra en el ambiente; en la segunda se extrae; posteriormente es suministrado a diferentes procesos para la elaboración de productos; la cuarta etapa consiste en la utilización de estos productos; para finalmente pasar a ser un residuo que podrá reintegrarse al ambiente por diferentes vías.

En cada una de estas etapas se pueden identificar varias fuentes de emisión de mercurio a los diferentes medios (aire, agua y suelo). Las fuentes de interés para este trabajo son de tipo antropogénico, ya que representan áreas de oportunidad (tabla 4.1), a diferencia de las fuentes naturales.

Figura 4.1 Ciclo de vida del mercurio



**Tabla 4.1 Fuentes antropogénicas de emisión de mercurio**

Etapa ciclo de vida	Fuente
<b>Extracción</b>	Primaria
	Secundaria
<b>Producción</b>	de cloro y sosa cáustica
	Fabricación de pilas
	Fabricación de dispositivos eléctricos
	Fabricación de instrumentos de medición
	Fabricación de amalgamas dentales
	Fabricación de productos farmacéuticos
	Fabricación de pinturas
	Fabricación de plaguicidas
	de coque
	de carbón de petróleo
	Fabricación de artesanías
<b>Uso</b>	Combustión de carbón
	Quema de combustóleo, diesel y gas natural
	Fundición primaria de plomo
	Fundición primaria de cobre
	Fundición de zinc
<b>Disposición</b>	de dispositivos eléctricos
	de instrumentos de medición
	Artesanales y culturales
	de lámparas fluorescentes
	de instrumentos de medición
	Incineración de residuos sólidos
	incineración de residuos peligrosos
Incineración de desechos médicos	
Crematorios	

Para este trabajo se hace una selección de entre las fuentes identificadas en la tabla anterior, definiendo las que serán consideradas para la determinación de emisiones de mercurio en México. Los criterios de selección empleados fueron los siguientes:

**Importancia del sector productivo en México.** En este punto se toma en cuenta si la actividad considerada se realizó o se realiza en México, así como su importancia. Se descartan las siguientes actividades:

- Fabricación de plaguicidas, pilas y pinturas, debido a que no hay producción en dichos sectores (INE, 1996).
- La combustión de lodos de proceso. Ya que no se realiza en el país.
- La extracción primaria de mercurio. No se reporta de manera oficial desde 1996.

**Intensidad de emisiones del sector productivo.** Este criterio se refiere a la magnitud de las emisiones que puede generar una actividad. No se tomarán en cuenta en este trabajo las actividades cuyas emisiones son reducidas o poco probables por contar con equipo de control.

En este caso se desecharon:

- Las posibles emisiones durante la fabricación y uso de equipo eléctrico, fabricación de lámparas fluorescentes y fabricación de instrumentos de medición.

**Datos disponibles.** Para la estimación de las emisiones se requiere de información básica como: intensidad de la actividad, composición de la materia prima, calidad del producto, temperatura de combustión, etc. Dicha información muchas veces no se puede obtener, ni se tiene una base para hacer suposiciones fundamentadas, por lo que no se estimarán las emisiones para la extracción secundaria de mercurio, combustión en la refinación de petróleo y fabricación de coque de petróleo, aunque las emisiones por combustión en la refinación de petróleo pueden ser importantes si esta actividad se realiza en gran escala.

A partir de estas consideraciones, se evaluarán solo las fuentes de emisión que se presentan en la tabla 4.2.

<b>Etapa ciclo de vida</b>	<b>Fuente</b>
<b>Producción</b>	de cloro y sosa cáustica de coque Combustión de carbón Quema de combustóleo, diesel y gas natural Fundición primaria de plomo Fundición primaria de cobre Fundición primaria de zinc
<b>Uso</b>	Artesanales y culturales
<b>Disposición</b>	de lámparas fluorescentes de instrumentos de medición Incineración de desechos médicos Crematorios

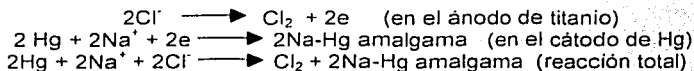
## 4.2 Características de las fuentes de emisión en México

A continuación se analiza cada una de las fuentes mencionadas en la tabla anterior, para identificar los posibles puntos de emisión en cada proceso, e indicar su importancia dentro del sector productivo mexicano.

### 4.2.1 Producción de cloro y sosa cáustica

La producción de cloro y sosa cáustica, mediante tecnología de cátodo de mercurio, consiste de dos celdas electroquímicas; una de electrolización y otra de descomposición.

Primero se hace pasar una salmuera de sodio o potasio a través de la celda de electrolización, que contiene un ánodo suspendido de titanio y un cátodo formado por mercurio metálico, el cual fluye a través de la celda junto con la salmuera, el gas cloro formado en el ánodo se colecta para darle un tratamiento posterior. Ahí se llevan a cabo las siguientes reacciones químicas:



La amalgama Na-Hg pasa como ánodo a la celda de descomposición, en donde una solución de grafito en hidróxido de sodio, es el cátodo. Al adicionar agua a la celda se produce hidróxido de sodio (sosa cáustica), mercurio elemental que es recirculado a la celda de electrolización e hidrógeno gaseoso como subproducto.

El principal punto de emisión de mercurio en este proceso se localiza en el sistema de extracción de aire a la salida de las celdas. Otro posible punto estaría en el flujo de hidrógeno, el cual esta saturado de vapor y acarrea partículas líquidas pequeñas de mercurio.

Las emisiones de mercurio dependen de las técnicas de control utilizadas. Generalmente se utilizan lavadores de gases y adsorbedores de carbón activado (USEPA, 1997b).

En México, el 33% de la producción de cloro se realiza utilizando celdas de mercurio. En la tabla 4.3 se muestra la producción de 1995 a 1999.

**Tabla 4.3 Producción de cloro y sosa cáustica con celdas de mercurio**

Año	Mercurio usado (ton Hg/año)	Producción de cloro (ton/año)
1995	5.258	121 846
1996	5.174	131 211
1997	5.403	134 786
1998	5.658	141 446
1999	5.767	133 352
2002 <sup>1</sup>	6.203	150 401

<sup>1</sup>Datos extrapolados a partir de información de años anteriores  
Fuente: ANIQ, 2000.

Existen ocho principales compañías fabricantes de cloro y sosa, en total tienen 11 plantas productoras, distribuidas en diferentes estados de la república como se indica a continuación: cuatro plantas en el Estado de México, tres en Nuevo León, dos en Veracruz, una en Jalisco y otra en Tlaxcala (ANIQ, 2001).

Según la Industria Mexicana de Cloro-Alcali (IMCA), en 1967 se instaló la última planta de este tipo y, debido a que ya existen otros métodos de producción de cloro, no existen planes de instalación de ninguna planta nueva con esta tecnología (ANIQ, 2000).

#### 4.2.2 Producción de coque

El carbón mineral utilizado como materia prima para la producción de coque en México, es del tipo bituminoso y sub-bituminoso, conteniendo ambos mercurio de manera natural. Aunque aún no se han hecho análisis para conocer el contenido preciso, se sabe que dicho mercurio es emitido como contaminante durante la coquización, debido principalmente a las altas temperaturas (1000°C) que se utilizan en los hornos de producción.

En la actualidad funcionan cuatro plantas coquizadoras con recuperación de subproductos (3 en Coahuila y una en Sonora) y dos con hornos de colmena (localizadas en Coahuila), (SE, 1999). En la siguiente tabla se presentan datos de producción de coque en México.

**Tabla 4.4 Producción de coque**

Año	Producción (ton/año)
1994	1,984,730
1995	2,147,602
1996	2,184,364
1997	2,139,376
1998	2,202,558
1999	2,219,845
2002 <sup>1</sup>	2,349,763

<sup>1</sup>Datos extrapolados a partir de información de años anteriores.  
Fuente: INEGI, 2000.

En la literatura se reporta que las plantas productoras de coque utilizan como equipo de control de emisiones a la atmósfera: casas de filtros, precipitadores electrostáticos y lavadores de gases (USEPA, 1997b). Sin embargo, no se conoce para México, la existencia o eficiencia de estos equipos, por lo que, para el cálculo de emisiones, no se considerará control alguno.

#### 4.2.3 Combustión de carbón

En México, el principal uso de carbón como combustible es en plantas carboeléctricas (SE,1999). En estas, el mercurio es emitido como contaminante en pequeñas cantidades durante el proceso de combustión, por efecto de las altas temperaturas que se alcanzan.

Las emisiones de mercurio dependen directamente del contenido del mismo en el carbón que se quema, pero también dependen del proceso utilizado, ya que en muchos casos el carbón es lavado antes de ser alimentado a los quemadores de las calderas. Este pretratamiento puede disminuir hasta en un 21% el contenido de mercurio (USEPA,1997b).

Además del pretratamiento, en algunos procesos se utilizan equipos de control de emisiones como pueden ser precipitadores electrostáticos, lavadores de gases y filtros de bolsa. La eficiencia de los equipos de control de emisiones es específica



de cada proceso debido a los arreglos que se pueden tener.

En el país solo el 6% de la electricidad es producida utilizando carbón como combustible, existen dos plantas carboeléctricas operando actualmente, ambas localizadas en el estado de Coahuila (tabla 4.5).

**Tabla 4.5 Generación de energía en Carboeléctricas**

Año	Generación GW-h	Consumo de carbón $\times 10^3$ ton
1995	13 422.3	7 550
1996	16 611.5	8 984
1997	16 479.4	8 853
1998	16 823.0	9 345
1999	16 690.8	9 096
2002 <sup>1</sup>	19 375.5	10 491

<sup>1</sup>Datos extrapolados a partir de información de años anteriores.  
Fuente: SE, 1999.

En estas plantas se utiliza como combustible principalmente carbón del tipo subbituminoso, que contiene mercurio como elemento traza y cuya cantidad varía dependiendo del yacimiento del que es extraído, aún no se han hecho análisis del contenido de mercurio en dicho carbón.

El carbón extraído en México recibe un pretratamiento de lavado antes de ser quemado (Comisión de Fomento Minero, 1971), y las plantas cuentan con precipitadores electrostáticos para el control de sus emisiones.

#### 4.2.4 Quema de combustóleo, diesel y gas natural

Los procesos en los cuales se queman estos combustibles en cantidades significativas, y que serán tomados en cuenta en este trabajo, son:

**Combustión en termoeléctricas.** El combustible se quema en calderas que constan, en general, de un sistema de inyección, un sistema de suministro de aire, quemadores, horno y un sistema convectivo de transferencia de calor.

Cuando el combustible empleado contiene mercurio como impureza, este puede ser emitido en la zona de combustión, donde se vaporiza y sale junto con los gases de combustión como elemento traza (USEPA, 1997b). En los Estados Unidos se utilizan casas de filtros y precipitadores electrostáticos como equipo de control de emisiones, sin embargo estos tienen una baja eficiencia en la recolección de mercurio, por lo que actualmente se está probando la complementación de dichos equipos con sustancias adsorbentes que mejoren su eficiencia (A&WMA, 2002).

En México las plantas termoeléctricas utilizan como combustibles: diesel, combustóleo y gas natural, el consumo anual de los mismos se muestra en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Combustible utilizado en termoeléctricas.**

Año	Generación GW-h	Combustóleo x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Diesel x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Gas natural x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>
1995	86 222	16 707	270	256 552
1996	89 100	17 243	246	288 325
1997	101 454	19 243	343	255 421
1998	113 483	21 676	500	411 546
1999	120 508	21 989	366	463 868
2002 <sup>1</sup>	159 760	26 870	568	604 069

<sup>1</sup>Datos extrapolados a partir de información de años anteriores.

Fuente: SE, 1999.

Actualmente se encuentran en operación 18 plantas termoeléctricas, ubicadas en 13 estados de la República Mexicana (CFE,1993):

**Producción de cemento.** La manufactura del cemento se puede dividir en cuatro pasos principales: adquisición y manejo del material, pretratamiento, tratamiento térmico y trituración final del cemento. El tratamiento térmico se lleva a cabo en hornos rotatorios, en los cuales se calcina la materia prima.

En México se utiliza diesel, combustóleo y combustible alterno para proporcionar el calor requerido en la calcinación (tabla 4.7). El mercurio se encuentra presente de manera natural en los dos primeros y como impureza en el último de ellos; aunque en ningún caso se conoce en que proporción.

El mercurio que contienen los combustibles es emitido como contaminante durante el tratamiento térmico, debido a que el metal se evapora por efecto de las altas temperaturas que se manejan (mayor que 350 °C) (USEPA, 1997b).

**Tabla 4.7 Combustible utilizado en la producción de cemento en 1999.**

Producción de cemento (ton)	Combustóleo (m3)	Diesel (m3)	Combustibles alternos (m3)
19,330,136	989,320	4,930	221,160

Fuente: DGGIA,1999.

La industria del cemento tiene en operación 29 plantas, localizadas en 17 estados de la república. El estado de Hidalgo cuenta con 5 plantas, siendo el mayor productor, posteriormente los estados de Coahuila y Nuevo León con 3, en Sonora, Morelos y Baja California Norte se tienen 2 plantas por estado y finalmente los estados de Guanajuato, Tabasco, Sinaloa, Oaxaca, Guerrero, Colima, Tamaulipas, Yucatán, Estado México, Puebla y San Luis Potosí que cuentan con una planta cada uno (DGGIA, 1999).

**Producción de cal.** La cal o cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>), es producida por la calcinación de la calcita, la cual contiene 50% o más de carbonato de calcio (USEPA, 1997b).

El proceso de manufactura se lleva a cabo en los siguientes cinco pasos: acarreo de la roca de calcio, preparación de la materia prima para la calcinación, calcinación de la roca, hidratación y transferencia del producto final para almacenamiento (USEPA,1997b).

En México se utiliza combustibles como diesel, gas natural y combustóleo para proporcionar la energía para la calcinación. La producción de cal se realiza en 12 plantas, localizadas en 9 estados del país: tres en Puebla, dos en Queretaro, y las restantes en Aguascalientes, Estado de México, Jalisco, Morelos, Oaxaca, Sonora y Yucatan (una por estado) (DGGIA, 1999).

En la tabla 4.7 se muestran el consumo de combustible utilizado en 1999 para la producción de cal.

**Tabla 4.8 Producción de cal en 1999.**

Cal producida (ton)	Combustible empleado (m <sup>3</sup> )		
	Combustóleo	Diesel	Gas natural
801,117	68,084	723	31,769,070

Fuente: DGGIA,1999.

No se precisa el porcentaje de energía producida por cada combustible utilizado, pero considerando su poder calorífico se calcula lo siguiente:

**Tabla 4.9 Producción de cal por tipo de combustible**

Combustible	Poder calorífico <sup>1</sup> (MJ/l)	Cal producida (ton/año)
Combustóleo	40.20	621,667
Diesel	36.03	5,848
Gas natural	24.00	173,522

<sup>1</sup> valores obtenidos de SE, 1999.

El paso más importante con respecto a las emisiones de mercurio es la calcinación, donde la temperatura puede alcanzar hasta 1820 °C.

Para controlar las emisiones provenientes de los hornos de calcinación se utilizan ciclones, conjuntamente con casas de bolsas o precipitadores electrostáticos, también se pueden utilizar lavadores tipo venturi. Sin embargo, no se sabe que tan bien pueden controlar las emisiones de mercurio en fase vapor estos equipos.

#### 4.2.5 Fundición primaria de plomo

El plomo se extrae principalmente del sulfuro de plomo, también conocido como galena (PbS), que contiene pequeñas cantidades de cobre, hierro, zinc y elementos traza como el mercurio.

La recuperación de plomo de la galena consiste de tres pasos: oxidación, reducción y refinamiento, siendo de importancia para este trabajo solo las dos primeras, en donde es posible la liberación de mercurio.

En la oxidación, el sulfuro de plomo se convierte en óxido de plomo a temperaturas alrededor de los 1000°C, formándose gases que contienen entre otras sustancias óxido de azufre y pequeñas cantidades de mercurio. Se estima que gran parte del mercurio presente en el mineral se emite durante este paso, como óxido de mercurio o en su forma elemental. Posteriormente, la reducción se lleva a cabo en hornos que requieren temperaturas de 1600°C, en donde el mercurio remanente es liberado (USEPA, 1997b).

Para controlar las emisiones de este proceso se utilizan ciclones, solos o en serie con otro equipo (filtros de bolsa o precipitadores electrostáticos) (USEPA, 1997b).

La producción de plomo en México disminuyó alrededor de 50,000 ton de 1997 a 1999, de acuerdo con datos reportados por la SECOFI, (1999) (tabla 4.10).

**Tabla 4.10 Producción de plomo**

Año	Producción (ton)
1995	164,348
1996	173,831
1997	174,661
1998	166,059
1999	125,656
2002 <sup>1</sup>	119,397

<sup>1</sup> Datos extrapolados a partir de información de años anteriores.

Fuente: SECOFI, 1999.

No se conocen las emisiones de mercurio en los procesos de producción del plomo, pero en 1999, una compañía fundidora reportó concentraciones de mercurio de 20 a 25 ppm en el concentrado que recibe de minas de Zacatecas para tratamiento final (DGGIA, 2000). De acuerdo con la USEPA (1997b), en Estados Unidos la galena tiene una concentración de 0.2 ppm de mercurio.

#### 4.2.6 Fundición primaria de cobre

El cobre se recupera por métodos hidrometalúrgicos y fundición, a partir de un mineral compuesto principalmente por sulfuros de cobre y hierro.

El proceso de fundición utiliza hornos de inducción a temperaturas entre 1000 y 1300°C. Los gases formados durante este proceso contienen trazas de mercurio, debido a que éste se encuentra presente en el mineral de cobre y se vaporiza a altas temperaturas.

En México, la producción anual de cobre se ha situado entre 333,000 y 390,000 toneladas de cobre en los últimos años (tabla 4.11). El 83.5% del cobre es recuperado por fundición en los centros mineros de Cananea y Nacozari de García, Sonora, en donde el sistema de control de emisiones está compuesto por una cámara de enfriamiento y recuperación de polvo (cámara de rocío), un ducto de material refractario y la chimenea de salida (Society of Economic Geologist, 1985).

**Tabla 4.11 Producción de cobre**

<b>Año</b>	<b>Producción (ton)</b>
1995	333,565
1996	340,710
1997	390,536
1998	384,641
1999	381,184
2002 <sup>1</sup>	443,493

<sup>1</sup>Datos extrapolados a partir de información de años anteriores.  
Fuente: SECOFI, 1999.

El contenido de mercurio en el mineral de cobre que se procesa no se ha determinado con precisión, sin embargo una de las empresas fundidoras en México determinó una concentración de 1.4 ppm de mercurio en el concentrado de cobre (DGGIA, 2000).

#### **4.2.7 Fundición primaria de zinc**

El zinc al igual que el plomo y el cobre es recuperado por procesos que incluyen la fundición del concentrado del metal.

El mercurio contenido en el mineral procesado es liberado en los gases provenientes de los hornos de fundición. Las emisiones son controladas por lavadores de gases (cámaras de rocío).

La producción de zinc ha tenido un comportamiento irregular, en 1997 fue de 379,251 en 1998 de 395,390 ton, disminuyendo en 1999 a 166,059 ton (SECOFI, 1999). De acuerdo con dos empresas fundidoras en México, han medido concentraciones de 5 a 10 ppm de Hg en el concentrado zinc (DGGIA, 2000).

#### **4.2.8 Usos artesanales y culturales**

En una encuesta realizada para este trabajo en el mercado herbolario de Sonora, en la Ciudad de México se encontraron 31 puestos que distribuyen mercurio líquido en recipientes de vidrio, los contenidos van de 1 a 5 ml (de 13 a 67g). El mercurio es combinado con agua y se esparce en habitaciones o negocios, existiendo la creencia popular de que atrae la buena suerte; esta aplicación es importante porque existe contacto directo de las personas y este metal.

#### **4.2.9 Disposición de lámparas fluorescentes**

En la actualidad, las lámparas fluorescentes son ampliamente utilizadas debido a sus múltiples aplicaciones y alta eficiencia. Funcionan por una descarga eléctrica en atmósfera de vapor de mercurio, pudiéndose presentar problemas durante su manejo y disposición, cuando estas se rompen.

Existen diferentes tipos de lámparas que difieren principalmente por su tamaño y

capacidad de iluminación, en general se les puede clasificar en: fluorescentes de tubo largo y fluorescentes compactas. Las principales compañías fabricantes que operan en México son: General Electric, Osram y Phillips. El contenido de mercurio depende del tipo de lámpara; las de tubo largo, de 1.2 a 1.5 m contienen de 35 a 50 mg; mientras que las compactas alrededor de 10 mg (CANAME, 2000).

En México, en los últimos años se han producido anualmente entre 25 y 40 millones de lámparas fluorescentes (tabla 4.12). Después de su uso, generalmente se disponen junto con la basura municipal en rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto. Existen pequeños recicladores que de manera clandestina recuperan los tubos de vidrio de las lámparas, sin tener un control de las emisiones de mercurio al aire u otros medios.

**Tabla 4.12 Producción de lámparas y contenido de mercurio**

Año	Tipos de lámparas	Producción millones	Contenido Hg/unidad (mg)	Contenido total Hg (kg)
1996	Tubo largo	22	40	880
	Compactas (112/T8)	4	10	40
1997	Tubo largo	25	40	1000
	Compactas (112/T8)	5	10	50
1998	Tubo largo	27	35	945
	Compactas (112/T8)	6	10	60
1999	Tubo largo	30	30	900
	Compactas (112/T8)	7	5	35
2002 <sup>1</sup>	Tubo largo	37	30	1110
	Compactas (112/T8)	8	5	40

<sup>1</sup>Datos extrapolados a partir de información de años anteriores.

Fuente: CANAME, 2000.

#### 4.2.10 Disposición de instrumentos de medición

El mercurio es utilizado en la manufactura de termómetros y otros instrumentos de medición, debido a que posee un volumen de expansión uniforme y una tensión superficial alta; dichos instrumentos son muy precisos, lo que hace que se sigan utilizando aún en gran cantidad.

**Disposición de termómetros.** Los termómetros de mercurio se utilizan principalmente en el sector salud, laboratorios y en el hogar. Un termómetro clínico típico contiene alrededor de 0.5 gramos de mercurio y uno largo de laboratorio puede tener 3.0 o más gramos (EPA, 1997c).

Aunque el contenido de mercurio en un solo termómetro parece ser muy pequeño, la cantidad total contenida en todos los termómetros que se consumen puede ser significativa; sobre todo cuando estos se rompen y el mercurio se dispersa libremente.

En México la producción y venta de termómetros ha disminuido más del 50% de 1993 a 1999 (tabla 4.13), según datos de los censos económicos realizados por el INEGI en esos años (INEGI, 1993-1999), aunque no se indica que porcentaje de la

producción reportada corresponde a termómetros de mercurio.

**Tabla 4.13 Producción y venta de termómetros**

Año	Producción (pzas)	Venta (pzas)
1993	73829	79446
1999	23911	23580
2002 <sup>1</sup>	23911	23580

<sup>1</sup> Se supone la misma producción y venta que en 1999, porque no se tiene suficientes datos para una extrapolación.

Fuente: INEGI, 1993,1999

**Disposición de termostatos.** El mercurio elemental es utilizado en los interruptores eléctricos para termostatos, los cuales están constituidos por un pequeño tubo de vidrio con cables de contacto sellados en una de las terminaciones del tubo. Una fuerza mecánica externa activa el interruptor ocasionando que el mercurio fluya de un extremo del tubo al otro conduciendo la carga eléctrica.

Los interruptores que contienen mercurio (aproximadamente 3 gramos) han sido utilizados en termostatos por mas de 40 años, estos proporcionan precisión y confiabilidad en el control de la temperatura, requieren muy poco o ningún mantenimiento y no necesitan de una fuente de potencia (USEPA, 1997b).

La producción y venta de termostatos en México ha sido muy variable, la tabla 4.14 presenta los datos de los censos económicos para 1993 y 1999.

**Tabla 4.14 Producción y venta de termostatos**

Año	Producción (pzas)	Venta (pzas)
1993	9 336 824	9 336 824
1999	92 132	92 132
2002 <sup>1</sup>	92 132	92 132

<sup>1</sup> Se supone la misma producción y venta que en 1999, porque no se tiene suficientes datos para una extrapolación.

Fuente: INEGI, 1993,1999

La disposición de los termostatos al final de su vida útil se lleva a cabo en rellenos sanitarios.

Los rellenos sanitarios son diseñados para la disposición de residuos sólidos municipales, sin embargo hay una gran cantidad de residuos peligrosos que se disponen de manera inadecuada en estos sitios, como son los desechos que contienen mercurio (lámparas fluorescentes, termómetros, pilas, amalgamas dentales, etc.). El mercurio es emitido como elemento traza en el biogás formado en los rellenos, aún cuando este haya sido cubierto (USEPA, 1997c).

En México hay 97 instalaciones para la disposición de residuos sólidos municipales, entre los que se incluyen rellenos controlado, no controlado y tiraderos a cielo abierto (tabla 4.15).

**Tabla 4.15 Instalaciones para la disposición de residuos sólidos municipales**

Concepto		1995	1996	1997	1998	1999 <sup>1</sup>	2002 <sup>1</sup>
Relleno controlado	Número	30	31	46	66	81	187
	Capacidad (Miles ton)	5,952.00	8,573.00	10,269.99	15,877.14	20,854.56	53,237.12
Relleno no controlado	Número	61	61	51	31	26	0
	Capacidad (Miles ton)	2,555.00	2,606.00	1,657.48	1,007.49	558.00	0
Tiradero a cielo abierto	Número	nd	nd	nd	nd	43	9
	Capacidad (Miles ton)	21,796.07	20,564.03	17,125.87	13,458.96	11,122.40	2586.50
Total	Número	91	92	97	97	150	196
	Capacidad (Miles ton)	30,303.07	31,743.03	29,053.34	30,343.59	32,534.96	55823.62

<sup>1</sup> Datos extrapolados a partir de información de años anteriores.

Fuente: SEMARNAP, 1999

#### 4.2.11 Incineración de desechos médicos

Los incineradores de desechos médicos son unidades de 0.6 a 11 ton/día de desechos infecciosos y no infecciosos, generados en establecimientos que involucran actividades de investigación, hospitales, clínicas, consultorios dentales, clínicas veterinarias, laboratorios médicos y escuelas de medicina y veterinaria, entre otros. Los desechos médicos que contienen mercurio son: lámparas fluorescentes, baterías, termómetros y piezas dentales con amalgamas (USEPA, 1997b).

Existen 43 empresas autorizadas para incineración de desechos médicos en la República Mexicana, las cuales cuentan con 56 equipos y una capacidad instalada de 28,774 kg/h (SEMARNAP, 1999).

#### 4.2.12 Crematorios

La volatilización del mercurio de las amalgamas dentales durante la cremación de cuerpos humanos es una fuente potencial de emisiones de mercurio al aire.

En el Distrito Federal hay nueve crematorios, con un total de 18 hornos, cada uno de los cuales crema entre cuatro y siete cadáveres diarios. Los servicios crematorios presentan un incremento aproximado de 30% anual (INE, 2000c).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## Capítulo 5 Metodología

En el capítulo dos, sección 2.2.2, se presentaron los diferentes métodos de estimación indirecta, mencionando sus ventajas y desventajas de carácter técnico y económico.

En este capítulo se propone la metodología para estimar las emisiones de mercurio de las fuentes seleccionadas que se describen en el capítulo 4.

### 5.1 Metodología de estimación

Debido a que no se han hecho mediciones para conocer la mayoría de las emisiones que se desean conocer en este trabajo, a continuación se establecerán los métodos indirectos de estimación que se consideran más adecuados para cada una de las fuentes identificadas.

**Producción de cloro y sosa cáustica (Pcl).** En la manufactura de cloro y sosa cáustica, como se mencionó en la sección 4.2.1, se identifican dos puntos principales de emisiones de mercurio: el sistema de ventilación a la salida de las celdas y en la corriente de hidrógeno.

Considerando la información de proceso disponible, se emplearán factores de emisión; basados en la tasa de producción, como método de estimación. Estos son:

- para el sistema de ventilación: 0.05 kg de mercurio por cada Mg<sup>1</sup> de cloro producido (0.05 kg Hg/ton cloro), publicado por la EPA (USEPA, 2002) con una confiabilidad E.
- para la corriente de hidrógeno: 0.0017 kg/Mg<sup>1</sup> de cloro producido (0.0017 kg Hg/ton cloro), también con una confiabilidad E (USEPA, 2002).

De donde, el total de mercurio emitido por la producción de cloro y sosa cáustica se estima con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} E_{Pcl} &= \text{Producción de cloro (ton/año)} * (0.0017 + 0.05) \text{ (kg Hg/ton cloro)} \\ &= \text{Producción de cloro (ton/año)} * 5.17 \times 10^{-5} \text{ (ton Hg/ton cloro)} \end{aligned} \quad (5.1)$$

<sup>1</sup> El factor de conversión utilizado es 1 Mg = 1 ton = 1000 kg

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el estudio *Diagnóstico del mercurio en México (DMM)*, se empleó un factor de emisión de la EPA de  $4.12 \times 10^{-5}$  ton Hg/ton cloro, el cual presupone el uso de equipo de control dentro de la industria. Sin embargo, como no es posible confirmar la existencia y eficiencia de tal equipo, se recomienda emplear el factor de la ecuación (5.1).

**Producción de coque (Pco).** Considerando que no se dispone de información acerca del contenido de mercurio, ni la cantidad de carbón empleado en México para la producción de coque, la estimación de emisiones de mercurio de este proceso se realiza a partir de un factor de emisión basado en el valor de producción:

- la Agencia Ambiental Europea propone un intervalo de 0.004 a 0.4 g Hg/ton de coque producido (EEA, 2001), con una confiabilidad E.

Ya que no se conoce el equipo de control utilizado en México se emplea el valor máximo de este intervalo ( $4 \times 10^{-7}$  ton Hg/ton coque).

Se prefirió utilizar un valor más alto que el considerado en el DMM ( $1.36 \times 10^{-7}$  ton Hg/ton coque), ya que este último está referido a la producción de coque en Estados Unidos y considera el uso de equipo de control de emisiones.

Las emisiones se estiman de la siguiente forma:

$$E_{Pco} = \text{Producción coque (ton coque/año)} * 4 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/ ton coque)} \quad (5.2)$$

**Combustión de carbón (Ccar).** De acuerdo con lo descrito en la sección 4.2.3, para calcular de manera indirecta las emisiones de mercurio en las plantas carboeléctricas se supone que:

- el tipo de carbón utilizado es bituminoso (30%) y sub-bituminoso (70%), con un contenido de mercurio de 0.21 g/ton y 0.10 g/ton respectivamente, (USEPA, 1997b);
- el carbón es lavado (removiendo 21% del mercurio contenido) (USEPA, 1997b) y
- los equipos de control tienen una eficiencia de por lo menos 95%.

Se prefiere emplear contenidos de mercurio específicos para cada tipo de carbón, en lugar del valor general (0.25 g Hg/ton carbón) referido en el DMM.

Por lo tanto, para calcular las emisiones de mercurio se realiza el siguiente balance de materiales:

$$E_{Ccar} = \text{consumo de carbón (ton/año)} [0.3 * 0.21 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg /ton carbón bituminoso)} + 0.7 * 0.10 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg/toncarbón subbituminoso)}] * 0.79 * 0.05$$

$$= \text{consumo (ton carbón/año)} * 5.253 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/ton carbón)} \quad (5.3)$$

**Combustión en termoeléctricas (Cter).** En este proceso las emisiones de mercurio dependen del contenido de este metal en el combustible y del equipo de control utilizado. Debido a que no se conocen estos datos específicamente para México, el método que resulta más adecuado es el factor de emisión, para cuya aplicación se supone lo siguiente:

- una concentración de mercurio de 0.04 g Hg/ton combustible para el combustóleo y diesel (USEPA 1997b), y una densidad de 1.003 ton/m<sup>3</sup> (Perry,1992).
- un contenido de 0.12 g Hg/ton gas para el gas natural (USEPA 1997b), y una densidad de 0.609 ton/m<sup>3</sup> (CFE, 2003).
- que todo el mercurio contenido en los combustibles se evapora en la zona de combustión;
- no se considera la posible existencia de equipo de control.

Las emisiones de mercurio se calculan según la siguiente ecuación:

$$E_{Cter} = [(\text{consumo de combustóleo y diesel}) (\text{m}^3/\text{año}) * 1.003 (\text{ton}/\text{m}^3) * 4 \times 10^{-4} (\text{ton Hg}/\text{ton comb})] + [(\text{consumo gas natural}) (\text{m}^3/\text{año}) * 0.609 (\text{ton}/\text{m}^3) * 1.2 \times 10^{-7} (\text{ton Hg}/\text{ton gas})] \\ + [(\text{consumo combustóleo y diesel}) (\text{m}^3/\text{año}) * 4.01 \times 10^{-8} (\text{ton Hg}/\text{m}^3 \text{ comb})] + [(\text{consumo gas natural}) (\text{m}^3/\text{año}) * 7.3 \times 10^{-8} (\text{ton Hg}/\text{m}^3 \text{ gas})] \quad (5.4)$$

En el estudio DMM no se estiman las emisiones por esta fuente.

**Producción de cemento (Pcem).** De acuerdo con lo descrito en la sección 4.2.4, para el cálculo de las emisiones debidas a la producción de cemento, se requiere conocer la cantidad de mercurio en los combustibles empleados, debido a que no se dispone de esta información para México, se considera un factor de emisión de  $6.5 \times 10^{-5}$  kg de mercurio por ton de cemento producido (mismo factor utilizado en el DMM), el cual es reportado por la USEPA (1997a), y considera el uso de combustóleo con la utilización de equipo de control de emisiones (filtros de bolsas y lavadores venturi) tiene una confiabilidad E, y las emisiones se calculan de la siguiente forma:

$$E_{Pcem} = \text{Producción de cemento (ton cemento/año)} * 6.5 \times 10^{-4} (\text{ton Hg}/\text{ton cemento}) \quad (5.5)$$

**Producción de cal (Pcal).** Las emisiones de mercurio en la producción de cal dependen del contenido de mercurio en los combustibles y del equipo de control utilizado.

En este estudio, caso para el cálculo de dichas emisiones se emplean los siguientes factores de emisión (en el DMM no se realizan estimaciones por esta fuente):

- $6.8 \times 10^{-9}$  ton de mercurio por ton de cal producida, empleando diesel o combustóleo. Este valor es reportado por la EPA (1997b), y corresponde a emisiones en hornos que usan coque de petróleo y equipo de control combinado (ciclón y casa de bolsas); tiene una confiabilidad E
- $1.36 \times 10^{-9}$  ton de mercurio por ton de cal producida cuando se emplea gas natural, este factor es propuesto por la EPA (1997b), para cuando se controlan las emisiones con casas de bolsas, y tiene una confiabilidad E.

Las emisiones se calculan como sigue:

$$E_{P_{cal}} = \text{producción cal con diesel o combustóleo (ton/año)} * 6.8 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/ton cal)} + \text{producción cal con gas natural (ton/año)} * 1.36 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/ton cal)} \quad (5.6)$$

**Fundición primaria de plomo (Fpb).** Las emisiones de mercurio por la fundición primaria de plomo dependen del contenido del mismo en el mineral procesado. Para estimar dichas emisiones, mediante un balance de materiales, se considera lo siguiente:

- un contenido de mercurio de 25 ppm ( $25 \times 10^{-3}$  g Hg/ton plomo) (valor más alto medido para México, suponiendo el peor escenario, ver sección 4.2.5), en lugar del valor para Holanda (3 ppm) utilizado en el DMM,
- la utilización de cámaras de rocío (lavador de gases), para el cual se supone una eficiencia de remoción de 0.957 (USEPA, 1997c).

Las emisiones se estiman de la siguiente forma:

$$E_{F_{pb}} = \text{Producción plomo (ton/año)} * 25 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/ton plomo)} * (1 - 0.957) = \text{Producción plomo (ton/año)} * 1.075 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg /ton plomo)} \quad (5.7)$$

**Fundición primaria de cobre (Fcu).** La principal fuente de emisión de mercurio en el proceso de recuperación del cobre, es en los hornos de fundición y depende del contenido de mercurio en el mineral procesado, por lo que para estimar las emisiones en esta fuente se realiza un balance de materia, tomando en cuenta que:

- el contenido de mercurio es de 1.4 ppm ( $1.4 \times 10^{-6}$  ton Hg/ton de cobre), medido en México ver sección 4.2.6, en lugar del valor para Holanda (0.1 ppm), empleado en el DMM,

- una eficiencia de remoción en el equipo de control utilizado (lavador de gases, similar al empleado en la producción de plomo), es de 0.957 según la USEPA (1997b).

Las emisiones se calculan a partir del balance:

$$\begin{aligned} E_{Fcu} &= \text{Producción de cobre (ton/año)} * 1.4 \text{ g Hg/ton cobre} * (1-0.957) \\ E_{Fcu} &= \text{Producción de cobre (ton/año)} * 6.02 \times 10^{-8} \text{ (ton Hg/ton cobre)} \end{aligned} \quad (5.8)$$

**Fundición primaria de zinc (Fzn).** El contenido de mercurio en el mineral de zinc es determinante en la concentración del mismo en las emisiones generadas durante el proceso de fundición. La estimación de dichas emisiones se hace mediante un balance de materia, considerando:

- un contenido de mercurio de 10 ppm ( $10 \times 10^{-3}$  g Hg/ton zinc), suponiendo valor máximo medido en México (ver sección 4.2.7).
- 0.957 como eficiencia de remoción por el uso de lavador de gases (cámara de rocío similar a la empleada en la fundición de plomo y cobre), para el control de emisiones (USEPA, 1997b).

$$\begin{aligned} E_{Fzn} &= \text{Producción de zinc (ton/año)} * 10 \times 10^{-3} \text{ ton Hg/ton zinc} * (1-0.957) \\ &= \text{Producción de zinc (ton/año)} * 4.3 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/ton zinc)} \end{aligned} \quad (5.9)$$

**Usos artesanales y culturales (Uart).** Las emisiones de mercurio debidas a su uso en actividades religiosas y/o culturales en México, se estiman mediante un balance de materiales, suponiendo:

- que un 6% del mercurio que se riega, se evapora directamente a la atmósfera y el restante se combina con polvo u otros desechos sólidos, disponiéndose con la basura municipal (USEPA 1997b).

Las emisiones al aire ( $E_a$ ) y como residuo sólido ( $E_r$ ) serán:

$$\begin{aligned} E_{aUart} &= \text{consumo mercurio (ton/año)} * 0.06 \\ E_{rUart} &= \text{consumo mercurio (ton/año)} * 0.94 \end{aligned} \quad (5.10)$$

**Disposición de lámparas fluorescentes (Dlam).** Para estimar la cantidad de mercurio que se emite por la disposición de lámparas fluorescentes se toman en cuenta los siguientes datos:

- todas las lámparas que se consumen se rompen accidentalmente o durante su disposición (camión recolector),

- el 6% del mercurio es emitido a la atmósfera cuando las lámparas se rompen y durante su transporte (USEPA, 1997c),
- el 94% del mercurio en las lámparas se dispone como residuo sólido municipal (USEPA, 1997c).

Las emisiones al aire ( $E_a$ ) y a otros medios ( $E_r$ ) son estimadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{a_{Diam}} = L. \text{ tubo largo (pzas)} * 30 \text{ (mg Hg/pza)} * 0.06 + L. \text{ compactas (pzas)} * 5 \text{ (mg Hg/pza)} * 0.06$$

$$= L. \text{ tubo largo (pzas)} * 1.8 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/pzas)} + L. \text{ compactas (pzas)} * 3 \times 10^{-10} \text{ (ton Hg/pzas)}$$

$$E_{r_{Diam}} = L. \text{ tubo largo (pzas)} * 30 \text{ (mg Hg/pza)} * 0.94 + L. \text{ compactas (pzas)} * 5 \text{ (mg Hg/pza)} * 0.94$$

$$= L. \text{ tubo largo (pzas)} * 2.82 \times 10^{-8} \text{ (ton Hg/pzas)} + L. \text{ compactas (pzas)} * 4.7 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/pzas)}$$

**Disposición de termómetros ( $D_{ter}$ ).** Las emisiones debidas a la disposición de termómetros, se hace tomando en cuenta las siguientes suposiciones:

- un contenido promedio de 1.5 g de mercurio por termómetro (USEPA, 1997c);
- que todos los termómetros que se venden anualmente se rompen y se disponen en rellenos sanitarios o en tiraderos a cielo abierto;
- que el 6% del mercurio contenido se volatiliza y emite al aire cuando se rompe una pieza
- que el 94% queda mezclado con los residuos, emitiéndose posteriormente a cuerpos de agua o suelo dentro de los rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto (USEPA, 1997c).

Las emisiones al aire y a otros medios son estimadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_{a_{Dter}} = \text{termómetros (pzas/año)} * 1.5 \text{ (g Hg/pza)} * 0.06$$

$$= \text{termómetros (pzas/año)} * 9 \times 10^{-8} \text{ (ton Hg/pzas)}$$

$$E_{r_{Dter}} = \text{termómetros (pzas/año)} * 1.5 \text{ (g Hg/pza)} * 0.94$$

$$= \text{termómetros (pzas/año)} * 1.41 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg/pzas)}$$

(5.12)

**Disposición de termostatos ( $D_{tem}$ ).** Las emisiones de mercurio por la disposición de termostatos se hace utilizando las suposiciones siguientes:

- que todos los termostatos vendidos contienen en promedio 3 g de mercurio por pieza (USEPA, 1997c);

- que los interruptores se rompen al llegar relleno sanitario o tiradero a cielo abierto;
- que el 6% del mercurio contenido se emite a la atmósfera y el resto se queda mezclado con los residuos (USEPA, 1997c).

Las emisiones al aire y a otros medios son estimadas mediante las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$\begin{aligned}
 E_{a_{Dtem}} &= \text{termostatos (pzas)} * 3.0 \text{ (g Hg/pza)} * 0.06 \\
 &= \text{termostatos (pzas)} * 1.8 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/pzas)} \\
 E_{r_{Dtem}} &= \text{termostatos (pzas)} * 3.0 \text{ (g Hg/pza)} * 0.94 \\
 &= \text{termostatos (pzas)} * 2.82 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg/pzas)}
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

**Incineración de desechos médicos (Ides).** Para estimar las emisiones de mercurio debidas a la incineración de desechos médicos, se usa el siguiente factor de emisión:

- $1.3 \times 10^{-3}$  kg Hg/ton de desecho, que considera el uso de lavador húmedo de gases como equipo de control (USEPA, 1997a).

Por considerar mayor similitud entre las tecnologías utilizadas en Estados Unidos y México se utiliza el factor de USEPA en lugar del factor empleado en el DMM ( $9.6 \times 10^{-4}$  kg Hg/ton desecho para Holanda).

Las emisiones se estiman como:

$$E_{ides} = \text{Capacidad real operación (ton/año)} * 1.3 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg/ton residuos)}
 \tag{5.14}$$

**Crematorios (cre).** Para conocer las emisiones de mercurio debidas a la cremación de cuerpos humanos, se utiliza un factor de emisión reportado por la USEPA (1997b), igual a  $1.5 \times 10^{-3}$  kg/cuerpo cremado, mismo que es empleado en el DMM.

Las emisiones se expresan como:

$$E_{cre} = \text{Cuerpos cremados/año} * 1.5 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg/año)}
 \tag{5.15}$$

## 5.2 Resumen de metodología propuesta

En la tabla 5.1 se presenta de manera condensada la metodología propuesta en cada fuente, los valores empleados para cada cálculo y la confiabilidad reportada para los factores de emisión.

**Tabla 5.1 Metodología y factores de emisión propuestos**

Fuente	Factor de emisión	Observaciones	Confiabilidad <sup>1</sup>
Producción de cloro y sosa cáustica	$5.17 \times 10^{-5}$ ton Hg/ton cloro	obtenido mediante valor reportado	E
Producción de coque	$4 \times 10^{-7}$ ton Hg/ton coque	mediante valor reportado	E
Combustión en carbo - eléctricas	$5.25 \times 10^{-9}$ ton Hg/ton	mediante balance de materia	
Combustión en termoelectricas	$4.01 \times 10^{-8}$ ton Hg/m <sup>3</sup> combustóleo $7.3 \times 10^{-9}$ ton Hg/m <sup>3</sup> gas natural	mediante balance de materia	
Producción de cemento	$6.5 \times 10^{-8}$ ton Hg/ton cemento	mediante valor reportado	E
Producción de cal	$6.8 \times 10^{-9}$ ton Hg/ton cal-combustóleo $1.36 \times 10^{-9}$ ton Hg/ton cal-gas natural	mediante valor reportado	E E
Fundición primaria de plomo	$1.075 \times 10^{-5}$ ton Hg/ton plomo	mediante balance de materia	
Fundición primaria de cobre	$6.02 \times 10^{-8}$ ton Hg/ton cobre	mediante balance de materia	
Fundición primaria de zinc	$4.3 \times 10^{-7}$ ton Hg/ton zinc	mediante balance de materia	
Usos artesanales y culturales	0.06 aire 0.94 otros medios	mediante cálculos ingeniería	
Disposición de lámparas fluorescentes	$1.8 \times 10^{-9}$ ton Hg/pzas tubo largo (aire) $3 \times 10^{-10}$ ton Hg/pzas compactas (aire) $2.8 \times 10^{-6}$ ton Hg/pzas tubo largo (otros medios) $4.7 \times 10^{-9}$ ton Hg/pzas compactas (otros medios)	mediante cálculos ingeniería	
Disposición de termómetros	$9 \times 10^{-8}$ ton Hg/pza (aire) $1.41 \times 10^{-6}$ ton Hg/pza (otros medios)	Cálculos ingeniería	
Disposición de termostatos	$1.8 \times 10^{-7}$ ton Hg/pza (aire) $2.82 \times 10^{-6}$ ton Hg/pza (otros medios)	Cálculos ingeniería	
Incineración de desechos médicos	$1.3 \times 10^{-5}$ ton Hg/ton residuo	Factor de emisión	E
Crematorios	$1.5 \times 10^{-6}$ ton Hg/ año	Factor de emisión	E

<sup>1</sup>Solo para valores reportados por la USEPA.



# Capítulo 6

## Estimación de emisiones

En este capítulo se estimarán las emisiones de mercurio de las fuentes consideradas relevantes para México, utilizando la metodología propuesta en el capítulo anterior.

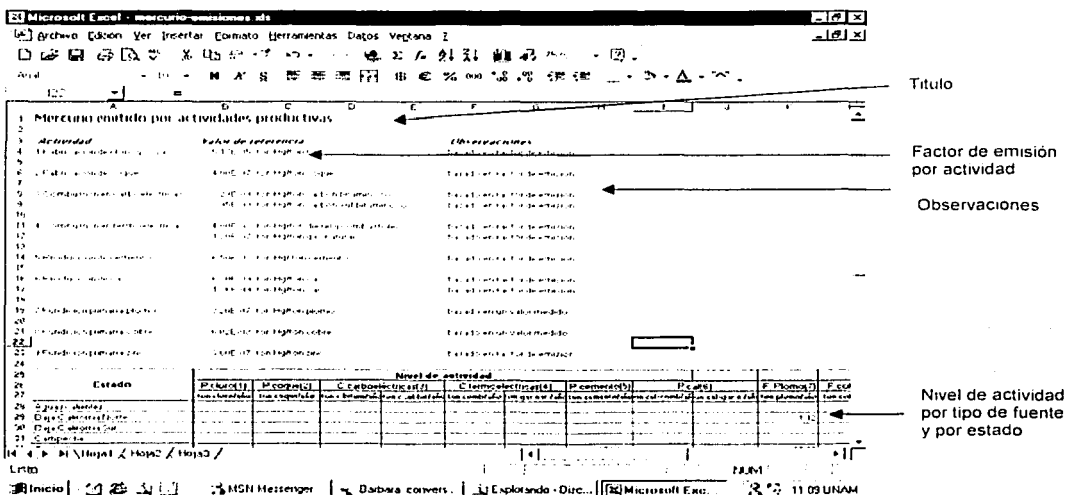
### 6.1 Estimación de emisiones

Las emisiones que se estiman a continuación corresponden al año 1999, ya que para ese año se obtuvieron todos los datos necesarios (niveles de actividad) para la aplicación de la metodología propuesta. La estimación de emisiones para el presente año (2002), se obtuvieron a partir de datos extrapolados.

#### 6.1.1 Hoja de cálculo

Las emisiones de mercurio presentadas en esta tesis se realizaron utilizando hojas de cálculo elaboradas para ello. Estas hojas de cálculo (ver archivo magnético **mercurio.xls** y ejemplo de calculo anexos), tienen la estructura que se presenta en la figura 6.1 y para la estimación de emisiones considera el tipo de fuente, según tabla 4.2; producción, utilización y disposición final, y los valores de referencia seleccionados en el capítulo anterior.

Figura 6.1 Hoja de cálculo de emisiones de mercurio



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

### 6.1.2 Cálculo de emisiones para 1999 y 2002

**Producción de cloro y sosa cáustica (Pcl).** Las emisiones se estiman a partir de la ecuación 5.1, con una producción de cloro de 133,352 ton para 1999 y de 150,401 ton para 2002 (tabla 4.3), obteniéndose:

para 1999:

$$E_{Pcl} = 133,352 \text{ (ton/año)} * 5.17 \times 10^{-5} \text{ (ton Hg/ton cloro)} \\ = 6.89 \text{ ton/año}$$

para 2002:

$$E_{Pcl} = 150,401 \text{ (ton/año)} * 5.17 \times 10^{-5} \text{ (ton Hg/ton cloro)} \\ = 7.77 \text{ ton/año}$$

**Producción de coque (Pco).** Las emisiones se determinan a partir de la ecuación 5.2. La producción de coque para 1999 fue de 2,219,845 ton y 2,349,763 para el 2002 (tabla 4.4):

para 1999:

$$E_{Pco} = 2,219,845 \text{ (ton/año)} * 4 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/ton coque)} \\ = 0.89 \text{ ton/año}$$

para 2002:

$$E_{Pco} = 2,349,763 \text{ (ton/año)} * 4 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/ton coque)} \\ = 0.94 \text{ ton/año}$$

**Combustión de carbón (Ccar).** Las emisiones para la combustión en carboeléctricas se estiman utilizando la ecuación 5.3, los datos siguientes de producción de acuerdo con la tabla 4.5 y las consideraciones hechas en el capítulo 9.096x10<sup>6</sup> ton en 1999 y 10.49x10<sup>6</sup> ton en el 2002.

para 1999:

$$E_{Ccar} = [9.096 \times 10^6 \text{ (ton carbón /año)}] * 5.253 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/ton carbón)} \\ = 0.047 \text{ ton/año}$$

para 2002:

$$E_{Ccar} = [10.491 \times 10^6 \text{ (ton carbón/año)}] * 5.253 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/ton carbón)} \\ = 0.055 \text{ ton/año}$$

**Combustión en termoeléctricas (Cter).** El cálculo de las emisiones de mercurio en esta fuente se realiza con la ecuación 5.4, donde el consumo de combustóleo, diesel y gas natural se obtiene a partir de la tabla 4.6

para 1999:

$$E_{Cter} = [(2.19 \times 10^7 + 3.66 \times 10^8) (\text{m}^3/\text{año}) * 4.012 \times 10^{-8} (\text{ton Hg}/\text{m}^3 \text{comb})] + [4.63 \times 10^8 (\text{m}^3/\text{año}) * 7.3 \times 10^{-8} (\text{ton Hg}/\text{m}^3 \text{gas})] = 34.69 \text{ ton/año}$$

para el 2002:

$$E_{Cter} = (2.68 \times 10^7 + 5.68 \times 10^8) (\text{m}^3/\text{año}) * 4.012 \times 10^{-8} (\text{ton Hg}/\text{m}^3 \text{comb}) + 6.04 \times 10^8 (\text{m}^3/\text{año}) * 7.3 \times 10^{-8} (\text{ton Hg}/\text{m}^3 \text{gas}) = 45.19 \text{ ton/año}$$

**Producción de cemento (Pcem).** El cálculo de las emisiones de mercurio debidas a la producción de cemento, se calculan con la ecuación 5.5, y una producción de  $1.93 \times 10^7$  ton, tanto para 1999 como para el 2002 (tabla 4.7).

para 1999 y 2002:

$$E_{Pcem} = 1.93 \times 10^7 (\text{ton/año}) * 6.5 \times 10^{-8} (\text{ton Hg}/\text{ton cemento}) = 1.26 \text{ ton/año}$$

**Producción de cal (Pcal).** El cálculo de las emisiones de mercurio por producción de cal, se realiza con la ecuación 5.6, de acuerdo con el tipo de combustible utilizado (tabla 4.9):

para 1999 y 2002:

$$E_{Pcal} = [6.27 \times 10^9 (\text{ton/año}) * 6.8 \times 10^{-9} (\text{ton Hg}/\text{ton cal})] + [1.73 \times 10^9 (\text{ton/año}) * 1.36 \times 10^{-9} (\text{ton Hg}/\text{ton cal})] = 0.0045 \text{ ton/año}$$

**Fundición primaria de plomo (Fpb).** Las emisiones de esta fuente se estiman a partir de la ecuación 5.7, considerando una producción de plomo de 125,656 ton para 1999 y 119,397 ton para el 2002 (tabla 4.9):

para 1999:

$$E_{Fpb} = 125\ 656 (\text{ton/año}) * 1.075 \times 10^{-6} (\text{ton Hg}/\text{ton plomo}) = 0.135 \text{ ton/año}$$

para 2002:

$$E_{Fpb} = 119\ 397 (\text{ton/año}) * 1.075 \times 10^{-6} (\text{ton Hg}/\text{ton plomo}) = 0.128 \text{ ton/año}$$

**Fundición primaria de cobre (Fcu).** Las emisiones por la fundición primaria de cobre se estiman utilizando la ecuación 5.8, donde la producción de cobre para 1999 fue de 381,184 ton y de 443,493 ton en el 2002 (tabla 4.11), resultando:

para 1999:

$$E_{Fcu} = 381,184 \text{ (ton/año)} * 6.02 \times 10^{-4} \text{ ton Hg/ton cobre} \\ = 0.0229 \text{ ton/año}$$

para el 2002:

$$E_{Fcu} = 443,493 \text{ (ton/año)} * 6.02 \times 10^{-4} \text{ ton Hg/ton cobre} \\ = 0.0266 \text{ ton/año}$$

**Fundición primaria de zinc (Fzn).** Utilizando la ecuación 5.9, se estiman las emisiones provenientes de esta actividad, y tomando en cuenta una producción de zinc de 362,811 ton para 1999 y de 383,791 ton para el 2002.

Emisiones en 1999:

$$E_{Fzn} = 362,811 \text{ (ton/año)} * 4.3 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/ton zinc)} = 0.156 \text{ ton/año}$$

Emisiones para el 2002:

$$E_{Fzn} = 383,791 \text{ (ton/año)} * 4.3 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/ton zinc)} = 0.165 \text{ ton/año}$$

**Usos artesanales y culturales (Uar).** Las emisiones de mercurio al aire y a otros medios, debidas a usos identificados en México como culturales, se estiman aplicando las ecuaciones 5.10, considerando un consumo de mercurio de 0.15 ton, para 1999 al igual que para 2002 (sección 4.2.8). Las emisiones al aire (a) y como residuo a otros medios (r) son:

para 1999 y 2002:

$$E_{aUar} = 0.15 \text{ (ton/año)} * 0.06 = 0.009 \text{ ton/año}$$

$$E_{rUar} = 0.15 \text{ (ton/año)} * 0.94 = 0.141 \text{ ton/año}$$

**Disposición de lámparas fluorescentes (Dlam).** La estimación de emisiones de mercurio al aire y a otros medios originadas por la disposición de lámparas fluorescentes, se estiman a partir de las ecuaciones 5.11, donde la cantidad de lámparas de tubo largo es de  $30 \times 10^6$  pzas en 1999 y  $37 \times 10^6$  pzas en el 2002, mientras que hubo  $7 \times 10^6$  pzas de lámparas compactas en 1999 y  $8 \times 10^6$  pzas en el 2002, obteniéndose los siguientes valores:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

para 1999:

$$E_{a_{Diam}} = 30 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 1.8 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/pza)} + 7 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 3 \times 10^{-10} \text{ (ton/pza)}$$
$$= 0.0561 \text{ ton/año}$$

$$E_{r_{Diam}} = 30 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 2.82 \times 10^{-8} \text{ (mg Hg/pza)} + 7 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 4.7 \times 10^{-9} \text{ (ton/pza)}$$
$$= 0.8789 \text{ ton/año}$$

para 2002:

$$E_{a_{Diam}} = 37 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 1.8 \times 10^{-9} \text{ (ton Hg/pza)} + 8 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 3 \times 10^{-10} \text{ (ton/pza)}$$
$$= 0.069 \text{ ton/año}$$

$$E_{r_{Diam}} = 37 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 2.82 \times 10^{-8} \text{ (mg Hg/pza)} + 8 \times 10^6 \text{ (pzas/año)} \cdot 4.7 \times 10^{-9} \text{ (ton/pza)}$$
$$= 1.081 \text{ ton/año}$$

**Disposición de termómetros (Dte).** Las emisiones de mercurio al aire y otros medios, debidas a la disposición de termómetros se estima con base en las ecuaciones 5.12, con 23,911 termómetros dispuestos en 1999 (igual que para 2002), así se obtiene:

para 1999 y 2002:

$$E_{a_{Dte}} = 23,911 \text{ (pzas/año)} \cdot 0.9 \times 10^{-7} \text{ (ton Hg/pza)}$$
$$= 0.0021 \text{ ton/año}$$

$$E_{r_{Dte}} = 23,911 \text{ (pzas/año)} \cdot 1.41 \times 10^{-6} \text{ (ton Hg/pza)}$$
$$= 0.0337 \text{ ton/año}$$

**Disposición de termostatos (Dtt).** El cálculo de las emisiones de mercurio debidas a la disposición de termostatos se estiman con las ecuaciones 5.13, considerando 92,132 termostatos dispuestos en 1999 (igual que para 2002). para 1999 y 2002:

$$E_{a_{Dtt}} = 0.18 \times 10^{-6} \text{ ton Hg/pza} \cdot 92,132 \text{ (pzas/año)} = 0.016$$

$$E_{r_{Dtt}} = 2.82 \times 10^{-6} \text{ ton Hg/pza} \cdot 92,132 \text{ (pzas/año)} = 0.2598$$

**Incineración de desechos médicos (Idm).** Las emisiones de mercurio debidas a la incineración de desechos médicos se estiman con la ecuación 5.14. De acuerdo con los datos de la sección 4.2.10, la capacidad instalada en México es de 28,774 kg/hr; sin embargo, se estima que solo opera al 80% de su capacidad durante 4 horas al día y 5 días a la semana (1040 hr/año), tomando como capacidad real de operación de 23,939 ton/año (1999 y 2002), obteniéndose:

$$E_{idm} = 23,939 \text{ (ton/año)} * 1.3 \times 10^{-6} \text{ ton Hg/ton residuo} = 0.031 \text{ ton/año}$$

**Crematorios (cre).** Para crematorios se emplea la ecuación 5.15, y considerando 22,680 cuerpos cremados en 1999 y de 50 977 durante el 2002, resultando los siguientes valores:

para 1999:

$$E_{cre} = 22,680 \text{ cuerpos} * 1.5 \times 10^{-6} \text{ ton/ cuerpo cremado} = 0.034 \text{ ton/año}$$

para el 2002.

$$E_{cre} = 50,977 \text{ cuerpos} * 1.5 \times 10^{-6} \text{ ton/ cuerpo cremado} = 0.076 \text{ ton/año}$$

## 6.2 Resultados

En la tabla 6.1 se presenta el resumen e de la estimación de las emisiones totales (al aire, agua y suelo) de mercurio para cada fuente considerada, correspondientes a 1999 y el 2002, Proporcionando un panorama general de las fuentes de emisión de mercurio en México, y la importancia relativa de cada una de las fuentes consideradas, cumpliéndose así el principal objetivo de este trabajo.

Las emisiones estimadas para 1999 son de 34.26 ton de mercurio, mientras que para el año 2002 se estimó un incremento de 20%.

Tabla 6.1 Emisiones totales de mercurio en México

Fuente	1999 (ton/año)	2002 (ton/año)
--------	-------------------	-------------------

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Fabricación de cloro y sosa cáustica	6.89	7.77
Fabricación de coque	0.89	0.94
Combustión en carboeléctricas	0.047	0.54
Combustión en termoeléctricas	34.6	45.19
Producción de cemento	1.26	1.26
Producción de cal	0.004	0.004
Fundición de plomo	0.135	0.128
Fundición de cobre	0.023	0.026
Fundición de zinc	0.15	0.65
Usos artesanales y culturales	0.15	0.15
Disposición de lámparas fluorescentes	0.93	1.15
Disposición de termómetros	0.035	0.035
Disposición de termostatos	0.275	0.275
Incineración de desechos médicos	0.031	0.031
Crematorios	0.034	0.076
<b>Total</b>	<b>45.45</b>	<b>58.22</b>

### 6.2.1 Análisis de resultados

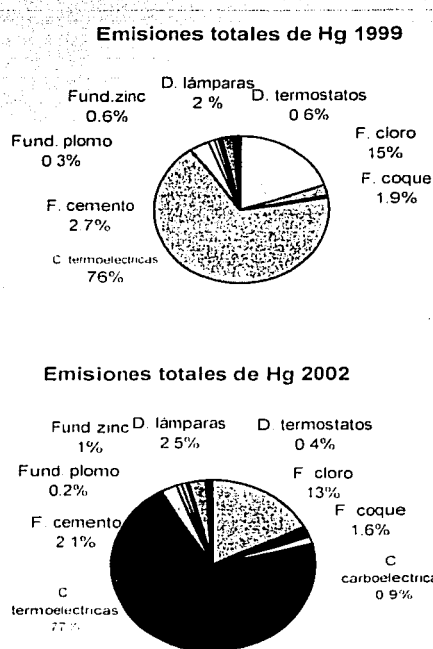
Al analizar los resultados de esta tabla, es importante recordar que las estimaciones se realizaron bajo las siguientes consideraciones:

- No se consideró el uso de equipos de control en la mayoría de las fuentes, con excepción de la combustión de carbón y la fundición primaria de cobre y plomo. Esto debido a la poca información disponible sobre el tema, y como una medida de protección al ambiente al posiblemente sobreestimar las emisiones.
- Las emisiones debidas al uso del Hg en actividades artesanales y culturales y en crematorios, se realizaron considerando el nivel de actividad en el D.F., debido a la carencia de datos referentes al resto de los Estados del país, por lo que, de considerarse dicha información, los valores obtenidos podrían incrementarse.
- Todas las actividades productivas (con excepción del plomo) consideradas en la tabla 6.1 tienden a incrementar su producción (ver sección 4.2), y como consecuencia se prevé habrá un aumento en las emisiones de mercurio.
- La producción de termómetros y termostatos ha disminuido (sección 4.2), debido principalmente a que están siendo sustituidos por otras tecnologías que no requieren el uso del mercurio, además la vida útil de estos instrumentos puede ser larga, disminuyendo su consumo y disposición final. Sin embargo, esta disminución no tiene un efecto significativo en el cálculo de las emisiones totales de mercurio, por ser sus emisiones mínimas comparadas con otras actividades como la combustión.
- A pesar de la reducción en el contenido de mercurio en lámparas fluorescentes, las emisiones debidas a su disposición van en aumento, debido al incremento en su producción.

En la figura 6.2 se presenta la importancia de cada una de estas fuentes, pudiendo destacar que:

hay dos fuentes que contribuyen con más del 90% de las emisiones totales de mercurio, la combustión en termoeléctricas (76.1%) y la fabricación de cloro y sosa cáustica (14.96%).

**Figura 6.2 Emisiones de mercurio, 1999 y 2002**



Mediante la hoja de cálculo se desglosan las emisiones por etapa, resultando que el alrededor del 97% (43.9 ton en 1999 y 56.5 ton en 2002) de las emisiones anuales totales son generadas en actividades de producción, y el mínimo restante en las etapas de uso y disposición.

De igual forma se determinó que el aire es el principal medio receptor de las emisiones de mercurio, ya que recibe  $\geq 97\%$  (32.6 y 42.7 ton en 1999 y 2002 respectivamente) de las emisiones totales, mientras que el 3% restante se integra de manera directa al agua y suelo, cabe mencionar que debido a la complejidad del ciclo del mercurio en la naturaleza, no es posible determinar de manera específica las emisiones de mercurio a estos dos medios.



Además del análisis de resultados anterior, en esta sección se incluye una comparación de estos resultados contra los presentados en el Diagnóstico del Mercurio en México (DMM), elaborado por el Instituto Nacional de Ecología en el año 2000, con información de 1999. Entre ambos existen varias diferencias, principalmente el número de fuentes consideradas, pudiendo comentar las siguientes:

- Las emisiones obtenidas para producción de coque (0.89 ton Hg/año) en este trabajo son mayores que las calculadas en el DMM (0.061 ton Hg/año), ya que aquí no se consideró el uso de equipo de control.
- Al contrario que en el caso anterior, para la combustión en carboeléctricas si se consideró el empleo de equipo de control (Comisión de fomento minero, 1971), y las emisiones obtenidas (0.05 ton Hg/año) resultaron menores que las estimadas en el DMM (2.625 ton Hg/año).
- De forma similar, la consideración del empleo de equipo de control (Society of Economic Geologist, 1985), para la fundición de cobre, plomo y zinc proporcionó menores emisiones (0.732 ton Hg/año) que las obtenidas en el DMM (6.834 ton Hg/año).
- Las emisiones de mercurio por incineración de residuos hospitalarios reportadas en el DMM (7.15 ton Hg/año) contienen un error de imprenta, debiendo ser 7.15 kg Hg/año; lo cual es menor que el valor obtenido en este trabajo por esta misma fuente (0.028 ton Hg/año). Esta diferencia se explica ya que en este último se consideró un mayor nivel de actividad.
- También las emisiones por cremación calculadas en este trabajo son mayores (0.034 ton Hg/año), que las obtenidas en el DMM (0.022), lo cual se explica por el número de cremaciones que en ese momento se estimó se realizaban en nuestro país, debiendo recordarse que esa actividad es cada día mas común.
- Finalmente, las emisiones totales calculadas en el DMM son de 22.53 ton Hg/año y en el presente trabajo de 45.45 ton Hg/año, siendo la razón principal que en este último si se consideraron las emisiones de las plantas termoeléctricas, no así en el DMM. Estas emisiones representan un 76% de las emisiones totales (ver figura 6.2).

### **6.2.2 Emisiones de mercurio en la República Mexicana**

Debido que no se tiene información por estado de los niveles de actividad necesarios para calcular las emisiones de cada fuente considerada, las estimaciones a nivel Estatal se realizaron tomando en cuenta lo siguiente:

- Las emisiones por cremación y usos artesanales solo consideran el nivel de actividad en el Distrito Federal,

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- las emisiones de plantas termoeléctricas, fabricación de cloro, fabricación de coque, se distribuyó entre los estados en los que se realizan dichas actividades, de acuerdo a los porcentajes de producción reportados para cada Estado,
- las emisiones por la incineración de desechos médicos obtenida, también se distribuyó entre los Estados que reportan realizar esta actividad, y de acuerdo a los porcentajes reportados.
- las emisiones por la disposición de lámparas, termómetros y termostatos se distribuyeron entre los diferentes Estados de la República, de acuerdo con el número de habitantes en cada uno.
- Las emisiones de mercurio para: fabricación de cemento, fabricación de cal, y combustión en termoeléctricas (DGGIA, 1999), así como para la fundición de plomo, cobre y zinc (SECOFI,1999), fueron estimadas para cada uno de los Estados que las realizan, ya que en estos casos si se contaba con el nivel de actividad a nivel Estatal.

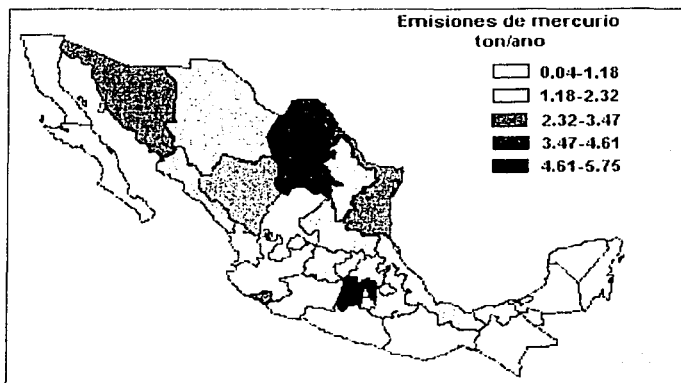
A partir de estas consideraciones, usando la hoja de calculo *mercurio.xls*, se obtuvieron las emisiones a nivel estatal que se reportan en la tabla 6.2.

**Tabla 6.2 Emisiones de mercurio por estado**

<b>Estado</b>	<b>Ton Hg / año</b>	<b>Principal fuente</b>
Estado de México	4.75	producción de cloro y sosa cáustica
Veracruz	3.32	termoeléctrica
Nuevo León	2.95	producción de cloro y sosa cáustica
Coahuila	2.78	termoeléctrica
Sonora	2.31	termoeléctrica

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura 6.3 Distribución de fuentes de emisión por estado



De acuerdo a lo anterior se puede concluir que en la Republica Mexicana, los estados de Coahuila, Estado de México, Hidalgo, Nuevo León y Sonora son los mayores emisores de mercurio (figura 6.3).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# Capítulo 7

## Conclusiones y recomendaciones

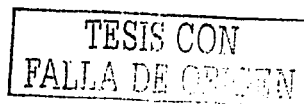
De acuerdo con el objetivo planteado para la realización del presente trabajo: *establecimiento de una metodología para la estimación de emisiones de mercurio*, se derivan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

### 7.1 Conclusiones

- Es indispensable la elaboración de un inventario de emisiones contaminantes para la toma de decisiones, tanto en el ámbito de política ambiental como para la selección de medidas de prevención y control de cualquier contaminante.
- Como antecedente de este trabajo se consideró el *Diagnóstico del mercurio en México*, realizado por el INE, buscando mejorar y completar las estimaciones del mismo.
- De las 28 fuentes de emisión de mercurio que se identificaron en México, se estimó la emisión de 15 de ellas, por ser las más revelantes o disponer de la información requerida.
- La metodología desarrollada incluye el uso de factores de emisión, cálculos de ingeniería y balances de materia. La técnica de estimación se asignó de acuerdo con la información disponible en el país.
- Las estimaciones realizadas proporcionan un panorama global de las emisiones de mercurio en México, a partir del cual deberá decidirse si es necesario realizar estimaciones o monitoreos puntuales.
- Con base en la información obtenida, las tres principales fuentes de emisión, en orden decreciente de importancia, son: termoeléctricas, fabricación de cloro y sosa cáustica y producción de cemento.
- Las hojas de cálculo elaboradas en este trabajo permiten la estimación automatizada de las emisiones de mercurio, para ser reportadas anualmente en el RETC.

### 7.2 Recomendaciones

Una vez completado el inventario nacional de emisiones contaminantes, la autoridad ambiental mexicana pretende establecer un programa permanente de revisión y actualización de este inventario, definiendo los contaminantes y fuentes prioritarios en el país. Si como resultado de este proceso las estimaciones de mercurio deben ser mejoradas se recomienda:



- Obtener información a nivel estatal y municipal relacionada con las actividades industriales que emiten mercurio, a través de un formato similar al de reporte de la COA.
- Medir el contenido de mercurio en los combustibles empleados en México (combustóleo, diesel y gas natural).
- Contar con información detallada proveniente de los censos industriales, para la aplicación de metodologías de estimación más sofisticadas y con mayor grado de aproximación, ya que actualmente solo se reporta información por rama y clase productiva.
- De entre las fuentes cuyas emisiones no fueron estimadas en este trabajo, por las razones expuestas en la sección 4.1, se recomienda analizar las posibles emisiones provenientes de la extracción primaria de mercurio, ya que la intemperización del mineral en minas a cielo abierto abandonadas, pudiese contaminar el suelo o cuerpos de agua cercanos; así como los procesos de refinación de petróleo que implican combustión.
- Hacer un estudio de factibilidad técnica y económica, para la eliminación de tecnologías que requieren mercurio en la producción de cloro y sosa .
- Con excepción de la función primaria de plomo y cobre, en el resto de las fuentes consideradas se utilizaron valores de emisión provenientes de estudios realizados en otros países, por lo que un incremento en la confiabilidad o aplicabilidad de estos valores, dependerá de la calibración de los mismos para las condiciones locales. Se recomienda:
  - > verificar el uso de equipo de control de emisiones,
  - > comparar proceso productivo de México con el de la fuente de información.
- Finalmente, es importante resaltar que el objetivo de esta tesis esta relacionado con la elaboración de un inventario confiable de la situación ambiental de México, por lo que se recomienda realizar más trabajos de investigación dentro de esta línea.

## BIBLIOGRAFIA

- ANIQ, 2000, Estadísticas de fabricación de productos químicos nacionales. Asociación Nacional de la Industria Química, México.
- ANIQ, 2001, Directorio de la industria Química. Asociación Nacional de la Industria Química, México.
- A&WMA, 2002, Sorbent Development for control of Mercury Emissions from Utility Power Plants. Proceedings of the Air & Waste Management Associations 95<sup>th</sup> Annual Conference & Exhibition. USA
- Barreto, 2002, Comunicación vía telefónica.
- CANAME, 2000, Comunicación vía fax. Cámara Nacional de Manufactureros Eléctricos. México.
- CCA, 1998, En Balance 1995, emisiones y transferencia de contaminantes en América del Norte. Comisión de Cooperación Ambiental.
- CFE, 1993, Monografías de centrales en operación. Comisión Federal de Electricidad, México.
- CFE, 2003, comunicación directa con Subgerencia de evaluación de emisiones. Comisión Federal de electricidad, México.
- Charles D. et al, 1998, Review of Methods of Assessing Uncertainties. Global Atmosphere Division, The UK Department of the Environment.  
<http://www.aeat.com/netcen/airqual/naei/ipcc/uncertainty/appA1a.html>
- Comisión de Fomento Minero, 1971, Carbón, boletines por sustancia, México.
- COREMI, 1991a, Monografía Geológico-Minera del Estado de Sinaloa. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1991b, Monografía Geológico-Minera del Estado de Zacatecas. Consejo de Recursos Mineros. México.
- COREMI, 1992, Monografía Geológico-Minera del Estado de Guanajuato. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1992b, Monografía Geológico-Minera del Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1992c, Monografía Geológico-Minera del Estado de Jalisco. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1992d, Monografía Geológico-Minera del Estado de San Luis Potosí. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1992e, Monografía Geológico-Minera del Estado de Sonora. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1993a, Monografía Geológico-Minera del Estado Coahuila. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1993b, Monografía Geológico-Minera del Estado de Durango. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1994a, Monografía Geológico-Minera del Estado Colima. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1994b, Monografía Geológico-Minera del Estado de Chihuahua. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1994b, Monografía Geológico-Minera del Estado de Nayarit. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1994d, Monografía Geológico-Minera del Estado de Veracruz. Consejo de Recursos Mineros, México.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- COREMI, 1995a, Monografía Geológico-Minera del Estado de Michoacán. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1995b, Monografía Geológico-Minera del Estado de Puebla. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1996a, Monografía Geológico-Minera del Estado de Estado de México. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1996b, Monografía Geológico-Minera del Estado de Oaxaca. Consejo de Recursos Mineros, México.
- COREMI, 1999a, Monografía Geológico-Minera del Estado de Guerrero. Consejo de Recursos Mineros, México.
- D'Arcangeli R. V., 2000, "Metodología para la estimación de emisiones contaminantes de la agricultura". Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- DGGIA, 2001, Comunicación directa con Lic. José Castro Díaz. Dirección General de Gestión e Información Ambiental del Instituto Nacional de Ecología. México
- Ebinghaus R., Turner R.R., Lacerda de L.D., Vasilier O., Salomons W., 1999, Mercury Contaminated Sites, Characterization, risk assessment and remediation.
- EEA, 2001, Combustion in energy and transformation industries. European Environmental Agency, EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook, 3rd edition, Technical report NO 30.  
[http://reports.eea.eu.int/technical\\_report\\_2001\\_3/en](http://reports.eea.eu.int/technical_report_2001_3/en)
- Ellison, S.L.R., 2002, Uncertainties in qualitative testing and analysis. EURACHEM guides & documents.
- Horne R.A., 1978, The Chemistry of Our Environment.
- INE 1996, Lo que usted debe saber sobre el mercurio y su situación en América del norte. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE, 1997, Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, Propuesta Ejecutiva Nacional. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE, 1999, Informe Nacional de Emisiones y Transferencia de Contaminantes 1997-1998. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE 2000a, Gestión ambiental hacia la industria logros y retos para el desarrollo sustentable 1995-2000. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE, 2000b, Segundo Informe Nacional de Emisiones y Transferencia de Contaminantes 1998-1999. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE, 2000c, Diagnóstico del mercurio en México, primer borrador. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INE, 2000d, Plan de acción regional de América del norte sobre el mercurio. Instituto Nacional de Ecología, México.
- INEGI, 1994, XIV censo industrial, industrias manufactureras, subsector manufactura de productos metálicos maquinaria y equipo. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI, 1999, XIV censo industrial, industrias manufactureras, subsector manufactura de productos metálicos maquinaria y equipo. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI, 2000, Estadísticas económicas de la industria minerometalúrgica. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- Kirk E. R., Othmer F. D., 1980, Encyclopedia of Chemical Technology.

TESIS CON  
MAYORÍA DE ORIGEN

- PNUMA 1992, Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, <http://www.rolac.unep.mx/Docamb/esp/dr1992.htm> 23/11/01, 9:00 a.m.
- PNUMA, 1999a, Perspectivas del medio ambiente en América Latina y el Caribe 2000, División de Información y Evaluación Ambientales y Alerta Temprana (DIEA&AT), <http://www.rolac.unep.mx/edicion/geoalc.htm>
- PNUMA, 1999b, Perspectivas del medio ambiente mundial 2000, División de Información y Evaluación Ambientales y Alerta Temprana (DIEA&AT), <http://www.unep.org/Geo2000/ov-es.pdf>
- SE, 1999, Balance nacional de energía 1999. Secretaría de Energía, México
- SECOFI, 1999, Anuario estadístico de la minería mexicana. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Dirección General de Minas, México
- SEMARNAP, 1999, Estadísticas del medio ambiente 1999,III. Principales actividades humanas relacionadas con el medio ambiente. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, México.
- SEMARNAT, 2001, Guía para la selección y empleo de métodos de estimación de emisiones contaminantes. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, en cooperación con la CCA (Comisión de Cooperación Ambiental).
- Society of Economic Geologist, 1985, Minas Mexicanas, tomos 1-4.
- Soto E.E., 2001, "Metodología para la estimación de emisiones contaminantes al agua, industria de la celulosa y el papel, Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM
- The Merck Index, 1990, Encyclopedia of Chemicals and drugs
- UNEP, 2002, The 1<sup>st</sup> Global Mercury Assessment Report, chapter 2. United Nations Environmental Program. Switzerland. <http://www.msceast.org/>
- USGS, 2000, The Materials Flow of Mercury in the Economies of the United States and the World. United States Geological Survey <http://geology.cr.usgs.gov/pub/circulars/c1197/>
- USGS, 2002, Mercury Statistics and Information. United States Geological Survey <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/mercury/430300.pdf>
- USEPA, 1997a, Mercury Study Report to Congress, volume 3: Fate and transport of mercury in the environment. United States Environmental Protection Agency.
- USEPA, 1997b, Locating and estimating air Emissions from sources of Mercury and mercury compounds. United States Environmental Protection Agency, AP-42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 8, section 8.1, <http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t3/reports/volume2.pdf>
- USEPA, 1997c, mercury in the environment: the waste connection. United States Environmental Protection Agency <http://www.epa.gov/glnpo/p2/mercpam.html>.
- USEPA, 2000, técnicas de estimación de emisiones. United States Environmental Protection Agency <http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/cicaspa.html>, 18/nov/01
- USEPA, 2002, AP-42, Fifth edition, volume 1. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch01>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



# A N E X O

**Mercurio emitido por actividades productivas**

Actividad	Factor de emisión
1 Fabricación de cloro y sosa	5.17E-05 ton Hg/ton Cl
2 Fabricación de coque	4.00E-07 ton Hg/ton coque
3 Combustión en carboceléctricas	8.29E-09 ton Hg/ton carbon bituminoso 3.95E-09 ton Hg/ton carbon subbituminoso
4 Combustión en termoceléctricas	4.00E-08 ton Hg/ton diesel y combustóleo 7.30E-08 ton Hg/ton gas natural
5 Producción de cemento	6.50E-08 ton Hg/ton cemento
6 Producción de cal	6.80E-09 ton Hg/ton cal 1.36E-09 ton Hg/ton cal
7 Fundición primaria plomo	1.08E-06 ton Hg/ton plomo
8 Fundición primaria cobre	6.02E-08 ton Hg/ton cobre
9 Fundición primaria zinc	4.30E-07 ton Hg/ton zinc

Estado	Nivel de actividad									Hg Emisión anual al aire (producción)												
	P cloro(1) ton cloro/año	P coque(2) ton coque/año	C carboceléctricas(3)		C termoceléctricas(4)		P cemento(5) ton cemento/año	P cal(6)		F. Plomo(7) ton plomo/año	F. cobre(8) ton cobre/año	F. zinc(9) ton zinc/año	1 ton/año	2 ton/año	3 ton/año	4 ton/año	5 ton/año	6 ton/año	7 ton/año	8 ton/año	9 ton/año	Total ton/año
Aguascalientes								132312					0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.96E-04	0	0	0	0.000695722
Baja California Norte				916666 66	25722222 2					1.12	0.35		0	0	0.00E+00	1.91E+00	0	0.00E+00	0.000001204	2.107E-08	0	1.914390112
Baja California Sur				916666 66	25722222 2								0	0	0.00E+00	1.91E+00	0	0.00E+00	0	0	0	1.914388887
Campeche				916666 66	25722222 2								0	0	0.00E+00	1.91E+00	0	0.00E+00	0	0	0	1.914388887
Coahuila		1845870 8	2.728 800	6.367 340		12861111 1	1.252 818			255 75	0.83		0	0.73964832	4.36E-01	9.39E-01	0.08143317	0.00E+00	0.000274931	4.966E-08	0	2.197016434
Colima				1833333 33	12861111 1	1.256 603							0	0	0.00E+00	1.01E+00	0.081679195	0.00E+00	0	0	0	1.093873639
Chihuahua				1833333 33	12861111 1					69 695 50	12446 78	137891 77	0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	0.074522693	0.000745226	0.059234461	1.147159863
Distrito Federal													0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0	0	0
Durango				916666 66	25722222 2					10 508	2144 79	12882 55	0	0	0.00E+00	1.91E+00	0	0.00E+00	0.01126911	0.000153759	0.02553064	1.931377721
Estado de México	48411 6			1833333 33	12861111 1	1.272 827	0.3366	206977 6	3.707 49	1759 34		2.0701572	0	0	0.00E+00	1.01E+00	0.032733759	3.45E-04	0.003869552	7.58123 05	0	3.606354774
Guatemala				916666 66	25722222 2				143 59	204 87	77 45		0	0	0.00E+00	1.91E+00	0	0.00E+00	0.000143559	1.23322 05	3.33035 07	1.914588887
Guerrero						1.649 642			3.248 30	258 86	12191 75		0	0	0.00E+00	0.00E+00	0.10722673	0.00E+00	0.003431923	1.55834E-05	0.005242453	0.115976688
Hidalgo				916666 66	25722222 2	5.641 183			10 417	164 87	32805 55		0	0	0.00E+00	1.91E+00	0.304276895	0.00E+00	0.01172271	3.40522 225	0.01419 807	2.309444449
Jalisco	12122 7							45250	53 6	9 92	18253 51	0.629743569	0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	3.08E-04	0.00027622	5.67184E-07	0.076275697	0.635388788
Michoacán									0.31	1026 16	0.16		0	0	0.00E+00	0.00E+00	0.08334411	0.00E+00	3.3325E-07	0.000314411	6.8E-08	0.000614813
Morales						1.285 800			2.34	0.21	5.3		0	0	0.00E+00	0.00E+00	0.081677	0.00E+00	2.515E-08	1.204 08	0.000000124	0.083579657
Nayarit									0.7	0.4	0.37		0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	7.525E-07	2.40E-08	1.541E-07	9.3568E-07
Nuevo León	30306 72			916666 66	25722222 2	487 984						1.88052824	0	0	0.00E+00	1.91E+00	0.03171896	0.00E+00	0	0	0	3.826370671
Oaxaca								3000		52 3	6.13	0.14	0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	2.04E-05	5.6222E-05	3.69029E-07	6.02E-08	7.70517E-05
Puebla						2.702 631	84437 31	45600					0	0	0.00E+00	0.00E+00	0.175671015	6.91E-04	0	0	0	0.176273889
Querétaro									2.172 72	437 05			0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	6.50E-04	0.002335674	2.63164E-05	0	0.003012064
Quintana Roo													0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0	0	0
San Luis Potosí				916666 66	25722222 2	820 283			2.065 61	12428 25	47754 42		0	0	0.00E+00	1.91E+00	0.053318395	0.00E+00	0.002220531	0.000748181	0.02050 121	1.991212114
Sinaloa				916666 66	25722222 2				1.849 09	187 18			0	0	0.00E+00	1.91E+00	0.00E+00	0.000877772	1.12682E-05	0	0	1.916387927
Sonora		379474 1		1833333 33	12861111 1	2.156 272	158	85841 96	1.31	118369 81	2.02		0.14799944	0	0.00E+00	1.01E+00	0.14015768	1.23E-04	1.40825E-05	0.019160623	6.6E-08	1.319633302
Tamaulipas				1833333 33	12861111 1								0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0	0	0
Tlaxcala	12122 7												0.62674359	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0	0	0.107194444
Veracruz	24245 6			1833333 33	12861111 1							1.25350786	0	0	0.00E+00	1.01E+00	0	0.00E+00	0	0	0	0.62674359
Yucatán				1833333 33	12861111 1	764 363	51500						0	0	0.00E+00	1.01E+00	0.046983516	3.50E-04	0	0	0	2.265702304
Zacatecas									21481 54	22258 43	99932 28		0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	0.023026295	0.001339597	0.04267002	0.067402633
Total			2.728 800	6.367 340		19.330 406		125656 27	381184 19	362792 37	6.854273584	0.88793796	4.36E-01	0.00E+00	1.25647639	3.10E-03	0.1340649	0.022947281	0.154400716	0.022947281	0.154400716	35.04603598
Nacional	133.352	2.219 845	2.728 800	6.367 340	22.000 000	463.000 000	19.330 406	627.515	173.523	125.656	381.184	362.811	6.8942984	0.887938	4.78E-02	3.47E+01	1.25647639	4.50E-03	0.1340649	0.022947277	0.154400716	43.9280161

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

### Mercurio emitido durante su uso

**Actividad** **factor de emisión**  
 Usos artesanales y culturales 6.00E-02  
0.94

Estado	Nivel de actividad	Hg Emisión anual (uso)		
	Usos artesanales y c.	Usos artesanales y c. (ton/año)		Total
	ton Hg/año	aire	agua y suelo	ton/año
Aguascalientes		0	0	0
Baja California Norte		0	0	0
Baja California Sur		0	0	0
Campeche		0	0	0
Coahuila		0	0	0
Colima		0	0	0
Chiapas		0	0	0
Chihuahua		0	0	0
Distrito Federal	0.15	0.009	0.141	0.15
Durango		0	0	0
Estado de México		0	0	0
Guanajuato		0	0	0
Guerrero		0	0	0
Hidalgo		0	0	0
Jalisco		0	0	0
Michoacán		0	0	0
Morelos		0	0	0
Nayarit		0	0	0
Nuevo León		0	0	0
Oaxaca		0	0	0
Puebla		0	0	0
Queretaro		0	0	0
Quintana Roo		0	0	0
San Luis Potosí		0	0	0
Sinaloa		0	0	0
Sonora		0	0	0
Tabasco		0	0	0
Tamaulipas		0	0	0
Tlaxcala		0	0	0
Veracruz		0	0	0
Yucatán		0	0	0
Zacatecas		0	0	0
<b>Total</b>		0.009	0.141	0.15
<b>Nacional</b>		0.009	0.141	0.15

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Mercurio emitido por disposición de productos que lo contienen

Actividad	factor de emisión		
Disposición de lámparas fluorescentes	L. tubo largo	1.80E-09	ton Hg/pzas
	L. tubo largo	2.82E-08	ton Hg/pzas
	L. compactas	3.00E-10	ton Hg/pzas
	L. compactas	4.70E-09	ton Hg/pzas
Disposición de termómetros		9.00E-08	ton Hg/pzas
		1.41E-06	ton Hg/pzas
Disposición de termostatos		1.80E-07	ton Hg/pzas
		2.82E-06	ton Hg/pzas
Incineración de desechos médicos		1.30E-06	ton Hg/ton desechos
	Crematorios	1.50E-06	ton Hg/cuerpos cremados

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Estado	Nivel de actividad					Hg emisión anual (disposición)										Hg emisión anual (producción, uso y disposición) Total (ton/año)		
	D. lámparas		D. termómetros	D. termostatos	Incineración desechos médicos	Cremación	D. lámparas (ton/año)		D. termómetros (ton/año)		D. termostatos (ton/año)		Incineración desechos médicos	Cremación	Total por disposición (ton/año)			
	tubo largo pzas/año	compactas pzas/año	pzas/año	pzas/año	ton desechos/año	No cuerpos c/año	aire	agua y suelo	aire	agua y suelo	aire	agua y suelo	aire	aire	aire		agua y suelo	agua y suelo
Aguascalientes	2.88E+05	6.72E+04	229.5	844.4			5.38E-04	8.44E-03	2.066E-05	0.0003236	0.0001592	2.49E-03	0.00E+00	0	7.18E-04	1.13E-02	1.28E-02	1.27E-02
Baja California Norte	7.65E+05	1.79E+05	609.7	2349.3	1036.55		1.43E-03	2.24E-02	5.487E-05	0.00085998	0.0004229	6.63E-03	1.35E-03	0	3.26E-03	2.69E-02	3.32E-02	1.95E+00
Baja California Sur	1.29E+05	3.01E+04	102.8	395.1			2.41E-04	3.78E-03	9.252E-06	0.00014495	7.13E-05	1.12E-03	0.00E+00	0	3.22E-04	5.04E-03	5.36E-03	1.92E+00
Campeche	2.10E+05	4.80E+04	167.3	644.9			3.93E-04	6.15E-03	1.506E-05	0.00023589	0.0001161	1.82E-03	0.00E+00	0	5.24E-04	8.21E-03	8.73E-03	1.92E+00
Coahuila	7.05E+05	1.67E+05	561.9	2185.1	1359.73		1.32E-03	2.07E-02	5.057E-05	0.00079228	0.0003897	6.11E-03	1.77E-03	0	3.53E-03	2.76E-02	3.11E-02	2.23E+00
Colima	1.65E+05	3.85E+04	131.5	506.7			3.00E-04	4.83E-03	1.184E-05	0.00018542	9.121E-05	1.43E-03	0.00E+00	0	4.12E-04	6.45E-03	6.86E-03	1.10E+00
Chiapas	1.21E+06	2.81E+05	911.2	3703.7			2.26E-03	3.53E-02	8.651E-05	0.00135625	0.00066677	1.04E-02	0.00E+00	0	3.01E-03	4.71E-02	5.01E-02	5.01E+02
Chihuahua	9.39E+05	2.19E+05	748.4	2883.7	548.2		1.76E-03	2.75E-02	6.736E-05	0.00105624	0.0005191	8.13E-03	0.00E+00	0	3.06E-03	3.67E-02	3.98E-02	1.19E+00
Distrito Federal	2.70E+06	6.17E+05	2108.9	8126	22.680		5.04E-03	7.89E-02	0.0001898	0.00297355	0.0014827	2.29E-02	2.42E-03	0.03402	4.31E-02	1.05E-01	1.48E-01	2.98E+01
Durango	4.44E+05	1.04E+05	353.8	1363.3			8.30E-04	1.30E-02	3.184E-05	0.00049899	0.0002454	3.85E-03	0.00E+00	0	1.11E-03	1.74E-02	1.85E-02	1.95E+00
Estado de México	4.03E+06	9.40E+05	3139.5	12373.3	12534.46		7.53E-03	1.18E-01	0.0002826	0.00442671	0.0022727	3.49E-02	1.63E-02	0	2.63E-02	1.57E-01	1.84E-01	3.79E+00
Guanajuato	1.43E+06	3.35E+05	1142.9	4403.9	67.02		2.68E-03	4.20E-02	0.0001029	0.00161145	0.0007927	1.24E-02	8.71E-05	0	3.66E-03	5.60E-02	5.97E-02	1.97E+00
Guerrero	9.45E+05	2.21E+05	753.2	2802.1			1.77E-03	2.77E-02	6.779E-05	0.00106201	0.0005224	8.18E-03	0.00E+00	0	2.79E-03	3.69E-02	3.93E-02	1.55E+01
Hidalgo	6.87E+05	1.60E+05	547.5	2109.8	830.68		1.28E-03	2.01E-02	4.928E-05	0.00077198	0.0003768	5.95E-03	1.08E-03	0	2.79E-03	2.68E-02	2.96E-02	2.34E+00
Jalisco	1.84E+06	4.54E+05	1549.4	5970.1	2269.41		3.64E-03	5.70E-02	0.0001394	0.00216465	0.0010748	1.68E-02	2.95E-03	0	7.80E-03	7.60E-02	8.38E-02	7.19E+01
México	1.22E+06	2.86E+05	975.5	3748.9			2.29E-03	3.59E-02	8.78E-05	0.00137546	0.0007693	1.07E-02	0.00E+00	0	3.05E-03	4.78E-02	5.09E-02	5.15E+02
Moravia	4.77E+05	1.11E+05	340.18	1464.9			8.92E-04	1.40E-02	3.422E-05	0.00053605	0.0002637	4.13E-03	0.00E+00	0	1.15E-03	1.86E-02	1.98E-02	1.03E+01
Nayarit	2.82E+05	6.58E+04	224.7	866.04			5.27E-04	8.26E-03	2.022E-05	0.00031683	0.0001559	2.44E-03	0.00E+00	0	7.03E-04	1.10E-02	1.17E-02	1.17E+02
Nuevo León	1.18E+06	2.75E+05	939.7	3620.7	847.44		2.20E-03	3.45E-02	8.457E-05	0.00132498	0.0009517	1.02E-02	1.10E-03	0	4.04E-03	4.61E-02	5.01E-02	3.88E+00
Oaxaca	1.09E+06	2.46E+05	841.6	3243			1.97E-03	3.09E-02	7.574E-05	0.00118695	0.0005837	9.15E-03	0.00E+00	0	2.63E-03	4.13E-02	4.39E-02	4.40E+02
Puebla	1.56E+06	3.64E+05	1243.4	4740.8	457.23		2.92E-03	4.57E-02	0.0001119	0.00175319	0.0008023	1.35E-02	5.64E-04	0	4.49E-03	6.10E-02	6.55E-02	2.42E+01
Querétaro	4.32E+05	1.01E+05	344.31	1320.7			8.08E-04	1.27E-02	3.099E-05	0.00048548	0.0002388	3.74E-03	0.00E+00	0	1.08E-03	1.69E-02	1.80E-02	2.10E+02
Quintana Roo	2.67E+05	6.23E+04	212.8	819.9	248.93		4.59E-04	7.82E-03	1.915E-05	0.00030005	0.0001476	2.31E-03	3.24E-04	0	9.90E-04	1.04E-02	1.14E-02	1.14E+02
San Luis Potosí	7.05E+05	1.65E+05	561.9	2165.1	74.85		1.32E-03	2.07E-02	5.057E-05	0.00079228	0.0003897	6.11E-03	9.73E-05	0	1.86E-03	2.76E-02	2.94E-02	2.02E+00
Sinaloa	7.80E+05	1.82E+05	621.6	2395.4	320.06		1.46E-03	2.29E-02	5.544E-05	0.00087646	0.0004312	6.76E-03	4.16E-04	0	2.36E-03	3.05E-02	3.28E-02	1.549E+00
Sonora	6.81E+05	1.59E+05	542.7	2091.4			1.27E-03	2.00E-02	4.844E-05	0.00076521	0.0003765	5.90E-03	0.00E+00	0	1.70E-03	2.06E-02	2.83E-02	1.35E+00
Tampasco	5.82E+05	1.36E+05	463.8	1787.3			1.09E-03	1.71E-02	4.174E-05	0.00065395	0.0003217	5.04E-03	0.00E+00	0	1.45E-03	2.27E-02	2.42E-02	2.42E+02
Tamaulipas	8.46E+05	1.97E+05	674.3	2588.1	310.92		1.58E-03	2.48E-02	6.069E-05	0.00095076	0.0004677	7.33E-03	5.08E-04	0	2.62E-03	3.31E-02	3.57E-02	1.05E+00
Tlaxcala	2.94E+05	6.86E+04	234.3	902.9			5.50E-04	8.61E-03	2.109E-05	0.00033036	0.0001625	2.55E-03	0.00E+00	0	7.33E-04	1.15E-02	1.22E-02	6.39E+01
Veracruz	2.12E+06	4.96E+05	1692.9	6522.9			3.97E-03	6.22E-02	0.0001524	0.00238699	0.0011741	1.84E-02	0.00E+00	0	5.30E-03	8.30E-02	8.83E-02	2.35E+00
Yucatán	5.10E+05	1.19E+05	406.4	1593.2	1073.18		9.54E-04	1.49E-02	3.658E-05	0.00057302	0.0002819	4.42E-03	1.40E-03	0	2.67E-03	1.69E-02	2.26E-02	1.08E+00
Zacatecas	414	9.66E+04	329.4	1271.4			2.87E-05	4.66E-04	2.985E-05	0.00046445	0.0002289	3.59E-03	0.00E+00	0	2.88E-04	4.52E-03	4.80E-03	7.29E-02
Total	29585414	6960200	23795.99	91974.24	23923.53	22680	5.54E-02	8.67E-01	0.0021417	0.03355376	0.0165654	0.2593674	0.031100589	0.03402	1E-01	1E+00	1.30E+00	3.65E+01
Nacional	30.000.000	7.000.000	23.911	92.132	23.939	22680	5.61E-02	8.79E-01	0.0022	0.0337	0.0166	0.2598	0.0311	0.034020	0.14	1.17	1.31	4.539E+01

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN