

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DESARROLLO DE UN INVENTARIO DE LAS
EMISIONES DE MERCURIO GENERADAS EN
COSTA RICA EN EL AÑO 2014 A UN NIVEL N2**

PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A LA CONSIDERACIÓN
DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL
PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

JULIO CÉSAR MURILLO HERNÁNDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO

SAN JOSÉ, COSTA RICA

2016

DESARROLLO DE UN INVENTARIO DE LAS EMISIONES DE MERCURIO GENERADAS EN
COSTA RICA EN EL AÑO 2014 A UN NIVEL N2

Informe de proyecto de graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Química de la
Universidad de Costa Rica, como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Química

Sustentante

Julio César Murillo Hernández

Aprobado por:



Ing. Esteban Durán Herrera Ph.D.
Profesor Catedrático
Escuela de Ingeniería Química

Presidente del Tribunal



Dr. Jorge Herrera Murillo
Vicedecano, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar
Universidad Nacional de Costa Rica

Director del Proyecto



M.Sc. José Pablo Sibaja Brenes
Académico del Laboratorio de Química de la Atmósfera
Universidad Nacional de Costa Rica

Miembro Lector



Ing. José Manuel Monge Carvajal
Profesor Interino
Escuela de Ingeniería Química

Miembro Lector

M.Sc. Alexander Vásquez Calvo
Profesor Adjunto
Escuela de Ingeniería Química

Miembro Lector

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 12 de diciembre del 2016

DEDICATORIA

Dedico mi Proyecto Final de Graduación a mi familia, a mis padres y mi hermano que me han apoyado y ayudado en cada una de las etapas de mi educación. A María Jesús, mi gran roca en los más recientes años y la recta final de lo que fue este proyecto universitario. La dedico también a mis amigos, los que he encontrado en esta etapa y los que ya tenía y se han mantenido conmigo durante este tiempo, por su compañía durante todo el viaje.

Les entrego a ustedes este documento, que con la ayuda de Dios me permite cerrar el capítulo de esta carrera de manera exitosa, donde el esfuerzo y la perseverancia en los momentos más difíciles han sido la clave para culminar este sueño de convertirme en Ingeniero.

Julio

AGRADECIMIENTOS

Doy infinitas gracias a Dios por darme la oportunidad en primer lugar de vivir, de estudiar y de guiar mi vida hacia infinitas bendiciones como lo es el poder terminar mis estudios de Licenciatura.

Agradezco a mi papá, mi mamá y mi hermano por los muchísimos sacrificios que han hecho por mí para que yo pudiera concentrarme en el estudio sin tener que lidiar con otras preocupaciones de las que ustedes se hicieron cargo. Gracias por entender todos los momentos en que decliné invitaciones y me perdí de momentos familiares por el estudio, finalmente les puedo decir que todo ha valido la pena. Gracias por darme palabras de aliento y de calma cuando “se venía la noche”, las llevaré por siempre en mi corazón.

A María Jesús, por su atención cuando necesitaba alguien que me escuchara, por sus consejos, su paciencia, sus ideas y su apoyo para que yo pudiera continuar con el camino, aunque en algunos momentos se viera muy oscuro o nublado el panorama.

A Adriana, por una amistad muy cultivada durante el desarrollo de estos proyectos finales de cada uno. Por haber compartido con una gran persona cuya compañía y cooperación en las visitas de campo e intercambio de ideas relacionadas con la tesis, permiten que ahora ambos podamos estar entregando un resultado de alta calidad, y estar orgullosos cada uno de nuestros trabajos.

Agradezco al personal del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, especialmente a Jorge Herrera, por confiar en mí para permitirme desarrollar esta tesis bajo su tutela, con su ayuda en los múltiples desafíos que presentó este proyecto y por darme los consejos e iniciación que me servirán para mi futuro profesional.

También, al personal de la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud y al personal del Comité Consultivo Técnico del Proyecto Actividades Habilitantes para la evaluación inicial de Minamata (MIA), por todas las lecciones aprendidas durante las reuniones, por el apoyo en la solicitud de la información a las diferentes dependencias y por su guía cuando no sabía cómo continuar con la investigación.

A los profesores José Pablo Sibaja y José Manuel Monge, por su ayuda, sus observaciones y consejos en el desarrollo del proyecto, por el conocimiento que compartieron conmigo.

A mis familiares y amigos por estar siempre presentes y atentos. A mis profesores, amigos y compañeros de la universidad, con quienes compartí más que solo años de estudio, clases recibidas y consultas respondidas; sino también momentos y anécdotas que recordaré con cariño siempre.

¡Gracias! Sin ustedes nada de esto hubiese sido posible.

RESUMEN

El estudio permitió el desarrollo de un Inventario Nacional de las Emisiones de Mercurio para Costa Rica durante el 2014 a un nivel N2. Además, se construyó el inventario para mercurio sin ninguna especiación química, con una relación temporal de un año, sin variaciones estacionales, mensuales, diarias u horarias, para toda la extensión territorial de Costa Rica en un periodo comprendido entre el 1° de enero y el 31 de diciembre del 2014.

La emisión del mercurio se estimó para cinco matrices distintas (aire, agua, suelo, productos y residuos) de acuerdo con la disponibilidad de los factores de emisión y de los factores de distribución de dicha emisión en cada una de las matrices. Las fuentes, los procesos, las tecnologías o las actividades emisoras del mercurio a estudiar en cuanto a su presencia en el país, así como los factores de emisión y los de distribución entre las matrices fueron definidos mayoritariamente con base en el instrumento del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), para elaborar inventarios de mercurio tanto a nivel N1 como a nivel N2, con los lineamientos basados en el ciclo de vida del mercurio. Los datos de la actividad de cada una de las fuentes encontradas como presentes en Costa Rica se trataron de conseguir de una fuente primaria en todos los casos, sea por las estadísticas y los documentos oficiales del gobierno o consultados directamente a las industrias privadas encargadas de la emisión, por ejemplo.

Para iniciar, se construyó un inventario de las emisiones del nivel N1 para tener un primer diagnóstico de la cantidad del mercurio que pudo haberse emitido en el país en el año de estudio, así como las fuentes emisoras más importantes a tomar en cuenta y el rango de incertidumbre entre el cual se contabilizó las emisiones del mercurio para el 2014. Definido este primer inventario, se implementó mejoras en cuanto a la calidad de los datos de actividad utilizados o los factores de emisión, además de mediciones realizadas en la zona minera de Abangares de cuánto mercurio es emitido al ambiente por cantidad de oro recuperado para conocer un factor de emisión local de mercurio que describiese la actividad; de manera que pudieran ser implementadas cuando se construyó el inventario de las emisiones a nivel N2.

A partir de las mejoras implementadas a la hora de desarrollar el inventario de nivel N2, la emisión total del mercurio fue de 5 029 kg, con un intervalo de incertidumbre entre 2 641 kg y

10 603 kg. El rango de la incertidumbre fue de 7 962 kg. Las fuentes emisoras más importantes fueron la extracción de oro con el método de amalgamación con mercurio (26,45 %), la quema informal de residuos (19,25 %) y el uso de amalgamas mercuriales (13,25 %). Esta emisión total se distribuyó en un 29,63 % al aire, un 24,87 % en los residuos, un 23,02 % al agua, un 21,11 % al suelo y un 1,38 % en los productos. La extracción del oro con amalgamación con mercurio pasó de ser una fuente muy poco importante en el inventario de nivel N1 a ser la más crítica del inventario de nivel N2, debido al estudio en el sitio que se decidió hacer, motivado por criterio de expertos en la materia y lo poco conocida y estudiada que ha sido la actividad, por causa de la ilegalidad de muchos aspectos de la misma. Este estudio arrojó un factor de emisión local de esta actividad de $3,8 \text{ g Hg (g oro)}^{-1}$.

La implementación de las mejoras a la hora de construir el inventario de nivel N2 generó una reducción de 361 kg de mercurio en el conteo total (un 6,70 %), así como una disminución de 119 kg (un 1,47 %) en el rango de incertidumbre al 95 % de confianza respecto al inventario de nivel N1, dentro del cual la emisión total podría encontrarse. El inventario de nivel N1 no permitió una cuantificación de la emisión generada por la producción de electricidad con energía geotérmica, de manera que aun cuando se agregó esta nueva fuente en el estudio del inventario a nivel N2 la emisión total y el rango de incertidumbre resultaron menores. También, hizo una sub estimación muy marcada en la actividad de minería de oro artesanal, que en caso de haberse hecho más similar a la realidad tanto la emisión total del inventario N1 como el intervalo de incertidumbre del mismo hubiesen sido mucho mayores, y por tanto la mejora generada por el inventario N2 más marcada.

Se recomienda al Ministerio de Ambiente y Energía, en conjunto con el Ministerio de Salud, que busquen implementar el cambio de tecnología de la minería de oro artesanal hacia alternativas sin mercurio; mientras esto se realiza, continuar con el monitoreo y estudio de la actividad para mantener las emisiones bajo control. Además, se debe mejorar la recolección de residuos sólidos por parte de las Municipalidades, de modo que se aumente la cobertura del servicio en el país y así se reduzca la cantidad de residuos sólidos dispuestos irregularmente.

CONTENIDO

| | Página |
|--|-----------|
| RESUMEN..... | i |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL MERCURIO..... | 1 |
| 1.2 CONVENIO DE MINAMATA..... | 3 |
| 1.3 EL MERCURIO EN COSTA RICA..... | 6 |
| 1.4 PROCESOS RELACIONADOS CON LA EMISIÓN DE MERCURIO..... | 9 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO..... | 13 |
| 2.1 MERCURIO..... | 13 |
| 2.1.1 <i>Propiedades físicas y químicas.....</i> | 13 |
| 2.1.2 <i>Cómo encontrarlo naturalmente.....</i> | 15 |
| 2.1.3 <i>Procesos como se convierte el mercurio para uso humano.....</i> | 16 |
| 2.1.4 <i>Usos del mercurio.....</i> | 16 |
| 2.2 CICLOS DEL MERCURIO EN AIRE, AGUA, SUELO Y BIOTA..... | 17 |
| 2.3 TOXICOLOGÍA DEL MERCURIO..... | 19 |
| 2.4 INVENTARIOS DE EMISIONES..... | 22 |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA..... | 27 |
| 3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS INVENTARIOS..... | 27 |
| 3.2 ELABORACIÓN DE FACTORES DE ENTRADA, DISTRIBUCIÓN Y/O EMISIÓN..... | 28 |
| 3.3 INCERTIDUMBRE DEL INVENTARIO..... | 30 |
| 3.4 FUENTES DE INFORMACIÓN..... | 32 |
| 3.5 ELABORACIÓN DE INVENTARIO A NIVEL N1..... | 41 |
| 3.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL INVENTARIO A NIVEL N1 E IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE MEJORA EN MÉTRICA PARA LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO A NIVEL N2..... | 41 |
| 3.7 ELABORACIÓN DEL INVENTARIO A NIVEL N2..... | 42 |
| 3.8 CONTROL DE CALIDAD..... | 43 |
| CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 45 |
| 4.1 INVENTARIO A NIVEL N1..... | 45 |
| 4.1.1 <i>Emisión total.....</i> | 45 |
| 4.1.2 <i>Emisión al aire.....</i> | 47 |
| 4.1.3 <i>Emisión al agua.....</i> | 49 |
| 4.1.4 <i>Emisión al suelo.....</i> | 50 |
| 4.1.5 <i>Emisión en los productos.....</i> | 51 |
| 4.1.6 <i>Emisión en los residuos.....</i> | 51 |
| 4.1.7 <i>Distribución de las emisiones por matriz.....</i> | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL INVENTARIO A NIVEL N1..... | 53 |
| 4.3 INVENTARIO A NIVEL N2..... | 64 |
| 4.3.1 Emisión total..... | 64 |
| 4.3.2 Emisión al aire..... | 67 |
| 4.3.3 Emisión al agua..... | 68 |
| 4.3.4 Emisión al suelo..... | 69 |
| 4.3.5 Emisión en los productos..... | 70 |
| 4.3.6 Emisión en los residuos..... | 71 |
| 4.3.7 Distribución de las emisiones por matriz..... | 72 |
| 4.4 COMPARACIÓN ENTRE EL INVENTARIO A NIVEL N1 Y EL INVENTARIO A NIVEL N2..... | 73 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 77 |
| 5.1 CONCLUSIONES..... | 77 |
| 5.2 RECOMENDACIONES..... | 78 |
| NOMENCLATURA..... | 81 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 85 |
| APÉNDICES..... | 93 |
| A DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE EMISIÓN LOCAL DE MINERÍA DE ORO ARTESANAL CON USO DE MERCURIO, Y SU INCERTIDUMBRE..... | 95 |
| B MEMORIA DE CÁLCULO..... | 101 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | Página |
|---|--------|
| Cuadro 1.1. Emisiones antropogénicas de mercurio por región, para los años 1995 y 2008.. | 3 |
| Cuadro 1.2. Áreas detalladas en el Convenio de Minamata para controlar el ciclo de vida del mercurio..... | 5 |
| Cuadro 1.3. Actividades productoras de emisiones de mercurio, evaluadas según su presencia o ausencia en la realidad de Costa Rica..... | 9 |
| Cuadro 2.1. Propiedades físicas del mercurio..... | 13 |
| Cuadro 2.2. Propiedades químicas del mercurio..... | 14 |
| Cuadro 3.1. Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión al usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2..... | 32 |
| Cuadro 4.1. Resultados del inventario N1 de emisión total de cada sector considerado, porcentaje de importancia de ésta sobre la emisión global, límites superior e inferior de incertidumbre y emisión por matriz..... | 46 |
| Cuadro 4.2. Análisis de las oportunidades de las mejoras que podrían implementarse para mejorar la estimación de ciertas fuentes emisoras identificadas en el inventario de nivel N1..... | 55 |
| Cuadro 4.3. Posibles mejoras en cuanto a los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones a nivel N2..... | 59 |
| Cuadro 4.4. Resultados del inventario N2 de emisión total de cada sector considerado, porcentaje de importancia de ésta sobre la emisión global, límites superior e inferior de incertidumbre y emisión por matriz..... | 66 |
| Cuadro A.1. Resultados de la caracterización del proceso de minería artesanal con uso de mercurio en el cantón de Abangares..... | 96 |
| Cuadro A.2. Componentes de la incertidumbre de las balanzas utilizadas en la caracterización del proceso de minería de oro artesanal..... | 97 |
| Cuadro A.3. Resultados de la caracterización del proceso de minería artesanal con uso de mercurio en el cantón de Abangares, con su incertidumbre asociada al 95 % de confianza..... | 98 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|--|--------|
| Figura 1.1. Emisiones globales de mercurio para el 2010, por actividad económica..... | 2 |
| Figura 2.1. Comparación de los balances y flujos preindustriales y actuales del mercurio..... | 18 |
| Figura 2.2. Ciclo del mercurio con reacciones químicas asociadas..... | 19 |
| Figura 2.3. Biomagnificación del mercurio..... | 21 |
| Figura 4.1. Distribución de la emisión total del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos..... | 45 |
| Figura 4.2. Distribución de la emisión al aire del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos..... | 48 |
| Figura 4.3. Distribución de la emisión al agua del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos..... | 49 |
| Figura 4.4. Distribución de la emisión al suelo del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos..... | 50 |
| Figura 4.5. Distribución de la emisión en los productos del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos..... | 51 |
| Figura 4.6. Distribución de la emisión en los residuos del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos..... | 52 |
| Figura 4.7. Distribución de las emisiones del inventario de nivel N1 según la matriz..... | 53 |
| Figura 4.8. Distribución de la emisión total del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos..... | 65 |
| Figura 4.9. Distribución de la emisión al aire del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos..... | 67 |
| Figura 4.10. Distribución de la emisión al agua del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos..... | 69 |
| Figura 4.11. Distribución de la emisión al suelo del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos..... | 70 |
| Figura 4.12. Distribución de la emisión en los productos del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos..... | 71 |
| Figura 4.13. Distribución de la emisión en los residuos del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos..... | 72 |
| Figura 4.14. Distribución de las emisiones del inventario de nivel N2 según la matriz..... | 73 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL MERCURIO

El mercurio es un elemento químico de interés mundial, permanece largos periodos de tiempo en el ambiente una vez introducido por alguna acción humana, se bioacumula en los ecosistemas, y es un contaminante con efectos negativos en la salud pública y la conservación del medio ambiente (UNEP, 2013b).

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés, y PNUMA, por sus siglas en español), en su Diagnóstico Global de Mercurio, divulgado en el 2013 (UNEP, 2013a), en el 2010 las emisiones de mercurio a la atmósfera en el ámbito mundial se estimaron en 1 960 toneladas, en tanto que el 10 % las mismas provienen de las fuentes naturales, el 30 % de las fuentes antropogénicas, y el 60 % restante fue mercurio emitido previamente que se ha acumulado por décadas en el suelo y en los océanos, de manera que las emisiones no son únicamente un problema del año de estudio sino que lo siguen siendo para contabilizaciones en años futuros.

De acuerdo con los datos estimados en el 2010 por la UNEP para este diagnóstico presentado en 2013, 727 toneladas (más del 35 % de las emisiones calculadas), se dieron por minería de oro artesanal y en pequeña escala, haciendo esta actividad productiva la más contaminante para el ambiente, mientras que un segundo sector importante en la contaminación atmosférica con mercurio fue la quema de carbón mineral, sobre todo para producir electricidad, que en el 2010 alcanzó emisiones por 475 toneladas. En resumen, entre la minería de oro artesanal y de pequeña escala y la combustión de carbón mineral, se contabilizó más del 60 % de las emisiones del mercurio globales en el 2010. La Figura 1.1 muestra la distribución de las emisiones globales por actividad.

La problemática por el uso del mercurio en la extracción de oro artesanal plantea otro reto, pues en el 2004 se estimó que entre 30 y 50 millones de personas en el mundo dependen de la actividad para vivir, y desde entonces la cantidad de personas va en aumento (Larson, 2014). Así,

se tiene un serio problema por enfrentar, ¿cómo eliminar las emisiones de mercurio causadas por minería de oro artesanal, sin afectar la calidad de vida de más de 50 millones de personas alrededor del globo, que sin esta actividad no tendrían otra actividad que les permita vivir? Sin duda, será necesario idear mecanismos de apoyo variados a estas personas y comunidades que se verían afectadas.

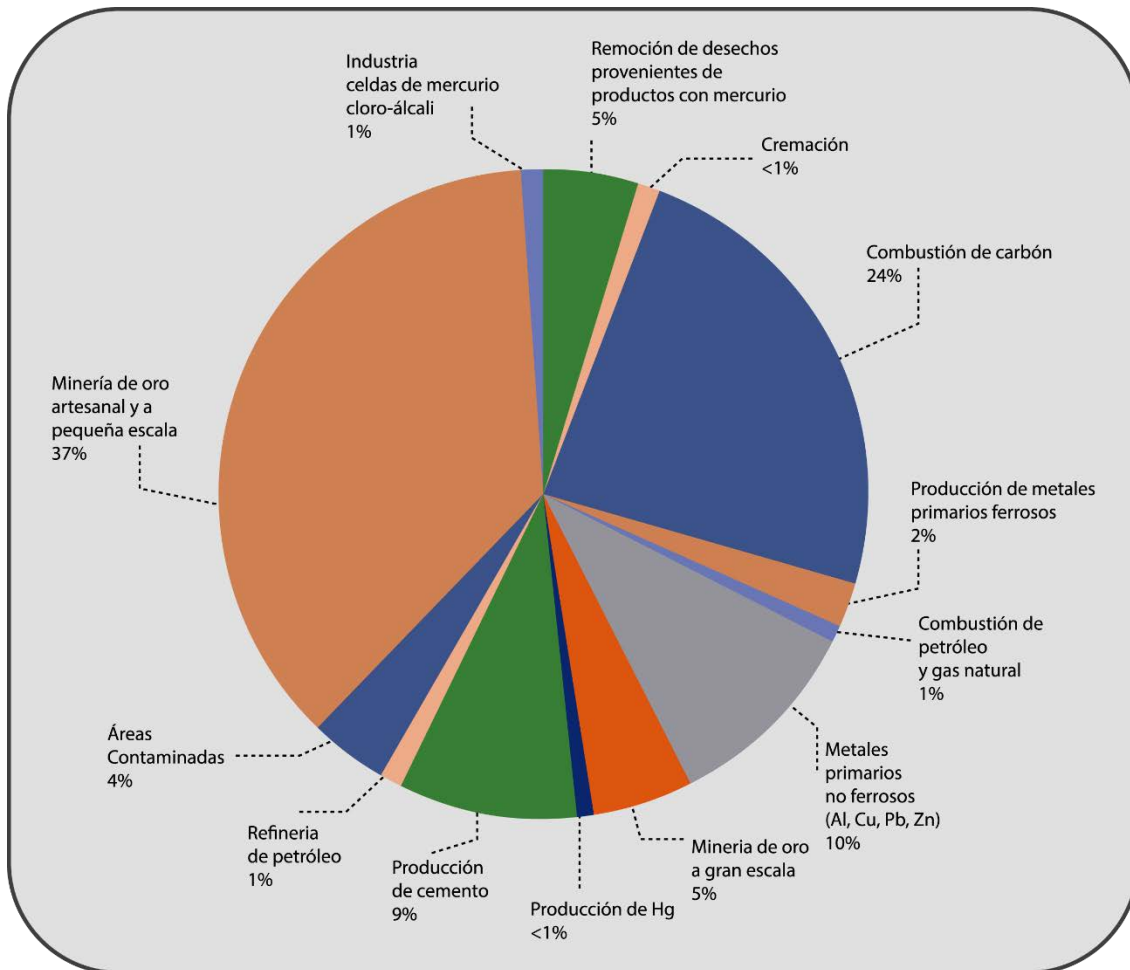


Figura 1.1. Emisiones globales de mercurio para el 2010, por actividad económica (PNUMA, 2012)

Las emisiones del mercurio han ido en aumento de la mano con la industrialización. De 1995 al 2008, las emisiones atmosféricas aumentaron levemente. Europa disminuyó sus emisiones más de un 15 % en este periodo, pero aún con esta disminución es la principal región que aporta emisiones del mercurio depositado en otros continentes y en el Ártico (Comisión de las Comunidades Europeas, 2005); debido que el mercurio es capaz de desplazarse grandes distancias

en la atmósfera, sin importar dónde se emita, con ayuda del patrón de corrientes del aire global. El mayor contribuyente a las emisiones de mercurio en ambos años fue el continente asiático, con más de la mitad de las emisiones mundiales siendo generadas en esta región.

En el Cuadro 1.1 se muestra la comparación en las emisiones por región en el año 1995 y 2008.

Cuadro 1.1 Emisiones antropogénicas de mercurio por región, para los años 1995 y 2008 (UNEP, 2013a y PNUMA, 2002).

| Región | Emisiones en 1995 (t) | Emisiones en 2008 (t) |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| Europa | 249,7 | 211,6 |
| África | 210,6 | 344,5 |
| Asia | 1 074,3 | 1 011,7 |
| Norte América | 213,5 | 112,8 |
| Sur América | 59,2 | 256,1 |
| Australia y Oceanía | 105,5 | 23,3 |
| Total | 1 912,8 | 1 960,0 |

En caso de América Latina y el Caribe, donde se ubica Costa Rica, habita aproximadamente un 9 % de la población mundial, se aporta un 16 % de las emisiones globales a la atmósfera, y se consume un 10 % de los productos que contienen mercurio. Si bien es cierto, la mayoría de las emisiones atribuidas a la región vienen de la extracción de oro artesanal a pequeña escala (70 % del total), es un gran desafío para los países la reducción de emisiones y uso del mercurio (Larson, 2014).

1.2 CONVENIO DE MINAMATA

El Convenio de Minamata sobre el Mercurio fue firmado en octubre del 2013 durante la Conferencia de Plenipotenciarios en la ciudad de Kumamoto, Japón. Este convenio es un primer paso en la lucha contra la contaminación mundial de mercurio, y Costa Rica es un país firmante del mismo, en tanto que el 21 de julio de 2016 la Asamblea Legislativa aprobó el Proyecto de Ley N° 19 426 para la ratificación del Convenio de Minamata sobre el Mercurio (Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, 2016), y el 16 de agosto del 2016 fue firmado por el Poder Ejecutivo. La ratificación de Costa Rica del Convenio de Minamata sobre el Mercurio fue publicada en el Diario Oficial La Gaceta el viernes 21 de octubre de ese mismo año, bajo el número de ley N° 9391.

El Convenio de Minamata toma este nombre de la enfermedad de Minamata, causada por un envenenamiento con mercurio que genera un daño neurológico severo. Se presentó por primera vez cuando una compañía japonesa llamada Chisso Corporation contaminó un mar cercano a la ciudad con desechos químicos que incluían mercurio, vertiendo unas 81 toneladas del tóxico elemento en el mar. Los desechos se fueron acumulando, envenenando a los peces y demás vida marina y provocando un severo daño neurológico en miles de personas que consumieron pescados o alguna otra variedad del producto del mar contaminado. Casi un millar de personas fueron intoxicadas y perdieron la vida como resultado de este trágico evento, mientras que muchos otros vivieron y aún viven con una discapacidad permanente (CCCB/CRCE, 2014).

El Convenio busca tomar los hechos ocurridos como lecciones aprendidas para futuro, de forma que se minimicen los riesgos del mercurio antes que impliquen un impacto ambiental o consecuencias graves en la salud pública. El Convenio establece su objetivo como “proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos con mercurio” (UNEP, 2013b; Artículo 1, Página 2).

Esto representa un avance importante en el control de la contaminación por mercurio en el ámbito mundial, un consenso global en que la contaminación por mercurio es una amenaza grave para la salud y el medio ambiente, y es necesario tomar medidas buscando minimizar y eliminar las emisiones y liberaciones del mercurio para mitigar la amenaza. Además, el convenio trasciende el ámbito de otros convenios químicos internacionales al prever y destacar la protección de la salud, que incluso se incluye en el artículo 16 del mismo, que involucra las medidas y las acciones que pueden adoptarse para evaluar los efectos del mercurio y proteger la salud humana (IPEN, 2014).

El Convenio de Minamata aborda el control de todo el ciclo de vida del mercurio, cubriendo las áreas principales detalladas en el Cuadro 1.2.

En cuanto a las emisiones, el artículo 8 del Convenio abarca el control y la reducción de las mismas en todo país firmante, pues cada uno deberá preparar un plan nacional en que se expongan las estrategias de control y reducción de emisiones, así como las metas, los objetivos y los resultados previstos; y presentarlo a la Conferencia de Países Firmantes en un plazo de cuatro años a partir del momento en que el Convenio entra en rigor para dicho país; además de

establecer a más tardar en los cinco años siguientes a partir del momento en que el Convenio sea efectivo para el mismo, un inventario de emisiones de las fuentes de mercurio existentes, que debe mantenerse actualizado a partir de entonces (UNEP, 2013b); el proyecto es uno de los aspectos que Costa Rica requiere para cumplir con la obligación adquirida al firmar el Convenio de Minamata y luego de ser ratificado ya el país debe presentarlo a la Conferencia en el plazo acordado.

Cuadro 1.2 Áreas detalladas en el Convenio de Minamata para controlar el ciclo de vida del mercurio (UNEP, 2013b).

| Artículo del Convenio | Descripción |
|------------------------------|--|
| Artículo 3 | Fuentes de suministro y comercio |
| Artículo 4 | Productos con mercurio añadido |
| Artículo 5 | Procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos con mercurio |
| Artículo 7 | Extracción de oro artesanal y en pequeña escala |
| Artículo 8 | Emisiones atmosféricas |
| Artículo 9 | Liberaciones al suelo y agua |
| Artículo 10 | Almacenamiento provisional ambientalmente racional de mercurio, distinto del mercurio de desecho |
| Artículo 11 | Desechos del mercurio |
| Artículo 12 | Sitios contaminados |
| Artículo 16 | Aspectos relacionados con la salud |

El Convenio explica que cada país firmante exigirá el uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para controlar y reducir (de ser viable) las emisiones lo antes posible, y antes que transcurran cinco años desde la entrada en vigor del Convenio en el mismo. Para las fuentes existentes, antes que pasen diez años del inicio de la vigencia del Convenio en el país, se debe incluir en un plan nacional lo siguiente (UNEP, 2013b):

- Un objetivo cuantificable para controlar, y cuando sea viable, reducir las emisiones.
- Valores límite de emisión para controlar, y cuando sea viable, reducir las emisiones.
- El uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para controlar las emisiones de las fuentes en cuestión.

Por otro lado, la creación de inventarios de emisiones es un tema muy importante para cumplir con las políticas ambientales creadas por convenios internacionales como Minamata. En el caso de los inventarios de emisiones, se aplican en investigación científica, planeación ambiental y diseño de programas y estrategias para el control de la calidad de aire, agua y suelo; de manera que se analicen datos y tendencias, para tomar decisiones sobre en cuáles sectores invertir dinero en busca de reducción de contaminantes o mejor capacidad de capturarlos y que no escapen.

El inventario, primera aproximación de la situación de mercurio en Costa Rica, además servirá como base para la creación de un primer perfil de uso de mercurio en el país, generar una revisión de la legislación costarricense en mercurio, e identificar las actividades comerciales ligadas al uso de mercurio en el país.

1.3 EL MERCURIO EN COSTA RICA

En el marco del Proyecto Actividades Habilitantes para la evaluación inicial de Minamata (MIA) que desarrolló en Costa Rica el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) por medio de la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA), se hizo una contratación de servicios profesionales para la revisión del marco regulatorio y político que existe y que es requerido, así como la capacidad institucional para la implementación del Convenio de Minamata sobre el Mercurio en Costa Rica, al consultor ambiental José Pablo Sánchez Vega, el cual fue presentado por el señor Sánchez en noviembre de 2015 como documento terminado.

En el mismo, el autor (Sánchez, 2015) revisa de manera exhaustiva la capacidad del país para implementar el Convenio, así como los aspectos solicitados por el acuerdo, que ya están contemplados en la legislación costarricense y los que faltan por regular.

El Ministerio de Ambiente y Energía es la autoridad competente y responsable de coordinar las acciones derivadas de la aplicación del Convenio de Minamata. Esta competencia fue delegada por el Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, de manera que sea el MINAE el encargado de representar a Costa Rica en las Conferencias de las Partes, así como en la implementación y la elaboración de los planes de acción del Convenio.

El mercurio correspondiente a la extracción minera es competencia de la Dirección de Geología y Minas del MINAE, según el artículo 3 del Código de Minería (Ley N° 6797, 1982). El caso de los productos con mercurio añadido recae en competencia de DIGECA, justificado en el Reglamento Orgánico del MINAE (N° 35 669, 2009). En caso de los residuos con mercurio, la competencia está dada según el artículo 13 del Reglamento General para la Clasificación y Manejo de Residuos Peligrosos (N° 37 788, 2013), regulación que contempla que el MINAE se apoya, fomenta, comunica y establece en conjunto con el Ministerio de Salud lo relativo a residuos peligrosos. Específicamente, la Contraloría Ambiental como dependencia del MINAE, creada bajo la Ley Orgánica del Ambiente (N° 7554, 1995) tiene compartida la materia de residuos peligrosos con el Ministerio de Salud, de acuerdo con lo establecido en el Reglamento para el Manejo de Residuos Peligrosos Industriales (N° 27 001, 1998) y el Reglamento General para la Clasificación y Manejo de Residuos Peligrosos (N° 37 788, 2013) (Sánchez, 2015).

Al Ministerio de Salud le corresponden los casos de productos con mercurio añadido, de conformidad con lo dicho por la Ley General de Salud (N° 5395, 1973), le recaen las competencias relativas a importación, transporte, almacenamiento, comercio y distribución de productos o sustancias peligrosas. También, es la entidad competente para el establecimiento de políticas, regulaciones, normas técnicas, así como el control en materia de residuos peligrosos, plaguicidas, manejo de residuos y contaminación (Sánchez, 2015).

La responsabilidad de ejercer, según la Ley de Protección Fitosanitaria (N° 7664, 1997), las funciones relativas a la comercialización y control de la importación de agroquímicos en el país es competencia del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Dentro del Ministerio, el departamento encargado de las tareas mencionadas es el Servicio Fitosanitario del Estado, el cual determina las prohibiciones para el ingreso al país de plaguicidas peligrosos y quien ya ha declarado la prohibición de ingreso de plaguicidas con mercurio a Costa Rica (Sánchez, 2015).

El Ministerio de Hacienda, específicamente por medio de la Dirección General de Aduanas se encarga del control de mercancías importadas, exportadas y transitadas por el país. Este ministerio es el ente competente de dictar las notas técnicas para restricción o prohibición de ingreso o salida de mercancías que sean consideradas por el MINAE, Ministerio de Salud o MAG (Sánchez, 2015).

En concordancia con el análisis de Sánchez (2015), se requiere las siguientes acciones para la implementación del Convenio de Minamata en la legislación costarricense:

- Prohibir la instalación de plantas cloro-álcali en Costa Rica vía Decreto Ejecutivo.
- Prohibir la exportación de mercurio y los compuestos de mercurio vía Decreto Ejecutivo Interinstitucional, entre el MINAE y el Ministerio de Salud, y que se solicite al Ministerio de Hacienda realizar la prohibición por medio de una nota técnica.
- La importación de productos peligrosos está contemplada en el Reglamento de Manejo de Productos Peligrosos (N° 28 930, 2000), pero no se prohíbe la importación de mercurio elemental o de ninguna otra forma. Se debe prohibir con una nota técnica del Ministerio de Hacienda, y que se respalde por medio de un Decreto Ejecutivo.
- La importación de los accesorios bajo partidas arancelarias que puedan contener mercurio debe ser prohibida o regulada con una nota técnica de la Dirección General de Aduanas. La fabricación y exportación deberá prohibirse con un Decreto Ejecutivo.
- Se debe desincentivar la fabricación de los productos con mercurio añadido mediante el Ministerio de Salud y MINAE, con restricción en permisos de funcionamiento donde se pretenda instalar fábricas y con el no otorgamiento de viabilidad ambiental para las instalaciones que usen mercurio como materia prima. El desincentivo sobre la comercialización se debe regular por cuotas de importación para productos con mercurio añadido, mediante una nota técnica.
- Un Decreto Ejecutivo debe comprender la restricción de los procesos de fabricación con mercurio y modificar el Reglamento General para el Otorgamiento de Permisos de Funcionamiento (N° 34 728, 2008), y el Reglamento General sobre los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (N° 31 849, 2004).
- Modificar el Reglamento General sobre los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (N° 31 849, 2004), para prohibir cualquier proceso que importe mercurio. Modificar también el Reglamento General para el Otorgamiento de Permisos de Funcionamiento (N° 34 728, 2008), para incluir que no se otorgará permiso de funcionamiento en ningún caso relacionado con mercurio.
- Regular las emisiones de mercurio de las calderas industriales a base de carbón con una reforma al Reglamento Sobre Emisión de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de

Calderas y Hornos de Tipo Indirecto (N° 36 551, 2011), específicamente para usos de carbón mineral.

- Adicionar un artículo al Reglamento para el Manejo de Productos Peligrosos (N° 28 930, 2000) en el que se establezca un tiempo límite para el almacenamiento de mercurio.
- Incorporar una prohibición en la nota técnica “Autorización para la importación, exportación y tránsito de desechos peligrosos por parte de la Autoridad Nacional Designada del Convenio de Basilea”, las restricciones para pilas y acumuladores que hayan sido incorporados en aparatos que contengan más de 0,0005 % de mercurio en masa y pilas de botón con un contenido de mercurio superior al 2 % en masa.

1.4 PROCESOS RELACIONADOS CON LA EMISIÓN DE MERCURIO

Los sectores relacionados directa o indirectamente con la producción o la emisión de mercurio a nivel mundial son bien conocidos, y a partir de este conocimiento el PNUMA ha elaborado instrumentos normalizados para levantar inventarios de uso, consumo y emisión de mercurio aplicables para regiones o países. En estas herramientas desarrolladas únicamente con el fin de contabilizar el mercurio total utilizado y emitido, se toman en cuenta las actividades humanas que pueden generar interés en temas de mercurio. Este proyecto basa también las actividades a evaluar en Costa Rica en la lista de actividades encontradas en estos instrumentos del PNUMA (2015), y muchas de las consideraciones y factores internacionales (UNEP, 2015).

Seguidamente, en el Cuadro 1.3 se mencionan las actividades productoras de emisiones y liberaciones de mercurio, y se analizan según su presencia en la realidad costarricense:

Cuadro 1.3 Actividades productoras de emisiones de mercurio, evaluadas según su presencia o ausencia en la realidad de Costa Rica.

| Actividad | Presencia en Costa Rica |
|--|-------------------------|
| Quema de residuos sólidos, formal o informal | Sí |
| Sistemas de tratamiento de aguas residuales | Sí |
| Compuestos químicos de laboratorio | Sí |

Cuadro 1.3 (continuación) Actividades productoras de emisiones de mercurio, evaluadas según su presencia o ausencia en la realidad de Costa Rica.

| Actividad | Presencia en Costa Rica |
|---|---|
| Uso de biocidas, pesticidas, explosivos, cosméticos y pinturas con mercurio | <p>El Decreto N° 27 769 prohíbe desde 1999 en su artículo 1 “el registro, formulación, fabricación, importación, exportación, tránsito, depósito, almacenamiento, venta y uso agrícola de productos a base de mercurio”, mientras en su artículo 2 “se designa al Ministerio de Agricultura y Ganadería por medio de la Dirección de Servicios de Protección Fitosanitaria y el Ministerio de Salud como entes encargados de velar por el cumplimiento de las disposiciones” de dicho decreto (Decreto N° 27 769, 1999).</p> <p>El contenido de mercurio en pinturas en el país está regulado por el Decreto N° 24 334, el cual reglamenta en su artículo 1 que toda pintura, a excepción de las mencionadas en el artículo 2, que se importe, fabrique, manipule, almacene, venda, transporte, distribuya o suministre, podrá contener una concentración másica máxima de mercurio de 0,005 %, pero en la industria nacional no se utiliza. El artículo 2 por su parte, dicta que las pinturas usadas en la fabricación de juguetes, muebles para niños y artículos escolares no podrán contener mercurio, plomo y otros productos químicos cuya utilización no esté previamente autorizada por el Departamento de Sustancias Tóxicas y Medicina del Trabajo, en tanto que es justamente este departamento, designado por el artículo 7, el encargado de vigilar el cumplimiento del presente decreto (Decreto N° 24 334, 1995).</p> <p>Algunos jabones, cremas y productos cosméticos contienen mercurio; sin embargo, en el país no se cuenta con una ley que regule la entrada de los mismos ni los límites máximos permitidos. Según la investigación de campo realizada, las industrias de explosivos de Costa Rica no utilizan el mercurio fulminante (Hg(ONC)₂) como detonador en su producción.</p> |
| Emisiones de mercurio en cementerios y crematorios | Sí |
| Uso de amalgamas dentales, esfigmomanómetros y otros equipos médicos | Sí |
| Extracción, refinamiento y uso de combustibles derivados de petróleo | Sí |

Cuadro 1.3 (continuación) Actividades productoras de emisiones de mercurio, evaluadas según su presencia o ausencia en la realidad de Costa Rica.

| Actividad | Presencia en Costa Rica |
|---|--|
| Producción de pulpa y papel con uso de mercurio | En el país, no está prohibido utilizar el mercurio para producir pulpa o papel; sin embargo, por medio de la consulta a varias de las empresas de este sector productivo se consiguió concluir que en el país no se realiza la producción de papel o de pulpa con mercurio. |
| Reciclaje de mercurio y otros metales ferrosos | El reciclaje, así como la producción primaria de mercurio no se da en Costa Rica. En cuanto al reciclaje de los metales ferrosos, los instrumentos del UNEP (2015) para evaluar esta práctica presentan factores para emisión de mercurio relacionados con la cantidad de vehículos reciclados únicamente, en tanto que en el país la práctica principal en cuanto a descarte de vehículos es su desmantelamiento y exportación, no su reciclaje como los proponen estos instrumentos del UNEP (2015). Esto es una debilidad encontrada en el uso de estos insumos. |
| Extracción primaria de mercurio, zinc, cobre, metales ferrosos y plomo, oro por minería industrializada. Producción de aluminio a partir de bauxita y alúmina | Según la Dirección de Geología y Minas (DGM) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) no hubo concesión para la explotación por el método primario para mercurio, zinc, cobre, plomo, aluminio, oro ni metales ferrosos para el 2014 (Gómez, 2016). Además, la Ley para declarar a Costa Rica país libre de minería metálica a cielo abierto (Ley N° 8904, 2011) prohíbe la minería a cielo abierto y únicamente podrá otorgarse permisos de exploración, concesiones de explotación minera a trabajadores organizados en cooperativas dedicados a la minería en pequeña escala para subsistencia familiar, artesanal y coligallero. También, esta ley en su artículo 2 menciona que se prohíbe en el país el otorgamiento de permisos y concesiones para exploración y explotación de minería a cielo abierto con la única excepción de exploración con fines científicos y de investigación. |
| Quema de biomasa como combustible | Sí |
| Uso de fluorescentes, manómetros y baterías con mercurio | Sí |
| Uso de switches y relays eléctricos con mercurio | Sí |

Cuadro 1.3 (continuación) Actividades productoras de emisiones de mercurio, evaluadas según su presencia o ausencia en la realidad de Costa Rica.

| Actividad | Presencia en Costa Rica |
|--|--|
| Producción de electricidad por energía geotérmica | Sí |
| Producción de cloro-álcali con celdas de mercurio, producción de cloruro de vinilo, poliuretano y acetaldehído con catálisis de mercurio | Los procesos industriales descritos involucran al mercurio como parte vital de la confección del producto terminado, pero según las consultas realizadas a expertos en la materia con conocimiento de las actividades industriales presentes en Costa Rica (Ministerio de Salud, Cámara de Industrias de Costa Rica, entre otros), y a los mismos sectores productivos encargados de producción de cloro comercial; ninguno es realizado en el país. |
| Extracción de oro y plata por minería artesanal con amalgamación con mercurio | Sí Extracción de oro únicamente |
| Uso de termómetros con mercurio | Sí |

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 MERCURIO

2.1.1 Propiedades físicas y químicas

El mercurio es un metal líquido, inodoro, plateado, pesado y ligeramente volátil a temperatura ambiente, con un peso atómico de $200,59 \text{ g mol}^{-1}$. En estado sólido es blanco, dúctil, maleable y puede cortarse con un cuchillo. Existen varios isótopos naturales para este elemento: 202 (29,8 %), 200 (23,13 %), 199 (16,84 %), 201 (13,22 %), 198 (10,02 %), 204 (6,85 %) y 196 (0,146 %). El símbolo Hg toma su nombre del latín *hydrargyrum*, que significa plata líquida (Universidad Nacional Autónoma de México, 2007). Las propiedades físicas del mercurio se detallan en el Cuadro 2.1, mientras que las propiedades químicas se presentan en el Cuadro 2.2.

Cuadro 2.1 Propiedades físicas del mercurio.

| Propiedad física | Valor |
|--|---|
| Punto de fusión | -38,87 C |
| Punto de ebullición | 357,72 C |
| Densidad | 13,534 g ml ⁻¹ (25 C) |
| Ecuaciones para presión de vapor | De 0 C a 150 C: $\log P = -3 212,5 T^{-1} + 7,15$ De 150 C a 400 C: $\log P = -3 141,33 T^{-1} + 7,879 - 0,000 19 t$ (P en kPa, T en K, t en C) |
| Calor de vaporización | 14,652 kcal mol ⁻¹ (25 C) |
| Tensión superficial | 484 dina cm ⁻¹ (25 C) |
| Resistividad eléctrica | 95,76 μΩ cm ⁻¹ |
| E (acuoso) | Hg/Hg ²⁺ : -0,854 V Hg/Hg ₂ ²⁺ : 0,796 1 V Hg ₂ ²⁺ /Hg ²⁺ : 0,905 V |
| Coefficiente de expansión de volumen del líquido | 182·10 ⁻⁶ C ⁻¹ (20 C) |
| Calor latente de fusión | 11,8 J g ⁻¹ |
| Expansión de volumen | $V_t = V_0(1 + 0,181 82 \cdot 10^{-3} t + 0,007 8 \cdot 10^{-6} t^2)$ t en C |
| Ángulo de contacto de vidrio | 128 (18 C) |
| Distancia atómica | 3 nm |

Fuente: Universidad Autónoma de México, 2007

Cuadro 2.1 (continuación) Propiedades físicas del mercurio

| Propiedad física | Valor |
|---|--|
| Presión crítica | 558,75 mmHg |
| Sistema cristalino | Romboédrico |
| Potenciales de ionización | Primer electrón: 10,43 V Segundo electrón: 18,75 V Tercer electrón: 34,2 V |
| Presión interna | 13,04 atm |
| Índice de refracción | 1,6-1,9 (20 C) |
| Solubilidad en agua | 20-30 $\mu\text{g l}^{-1}$ |
| Coeficiente de temperatura de tensión superficial | -0,19 $\text{mN m}^{-1} \text{C}^{-1}$ |
| Viscosidad | 1,55 mPa s^{-1} (20 C) |
| Entropía | 76,107 J mol^{-1} (298 K) |
| Calor de fusión | 2 297 J átomo^{-1} |
| Calor de vaporización | 59 149 J átomo^{-1} |
| Calor específico a presión constante | 27,66 J mol^{-1} (25-357 C, líquido) 20,79 J mol^{-1} (gaseoso) |
| Calor latente de vaporización | 271,96 J g^{-1} |
| Punto triple | 38,841 68 C |
| Conductividad térmica | 0,092 $\text{W cm}^{-2} \text{K}^{-1}$ |
| Densidad crítica | 3,56 g ml^{-1} |
| Temperatura crítica | 1 677 C |

Fuente: Universidad Autónoma de México, 2007.

Cuadro 2.2 Propiedades químicas del mercurio

| Propiedad química | Comportamiento |
|-----------------------------|---|
| Oxidación | No se oxida a temperatura ambiente, pero al calentar cerca de su punto de fusión sí lo hace lentamente. |
| Aleaciones | Forma aleaciones con muchos metales, excepto con hierro (solo a temperaturas muy altas). Con azufre se combina a temperatura ambiente. |
| Reacción con ácidos y bases | Reacciona con ácido nítrico y ácido sulfúrico solamente en caliente. No reacciona con ácido clorhídrico. Reacciona con amoníaco en presencia de aire para formar la base de Millon (Hg_2NOH). |
| Ignición | En presencia de cloro a (200-300) C. También los vapores de mercurio en presencia de diyodo-fosforo de boro. |

Fuente: University of Warmia and Mazury, 2012.

Cuadro 2.2 (continuación) Propiedades químicas del mercurio

| Propiedad química | Comportamiento |
|-------------------------|--|
| Precipitación del metal | El cobre, hierro o zinc precipitan el mercurio cuando se encuentran en disoluciones neutras o ligeramente ácidas. Las sales mercúricas en presencia de NaOH generan un precipitado amarillo (HgO) y con disolución alcalina de yodo se precipita HgI ₂ . Las sales mercúricas dan un precipitado negro con hidróxidos alcalinos y un precipitado blanco de calomel con HCl o cloruros solubles. |
| Mezclas explosivas | Mezclas con acetileno, amoníaco, dióxido de cloro, metil-azida, cloratos, nitratos y ácido sulfúrico caliente. |
| Reacciones explosivas | Con tetracarbonil-níquel (en agitación), con ácido peroxifórmico, con dióxido de cloro (en agitación), con 3-bromo-propino, con metil-silano, con oxígeno (en agitación) y en disoluciones concentradas con perclorato de plata con 2-pentino o 3-hexino. |
| Incompatibilidades | Es incompatible con halógenos o agentes oxidantes fuertes. |
| Reacciones violentas | Con bromo o acetiluro de sodio. Con sodio, rubidio y potasio también genera una reacción violenta y exotérmica. La formación de amalgamas de calcio también es violenta. |

Fuente: University of Warmia and Mazury, 2012.

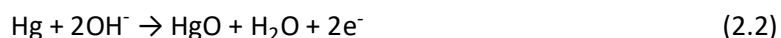
2.1.2 *Cómo encontrarlo naturalmente*

La forma principal de mercurio en la naturaleza es el cinabrio (HgS), que constituye la manera principal para la obtención de este metal. Otras formas minerales incluyen la corderoita (Hg₃S₂Cl₂), la livingstonita (HgSb₄S₈), y formas supergénicas tales como el mercurio elemental (Hg₀), el calomel (HgCl₂), y la schuetteita (Hg₃(SO₄)O₂) (Higuera y Oyarzun, 2016).

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



Reacción que pone en solución al mercurio, de manera que puede formar complejos peligrosos con materia orgánica. En medio alcalino oxidante, el mercurio precipitará como óxido, lo cual es una forma más estable mientras el sistema mantenga las condiciones alcalinas y oxidantes:



2.1.3 *Procesos como se convierte el mercurio para uso humano*

El mercurio es un elemento natural de la tierra, presente en la corteza terrestre a razón promedio de 0,05 mg kg⁻¹, con variaciones locales significativas. A pesar de que 25 % de los principales minerales de mercurio son conocidos, prácticamente los únicos depósitos que han sido explotados para la extracción del metal son los de cinabrio. En la biosfera también hay mercurio en bajos niveles. La absorción del mercurio por las plantas podría explicar la presencia del mismo en los combustibles derivados del petróleo (PNUMA, 2002). El mercurio se obtiene con facilidad del cinabrio al calentarse en aire, desprendiéndose vapor de mercurio, que inmediatamente es condensado para obtener mercurio líquido. La reacción química es la siguiente:



El mercurio ofrecido en el mercado mundial se obtiene de diversas fuentes, entre las que están (PNUMA, 2002):

- Extracción de mercurio primario (como producto principal de la minería, o como subproducto de la extracción o refinamiento de otros minerales o metales (como zinc, oro o plata)).
- Mercurio primario recuperado al refinar gas natural.
- Reprocesamiento o minería secundaria de residuos mineros que contienen mercurio.
- Mercurio reciclado, recuperado de los productos usados y los residuos de los procesos de producción industrial.
- Mercurio de las reservas o inventarios gubernamentales.
- Reservas privadas (como el mercurio para la industria de cloro-álcali).

2.1.4 *Usos del mercurio*

El mercurio se utiliza en muchos productos y procesos. Se usa como catalizador de reacciones orgánicas, para recubrir espejos, en lámparas para generar rayos UV o lámparas fluorescentes, en instrumentos como termómetros, barómetros y manómetros, hidrómetros y picnómetros; en la

extracción de oro y plata de sus minerales, en la generación de amalgamas dentales, en relays y switches eléctricos, en la determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl, como reactivo de Millon, como cátodo en electrólisis y electroanálisis, en pilas y manufactura de sales mercuriales, en productos farmacéuticos, agroquímicos y pinturas, entre otros ejemplos (Environmental Protection Agency, 2009).

2.2 CICLOS DEL MERCURIO EN AIRE, AGUA, SUELO Y BIOTA

El ciclo del mercurio se presenta como uno muy complejo, en el que varias especies de mercurio están presentes en el ambiente, las cuales de manera general se pueden agrupar en especies elementales, orgánicas e inorgánicas. El mercurio se extrae de los reservorios localizados en áreas profundas de la corteza, naturalmente (por erupción volcánica o procesos geotérmicos) o por la mano del hombre (extracción de minerales con mercurio). Una vez incorporado a la atmósfera, el mercurio se transporta, deposita y revolatiliza. Eventualmente, se entierra en el fondo marino, pero esto ocurre muy lentamente, de manera que el mercurio emitido hace varias décadas aún puede estar viajando en la atmósfera (Haynes, 2012).

La Figura 2.1 muestra la variación en los flujos de mercurio desde la época preindustrial hasta la actual, lo cual es posible conocerlo gracias a los continuos estudios que se realizan sobre las liberaciones procedentes de diversas fuentes, los flujos a la superficie de la tierra y la magnitud de los depósitos acumulados en los suelos, cuencas y océanos, y los conocimientos en general del ciclo mundial del mercurio. Es claro que hay aún mucha incertidumbre en los datos reportados, pero con el pasar de los años y debido a la importancia que se ha tomado al mercurio es que se han ido afinando las estimaciones para que se acerquen cada vez más a la realidad. Lo que sí es innegable es que las emisiones antropogénicas de mercurio al aire equivalen o superan los aportes naturales (PNUMA, 2002).

El mercurio más común encontrado en la atmósfera es el elemental Hg^0 , siendo hasta un 97 % del mercurio gaseoso total. Esta especie de mercurio tiene un tiempo de residencia en la atmósfera entre 6 meses y hasta un año, y su deposición puede ser húmeda o seca. El mercurio elemental puede ser transformado en mercurio divalente Hg^{2+} o mercurio asociado con material

particulado Hg_p , los cuales son solubles y con un tiempo de residencia mucho menor, por lo que son las especies primariamente depositadas (Haynes, 2012).

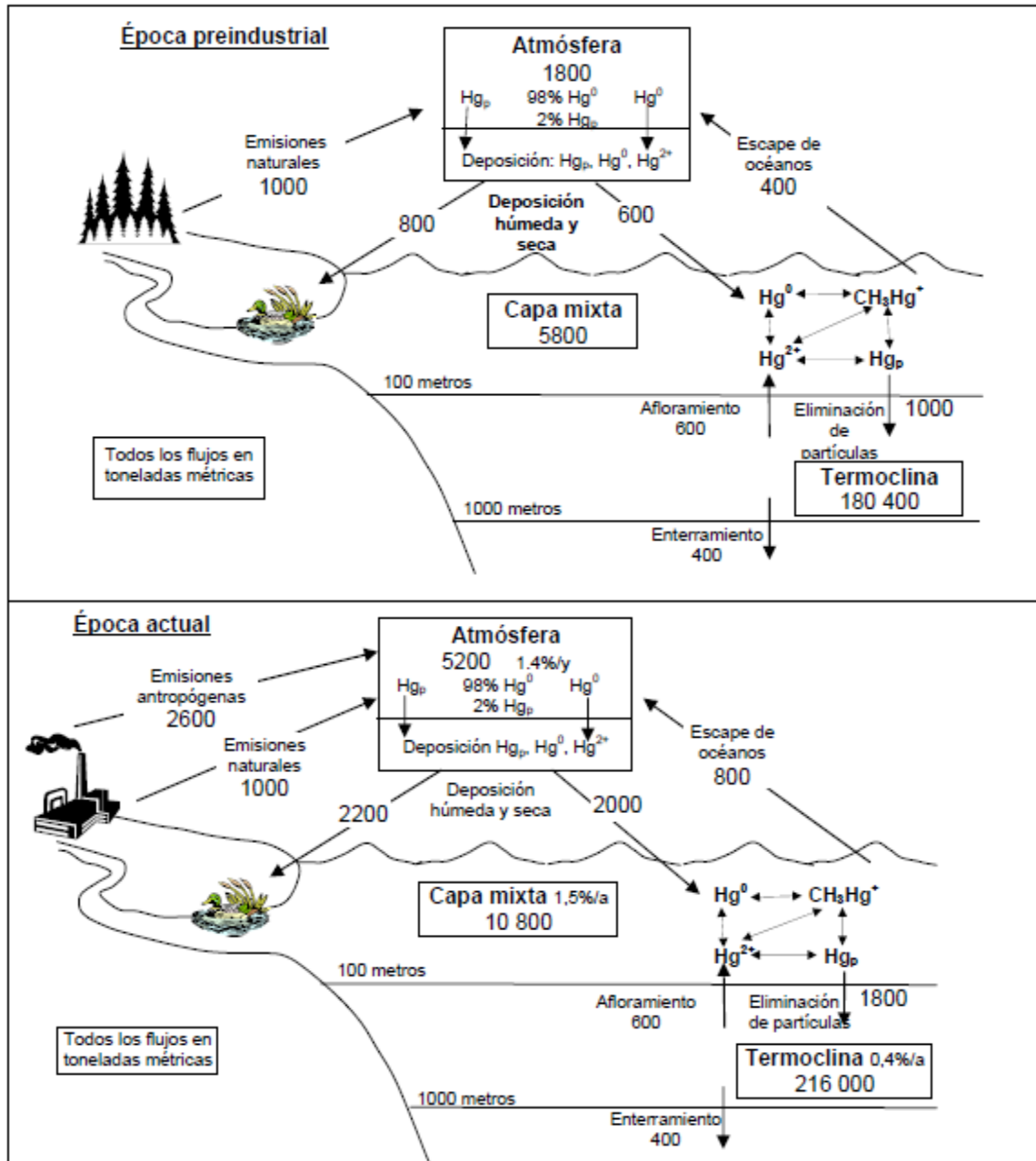
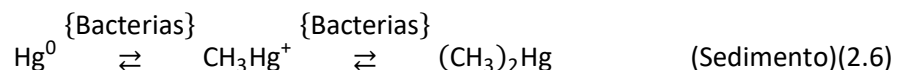
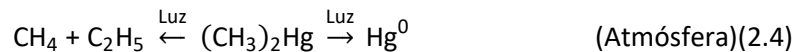


Figura 2.1. Comparación de los balances y flujos preindustriales y actuales del mercurio (PNUMA, 2002)

Las reacciones del mercurio más importantes en cada una de las matrices son las siguientes (Bisinoti y Jardim, 2004):



Las reacciones anteriores quedan mejor ilustradas en la Figura 2.2, donde además de mostrarse las reacciones en cada una de las matrices, también se muestra cómo un producto generado en la reacción de una matriz luego pasa a otra matriz a ser reactivo, como en el caso del CH_3Hg^+ producido en la matriz acuática que luego reacciona en la matriz de sedimento con el mercurio elemental para producir $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$.

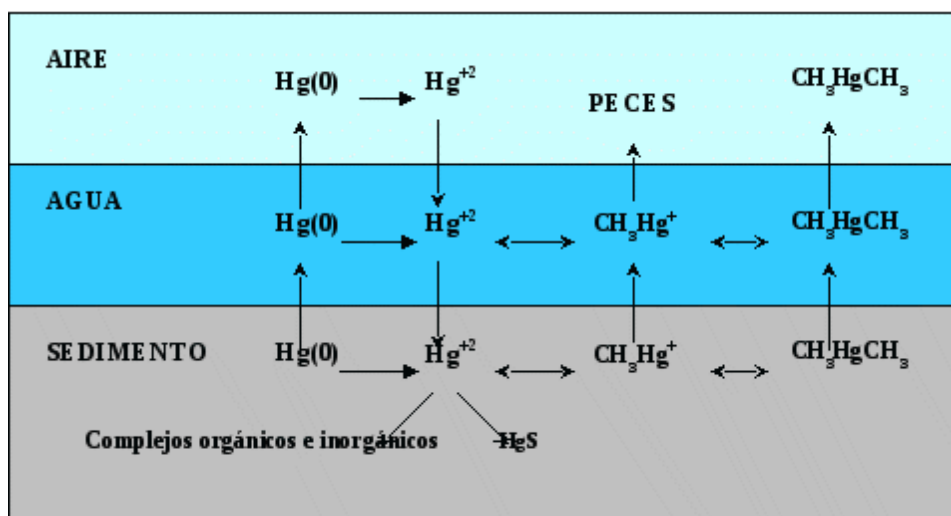


Figura 2.2. Ciclo del mercurio con reacciones químicas asociadas (Ramos, Estévez y Giraldo, 2000)

2.3 TOXICOLOGÍA DEL MERCURIO

El mercurio existe en distintas formas: elemental (o metálico), inorgánico (como cloruro de mercurio, por ejemplo), y orgánico (como metilmercurio y etilmercurio, por ejemplo); todos causan efectos tóxicos en los sistemas nervioso, digestivo e inmunológico, y en los pulmones, los

riñones, la piel y los ojos, entre otros. La exposición de los seres humanos se produce principalmente a través de la inhalación de los vapores de mercurio elemental liberados durante los procesos industriales, o mediante el consumo de pescado y mariscos contaminados (OMS, 2016a). La Organización Mundial de la Salud (OMS) cataloga al mercurio y los compuestos mercuriales como uno de los diez grupos de productos químicos con mayores repercusiones en la salud pública.

La especie más peligrosa de mercurio es el metilmercurio (CH_3Hg). Aunque la forma en que se produce la metilación del mercurio no se conoce con exactitud, se sabe que en el proceso intervienen bacterias. Estas bacterias son las primeras especies que contienen el metilmercurio, y las mismas pueden ser consumidas por el peldaño superior de la cadena trófica. El mercurio llega al fitoplancton y de ahí pasa a organismos superiores, con el problema que los animales acumulan el metilmercurio más rápido de lo que pueden excretarlo; y se va incrementando la concentración de este compuesto en la cadena trófica (biomagnificación). Así, aunque la concentración inicial de metilmercurio en el agua sea baja o muy baja, la biomagnificación convierte el metilmercurio en una amenaza real para la salud humana (Higuera y Oyarzun, 2016). La Figura 2.3 muestra el proceso de biomagnificación.

Entre los factores que determinan eventuales efectos sobre la salud, así como su gravedad, están los siguientes (OMS, 2016b):

- La forma de mercurio que se trate.
- La dosis.
- La edad o estado de desarrollo de la persona expuesta, siendo la fetal la más vulnerable.
- La duración de la exposición.
- La vía de exposición, sea inhalación, contacto cutáneo o ingestión.

Existen dos grupos especialmente vulnerables a los efectos del mercurio. Los fetos son sensibles a sus efectos sobre el desarrollo, dado que la exposición intrauterina a metilmercurio por el consumo materno de pescado o mariscos contaminados puede dañar el cerebro y el sistema nervioso del bebé en crecimiento. La alta exposición a esta sustancia durante la etapa fetal puede afectar el pensamiento cognitivo, la memoria, la capacidad de concentración, el lenguaje y las

aptitudes motoras y espacio-visuales del niño. El otro grupo son las personas que sufren exposición crónica a niveles elevados de mercurio (como poblaciones que practiquen la pesca de subsistencia, minería de oro artesanal o alguna otra actividad que involucre emisión de mercurio y en la que no se cuenta con protección personal suficiente) (OMS, 2016b).

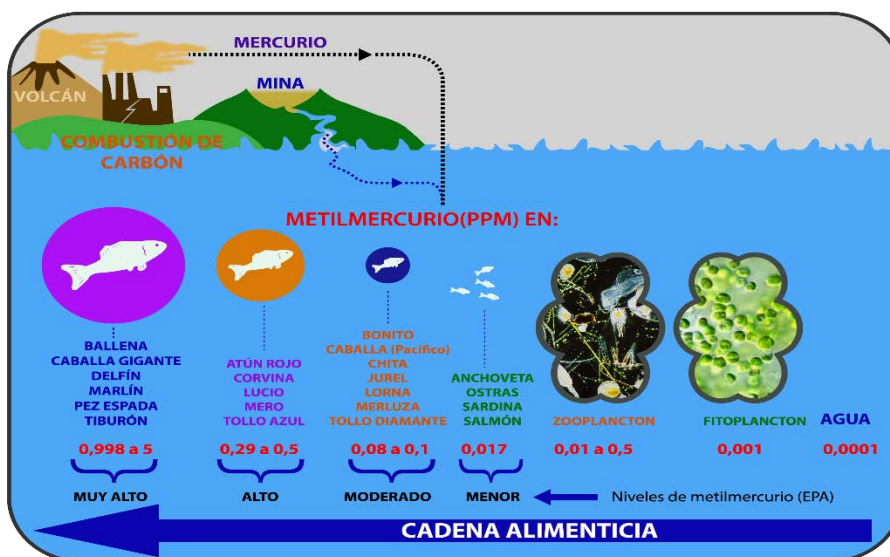


Figura 2.3. Biomagnificación del mercurio (Passamonti, 2015)

En los Estados Unidos, se define para el mercurio un TLV-TWA (valor umbral límite-media ponderada en el tiempo) de $0,05 \text{ mg m}^{-3} \text{ Hg}$, mientras que para derivados alquilados un TLV-TWA de $0,01 \text{ mg m}^{-3} \text{ Hg}$. Esto quiere decir que los trabajadores pueden estar expuestos a estas concentraciones máximas durante una jornada laboral de 8 horas diarias, y semanal de 40 horas sin sufrir efectos en su salud. En Alemania, el valor equivalente MAK (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) es de $0,1 \text{ mg m}^{-3}$, en Francia el VME (Valeur Moyenne d'Exposition) es de $0,05 \text{ mg m}^{-3}$ para vapores de mercurio, en el Reino Unido la legislación define una concentración máxima para periodos largos de $0,05 \text{ mg m}^{-3}$; en tanto que para periodos cortos hasta de $0,15 \text{ mg m}^{-3}$. La concentración IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) es de 28 mg m^{-3} , en la cual la posibilidad de la muerte o efectos graves en la salud es muy alta (Universidad Nacional Autónoma de México, 2007).

2.4 INVENTARIOS DE EMISIONES

Un inventario de emisiones de sustancias nocivas atmosféricas es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire. Un inventario permite conocer las fuentes emisoras de los contaminantes, así como el tipo y la cantidad de los contaminantes que emite cada una de ellas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

Los inventarios de emisiones se realizan, según su objetivo, para uno o varios contaminantes. Pueden contener los siguientes tipos de fuentes, aunque no necesariamente en un inventario se encuentran todas:

- Fuentes puntuales (por ejemplo, las industrias).
- Fuentes móviles (como los vehículos que circulan por las carreteras).
- Fuentes de área (comercios, servicios, casas de habitación).
- Fuentes naturales (erosión del suelo, emisiones biogénicas).

Los componentes incluidos en un inventario de emisiones, están determinados por el propósito que tiene el mismo. En el caso del proyecto de estudio, la contabilidad propuesta es para el mercurio únicamente, por lo que solo se consideran las fuentes que pueden ser significativas.

Es importante conocer algunos de los usos que se les da a los inventarios de emisiones, dentro de los cuales están:

- Identificar posibles medidas de reducción de emisiones para considerarlas en los programas de gestión de calidad de aire, agua o suelo.
- Estimar la calidad de aire, agua o suelo de escenarios futuros por medio de modelación y datos de distribución temporal y espacial de mediciones.
- Determinar tendencias sobre niveles de emisiones.
- Determinar los efectos de las medidas de control en las tasas de emisiones de un sitio.
- Apoyar el establecimiento de programas de inventario de emisiones.
- Dar a conocer el reporte de emisiones de las fuentes.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México define en su libro *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones (2005)*, nueve pasos que se requiere seguir a la hora de hacer un inventario de emisiones. Estos son:

1. Identificar el propósito de un inventario de emisiones.
2. Definir las características necesarias para el inventario de emisiones.
3. Determinar las fuentes de información para el inventario de emisiones y seleccionar las técnicas y métodos de estimación de emisiones.
4. Recopilar la información relacionada con las emisiones y datos de actividad.
5. Realizar la estimación de emisiones y la modelación necesaria.
6. Asegurar la calidad.
7. Evaluar la congruencia e incertidumbre de los resultados del inventario de emisiones.
8. Almacenar electrónicamente los datos.
9. Documentar los resultados.

Los inventarios de emisiones han encontrado un auge significativo en los últimos años, debido a su importancia crucial para las actividades de gestión de calidad de aire a nivel urbano, regional y global. Además, para los sectores económicos como el energético, el transporte y la industria, la integración de los inventarios se ha convertido en una necesidad para la gestión de la administración y la toma de decisiones importantes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005). En estudios de calidad de aire, existen cuatro tipos de inventarios: los del tipo tóxico-peligroso, los de contaminantes criterios, los de solventes y los de gases de efecto invernadero. El que se elabore un inventario de uno de estos tipos no exime a la región o país de la necesidad de elaborar los otros tres.

Las estimaciones en cuanto a la liberación del mercurio al ambiente son únicamente eso: estimaciones. Compilar un diagnóstico mundial, nacional o incluso regional no deja de necesitar ciertas suposiciones y generalizaciones de manera que se pueda completar la información, es muy importante que estas suposiciones estén bien justificadas, de manera que tengan validez y no le resten credibilidad al estudio que se entrega. Si bien los datos son conseguidos de fuentes primarias, como las bases de datos de las instituciones de gobierno o directamente con las

industrias involucradas en la posible emisión, siempre pueden tener un grado de incertidumbre asociados por cantidad de motivos. Así también, cuando se debe estimar algún dato de producción o algún factor a partir de suposiciones, se hacen las mismas de manera que se asemeje el dato final lo más posible a la realidad que se busca reportar, pero las estimaciones por más bien fundamentadas también contribuyen a la incertidumbre de los datos y por ende de los inventarios.

La incertidumbre asociada con los factores de corrección de los coeficientes de actividad, la validez de los factores de emisiones que se usan para las zonas o las regiones que son similares a otra zona o región que sí posee un inventario y un factor de emisión calculado propiamente dichos; sumado a las incertidumbres de la tecnología disponible y a los métodos de medición usados, hacen que los inventarios se creen como una fotografía medio borrosa de un momento y lugar puntuales.

Históricamente, los inventarios se basan en estimaciones de carácter anual de las emisiones en los sitios urbanos o las zonas metropolitanas, y así los grandes programas de gestión de calidad del aire que se generan a la luz de éstos, aplican para dichos espacios; y con el paso del tiempo y el avance de las tecnologías cada vez se han ido haciendo más precisos y más representativos con lo que es la dinámica atmosférica del sitio (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005).

Existen seis técnicas para la estimación de las emisiones, las cuales representan los métodos más comunes en el desarrollo de los inventarios de emisiones, y que vienen referidas por desarrollo de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) y otras instituciones de autoridad internacional en la materia. Dichas técnicas son:

- Muestreo en la fuente: consiste en hacer mediciones directamente de la concentración de contaminantes una vez que se conoce el flujo de salida de gases de chimenea, por ejemplo.
- Modelos de emisión: son ecuaciones útiles para el cálculo de las emisiones, dependientes de múltiples parámetros. Normalmente se corren por computadora, a consecuencia de su complejidad.

- Factores de emisión: expresan una relación entre la cantidad de un contaminante emitido y una unidad de actividad.
- Balance de materiales: está basada en mediciones de componentes de un proceso para determinar las mediciones al aire o a otra matriz. Se utiliza con mayor frecuencia en las fuentes de evaporación de solventes cuando no hay otra manera de hacer la estimación por el faltante de información.
- Encuestas: son cuestionarios diseñados para obtener información sobre emisiones. Buscan generar información sobre establecimientos industriales y servicios, pero también de fuentes de área, como muestreos representativos de fuentes de alguna categoría.
- Extrapolación: cálculo de emisiones de una fuente con base en las emisiones de otra fuente, usando un parámetro de extrapolación conocido para ambos casos.

En cuanto a los niveles de factores de emisión para inventarios, se pueden realizar inventarios de nivel N1 únicamente con factores ya definidos a escala global para distintas actividades económicas, y que el IPCC muestra en su base de datos a manera tal que cualquier persona pueda ingresar, buscar el factor de emisión que más se parece a su actividad económica y multiplicarlo por su dato de actividad anual para conocer la cantidad de contaminante asociado durante el año de estudio.

De esta manera, y buscando los factores de emisión, se permite al usuario hacer un inventario de emisiones muy general, ya que los factores mostrados son estudios generales llevados a cabo en algún lugar del mundo, bajo condiciones muy específicas adjuntadas en la descripción de cada uno de los factores; así el usuario que calcula su inventario busca las condiciones que más se asemejen a su realidad y comprende las condiciones en las que se generó cualquiera de los factores por elegir. Así, se da la posibilidad de calcular inventarios de emisiones con un análisis sumamente general, pero que permiten al interesado tener un primer estimado de la contaminación que está asociada con su actividad, o conjunto de actividades.

Cabe rescatar que no solamente la IPCC desarrolla y registra factores de emisión, sino que las diferentes instituciones en el ámbito mundial definen factores de emisión por zonas geográficas, como los sistemas FIRE (Factor Information Retrieval) o el AP42 (Compilation of Air Pollutant Emission Factors) de la EPA estadounidense.

Ahora, en caso de un inventario con los factores de emisión de nivel N2, se considera que el ente interesado busca la manera de generar algunos factores de emisión propios y utilizar información más cercana a la realidad de la región o de la zona, para no usar información tan general como los factores de emisión globales reportados en bases de datos como la de la IPCC, de esta forma se consigue conocer de manera más acertada la emisión contaminante de la actividad analizada por el interesado.

Estos inventarios, al ser generados con una incertidumbre menor, necesitan un esfuerzo mayor de parte del usuario, pues se debe hacer mediciones de contaminantes directamente de la fuente de emisión o por alguna de las técnicas de estimación de emisiones, y conocer la relación entre la cantidad de masa del contaminante por unidad de medida de la actividad evaluada (el factor de emisión), y así este es específico de su actividad bajo sus condiciones específicas y del sitio en el mundo que se hace el estudio, en caso que alguna condición de la zona geográfica pudiese afectar de alguna manera el factor de emisión generado.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

La metodología de generación del inventario a nivel N2 incluyó la construcción de un inventario a nivel N1, en primer lugar, con el fin de tener una primera idea de cuánto contabilizaron las emisiones durante el año de estudio, así como los campos, las fuentes, los sectores o las actividades donde se estaba emitiendo más mercurio, de manera que para el inventario a nivel N2 se les prestara más atención a los mismos.

3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS INVENTARIOS

- El año base para los Inventarios de las Emisiones de Mercurio generadas en Costa Rica a un nivel N1 y a nivel N2 fue el 2014. Se eligió este año para estudiarse debido a que los inventarios comenzaron a construirse desde julio de 2015, y se requieren tener datos de un año terminado, por lo que el año terminado más reciente era el 2014 en el momento. Además, se buscó hacer los inventarios con la información lo más reciente posible, para evaluar y analizar la situación del mercurio en el país más cercana a la realidad actual, y también para una vez terminados los inventarios para el año 2014 se pudiesen mantener actualizados con una temporalidad que deberá ser definida por las personas encargadas de sus renovaciones futuras.
- En cuanto el periodo de tiempo considerado en los inventarios, como se dijo anteriormente, fue entre el 1° de enero y el 31 de diciembre del 2014. De este modo, la resolución temporal de los mismos fue un año, y no se realizó análisis adicional de variaciones estacionales, mensuales, diarias u horarias.
- El área geográfica de interés para los inventarios fue la extensión territorial de Costa Rica (51 100 km²). Los presentes inventarios no incluyeron ningún tipo de resolución espacial adicional.
- Los presentes inventarios tampoco presentaron ningún tipo de especiación química para el mercurio, es decir, no hicieron distinción entre el mercurio elemental, particulado o mercurio divalente.

3.2 ELABORACIÓN DE FACTORES DE ENTRADA, DISTRIBUCIÓN Y/O EMISIÓN

La emisión de mercurio se estimó para cinco matrices distintas (aire, agua, suelo, productos y residuos) en función de la disponibilidad de los factores de entrada, la distribución o la emisión, propios para cada tipo de fuente, proceso, tecnología o actividad, de modo que la sumatoria de las liberaciones de cada matriz brindó el total para cada fuente o sector analizado. La proporción en la cual el mercurio asociado a una actividad se emite en cada una de las matrices es definida por la metodología de construcción y explicación del instrumento del PNUMA, usado como base para desarrollar este inventario en su capítulo 3 (UNEP, 2015), con lineamientos a partir del ciclo de vida del mercurio. Para cada uno de los sectores, fuentes, tecnologías o actividades la proporción de liberación entre las matrices es distinta según la naturaleza del mismo.

La cuantificación de las emisiones de mercurio se realizó usando tanto factores de entrada y distribución como factores de emisión, con ayuda de las ecuaciones 3.1 y 3.2 según corresponde.

- Vía factores de entrada y de distribución

Liberación a la matriz i = Factor de entrada × Factor de distribución a la matriz i × Actividad (3.1)

- Vía factores de emisión

Liberación a la matriz i = Factor de emisión a la matriz i × Actividad (3.2)

A modo de ejemplo, se propone lo siguiente: se tiene la producción de cemento como actividad, con 100 000 t producidas en un año. El factor de emisión de esta actividad se propone como

1 g t^{-1} , mientras que la distribución a la matriz de aire es al 100 %. Entonces, utilizando la ecuación 3.1 resulta en:

$$\text{Liberación a la matriz aire} = 1 \frac{\text{g}}{\text{t}} \cdot 1 \frac{\text{g al aire}}{\text{g}} \cdot 100\,000 \text{ t} = 100\,000 \text{ g al aire}$$

Como ejemplo del uso de la ecuación 3.2, se propone el siguiente: se tiene el consumo de combustibles como actividad, con 100 000 t consumidas en un año. El factor de emisión a la matriz de aire se propone como $0,01 \text{ mg t}^{-1}$. Entonces, utilizando la ecuación 3.2 resulta en:

$$\text{Liberación a la matriz aire} = 0,01 \frac{\text{mg al aire}}{\text{t}} \cdot 100\,000 \text{ t} = 1\,000 \text{ mg al aire}$$

Los factores utilizados para la cuantificación de las liberaciones de este inventario son, en su mayoría, los denominados Factores por Defecto incluidos en el instrumento del PNUMA utilizado como base para desarrollar este inventario. Para todos los factores de emisión, se tomó o se calculó un factor mejor aproximado (MAP) como el que se consideró en función al conocimiento de una fuente específica, o su tecnología, sistema de control de emisiones, prácticas de operación o cualquier otro parámetro que estuviera señalado en el instrumental normalizado del PNUMA, o estimado basado en conocimientos generales del sector y suposiciones sobre la fuente por evaluar. Cuando el instrumento de nivel N1 presentó un intervalo de factores, en la mayoría de casos el factor de emisión MAP utilizado fue la media aritmética entre los valores MIN y MAX según lo sugerido por UNEP (2015); mientras que cuando el instrumental de nivel N2 presentó un intervalo de factores, el MAP fue estimado suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad del intervalo, según lo sugerido en cuanto a concentraciones de sustancias en el medio ambiente de IPCC (2000), con ayuda de la ecuación 3.3:

$$F_{\text{MAP}} = e^{\left[\ln(F_{\text{MIN}}) + \frac{\ln(F_{\text{MAX}}) - \ln(F_{\text{MIN}})}{2} \right]} \quad (3.3)$$

Donde:

- F_{MAP} (=) Factor mejor aproximado
- F_{MIN} (=) Factor mínimo del intervalo indicado por el instrumento del PNUMA o cualquiera otra fuente bibliográfica
- F_{MAX} (=) Factor máximo del intervalo indicado por el instrumento del PNUMA o cualquiera otra fuente bibliográfica

El factor de emisión mínimo fue determinado como aquel valor que el instrumento del PNUMA (de nivel N1 o N2) o cualquier otra fuente bibliográfica indicaran para las tecnologías o las prácticas con mayor liberación de mercurio que no fueran propiamente las identificadas en el país, pero que su presencia pudiera llegar a existir. Cuando el instrumento mostraba un intervalo, el valor mínimo, se tomó como el menor del intervalo.

El factor de emisión máximo fue determinado como aquel valor que el instrumento del PNUMA (de nivel N1 o N2) o cualquier otra fuente bibliográfica indicaran para las tecnologías o las prácticas con menor liberación de mercurio que no fueran propiamente las identificadas en el país, pero que su presencia pudiera llegar a existir. Cuando el instrumento mostraba un intervalo, el valor máximo se tomó como el mayor del intervalo.

Para los factores de distribución de las entradas de mercurio, no se consideraron intervalos de incertidumbre ya que únicamente inciden sobre la forma en que las entradas se distribuyen entre las cinco matrices. Estos factores sí pueden tener incertidumbre sobre el verdadero camino que toma el mercurio para ser liberado por la fuente entre alguna de las cinco matrices, pero no incide sobre la liberación total.

3.3 INCERTIDUMBRE DEL INVENTARIO

La incertidumbre analiza el rango de confianza en una medida, de manera que incluye los errores aleatorios provenientes de las emisiones consideradas en el inventario. La estimación de la incertidumbre ayuda a priorizar esfuerzos para mejorar la exactitud de los inventarios futuros, y la elección de la metodología de análisis de información, y no está orientada a cuestionar la validez de las estimaciones (IPCC, 2000). Las incertidumbres de las estimaciones pueden deberse a variabilidad en las definiciones, variabilidad natural del proceso o de la fuente, y la evaluación del método de muestreo del proceso (Maíz, 2008).

Para la estimación de la incertidumbre, basados en (Maíz, 2008), se utilizó el método de propagación de error para combinar las dispersiones planteadas para cada factor de entrada, distribución y/o emisión; y actividad (determinadas como MIN y MAX). Se asumió una distribución normal logarítmica para establecer la distribución de probabilidad, según así es el comportamiento de la concentración de las sustancias químicas en el ambiente (IPCC, 2000). Las estimaciones siguen lo planteado por el IPCC (2000) y por Pulles, Kok y Quass (2006).

El límite superior del intervalo de incertidumbre propuesto para cada fuente refleja el potencial de emisión máximo de dicha fuente, al considerar errores en la estimación de su actividad, así como errores en el factor de entrada, distribución y/o emisión; y al asignar una probabilidad de

ocurrencia normal a dichos errores. De forma análoga, el límite inferior del intervalo indica la emisión mínima esperada de la fuente.

Además, la incertidumbre se asocia al valor de emisión propuesto como mejor aproximado (MAP), y no necesariamente a la emisión real de cada fuente. Es decir, que cuando la estimación de la liberación incluye más de una matriz, pero para algunas de ellas no hay factor de distribución, entonces, la liberación total de la fuente es subestimada y la incertidumbre asociada a las matrices que sí fueron estimadas no incluye esta subestimación. La incertidumbre se calculó para el total de la liberación hacia las cinco matrices y no cada matriz por individual, debido a que no se tiene un rango de valores mínimos y máximos en los factores de distribución, sino un único valor.

Finalmente, la incertidumbre asociada a la liberación de una fuente o sector no representa el intervalo de duda que exista ante la posible omisión de establecimientos adicionales que realicen la misma actividad o información adicional de un sector, y que fueran obviados entre las fuentes de información, sino únicamente representa el intervalo de duda para la estimación de las liberaciones de los establecimientos o la información que sí fueron considerados.

Para las fuentes por considerar, el límite inferior y superior del intervalo de incertidumbre fueron calculados con las ecuaciones 3.4 y 3.5:

$$L_{INF}=e^{\left[\ln(A_{MAP}\times F_{MAP})-\frac{\ln(A_{MAX}\times F_{MAX})-\ln(A_{MIN}\times F_{MIN})}{\sqrt{12}}\right]} \quad (3.4)$$

$$L_{SUP}=e^{\left[\ln(A_{MAP}\times F_{MAP})+\frac{\ln(A_{MAX}\times F_{MAX})-\ln(A_{MIN}\times F_{MIN})}{\sqrt{12}}\right]} \quad (3.5)$$

Donde:

- L_{INF} (=) Límite inferior del intervalo de incertidumbre
- L_{SUP} (=) Límite superior del intervalo de incertidumbre
- A_{MAP} (=) Actividad de la fuente mejor aproximada
- A_{MIN} (=) Actividad de la fuente mínima
- A_{MAX} (=) Actividad de la fuente máxima
- F_{MAP} (=) Factor de entrada, distribución y/o emisión mejor aproximado

- F_{MIN} (=) Factor de entrada, distribución y/o emisión mínimo
- F_{MAX} (=) Factor de entrada, distribución y/o emisión máximo

3.4 FUENTES DE INFORMACIÓN

El Cuadro 3.1 resume las fuentes donde se consiguió la información de actividad de los diversos sectores, fuentes, productos, tecnologías, entre otros. También indica las fuentes donde se tomó la información de los factores de emisión y de distribución por matriz. Los supuestos y cálculos necesarios son detallados en la memoria de cálculo de cada actividad, descrita en el apéndice.

Cuadro 3.1 Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|--|---|---|
| Extracción de oro con el método de amalgamación con mercurio | Departamento de Control Minero de la Dirección de Geología y Minas, de MINAE (Gómez, 2016). | <p>Para el inventario de nivel N1 el factor MAP fue tomado del instrumental de UNEP (2015). Los factores MIN y MAX fueron supuestos como 0,1 veces y 10 veces el factor de emisión MAP, respectivamente, según lo sugerido por Maíz (2008).</p> <p>Para el inventario de nivel N2 los factores MIN y MAX conseguidos fueron los valores mínimos y máximos de mediciones en la zona de minería artesanal de Costa Rica (Abangares, Guanacaste), de mercurio perdido durante el procesamiento respecto al oro recuperado. El factor MAP fue generado asumiendo una distribución normal logarítmica y bajo el supuesto que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo, y con todos los datos de medición efectuados para calcular la media logarítmica correspondiente.</p> |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|---|---|
| Quema de carbón mineral | Balance Energético Nacional del 2014, de la Dirección Sectorial de Energía del MINAE (Molina, 2016a) | Para el inventario de nivel N1 los factores de emisión MAP, MIN y MAX fueron tomados del instrumental de UNEP (2015). Para el inventario de nivel N2 se usaron los factores de emisión MAP, MIN y MAX del Inventario de liberaciones de mercurio de México en el 2004 elaborado por Maíz (2008). |
| Quema de combustibles derivados del petróleo | Balance Energético Nacional del 2014, de la Dirección Sectorial de Energía del MINAE (Molina, 2016a) | Los factores de emisión MIN y MAX utilizados fueron los del instrumental de UNEP (2015). Para el inventario de nivel N1 el valor MAP fue calculado con una media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 el valor MAP fue estimado con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Producción de electricidad con energía geotérmica | Balance Energético Nacional del 2014, de la Dirección Sectorial de Energía del MINAE (Molina, 2016a). | Este sector únicamente es tomado en cuenta para el Inventario a nivel N2, porque para el nivel N1, aún no ha sido incluido en el instrumental para ser cuantificado, sino que sólo se considera como una fuente adicional de emisión del país en estudio de consideración cualitativa (si se da o no) Los factores de emisión MAP y MAX fueron tomados de Maíz (2008). El factor de emisión MIN fue el menor valor indicado en el intervalo para mediciones de los eyectores de gases evacuados en el condensador de la actividad, desarrollado por la EPA, según UNEP (2015). |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|--|--|
| Quema de biomasa | Balance Energético Nacional del 2014, de la Dirección Sectorial de Energía del MINAE (Molina, 2016a) | Para el inventario de nivel N1 los valores MAP, MIN y MAX utilizados fueron los del instrumental de UNEP (2015). Para el inventario de nivel N2, el factor de emisión MAP fue conseguido del instrumental de UNEP (2015) para cálculos de inventarios N2. Los factores MIN y MAX fueron estimados como 0,1 veces y 10 veces el factor de emisión MAP, respectivamente, según lo sugerido por Maíz (2008). |
| Uso de termómetros clínicos | Área de Almacenamiento y Distribución de la Caja Costarricense del Seguro Social (González, 2016a) respecto a los termómetros clínicos despachados a áreas de salud y los almacenados, importaciones reportadas por la Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda (Dirección General de Aduanas, 2016). | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los sugeridos por el instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue generado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 se hizo con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Uso de switches y relays con mercurio | Población del 2014 reportada por (INEC, 2011a) | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|--|---|
| Producción de cemento | Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, de MINAE (Sibaja, 2016) | <p>Para el inventario de nivel N1 los factores de emisión MAP, MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015)</p> <p>Para el inventario de nivel N2, los factores de emisión MIN y MAX fueron los valores mínimos y máximos medidos en una de las cementeras a partir de la concentración de gases de salida en la chimenea, tomando en consideración datos semestrales entre enero de 2013 y enero de 2016, mientras que el factor de emisión MAP fue calculado suponiendo una distribución normal logarítmica para todos los datos y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> |
| Uso de pilas | Importaciones reportadas por la Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda (Dirección General de Aduanas, 2016). Pilas reportadas como recolectadas o recicladas por diferentes gestores. | <p>Para el inventario de nivel N1, el factor de emisión MAP se calculó como el promedio entre los factores de emisión para las celdas de botón zinc-aire, las celdas alcalinas de botón y las celdas de botón de óxido de plata, según lo sugerido por UNEP (2015). Los valores MIN y MAX fueron tomados como un $\pm 50\%$ del valor MAP.</p> <p>Para el inventario de nivel N2, el factor de emisión MAP fue estimado como el promedio entre los factores de emisión para las celdas de botón zinc-aire, las celdas alcalinas de botón, las celdas de botón de óxido de plata y las alcalinas con formas distintas a la celda de botón, según lo sugerido por UNEP (2015). Los valores MIN y MAX fueron tomados como un $\pm 50\%$ del valor MAP.</p> |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|---|---|
| Uso de productos con poliuretano | Población del 2014 reportada por (INEC, 2011a) | Los factores de emisión MIN y MAX fueron tomados del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Uso de fluorescentes | Importaciones reportadas por la Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda (Dirección General de Aduanas, 2016). Fluorescentes reportados como reciclados por diferentes gestores. | Para el inventario de nivel N1 los factores de emisión MIN, MAX y MAP fueron tomados del instrumental de UNEP (2015) para lámparas de extremo doble. Para el inventario de nivel N2, el factor de emisión MIN usado fue el mínimo del rango de mercurio en lámparas compactas, y el MAX fue tomado como el máximo del rango de mercurio en lámparas de extremo doble según UNEP (2015). El valor MAP fue calculado con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Uso de termómetros de laboratorio | Reportes de las universidades de la cantidad de termómetros de laboratorio que tienen en sus diferentes sedes y centros de investigación. | Los factores de emisión MIN y MAX utilizados fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 se hizo con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|---|--|
| Uso de amalgamas dentales con mercurio | <p>Para el inventario N1, se utilizó la población del 2014 reportada por (INEC, 2011a).</p> <p>Para el inventario N2, se usó las importaciones reportadas por la Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda (Dirección General de Aduanas, 2016). Área de Almacenamiento y Distribución de la Caja Costarricense del Seguro Social (González, 2016b) respecto a las amalgamas despachadas a áreas de salud y las almacenadas</p> | <p>Para el inventario N1, los valores MIN, MAX y MAP por utilizar fueron los del instrumental UNEP (2015) para el uso de factores poblacionales. El valor MAP sugerido en este caso es igual al valor MAX.</p> <p>Para el inventario N2, los factores de emisión MIN y MAX fueron tomados del instrumental de UNEP (2015) para el uso de masa de mercurio por cada cápsula de amalgama predosificada. El valor MAP fue calculado con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> |
| Uso de esfigmomanómetros con mercurio | <p>Importaciones reportadas por la Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda (Dirección General de Aduanas, 2016).</p> | <p>Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP para el inventario de nivel N1 fue tomado también de lo sugerido por UNEP (2015), mientras que para el inventario de nivel N2 el valor MAP fue calculado con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|---|--|
| Uso de manómetros con mercurio | Población del 2014 reportada por (INEC, 2011a) | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue generado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 tomando una distribución normal logarítmica y suponiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Uso de químicos de laboratorio con mercurio | Para el inventario de nivel N1 se utilizó la población del 2014 reportada por (INEC, 2011a). Para el inventario de nivel N2 se utilizó los reportes de universidades de los reactivos con mercurio en sus sedes, además las importaciones reportadas por la DGA del Ministerio de Hacienda (Dirección General de Aduanas, 2016). | Para el inventario de nivel N1, los factores MAX y MIN fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado con la media aritmética entre los factores MIN y MAX. Para el inventario de nivel N2, el factor de emisión MAP fue tomado como 1 porque el reporte de los químicos de laboratorio fue dado en kg mercurio equivalente, de modo que el dato de actividad es a su vez la emisión. Los valores MIN y MAX fueron supuestos como $\pm 5\%$ del valor MAP únicamente para el cálculo de la incertidumbre. |
| Otros equipos de laboratorio con mercurio | Se utilizó la población del 2014 reportada por (INEC, 2011a) | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|--|--|---|
| Emisión de mercurio de los residuos sólidos en rellenos sanitarios | Informe de la Contraloría General de la República acerca de la gestión de las Municipalidades en la recolección de residuos sólidos de tipo ordinario (Contraloría General de la República, 2016). | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue tomado para el inventario de nivel N1 como lo sugerido por UNEP (2015) para inventarios de nivel N1, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Emisión de mercurio de la quema informal de residuos sólidos | Estimación realizada a partir del informe de (Contraloría General de la República, 2016), con datos de (INEC, 2011b) e (INEC, 2014). | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue tomado para el inventario de nivel N1 como lo sugerido por UNEP (2015) para inventarios de nivel N1, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Emisión de mercurio de la disposición informal de residuos sólidos | Estimación realizada a partir de (Contraloría General de la República, 2016), con datos de (INEC, 2011b) e (INEC, 2014). | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue tomado para el inventario de nivel N1 como lo sugerido por UNEP (2015) para inventarios de nivel N1, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |

Cuadro 3.1 (continuación) Fuentes de información para los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones, tanto a nivel N1 como a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Fuente del dato de actividad | Fuente de los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|--|---|
| Emisión de mercurio de las aguas residuales | Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud (Dirección de Protección al Ambiente Humano, 2016c) | Los factores de emisión MIN y MAX fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Emisión de mercurio de los crematorios | Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, de MINAE (Sibaja, 2016) | Los factores de emisión MIN y MAX fueron tomados del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Emisión de mercurio de los cementerios | Población del 2014 reportada por (INEC, 2011a) | Los factores de emisión MIN y MAX a utilizar fueron los del instrumental de UNEP (2015). El valor MAP fue calculado para el inventario de nivel N1 mediante media aritmética entre los valores MIN y MAX, mientras que para el inventario de nivel N2 con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |

Es necesario mencionar los siguientes criterios para determinar el intervalo donde la actividad de una fuente puede encontrarse, información necesaria para el posterior cálculo de la incertidumbre:

- La información obtenida por las fuentes documentales especificadas en el Cuadro 3.1 fue considerada la actividad mejor aproximada (MAP). En algunos casos, la actividad total de un conjunto de establecimientos pertenecientes a un tipo de fuente o sector, fue la suma de sus respectivas actividades.
- Se determinó la actividad mínima (MIN) y la actividad máxima (MAX), como un porcentaje de desviación sobre el valor de MAP (ya sea $\pm 10\%$ o $\pm 30\%$). Este porcentaje fue elegido según el tipo de fuente documental, el origen de la emisión y en aquellos casos en los que se contaba con varias fuentes de información que fueron sumadas o restadas, de manera que este porcentaje de variación pudiera representar la dispersión que los datos individuales tenían. También se siguió lo sugerido por Maíz (2008) para la asignación de porcentajes de desviación a los datos de actividad.

3.5 ELABORACIÓN DE INVENTARIO A NIVEL N1

Como se mencionó al inicio, este inventario generó un panorama inicial de la cantidad de emisiones de mercurio en Costa Rica para el año de estudio, una distribución por cada una de las matrices y un intervalo inicial de incertidumbre. Este inventario fue desarrollado con ayuda del instrumental de elaboración de inventarios de mercurio a nivel N1 del PNUMA.

3.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL INVENTARIO A NIVEL N1 E IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES DE MEJORA EN MÉTRICA PARA LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO A NIVEL N2

Concluida la elaboración del inventario a nivel N1, fue posible identificar las fuentes emisoras que, según el instrumental, son las más contaminantes del país, lo cual permitió conocer en cuáles sectores se necesitaba hacer esfuerzos por tratar de mejorar la calidad de la información utilizada. De esta manera, también fue posible hacer un análisis de las oportunidades de mejora para concluir si se tomaba la decisión de implementar algún tipo de esfuerzo adicional para mejorar la calidad de los datos de alguno de los sectores identificados como más contaminantes del país en función de su costo asociado y la mejora que podría obtenerse en cuanto la métrica de la emisión de ese sector en específico.

Se buscó potenciales mejoras generales para el inventario N1 y todas las fuentes de emisión consideradas, de manera que pudieran implementarse en el momento de construir el inventario de nivel N2. Algunas de estas fueron el reemplazar el uso de factores poblacionales por datos del país, en los casos en que fuera posible, utilizar la media logarítmica entre valores de un rango y no la media aritmética porque la primera describe de manera más acertada el comportamiento de la concentración de sustancias químicas en el medio, también analizar si la fuente de donde se tomó los factores de emisión fue la más adecuada y la que mejor se ajustó a la realidad del comportamiento de dicha fuente en el país.

Se utilizó razonamiento lógico para decidir con respecto a si las aplicabilidades de los factores de emisión tomados de la fuente documental del inventario N1 dada eran más adecuadas a la realidad costarricense que otros factores encontrados en otras fuentes bibliográficas (inventarios de otras regiones, por ejemplo), también en el caso de la toma de decisión de cambiar el uso de factores poblacionales hacia recopilar la información necesaria para no utilizarlos y describir la emisión de la actividad de otro modo que sea más acorde con la realidad.

El análisis de las oportunidades de mejora y su aplicabilidad (si aplicó), así como la implementación de las mejoras generales para construir un inventario de mejor calidad que el N1 se efectuó cuando se calculó el inventario de nivel N2.

3.7 ELABORACIÓN DEL INVENTARIO A NIVEL N2

Con la idea de realizar todas las mejoras propuestas en el Cuadro 4.2, se levantó con ayuda del instrumental correspondiente un inventario de emisiones a un nivel N2, el cual luego se procedió a comparar con el inventario a nivel N1 en cuanto a la estimación total de la emisión de mercurio durante el 2014, la distribución total de las emisiones en las cinco matrices, los límites superior e inferior de la incertidumbre de cada uno de los inventarios, y el peso relativo de cada uno de los sectores en la emisión total de mercurio y en la emisión distribuida en cada una de las matrices.

3.8 CONTROL DE CALIDAD

Como medidas tomadas para asegurar la calidad del inventario presentado, se enumeran las siguientes acciones seguidas durante el desarrollo del mismo:

- La lista de actividades potencialmente emisoras del mercurio ha sido desarrollada y utilizada por años por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), reconocidos por agencias internacionales como la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos y la GEF (Global Environmental Facility). Incluso, son las actividades con las que se ha desarrollado la herramienta de elaboración de inventarios de mercurio, disponible para uso de cualquier interesado en el mundo, y con la cual se han desarrollado inventarios nacionales de emisiones en muchos países. Además, también añade un espacio para agregar fuentes emisoras no contempladas en la misma, e incluso se insta a quien encuentre algún caso de estos que se comuniquen con el PNUMA para que su aporte sea conocido por los autores de la herramienta, y que luego de ser investigado, si es válido el aporte, pueda ser incluido en actualizaciones de la misma.
- La información de las actividades tomadas en cuenta en el inventario se trató de obtener de los datos oficiales publicados por instituciones de gobierno, en los casos que aplica. En los casos de la información relacionada con las compañías privadas (producción de cemento, reciclaje de fluorescentes, por citar ejemplos), la misma fue brindada directamente por dichas empresas, de manera que en todo momento se intentó obtener fuentes primarias de la información de los datos de actividad y se hizo controles cruzados para disminuir los errores de algún dato brindado de manera errónea por cualquier tipo de mal entendido.
- Las hojas de cálculo fueron auditadas y revisadas, y con ayuda de lo explicado en este documento y la memoria de cálculo de cada inventario de los apéndices es posible comprobar los cálculos desarrollados para la confección del inventario haciéndolos nuevamente a mano o con alguna herramienta de cómputo distinta a la propuesta por el PNUMA.

- Los datos finales del inventario arrojan resultados coherentes con otros estudios realizados en el ámbito regional, como México, Panamá o Ecuador, y una distribución de emisiones que cumplió con la hipótesis con la que se comenzó a desarrollar este inventario, y consecuente con la opinión de expertos en la dinámica del mercurio en Costa Rica que, sin cálculos, aseguraban que las fuentes más importantes serían en su mayoría las señaladas también en el inventario a nivel N2, una vez que fue concluido.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 INVENTARIO A NIVEL N1

Los resultados generados al realizar el conteo a nivel N1 se muestran en el Cuadro 4.1. Se puede observar que con el cálculo la emisión total de todos los sectores considerados para Costa Rica durante el 2014 fue de 5 390,08 kg Hg, con un intervalo de incertidumbre entre 2 795,54 kg Hg y 10 876,12 kg Hg. También, es posible comprobar que la emisión total fue 2 594,54 kg mayor que el límite inferior de la incertidumbre, y fue 5 486,04 kg menor que el límite superior de la incertidumbre, de modo que el valor reportado no se encuentra en la mitad del intervalo de incertidumbre mostrado y, por tanto, no es un intervalo de incertidumbre simétrico.

4.1.1 Emisión total

Los sectores más representativos en cuanto la emisión total son mostrados en la Figura 4.1.

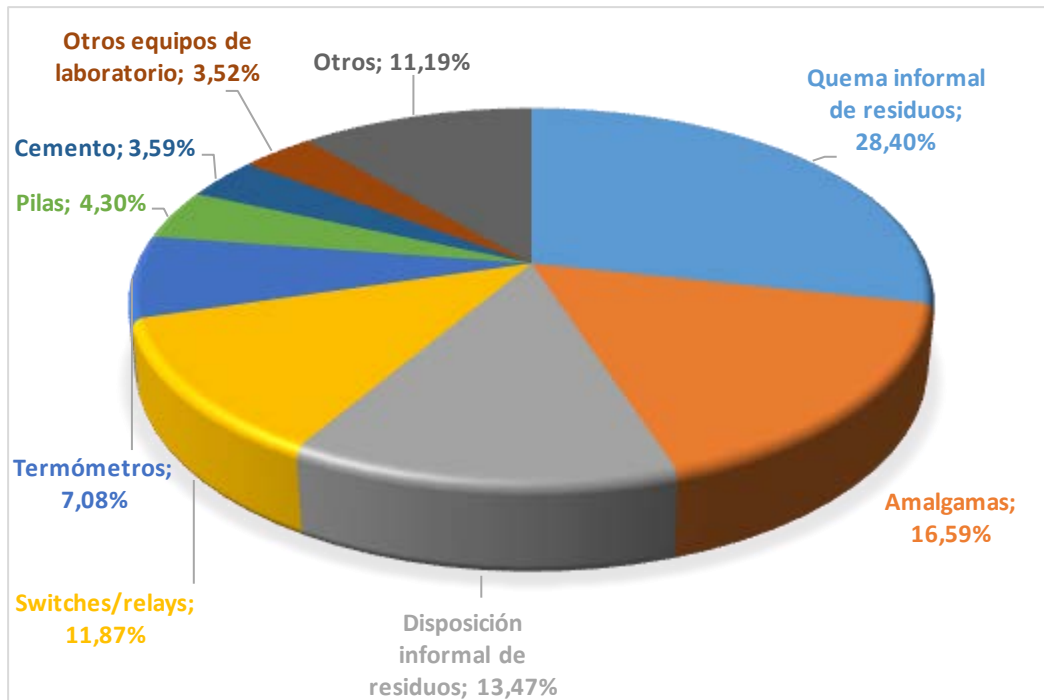


Figura 4.1 Distribución de la emisión total del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos

Cuadro 4.1 Resultados del inventario N1 de emisión total de cada sector considerado, porcentaje de importancia de esta sobre la emisión global, límites superior e inferior de incertidumbre y emisión por matriz

| Sector | Emisión por matriz (kg Hg) | | | | | | Emisión total (kg Hg) | % importancia | Incertidumbre | |
|----------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| | Aire | Agua | Suelo | Productos | Residuos | | | | L _{INF} (kg Hg) | L _{SUP} (kg Hg) |
| Carbón | 0,44 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,44 | 0,01 % | 0,21 | 0,90 |
| Derivados del petróleo | 10,97 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10,97 | 0,20 % | 5,32 | 22,59 |
| Coque de petróleo | 5,44 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,44 | 0,10 % | 2,64 | 11,20 |
| Biomásas | 73,19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 73,19 | 1,36 % | 31,49 | 170,10 |
| Extracción de oro c/amalgama | 7,00 | 14,00 | 14,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 35,00 | 0,65 % | 7,75 | 158,13 |
| Cemento | 145,14 | 0,00 | 0,00 | 48,38 | 0,00 | 0,00 | 193,52 | 3,59 % | 73,47 | 509,73 |
| Termómetros | 38,16 | 114,49 | 0,00 | 0,00 | 228,98 | 0,00 | 381,63 | 7,08 % | 232,43 | 626,59 |
| Termómetros laboratorio | 3,28 | 9,83 | 0,00 | 0,00 | 19,66 | 0,00 | 32,76 | 0,61 % | 15,62 | 68,69 |
| Switches/relays | 63,99 | 0,00 | 63,99 | 0,00 | 511,89 | 0,00 | 639,86 | 11,87 % | 306,41 | 1 336,18 |
| Fluorescentes | 5,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 105,47 | 0,00 | 111,02 | 2,06 % | 62,23 | 198,07 |
| Pilas | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 231,54 | 0,00 | 231,54 | 4,30 % | 141,02 | 380,16 |
| Productos con poliuretano | 14,22 | 7,11 | 0,00 | 0,00 | 120,86 | 0,00 | 142,19 | 2,64 % | 88,71 | 227,92 |
| Amalgamas | 23,16 | 384,53 | 55,60 | 41,70 | 389,17 | 0,00 | 894,16 | 16,59 % | 594,96 | 1 343,82 |
| Esfingomanómetros | 0,85 | 2,54 | 0,00 | 0,00 | 5,09 | 0,00 | 8,48 | 0,16 % | 6,70 | 10,74 |
| Manómetros | 2,37 | 7,11 | 0,00 | 0,00 | 14,22 | 0,00 | 23,70 | 0,44 % | 22,20 | 25,29 |
| Químicos de laboratorio | 0,00 | 15,64 | 0,00 | 0,00 | 31,76 | 0,00 | 47,40 | 0,88 % | 34,27 | 65,56 |
| Otros equipos de laboratorio | 0,00 | 62,56 | 0,00 | 0,00 | 127,02 | 0,00 | 189,59 | 3,52 % | 137,07 | 262,22 |
| Rellenos sanitarios | 47,47 | 0,47 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 47,94 | 0,89 % | 23,28 | 98,76 |
| Quema informal de residuos | 1 530,73 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1 530,73 | 28,40 % | 658,59 | 3 557,81 |
| Disposición informal de residuos | 72,61 | 72,61 | 580,89 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 726,12 | 13,47 % | 312,41 | 1 687,68 |
| Agua residual | 0,00 | 11,30 | 0,00 | 0,00 | 1,26 | 0,00 | 12,55 | 0,23 % | 4,42 | 35,63 |
| Crematorios | 2,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,26 | 0,04 % | 1,43 | 3,57 |
| Cementerías | 0,00 | 0,00 | 49,60 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 49,60 | 0,92 % | 32,91 | 74,76 |
| Total | 2 046,82 | 702,20 | 764,07 | 90,08 | 1 786,90 | 5 390,08 | 5 390,08 | 100,00 % | 2 795,54 | 10 876,12 |

Se observa que son 8 sectores (quema informal de residuos, amalgamas dentales, disposición informal de residuos sólidos, uso de switches y relays, uso de termómetros, uso de pilas, producción de cemento y otros equipos de laboratorio distintos a los termómetros que contienen mercurio) los que concentran casi el 90 % de las emisiones totales reportadas en el nivel N1. Incluso, los 4 más representativos son responsables de más del 70 % de las emisiones de mercurio reportadas según el inventario de nivel N1 para Costa Rica.

También, es posible apreciar la grave problemática que genera la no recolección y disposición de los residuos sólidos de manera adecuada en cuanto a las emisiones de mercurio, pues las técnicas alternativas de disposición de los residuos que no llega a los rellenos sanitarios (los que se queman o botan en ríos, lotes baldíos o enterrados) son responsables de casi el 42 % de las emisiones totales de mercurio del país, según el inventario de nivel N1. Adicionalmente, el uso de los productos terminados con mercurio (termómetros clínicos y de laboratorio, switches y relays, fluorescentes, pilas, productos con poliuretano, amalgamas dentales, esfigmomanómetros y manómetros) son responsables de casi un 46 % de las emisiones totales de mercurio, de manera que, entre los productos con mercurio de uso casi diario y la disposición no controlada de residuos sólidos se emitió casi el 88 % de la totalidad de la emisión de mercurio del país en el año 2014.

Los 15 sectores representados en la categoría otros, y que entre todos suman un 11,19 % de las emisiones totales, son los siguientes: quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, uso de biomasa como combustible, extracción de oro con amalgamación, termómetros de laboratorio, uso de fluorescentes, uso de productos con poliuretano, manómetros y esfigmomanómetros, químicos de laboratorio, residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios, mercurio en aguas residuales, y emisiones de mercurio en cementerios y crematorios).

4.1.2 Emisión al aire

Los sectores más representativos en cuanto a la emisión al aire son mostrados en la Figura 4.2. Es posible observar que la quema informal de los residuos es la responsable de casi el 75 % de las emisiones al aire según el inventario de nivel N1, mientras que, si se suma también el mercurio que se emite por los residuos sólidos que se disponen en los ríos, se entierra o de desecha en los

lotes baldíos sin ningún tipo de tratamiento ni protección del suelo o contención de las emisiones al aire entonces se alcanza casi el 79 % de las emisiones totales a la matriz.

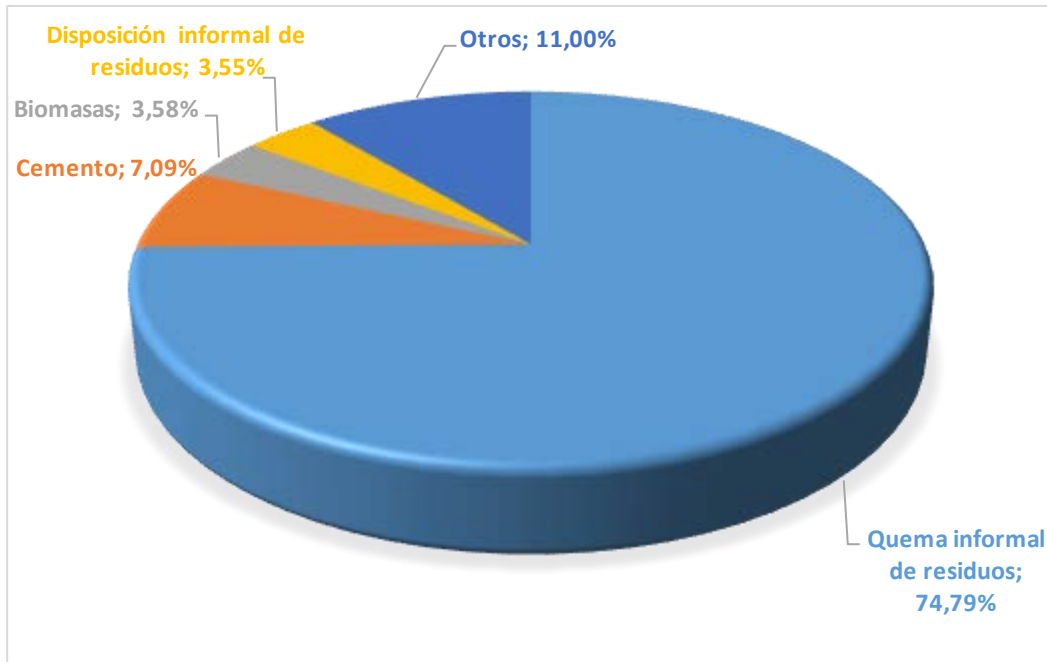


Figura 4.2 Distribución de la emisión al aire del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos

Los otros sectores que presentan alguna relevancia en la emisión de mercurio al aire, según el inventario N1, son la producción cementera y la quema de biomasa, que entre ambas suman un 10,67 % de las emisiones totales en la matriz; mientras que otros 14 sectores que emiten mercurio al aire, y que engloban un 11 % de las emisiones entre todos, son los siguientes: quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, extracción de oro con amalgamación, termómetros clínicos y de laboratorio, uso de los switches y relays, uso de fluorescentes, uso de productos con poliuretano, uso de amalgamas dentales, manómetros y esfigmomanómetros, residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios, y las emisiones de mercurio en crematorios.

Hay 5 sectores, el uso de pilas con mercurio, químicos de laboratorio, otros equipos de laboratorio distintos a los termómetros, las aguas residuales y los cementerios que no aportan emisiones al aire, según el inventario de nivel N1.

4.1.3 Emisión al agua

Los sectores más representativos en cuanto la emisión al agua, se muestran en la Figura 4.3. Es posible observar que el uso de las amalgamas con mercurio es responsable de más de la mitad de las emisiones al agua, mientras que el uso de termómetros representa del 16,30 % de las emisiones en esta matriz según el inventario N1. Si se toma en cuenta el uso de los productos terminados con mercurio, de la forma que se definieron en la sección de emisión global anterior (sección 4.1.1), éstos se encargaron de más de un 77 % de la emisión total que va al agua.



Figura 4.3 Distribución de la emisión al agua del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos

Los otros sectores que presentan alguna relevancia en la emisión de mercurio al agua, según el inventario N1, son la disposición informal de residuos sólidos en los lotes baldíos o los ríos (10,34 %) y el uso de otros equipos de laboratorio distintos a los termómetros (8,91 %) que contengan mercurio; mientras que otros 8 sectores que emiten mercurio en esta matriz, y que engloban un 9,68 % de las emisiones entre todos, son los siguientes: extracción de oro con amalgamación, termómetros de laboratorio, uso de productos con poliuretano, manómetros y esfigmomanómetros, químicos de laboratorio, residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios, y emisiones de mercurio de aguas residuales.

Hay 11 sectores, quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, uso de biomasa como combustible, producción de cemento, uso de los switches y relays, uso de fluorescentes, uso de pilas, quema informal de residuos, y emisiones de mercurio en crematorios y cementerios que no aportan emisiones al agua, según el inventario de nivel N1.

4.1.4 Emisión al suelo

Los sectores más representativos en cuanto la emisión al suelo, se muestran en la Figura 4.4. Es posible observar que la disposición informal de residuos sólidos en ríos, lotes baldíos es responsable de más del 75 % de las emisiones totales en esta matriz. Esto dista mucho de lo que sucedería si estos residuos llegaran a los rellenos sanitarios, en donde no se contabiliza emisión de mercurio al suelo de ningún tipo, pues toda es retenida en la geomembrana.

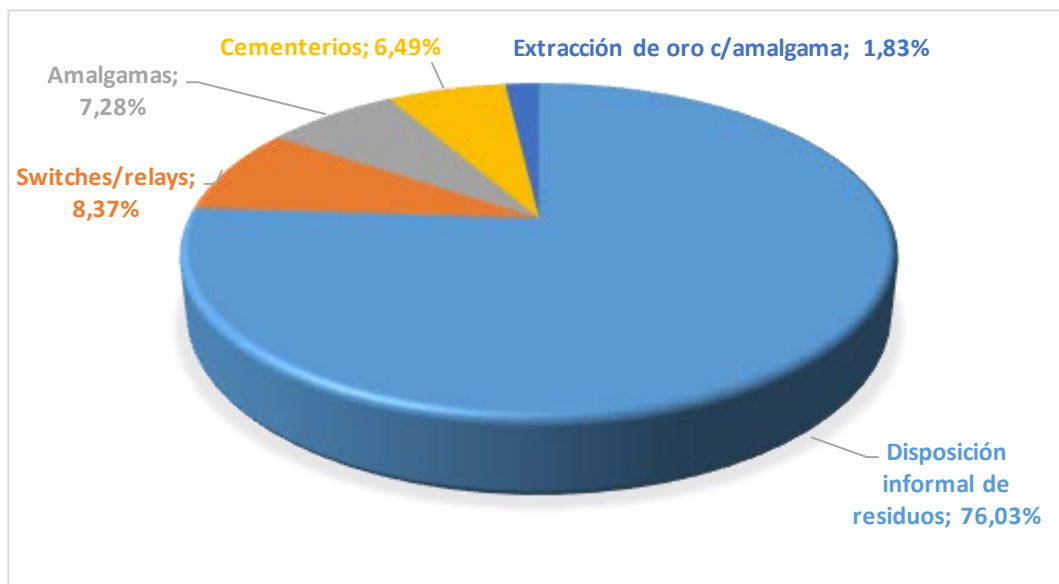


Figura 4.4 Distribución de la emisión al suelo del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos

Los otros sectores que presentan alguna relevancia en la emisión de mercurio al suelo, según el inventario N1, y que de paso son los únicos sectores en los que se reporta emisión hacia esta matriz, son el uso de switches y relays con mercurio (8,37 %), el uso de amalgamas con mercurio (7,28 %), la emisión de mercurio en los cementerios (6,49 %) y la emisión por uso de mercurio en la extracción de oro de manera artesanal (1,83 %). Incluso, las dos fuentes más importantes luego

de la disposición informal de los residuos sólidos son de productos terminados con mercurio, y entre ambas son responsables de más del 15 % de las emisiones de mercurio al suelo.

4.1.5 Emisión en los productos

Los sectores más representativos en cuanto la emisión en los productos son mostrados en la Figura 4.5. Según el inventario a nivel N1, los únicos dos sectores responsables de las emisiones del mercurio contabilizadas en esta matriz son la producción de cemento, por el mercurio que queda en el material terminado para comercialización, y en el uso de amalgamas mercuriales, por colocado en las piezas dentales de los pacientes. La distribución de la emisión en los productos es casi de un 50 % en cada sector, levemente mayor hacia la emisión de mercurio en el cemento.

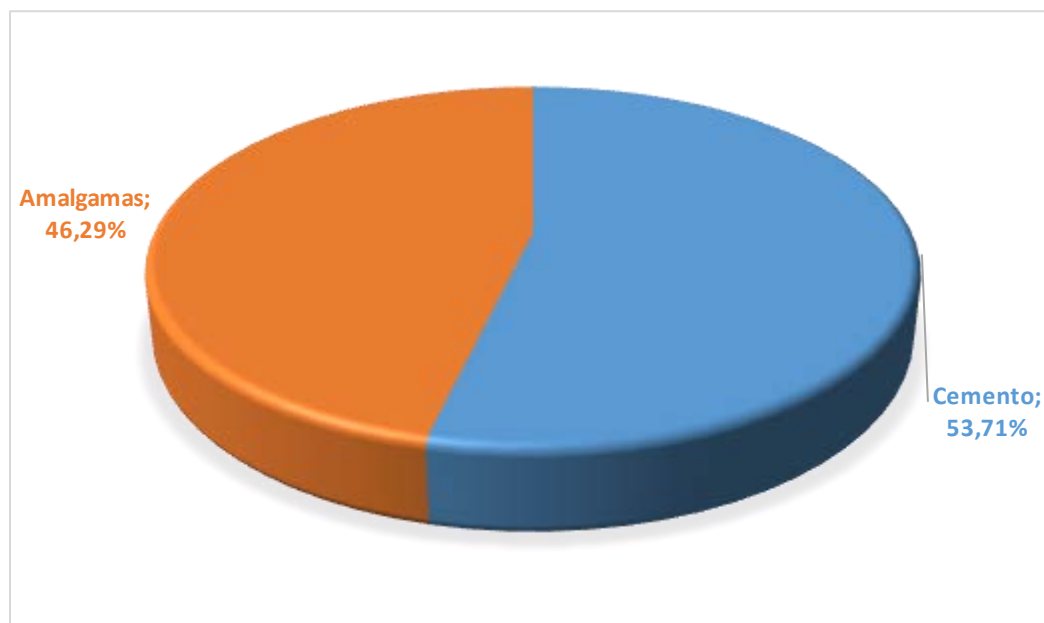


Figura 4.5 Distribución de la emisión en los productos del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos

4.1.6 Emisión en los residuos

Los sectores más representativos en cuanto la emisión en los residuos son mostrados en la Figura 4.6. La mayor emisión se da por productos de uso cotidiano como son los switches y relays con mercurio, que son encontrados en muchísimos aparatos donde el usuario ni siquiera sabe si los componentes eléctricos de su bien tienen o no el metal. El segundo lugar en cuanto a relevancia, la emisión a los residuos de las amalgamas dentales, contabiliza el mercurio que se

encontraba en la cápsula predosificada, que no es aplicado en el procedimiento dentista que recibe el paciente.

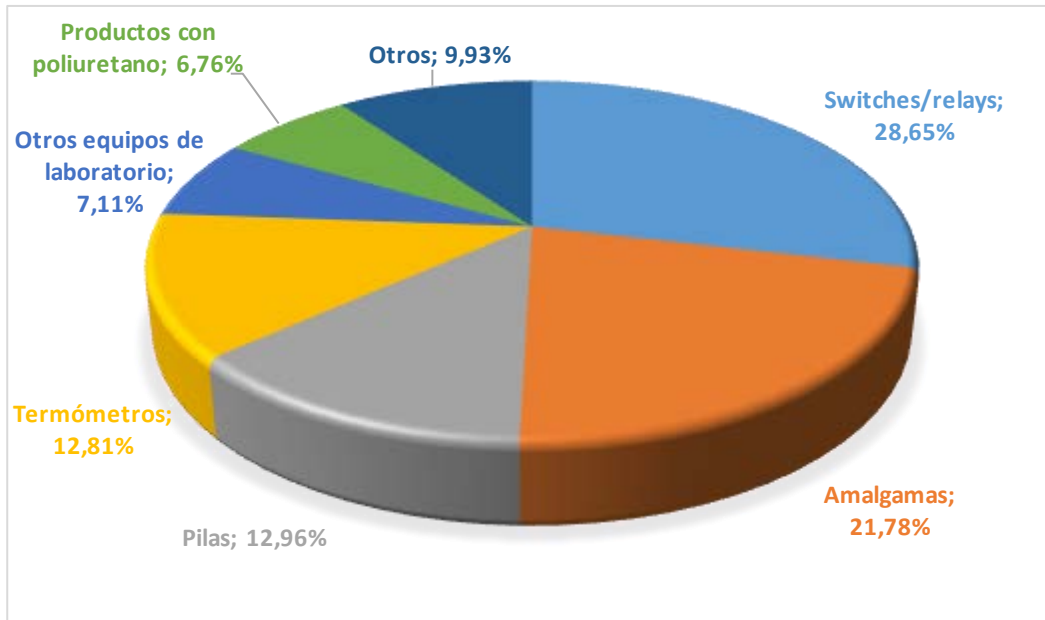


Figura 4.6 Distribución de la emisión en los residuos del inventario de nivel N1 según los sectores más significativos

Los otros sectores que presentan alguna relevancia en la emisión de mercurio en los residuos, según el inventario N1, son las pilas (12,96 %), los termómetros clínicos (12,81 %), los otros equipos de laboratorio diferentes de los termómetros (7,11 %) y los productos con poliuretano (6,76 %); mientras que otros 6 sectores que emiten mercurio en esta matriz, y que engloban el 9,93 % de las emisiones entre todos, son los siguientes: termómetros de laboratorio, fluorescentes, manómetros y esfigmomanómetros, químicos de laboratorio y aguas residuales.

Hay 11 sectores, quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, uso de biomasa como combustible, extracción de oro con amalgamación con mercurio, producción de cemento, rellenos sanitarios, quema informal de residuos, disposición informal de residuos sólidos y emisiones de mercurio en crematorios y cementerios, que no aportan emisiones en los residuos, según el inventario de nivel N1.

4.1.7 Distribución de las emisiones por matriz

La distribución de las emisiones del inventario de nivel N1 se muestra en la Figura 4.7. Casi el 40 % de las emisiones de mercurio fueron al aire, y entre las emisiones al aire y las que fueron a los residuos se tuvo más del 70 % de las emisiones totales para el año 2014.

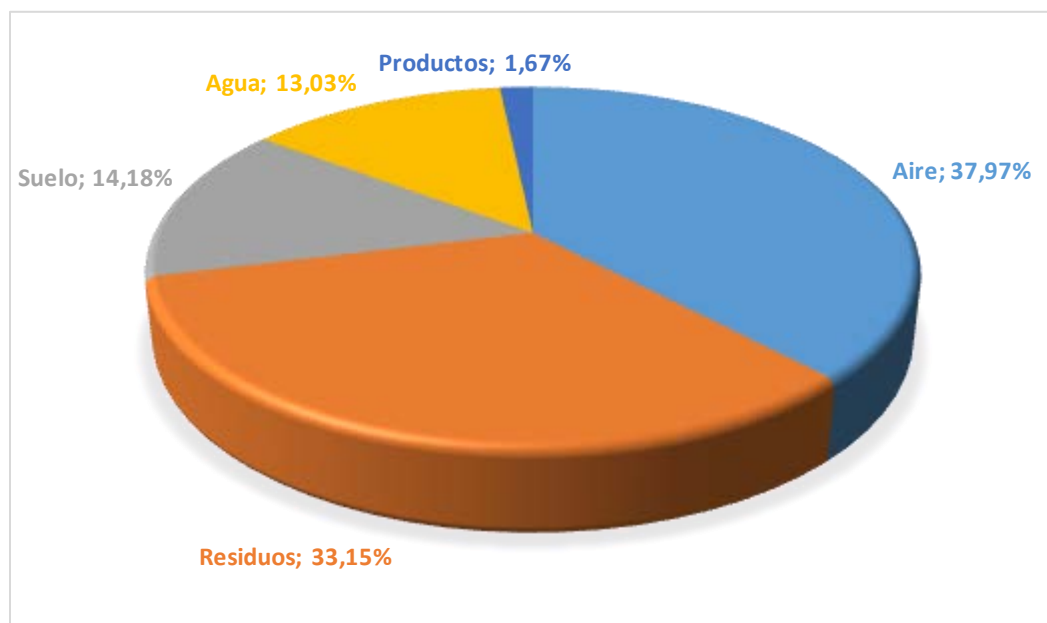


Figura 4.7 Distribución de las emisiones del inventario de nivel N1 según la matriz

En cuanto a las emisiones al suelo, estas fueron de un 14,18 %, en tanto que las emisiones al agua fueron un 13,03 % del total. Las emisiones a los productos fueron muy pocas, representando estas apenas el 1,67 % de las totales reportadas en el inventario.

4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL INVENTARIO A NIVEL N1

Según el Cuadro 4.1, las fuentes identificadas en el inventario de nivel N1 como más impactantes en cuanto a emisión en el ámbito nacional son la quema informal de residuos, el uso de amalgamas dentales con mercurio, la disposición informal de residuos sólidos, y el uso de los switches y relays eléctricos con mercurio. Estas cuatro fuentes de emisión representan más del 70 % del total de mercurio contabilizado en el nivel N1, de manera que la implementación de

mejoras se debió enfocar principalmente hacia estos sectores, dado que una reducción en estas emisiones sería más impactante en el conteo final.

Esto no quiere decir que implementar mejoras para disminuir la contaminación con mercurio en cualquier área no sea algo bueno, sino que, en una situación de recursos económicos limitados, los esfuerzos se deben enfocar hacia el estudio de las fuentes más impactantes para encontrar posibilidades de disminución de las emisiones que tengan más peso en el inventario global.

El sector de minería de oro artesanal se decidió investigar más profundamente, aunque en el inventario de nivel N1 no fuera una fuente de alto impacto en el resultado final, por criterios de expertos del Ministerio de Salud y del Ministerio de Ambiente y Energía, entre otros, con quienes se conversó en las etapas tempranas del proyecto y que recomendaron siempre visitar la zona y no dejarse únicamente llevar por lo que un cálculo pudiera proyectar; esto por cuanto la minería de oro artesanal es considerada por estas autoridades como de interés en cuanto la emisión de mercurio, por su uso indiscriminado, la falta de capacitación de las personas que no se imaginan el peligro al que se exponen al utilizar esa sustancia como si no fuera peligrosa, sin ningún equipo de protección personal; y lo informal de la actividad donde es bien sabido por los entendidos en este tema, que el mercurio utilizado en la zona ingresa de manera ilícita al país, sin tener controles de quién lo ingresa o cuánto se está importando irregularmente para su uso en esta práctica minera.

De esta manera, el Cuadro 4.2 resume un análisis de cuáles medidas son posibles de implementar para mejorar la estimación de las emisiones en estas cinco fuentes señaladas, más la fuente de cemento, cuya implementación se hizo por lo simple que era y el beneficio que traería en cuanto al análisis específico de la actividad, y no tanto en el conteo final (dado que no era una fuente impactante de emisión); y un análisis de las oportunidades de mejora que luego se utilizó como criterio para tomar la decisión sobre si buscar la implementación de la mejora o no.

Cuadro 4.2 Análisis de las oportunidades de las mejoras que podrían implementarse para mejorar la estimación de ciertas fuentes emisoras identificadas en el inventario de nivel N1.

| Fuente | Mejoras por implementar | Análisis de oportunidades de mejora |
|--|---|---|
| Uso de amalgamas dentales con mercurio | <p>El dato de la cantidad de mercurio en la amalgama no puede mejorarse, en tanto que es un rango de valores muy estándar de este producto y que es así reportado en los envases como se distribuyen las mismas y en la información que consigue directamente del proveedor.</p> <p>Se podría mejorar el dato de actividad si se conociera la cantidad de amalgamas que están siendo aplicadas a los pacientes costarricenses durante el año de estudio, y no la suma de las importadas, las despachadas y las almacenadas.</p> | <p>El Área de Estadística en Salud de la CCSS llevaba un control de la cantidad de amalgamas que se colocaban en los pacientes entre el 2008 y el 2013, pero dejó de contabilizar la información de esta manera a partir del 2014. Conocer la cantidad de amalgamas dentales aplicadas en la CCSS durante el año de estudio implica contactar con los 122 establecimientos de salud que ofrecen este servicio, hacer la consulta y apelar a que esa información exista, o de forma alternativa revisar los expedientes de todos los pacientes de la red para buscar a cuántos se les aplicó amalgamas de mercurio en su tratamiento. Además, esta propuesta no tomaría en cuenta las aplicaciones en consulta privada, que, aunque son menores que en la CCSS, tampoco son nulas.</p> <p>Otra oportunidad es mejorar el registro de importaciones de parte de la DGA del Ministerio de Hacienda, por medio de una nota técnica que agrupe todas las amalgamas de interés que ingresan al país y sean separadas de las que son sin mercurio. Esto también podría implementarse para los otros productos de interés importados, para mejorar la calidad de estos datos.</p> <p>El beneficio que podría obtenerse es alto, considerando que en el inventario N1 se proyecta un cálculo a partir de la población, la incidencia de tratamiento con amalgamas mercuriales en la población con estudios desarrollados a nivel mundial por el PNUMA y un factor de cantidad de odontólogos por cada 1000 habitantes en el país, donde sí se utilizó información de los odontólogos en el país colegiados en el 2014 y no el factor estándar sugerido, pero si es posible conocer de primera mano la cantidad de amalgamas aplicadas durante un año no se requeriría estimaciones y la calidad de los datos sería mucho mayor, lo que reduciría mucho el intervalo de incertidumbre para esta fuente.</p> |

Cuadro 4.2 (continuación) Análisis de las oportunidades de las mejoras que podrían implementarse para mejorar la estimación de ciertas fuentes emisoras identificadas en el inventario de nivel N1.

| Fuente | Mejoras por implementar | Análisis de oportunidades de mejora |
|--|---|---|
| Extracción de oro con el método de amalgamación con mercurio | <p>La irregularidad de la actividad y la poca organización y comunicación entre los mineros artesanales hace difícil el conocimiento de la cantidad de oro que se obtiene de esta práctica, y solamente mediante estimaciones de la Dirección de Geología y Minas ha sido posible tener cierta idea de la cantidad del oro que se obtiene de dicha actividad.</p> <p>Es posible hacer mediciones en sitio de la cantidad de mercurio que se pierde en la realización de la actividad por kilogramo de oro extraído.</p> | <p>Organizar una visita a la zona de manera que pueda medirse la cantidad de mercurio que se pierde durante la extracción del oro con lleva ciertas complicaciones en cuanto a que no todos los mineros están dispuestos a permitir el ingreso de personas extrañas que estudian la peligrosidad de una de las materias primas claves en su fuente de ingresos. Esto ocasiona que el muestreo fuera sesgado hacia los sitios donde se permitió el ingreso.</p> <p>En cuanto a costo económico, el mismo no es alto, pues los equipos necesarios son solamente balanzas que permitan medir la masa de la materia prima rocosa y el mercurio agregado inicialmente, y de la amalgama, mercurio recuperado y oro obtenido al final del proceso. Esto permite que no se necesite grandes requerimientos en cuanto a transporte de los investigadores, pues en cualquier vehículo de doble tracción (propio o rentado) es posible acceder a toda la zona y cargar con los equipos necesarios.</p> <p>El beneficio que podría conseguirse sí es muy alto, dado que es una actividad de las consideradas como más importantes en cuanto a emisión de mercurio por los expertos en el tema, y hacer una caracterización del proceso y un estudio de la cantidad de mercurio que se está emitiendo con datos directos de la zona permitiría el cálculo de un factor de emisión de la actividad para esa área del país, que mientras no se desarrolle minería artesanal con mercurio de otro tipo sería a su vez un factor local.</p> |

Cuadro 4.2 (continuación) Análisis de las oportunidades de las mejoras que podrían implementarse para mejorar la estimación de ciertas fuentes emisoras identificadas en el inventario de nivel N1.

| Fuente | Mejoras por implementar | Análisis de oportunidades de mejora |
|--|--|---|
| Quema informal de residuos | Mejorar el dato de la cantidad de residuos sólidos incinerados o de disposición informal de residuos conlleva a poner en duda el muestreo desarrollado por el INEC en su Encuesta Nacional de Hogares, un ente gubernamental con amplia experiencia en el manejo de encuestas e información estadística que represente la realidad de todo el país a partir de los muestreos que deben realizarse. | Estos análisis ya han sido realizados por el US-EPA en incineradores de residuos sólidos, de manera que se pueda sugerir un intervalo de entre 1 g t ⁻¹ y 10 g t ⁻¹ de mercurio en los mismos, sea que se disponga en rellenos sanitarios, se quemé o se descarte de otro modo. Desarrollar un experimento de quema de residuos sólidos para medir la cantidad de mercurio contenidos en los mismos implicaría un alto costo por el sistema de una única salida de gases de combustión con un concentrador de mercurio en la misma, además de la cantidad que debería quemarse para que el experimento tuviese algún tipo de significancia. Luego de haber desarrollado el experimento, el beneficio del mismo podría no ser tan alto, considerando que ya el PNUMA sugiere un intervalo de mercurio en los residuos sólidos reducido, de apenas 9 g de rango por una tonelada analizada. Se podría tener información para un factor de emisión local, pero éste saldría muy caro y seguramente no sería muy distinto del ya sugerido por el organismo internacional. |
| Uso de switches y relays eléctricos con mercurio | Conocer la cantidad de switches y relays eléctricos que contienen mercurio que ingresan a un país es una tarea imposible, razón por la cual el PNUMA plantea factores de emisión basados en la población. | La mejora en cuanto la información debería ser buscar eliminar el factor poblacional y utilizar un factor de cuánto mercurio contienen los switches y relays eléctricos importados y utilizados en Costa Rica; sin embargo, esta información, en la mayoría de los casos, no es conocida por el importador o el analista arancelario, por nadie más que el fabricante que puede dar fe de si se utilizó mercurio en la manufactura y en qué cantidad. Mientras no se cuente con esta información, que no está disponible en las especificaciones de los productos, implementar una mejora de métrica en esta fuente emisora será imposible. |

Cuadro 4.2 (continuación) Análisis de las oportunidades de las mejoras que podrían implementarse para mejorar la estimación de ciertas fuentes emisoras identificadas en el inventario de nivel N1.

| Fuente | Mejoras por implementar | Análisis de oportunidades de mejora |
|-----------------------|--|--|
| Producción de cemento | Utilizar mediciones de concentración de mercurio en los gases de chimenea para estimar un factor de emisión local para la actividad. | Según el Reglamento de requisitos, condiciones y controles para la utilización de los combustibles alternos en los hornos cementerios (N° 31 837, 2004) estas mediciones son algo que las cementeras deben hacer y reportar semestralmente ante la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud de ordinario, de manera que lo único que debió hacerse fue solicitar los reportes correspondientes a quien correspondía y se obtuvo el beneficio de poder calcular las emisiones de esta fuente con un factor de emisión con mediciones nacionales, y no necesitar el factor estándar sugerido, que también fue mucho mayor que lo medido directamente en las industrias costarricenses. |

En el Cuadro 4.3 se enumeran las mejoras en cuanto a la fuente del dato de actividad o de los factores de emisión para cada una de las actividades consideradas, en caso de que se pueda mejorar de alguna manera la calidad de la información utilizada para buscar mejores resultados en el inventario a nivel N2. De manera general, para todos los casos en que se utilizó los valores MAX y MIN del instrumental de UNEP (2015), una mejora propuesta fue no utilizar la media aritmética de los mismos para el cálculo del factor MAP, sino la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo, así como también lo sugiere (IPCC, 2000). En el Cuadro 4.3, cuando se escribió que no hubo otra mejora propuesta para los factores de entrada, distribución y/o emisión, se refiere a que esta ya está siendo aplicada.

Cuadro 4.3 Posibles mejoras en cuanto a los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Mejora propuesta para el dato de actividad | Mejora propuesta para los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|--|---|
| Quema de carbón mineral | No hay mejora propuesta | Tomar los factores de emisión MAP, MIN y MAX del Inventario de liberaciones de mercurio de México en el 2004 elaborado por (Maíz, 2008), debido a que estos fueron desarrollados mediante el análisis de carbón mineral en México por (Mugica et. all, 2003), y del Inventario Preliminar de Emisiones Atmosféricas de Mercurio en México del 2001. Los factores desarrollados por (UNEP, 2015) se hicieron con mediciones de carbón de los Estados Unidos y China durante la década de los 90, de manera que se prefirió considerar los intervalos propuestos por el inventario de México. |
| Quema de combustibles derivados del petróleo | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |

Cuadro 4.3 (continuación) Posibles mejoras en cuanto a los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Mejora propuesta para el dato de actividad | Mejora propuesta para los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|--|--|--|
| Quema de biomasa | No hay mejora propuesta | Para el inventario de nivel N2 el factor de emisión MAP fue tomado del instrumental de (UNEP, 2015) para cálculos de inventarios N2. Los factores MIN y MAX fueron estimados como 0,1 veces y 10 veces el factor de emisión MAP, respectivamente, según lo sugerido por (Maíz, 2008), debido a que los valores MIN y MAX sugeridos por (UNEP, 2015) se basan en investigaciones llevadas a cabo en Dinamarca y Suecia en la década de los 90. |
| Producción de electricidad con energía geotérmica | No hay mejora propuesta | Para el inventario de nivel N2, los factores de emisión MAP y MAX fueron tomados de (Maíz, 2008). El factor de emisión MIN se tomó como el menor valor indicado en el intervalo para mediciones de los eyectores de gases evacuados en el condensador de la actividad, desarrollado por la EPA, según (UNEP, 2015); debido a que los valores sugeridos por (UNEP, 2015) se basan en mediciones escasas desarrolladas en los Estados Unidos durante el año 1977, y los datos no fueron validados. |
| Extracción de oro con el método de amalgamación con mercurio | No hay mejora propuesta | Se propuso hacer mediciones en la zona de minería artesanal de Costa Rica (Abangares, Guanacaste), de mercurio perdido durante el procesamiento respecto al oro recuperado. El factor MAP fue calculado suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo, y tomando en cuenta todos los datos de medición efectuados para calcular la media logarítmica correspondiente. |

Cuadro 4.3 (continuación) Posibles mejoras en cuanto a los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Mejora propuesta para el dato de actividad | Mejora propuesta para los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|--|--|
| Producción de cemento | No hay mejora propuesta | Se propuso utilizar mediciones hechas en las cementeras costarricenses de concentración de mercurio en los gases de chimenea, de manera que los factores de emisión MIN y MAX fueron los valores mínimos y máximos medidos en una de las cementeras a partir de la concentración de gases de salida en la chimenea, tomando en cuenta datos semestrales entre enero del 2013 y enero del 2016; en tanto, el factor de emisión MAP fue calculado suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo, y tomando en cuenta todos los datos de medición efectuados para calcular la media logarítmica correspondiente. |
| Uso de termómetros clínicos | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Uso de termómetros de laboratorio | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Uso de switches y relays con mercurio | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Uso de pilas | No hay mejora propuesta | Se propuso tomar en cuenta en el promedio las pilas alcalinas con formas distintas a la celda de botón, pues su uso en el país es conocido, aunque la calidad de la información de DGA no fue la suficiente para conocer cómo es la distribución de la importación entre los tipos de pilas. |
| Uso de productos con poliuretano | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |

Cuadro 4.3 (continuación) Posibles mejoras en cuanto a los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Mejora propuesta para el dato de actividad | Mejora propuesta para los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|---|--|---|
| Uso de fluorescentes | No hay mejora propuesta | Se propuso tomar un intervalo de emisiones que combinara las concentraciones de las lámparas compactas y las lámparas de extremo doble, dado que es conocido que ambas son utilizadas en el país; pero la calidad de la información de la DGA no fue la suficiente para conocer cómo es la distribución de la importación entre estos dos tipos de fluorescentes. El factor de emisión MIN fue tomado como el mínimo del rango de mercurio en lámparas compactas según (UNEP, 2015) y el MAX fue tomado como el máximo del rango de mercurio en lámparas de extremo doble según (UNEP, 2015). |
| Uso de amalgamas dentales con mercurio | Se propuso no utilizar el factor poblacional del inventario a nivel N1 sino recopilar información sobre las amalgamas importadas, las enviadas por los almacenes de la CCSS, por ser quienes más utilizan amalgamas en el ámbito nacional. | Los factores de emisión MIN y MAX fueron tomados del instrumental de (UNEP, 2015). El valor MAP fue calculado con la ecuación 3.3 suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo. |
| Uso de esfigmomanómetros con mercurio | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Otros equipos de laboratorio con mercurio | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Uso de manómetros con mercurio | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |

Cuadro 4.3 (continuación) Posibles mejoras en cuanto a los datos de actividad y los factores de emisión a usar en el cálculo del inventario nacional de emisiones a nivel N2

| Actividad o sector considerado en el inventario | Mejora propuesta para el dato de actividad | Mejora propuesta para los factores de entrada, distribución y/o emisión a usar |
|--|---|--|
| Uso de químicos de laboratorio con mercurio | Se propuso no utilizar el factor poblacional sugerido por el inventario a nivel N1, sino recopilar información sobre los compuestos químicos importados, más los existentes en las universidades que imparten carreras con laboratorios de química entre las materias del plan de estudios. | Para el inventario de nivel N2 el factor de emisión MAP fue tomado como 1 porque el reporte de los químicos de laboratorio fue dado en kg mercurio equivalente, de modo que el dato de actividad es a su vez la emisión. Los valores MIN y MAX fueron tomados como $\pm 5\%$ del valor MAP únicamente para el cálculo de la incertidumbre. |
| Emisión de mercurio de los residuos sólidos en rellenos sanitarios | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Emisión de mercurio de la quema informal de residuos sólidos | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Emisión de mercurio de la disposición informal de residuos sólidos | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Emisión de mercurio de las aguas residuales | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Emisión de mercurio de los crematorios | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |
| Emisión de mercurio de los cementerios | No hay mejora propuesta | No hay otra mejora propuesta |

4.3 INVENTARIO A NIVEL N2

Los resultados generados al realizar el inventario a nivel N2 se muestran en el Cuadro 4.4. Se puede observar que con el cálculo del inventario a nivel N2 la emisión total de todos los sectores considerados para Costa Rica durante el 2014 fue de 5 028,79 kg Hg, con un intervalo de incertidumbre entre 2 641,31 kg Hg y 10 603,35 kg Hg. También, es posible comprobar que la emisión total fue 2 387,48 kg mayor que el límite inferior de la incertidumbre, y también fue 5 574,56 kg menor que el límite superior de la incertidumbre, de modo que el valor reportado no se encuentra en la mitad del intervalo de incertidumbre mostrado, y por tanto no es un intervalo simétrico.

4.3.1 Emisión total

Los sectores más representativos en cuanto la emisión total, se muestran en la Figura 4.8. Es posible observar que son 8 sectores (extracción de oro con amalgama, quema informal de residuos, amalgamas dentales, disposición informal de residuos sólidos, uso de los switches y relays, uso de termómetros, químicos de laboratorio y uso de pilas), los que concentran casi el 90 % de las emisiones totales reportadas en el nivel N2. Incluso, los 4 más representativos son responsables de más del 68 % de las emisiones de mercurio reportadas según el inventario de nivel N2 para Costa Rica.

Se aprecia el impacto que tiene la actividad de minería artesanal de la zona de Abangares, pues esta zona tan pequeña con pocas personas que la practican, es responsable de más de la cuarta parte de las emisiones totales generadas en el año en el país, según el inventario N2 desarrollado. Además, queda en evidencia la grave problemática que genera la no recolección y disposición de residuos sólidos de manera adecuada en cuanto a emisiones de mercurio, pues las técnicas alternativas de disposición de residuos, que no llega a los rellenos sanitarios (la que es quemada o botada en ríos, lotes baldíos o enterrada), son responsables de más del 28 % de las emisiones totales de mercurio del país, según el inventario de nivel N2.

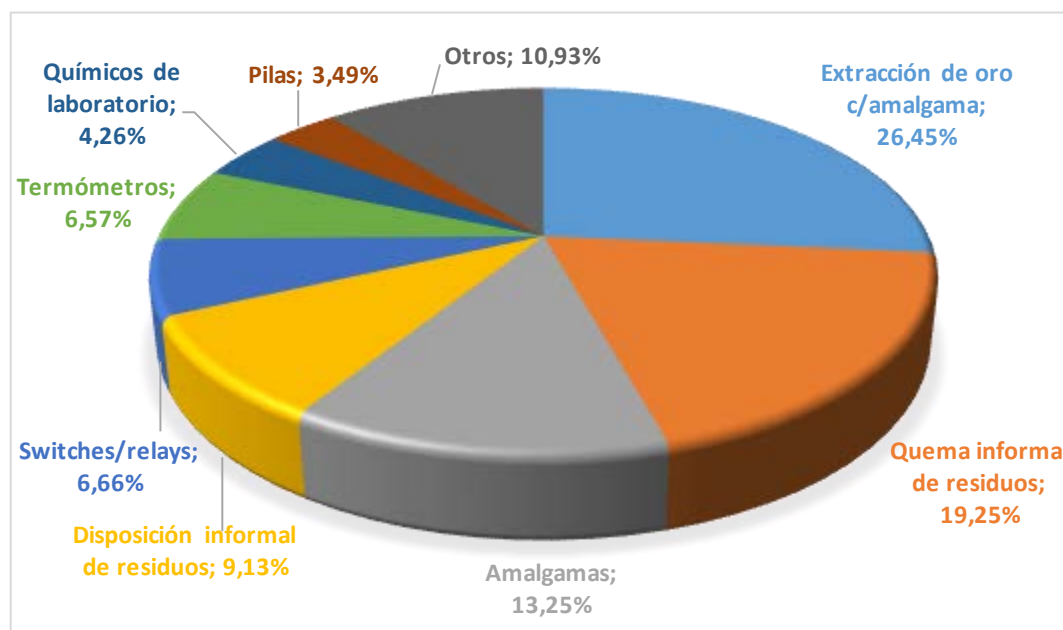


Figura 4.8 Distribución de la emisión total del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos

Adicionalmente, el uso de productos terminados con mercurio (termómetros clínicos y de laboratorio, los switches y relays, fluorescentes, pilas, productos con poliuretano, amalgamas dentales, esfigmomanómetros y manómetros) son responsables de más del 34 % de las emisiones totales de mercurio, de manera que, entre los productos con mercurio de uso casi diario y la disposición no controlada de residuos sólidos se está emitiendo más del 62 % de la totalidad de la emisión de mercurio de todo el país en el año 2014.

Los 16 sectores representados en la categoría otros, y que entre todos suman un 10,93 % de las emisiones totales, son los siguientes: quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, uso de biomasa como combustible, producción de electricidad con energía geotérmica, producción de cemento, termómetros de laboratorio, uso de fluorescentes, uso de productos con poliuretano, manómetros y esfigmomanómetros, otros equipos de laboratorio distintos a los termómetros, residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios, mercurio en aguas residuales, y emisiones de mercurio en cementerios y crematorios.

Cuadro 4.4 Resultados del inventario N2 de emisión total de cada sector considerado, porcentaje de importancia de ésta sobre la emisión global, límites superior e inferior de incertidumbre y emisión por matriz

| Sector | Emisión por matriz (kg Hg) | | | | | | Emisión total (kg Hg) | % | Incertidumbre | |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| | Aire | Agua | Suelo | Productos | Residuos | | | | L _{INF} (kg Hg) | L _{SUP} (kg Hg) |
| Carbón | 0,85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,85 | 0,02 % | 0,37 | 1,97 |
| Derivados del petróleo | 6,31 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,31 | 0,13 % | 3,06 | 12,99 |
| Coque de petróleo | 3,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,13 | 0,06 % | 1,52 | 6,44 |
| Biomásas | 6,34 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,34 | 0,13 % | 1,40 | 28,66 |
| Geoterminia | 69,22 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 69,22 | 1,38 % | 8,44 | 567,87 |
| Extracción de oro c/amalgama | 266,00 | 532,00 | 532,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1 330,00 | 26,45 % | 546,76 | 3 235,23 |
| Cemento | 7,95 | 0,00 | 0,00 | 2,65 | 2,65 | 0,00 | 13,26 | 0,26 % | 2,34 | 75,25 |
| Termómetros | 33,05 | 99,15 | 0,00 | 0,00 | 198,30 | 330,50 | 628,00 | 6,57 % | 201,29 | 542,64 |
| Termómetros laboratorio | 0,86 | 2,59 | 0,00 | 0,00 | 5,18 | 8,63 | 13,26 | 0,17 % | 5,54 | 13,45 |
| Switches/relays | 33,51 | 0,00 | 33,51 | 0,00 | 268,12 | 335,15 | 628,00 | 6,66 % | 160,49 | 699,87 |
| Fluorescentes | 3,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 59,66 | 62,80 | 175,72 | 1,25 % | 28,82 | 136,87 |
| Pilas | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 175,72 | 175,72 | 175,72 | 3,49 % | 107,02 | 288,51 |
| Productos con poliuretano | 10,60 | 5,30 | 0,00 | 0,00 | 90,09 | 105,98 | 105,98 | 2,11 % | 66,12 | 169,88 |
| Amalgamas | 0,00 | 333,22 | 88,86 | 66,64 | 177,72 | 666,44 | 666,44 | 13,25 % | 528,80 | 839,90 |
| Esfigmomanómetros | 0,82 | 2,45 | 0,00 | 0,00 | 4,91 | 8,18 | 8,18 | 0,16 % | 6,46 | 10,35 |
| Manómetros | 2,36 | 7,07 | 0,00 | 0,00 | 14,15 | 23,58 | 23,58 | 0,47 % | 22,09 | 25,17 |
| Químicos de laboratorio | 0,00 | 70,62 | 0,00 | 0,00 | 143,39 | 214,01 | 214,01 | 4,26 % | 173,89 | 263,38 |
| Otros equipos de laboratorio | 0,00 | 54,18 | 0,00 | 0,00 | 110,01 | 164,19 | 164,19 | 3,26 % | 118,71 | 227,09 |
| Rellenos sanitarios | 30,02 | 0,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 30,32 | 30,32 | 0,60 % | 14,72 | 62,46 |
| Quema informal de residuos | 968,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 968,12 | 968,12 | 19,25 % | 416,53 | 2 250,16 |
| Disposición informal de residuos | 45,92 | 45,92 | 367,39 | 0,00 | 0,00 | 459,24 | 459,24 | 9,13 % | 197,58 | 1 067,38 |
| Agua residual | 0,00 | 4,81 | 0,00 | 0,00 | 0,53 | 5,35 | 5,35 | 0,11 % | 1,88 | 15,18 |
| Crematorios | 1,81 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,81 | 1,81 | 0,04 % | 1,14 | 2,86 |
| Cementerios | 0,00 | 0,00 | 39,68 | 0,00 | 0,00 | 39,68 | 39,68 | 0,79 % | 26,33 | 59,81 |
| Total | 1 490,02 | 1 157,62 | 1 061,44 | 69,29 | 1 250,41 | 5 028,79 | 5 028,79 | 100,00 % | 2 641,31 | 10 603,35 |

4.3.2 Emisión al aire

Los sectores más representativos en cuanto la emisión al aire son mostrados en la Figura 4.9. Es posible observar que la quema informal de residuos es la responsable de casi el 65 % de las emisiones al aire según el inventario de nivel N2, mientras que, si se suma también el mercurio que se emite por los residuos sólidos que se disponen en ríos, se entierra o se desecha en lotes baldíos sin ningún tipo de tratamiento ni protección del suelo entonces, se alcanza más del 68 % de las emisiones totales al aire.

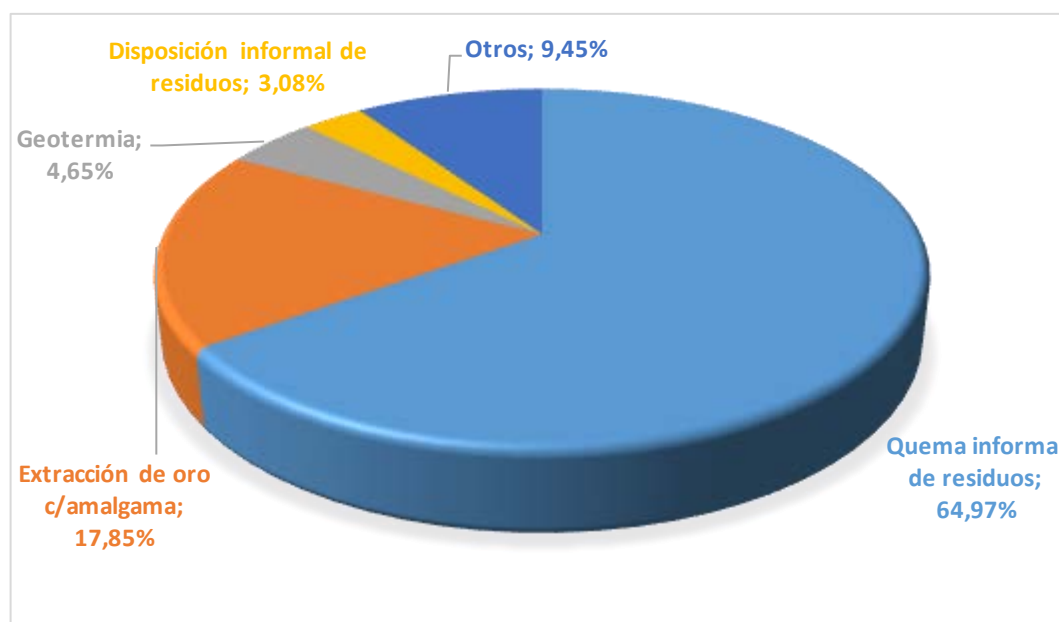


Figura 4.9 Distribución de la emisión al aire del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos

El segundo sector en importancia de emisiones al aire es la extracción de oro con amalgamación con mercurio, el cual alcanza casi el 18 % del total emitido a esta matriz. Cabe recordar que esta actividad se practica en un único cantón del país, con una población de menos del 0,5 % del conteo nacional, y aunque no todos los habitantes del cantón de Abangares se dedica a la actividad minera y hay ciudadanos de otros cantones que viajan a la zona para emplearse en la explotación minera, esto permite ver cómo una práctica de tan pocos ciudadanos tiene tan alto impacto en las emisiones de mercurio nacionales y de las matrices.

Otro sector que presenta alguna relevancia en la emisión de mercurio al aire, según el inventario N2, es la producción de energía geotérmica (4,65 %); mientras que otros 14 sectores que emiten mercurio al aire, y que engloban un 9,45 % de las emisiones entre todos, son los siguientes: quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, quema de biomasa como combustible, producción de cemento, termómetros clínicos y de laboratorio, uso de los switches y relays, uso de fluorescentes, uso de productos con poliuretano, manómetros y esfigmomanómetros, residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios, y emisiones de mercurio en crematorios.

Hay 6 sectores, el uso de pilas con mercurio, el uso de amalgamas dentales con mercurio, químicos de laboratorio, otros equipos de laboratorio distintos a los termómetros, las aguas residuales y los cementerios que no aportan emisiones al aire, según el inventario de nivel N2.

4.3.3 Emisión al agua

Los sectores más representativos en cuanto la emisión al agua, son mostrados en la Figura 4.10. Es posible observar que la extracción de oro con el método de amalgamación es responsable de más del 45 % de las emisiones al agua, a pesar de ser una actividad desarrollada por tan pocas personas en un espacio nacional tan pequeño. Además, el uso de las amalgamas con mercurio es responsable casi un 30 % de las emisiones al agua, mientras que el uso de termómetros es responsable del 8,56 % de las emisiones en la matriz según el inventario N2. Si se toma en cuenta el uso de productos terminados con mercurio, de la forma que se definieron en la sección de emisión global del inventario N1 (sección 4.1.1), estos son responsables de casi un 39 % de la emisión total que va al agua.

Los otros sectores que presentan alguna relevancia en la emisión de mercurio al agua, según el inventario N2, son los químicos de laboratorio (6,10 %) y el uso de otros equipos de laboratorio distintos a los termómetros (4,68 %) que contengan mercurio; mientras que otros 7 sectores que emiten mercurio al agua, y que engloban un 5,91 % de las emisiones entre todos, son los siguientes: termómetros de laboratorio, uso de productos con poliuretano, manómetros y esfigmomanómetros, residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios, disposición informal de residuos y emisiones de mercurio de aguas residuales, siendo que solamente la disposición informal de los residuos representa dos terceras partes de la emisión agrupada en este apartado.

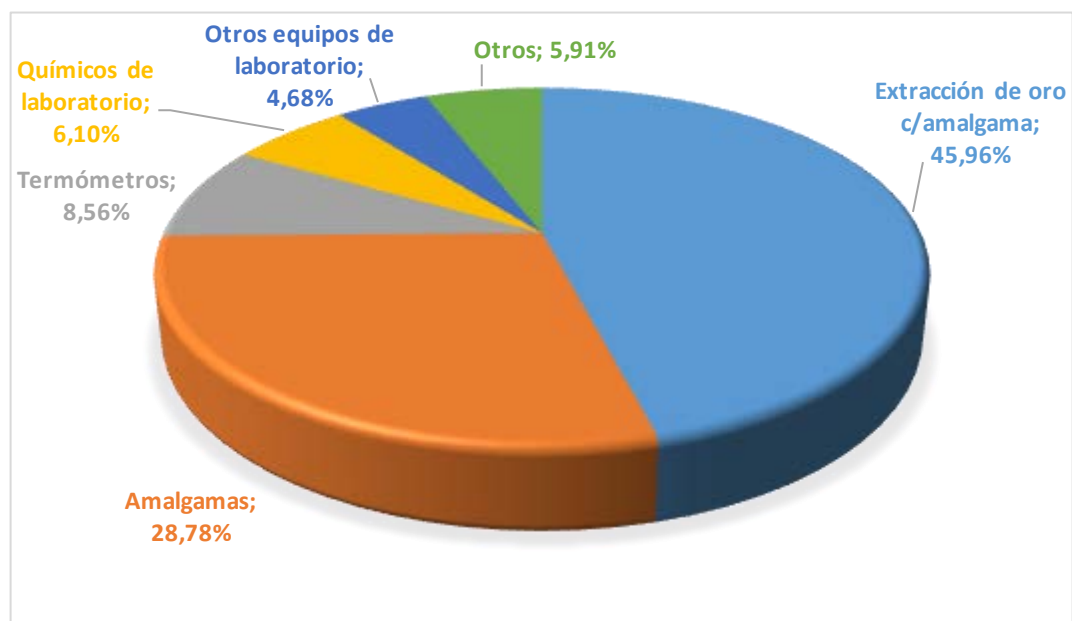


Figura 4.10 Distribución de la emisión al agua del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos

Hay 12 sectores, quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, uso de biomasa como combustible, producción de energía geotérmica, producción de cemento, uso de los switches y relays, uso de fluorescentes, uso de pilas, quema informal de los residuos, y las emisiones de mercurio en los crematorios y cementerios que no aportan emisiones al agua, según el inventario de nivel N2.

4.3.4 Emisión al suelo

Los sectores más representativos en cuanto la emisión al suelo son mostrados en la Figura 4.11. Es posible observar que la actividad minera con el método de amalgamación es responsable de más del 50 % de las emisiones totales al suelo, aunque como ya se ha mencionado, sea practicada en un área nacional tan reducida y por tan pocos costarricenses.

Otra fuente muy importante, con casi un 35 % de la contaminación total de mercurio al suelo es la disposición informal de residuos sólidos en ríos o lotes baldíos, lo cual dista mucho de lo que sucedería si estos residuos llegaran a los rellenos sanitarios, en donde no se contabiliza emisión de mercurio al suelo de ningún tipo, pues toda potencial emisión es retenida en la geomembrana.

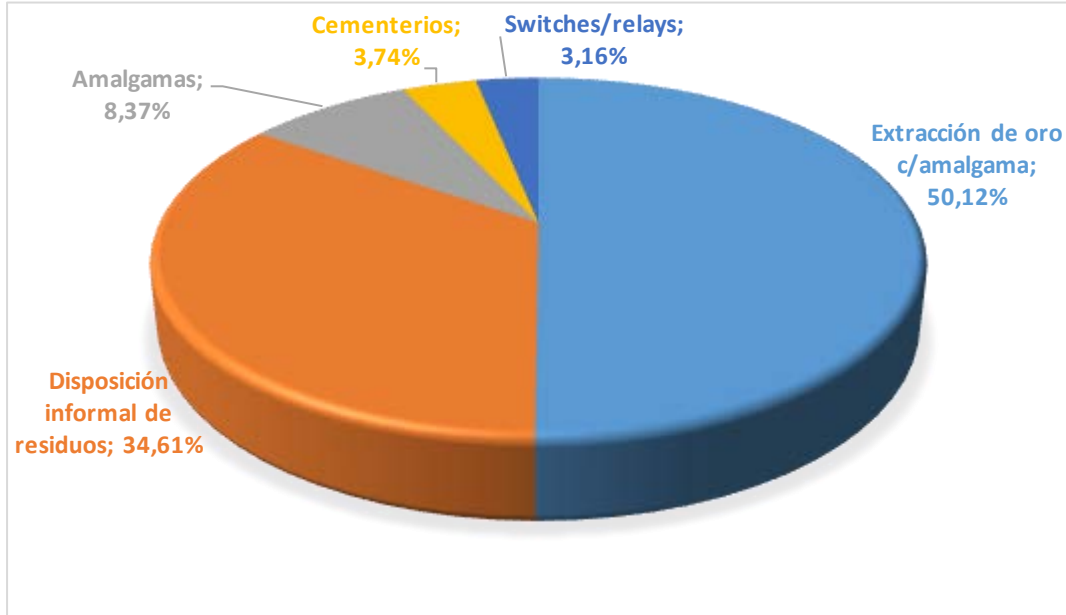


Figura 4.11 Distribución de la emisión al suelo del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos

Los otros sectores que presentan alguna relevancia en la emisión de mercurio al suelo, según el inventario N2, y que de paso son los únicos sectores en los que se reporta emisión de mercurio al suelo, son el uso de amalgamas con mercurio (8,37 %), la emisión de mercurio en los cementerios (3,74 %) y el uso de los switches y relays con mercurio (3,16 %). Los productos terminados con mercurio como fueron definidos en la sección 4.1.1 son responsables de más del 11 % de las emisiones de mercurio al suelo.

4.3.5 Emisión en los productos

Los sectores más representativos en cuanto la emisión en los productos, se muestran en la Figura 4.12. Según la Figura y el inventario a nivel N2, los únicos dos sectores responsables de emisiones de mercurio contabilizadas en los productos son la producción de cemento, por el mercurio que queda en el material terminado para comercialización, apenas de un 3,83 % del total; y en el uso de amalgamas mercuriales, por el mercurio que queda en la cavidad bucal del paciente; que en este caso es casi la totalidad del mercurio que se emite en los productos.

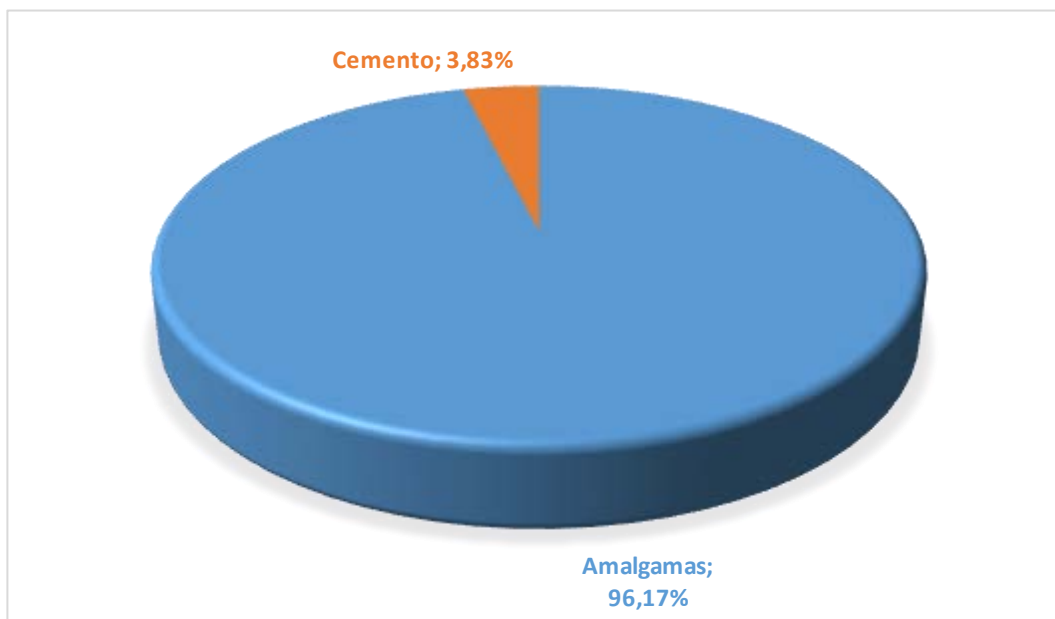


Figura 4.12 Distribución de la emisión en los productos del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos

4.3.6 Emisión en los residuos

Los sectores más representativos en cuanto la emisión en los residuos, se presentan en la Figura 4.13. La mayor emisión (más de una quinta parte del total) se da por productos de uso cotidiano como son los switches y relays con mercurio, que son encontrados en muchísimos aparatos donde el usuario ni siquiera sabe si los componentes eléctricos de su bien tienen o no mercurio.

Los otros sectores que presentan alguna relevancia en la emisión de mercurio en los residuos, según el inventario N2, son los termómetros clínicos (15,86 %), las amalgamas (14,21 %), las pilas (14,05 %), los químicos de laboratorio (11,47 %), los otros equipos de laboratorio diferentes de los termómetros (8,80 %), los productos con poliuretano (7,20 %) y los fluorescentes (4,77 %); mientras que otros 5 sectores que emiten mercurio en los residuos, y que engloban el 2,19 % de las emisiones entre todos, son los siguientes: producción de cemento, termómetros de laboratorio, manómetros y esfigmomanómetros, y aguas residuales.

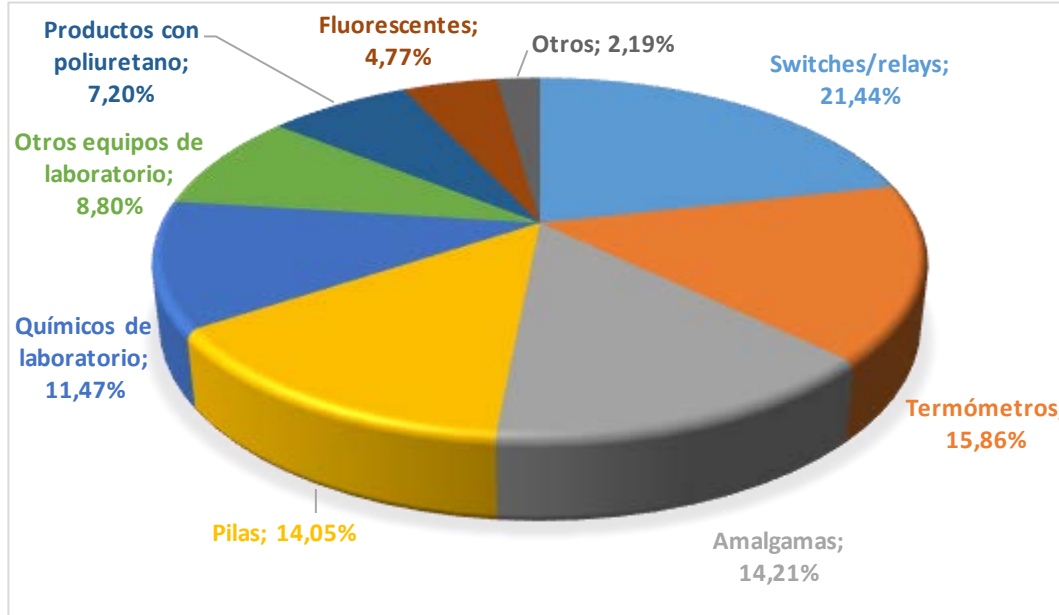


Figura 4.13 Distribución de la emisión en los residuos del inventario de nivel N2 según los sectores más significativos

Hay 11 sectores, quema de carbón mineral, uso de combustibles derivados de petróleo, uso de coque de petróleo, uso de biomasa como combustible, producción de electricidad con energía geotérmica, extracción de oro con amalgamación con mercurio, rellenos sanitarios, quema informal de residuos, disposición informal de residuos sólidos y emisiones de mercurio en crematorios y cementerios que no aportan emisiones en los residuos, según el inventario de nivel N2.

4.3.7 Distribución de las emisiones por matriz

La distribución de las emisiones del inventario de nivel N2 se muestra en la Figura 4.14. Casi el 30 % de las emisiones de mercurio fueron al aire, y entre las emisiones al aire y las que fueron a los residuos se tuvo más del 54 % de las emisiones totales para el año 2014.

En cuanto a las emisiones al agua, estas fueron de un 23,02 %, en tanto que las emisiones al suelo representan un 21,11 % del total. Las emisiones a los productos fueron muy pocas, representando estas apenas el 1,38 % de las totales reportadas en el inventario.

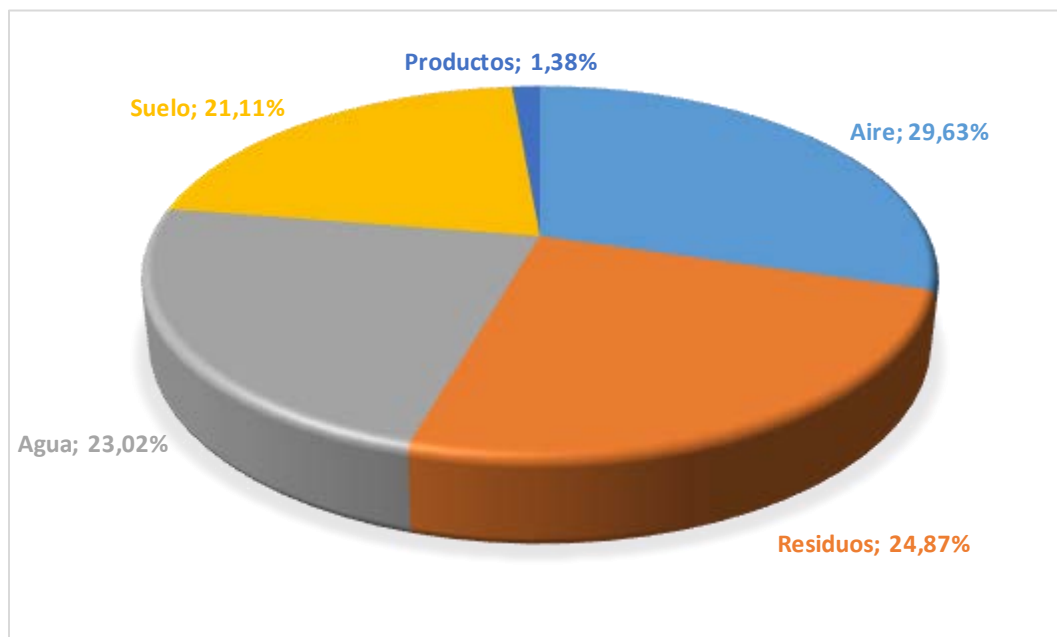


Figura 4.14 Distribución de las emisiones del inventario de nivel N2 según la matriz

4.4 COMPARACIÓN ENTRE EL INVENTARIO A NIVEL N1 Y EL INVENTARIO A NIVEL N2

Una diferencia que presenta el inventario a nivel N2 respecto al de nivel N1 es la inclusión de la actividad de producción de energía eléctrica con geotermia como una fuente emisora de mercurio. En el nivel N1, solamente se proponía un espacio donde el usuario puede señalar que esta actividad existe en el país o la región de análisis, pero sin manera de cuantificarla. En el N2, sí se propone factores de emisión para estimar la cantidad de mercurio emitido por la misma, aunque no son muy confiables al haberse generado con datos sin validación. Es debido a esto que el PNUMA propone una manera de calcularlo y hace la salvedad de utilizarla con cuidado, pero para este inventario se prefirió utilizar una combinación entre datos de la US-EPA y el Inventario de Emisiones de México, en donde sí se hizo un estudio de mejor calidad.

La caracterización del proceso y la estimación de un factor de emisión nacional para la minería de oro con amalgamación con mercurio, convirtió a esta fuente en la más importante del inventario de nivel N2, respecto a su muy baja importancia en el N1. El factor de emisión estimado de casi 4 g de mercurio emitido por cada gramo de oro recuperado dista mucho del sugerido de 0,1 g de mercurio por gramo de oro en el N1, demostrando que en este caso la propuesta del inventario N1 es muy pobre para representar esta actividad a nivel nacional, que

resulta la más importante de Costa Rica y así también de otros países de América Latina. También, coincide con lo comunicado de los personeros del Ministerio de Ambiente y Energía y Ministerio de Salud en tanto que esta actividad, con toda su ilegalidad, de seguro sería de las más importantes del país en cuanto a emisión, y dado que estas comunicaciones fueron lo que impulsaron la realización de la caracterización, debe decirse que estaban en lo correcto.

La utilización de las mediciones locales en los gases de salida de la chimenea de las empresas cementeras permitió que la emisión asociada a esta actividad decayera grandemente. En el inventario N1, la emisión fue estimada en 193,52 kg, mientras que en el N2 fue de 13,26 kg. Esto realza el trabajo efectuado por las empresas en cuestión, en tanto que su proceso es mucho más controlado en emisiones de mercurio de lo que lo es a nivel mundial, debido a que el factor de emisión nacional calculado fue mucho menor que lo sugerido según mediciones en otros países.

La utilización de datos de la cantidad de amalgamas, como se hizo a nivel N2 permitió una reducción de 227,72 kg en la emisión de esta fuente respecto a la estimación poblacional sugerida en el nivel N1. En ambos inventarios sigue siendo una fuente importante en la distribución total, pero esta disminución de casi una cuarta parte de la cantidad de mercurio asociado según el inventario N1 al hacer un cambio en la metodología de estimación es rescatable.

El cambio en la metodología de estimación de las sustancias químicas de un factor poblacional en el inventario N1 hacia un esfuerzo por determinar las importaciones y las existencias en laboratorios de universidades en el inventario N2 permitió que este sector adquiriera más relevancia en el inventario global, al pasar de un 0,88 % de la totalidad en el N1 a un 4,26 % en el N2. Esto sugiere que Costa Rica tiene más sustancias químicas con mercurio que los países que se estudiaron para determinar el factor poblacional de PNUMA, y que, al utilizar una consulta directa a los poseedores de estas sustancias, se tiene una mejor calidad en la información de este sector.

De manera general, el uso de la media logarítmica como metodología de estimación del factor mejor aproximado MAP del inventario N2 sobre la media aritmética en el N1, generó disminuciones en las estimaciones de la emisión de los sectores en que se aplicó el cálculo de esta manera, y según la IPCC es una manera más adecuada de estimar el comportamiento de una concentración de una sustancia química en el ambiente.

Los cambios generados sobre todo en el uso de medias logarítmicas sobre medias aritméticas, la variación en la metodología de estimación de las amalgamas y sustancias químicas, además de la estimación del factor de emisión nacional de la minería de oro artesanal con amalgamación

fueron los cambios que más influyeron en el cambio de la distribución de las emisiones entre las matrices. En el inventario N1, entre la matriz de aire y residuos recibieron 3 833,73 kg de las emisiones totales, es decir un 71,13 %, mientras que en inventario N2 la emisión en estas dos matrices fue de 2 740,430 kg, es decir un 54,49 %. Las emisiones al agua y al suelo del inventario N2 contemplaron mucha contribución de la actividad de oro artesanal, sumamente sub estimada en el inventario N1, y la gran cantidad de mercurio perdido en estas matrices fue el principal contribuyente para que el total en las mismas aumentara.

Finalmente, la emisión total estimada para el inventario N2 luego de todas las mejoras propuestas e implementadas fue 361,28 kg menor que en el N1 aun cuando incluyó la geotermia, que el otro no consideraba; es decir, una reducción del 6,70 % en el conteo total. También, el mínimo de emisión del inventario N2 fue 154,23 kg menor que el mínimo del inventario N1; mientras que el máximo del N2 fue 272,77 kg menor que el del N1. El intervalo de incertidumbre del inventario N2 fue 118,54 kg menor que el del N1, es decir, una reducción del 1,47 %.

De esta manera, para el inventario N2 tanto la emisión global a reportar como los límites máximo y mínimo entre los cuales podrían andar las mismas fueron menores que lo calculado en el inventario N1, y esto considerando la gran sub estimación que se hizo en este, en el sector de minería de oro. Si en esta fuente emisora el inventario N1 hubiese planteado una estimación algo más cercana con lo encontrado a la hora de calcular el factor de emisión nacional, con ayuda de la caracterización del proceso; las diferencias entre la emisión final y los límites hubiesen sido mucho mayores.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La emisión del mercurio para el 2014 en Costa Rica se contabilizó en 5 028,79 kg, con un intervalo de incertidumbre entre 2 641,31 kg y 10 603,35 kg.
- El factor de emisión local estimado para la minería de oro artesanal con amalgamación con mercurio, según lo obtenido en el Apéndice A, fue de $(3,8 \pm 0,2)$ g Hg (g oro)⁻¹, el cual es muy distinto al sugerido en el inventario a nivel N1 para esta práctica, que es 0,1 g Hg (g oro)⁻¹, y también mayor al que sugiere la metodología de construcción del inventario N2, que es de 3,0 g Hg (g oro)⁻¹.
- Las oportunidades de mejora implementadas y las mejoras generales identificadas y aplicadas para el inventario de nivel N2 fueron satisfactorias al permitir una reducción de 361,28 kg en la estimación de la emisión o un 6,70 % de reducción en la emisión total, y de 118,54 kg en el rango de incertidumbre entre el cual podrían fluctuar las mismas, o un 1,47 % de reducción en el intervalo. Esta reducción se logró, aunque la actividad de minería de oro artesanal fue muy sub estimada en el inventario N1 tanto en la emisión como en la incertidumbre de la misma.
- El inventario de nivel N2 sigue utilizando ciertos factores de emisión como datos de la población, debido a la dificultad de calcular el mercurio liberado por la actividad de otro modo, pero este tipo de estimaciones no toman en cuenta prácticamente los datos del país en cuanto al comportamiento de sus habitantes ni a sus prácticas ambientales.
- El inventario de nivel N2 estima las emisiones para todas las fuentes descritas que fueron consideradas, pero queda limitado únicamente a ellas. Cualquier fuente generadora de emisión de mercurio en alguno de los sectores considerados, o cualquier otro, presente en Costa Rica que no se consideró en este conteo, provocaría un aumento en la emisión total del país que no fue estimado en este inventario.
- La clasificación de las partidas arancelarias utilizada actualmente por la Dirección General de Aduanas no permite en muchos casos la distinción entre productos con mercurio y

otros productos con igual función, pero sin mercurio. En muchos casos la descripción de la importación fue muy abierta y quedó a criterio del generador del inventario si considerar que el producto importado sería contado como uno con mercurio o no.

- La comunicación y solicitud de información en el sector privado fue compleja, debido al conocimiento de las personas de la peligrosidad del mercurio, de manera que facilitar información a una persona que está buscando contabilizar la contaminación con mercurio que está haciendo dicha empresa o compañía puede ser algo que atente contra la imagen de la misma, de modo que se necesitó asistencia extra de mediadores de parte del Ministerio de Salud, Ministerio de Ambiente y Energía y Universidad Nacional de Costa Rica para conseguir la atención a las peticiones y respuesta a los datos requeridos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Promover, por medio del Ministerio de Ambiente y Energía, el cambio de tecnología de la actividad minera de la zona de Abangares, para que se consiga el metal precioso con metodologías que no usen el mercurio y les genere beneficios a los mineros, por ejemplo, el uso de concentradores, de manera que no se procese el material completo sino una parte del mismo, combinado con mesas vibratorias que separen el oro del material rocoso y arcilloso por gravimetría.
- Mejorar, por medio de las Municipalidades de Costa Rica, el servicio de recolección de los residuos sólidos, de manera que se pueda aumentar la cobertura del servicio en el territorio nacional y de esta manera los ciudadanos quemem o dispongan irregularmente menos residuos sólidos que han generado y que si no son recolectados por las Municipalidades deben buscar la manera de deshacerse de ellos.
- Mejorar el registro de la importación y exportación de los productos que contengan mercurio por medio de la Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda, para que se cree una nota técnica que obligue el registro de todo producto con mercurio que ingrese o salga del país, y esto mejore la calidad de toda la información procedente de esta Dirección que fue utilizada en este inventario.
- Mediante la Academia, continuar realizando mediciones periódicas en la zona de Abangares, mientras no se suprima el uso de mercurio en la minería de oro artesanal, de

manera que se pueda continuar recolectando información de la cantidad de oro extraído en la zona y la cantidad de mercurio perdido en la recolección del oro, de modo que se tenga más datos que permitan una mejor estimación de la emisión de mercurio asociada a esta que es la actividad más impactante del país.

- Por parte del Ministerio de Salud, recolectar información histórica de ambas cementeras del país en cuanto a mediciones de concentración de mercurio en sus gases de chimenea, y seguir solicitándola de acuerdo con lo establecido por la ley, para contar con más datos de la emisión de mercurio por el proceso de producción de cemento que permita mejorar la estimación del metal emitido por esta actividad.
- Es responsabilidad del Ministerio de Salud, solicitar en un plazo establecido a las universidades que imparten carreras con laboratorios de química, física o biología, además de los laboratorios de investigación, de centros de salud y demás existentes en el país, un inventario actualizado de los reactivos y equipos con mercurio que se tengan, y seguirlo actualizando periódicamente, de manera que se pueda mejorar la calidad de los datos referidos a químicos y equipos de laboratorio.
- El Ministerio de Salud debe hacer una revisión de los permisos de funcionamiento de los establecimientos del país, para que se asignen los correctos a los que no los tienen. Posterior a esto, generar una base de datos que registre todos los permisos de funcionamiento del país en un sistema único, que permita buscar cualquier actividad de interés en cuanto a emisiones de mercurio y se les pueda dar seguimiento a las mismas de manera más precisa, además de cerciorarse si cumplen con todos los requisitos que la legislación solicita, y acceder los reportes de cumplimiento de una manera más ágil.
- Generada la base de datos recomendada en el inciso anterior, el Ministerio de Salud deberá solicitar a todo ente existente con permiso de funcionamiento con código CIU como los indicados en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (N° 33 601, 2006) que deben reportar concentración de metales pesados, que comuniquen las concentraciones de mercurio en sus aguas, y los caudales, de manera que se pueda mejorar el dato de actividad del sector de aguas residuales, así como obtener un factor de emisión nacional de mercurio en aguas residuales.
- El Ministerio de Salud deberá pedir a todos los gestores de residuos sólidos con mercurio (fluorescentes, pilas y demás productos con este metal que sean gestionados) una

contabilidad actualizada periódicamente de la masa de productos gestionados, para que se pueda mejorar esta información necesaria para el inventario.

- Promover, por parte del Ministerio de Ambiente y Energía y el Ministerio de Salud, el uso de productos sin mercurio existentes en el mercado como alternativas a los que sí tienen mercurio, para disminuir la cantidad de bienes con el metal de interés que se importan y consumen en el país.

NOMENCLATURA

| Símbolo | Significado | Unidades |
|------------|---|-----------------------------------|
| A | Actividad | Variable a lo largo del documento |
| B | Razón masa de mercurio (masa de oro) ⁻¹ | g Hg (g oro) ⁻¹ |
| E | Emisión | kg |
| EMP | Error máximo permisible | g |
| F | Factor de entrada, distribución y/o emisión | Variable a lo largo del documento |
| Hg | Masa de mercurio | g |
| L | Límite de la incertidumbre | kg |
| M | Media logarítmica | g |
| P | Presión | kPa |
| R | Resolución | g |
| T | Temperatura | K |
| U | Incertidumbre al 95 % | g |
| V | Volumen | m ³ |
| X | Función, dependiente de a, b | Adimensional |
| Y | Precisión | g |
| a | Variable de una función X | Adimensional |
| b | Variable de una función X | Adimensional |
| n | Cantidad de mediciones | Adimensional |
| t | Temperatura | C |
| Δ | Incertidumbre, de manera general, para una función X | Adimensional |
| Subíndices | | |
| 0 | Inicial, de referencia | Adimensional |
| 1 | Referente a la corrida 1 | Adimensional |
| 2 | Referente a la corrida 2 | Adimensional |
| 3 | Referente a la corrida 3 | Adimensional |
| A.R. | Referente a las aguas residuales | Adimensional |
| B | Referente a la balanza de 150,00 kg de capacidad máxima | Adimensional |
| INF | Inferior | Adimensional |

| | | |
|-----------|---|--------------|
| MAP | Mejor aproximado | Adimensional |
| MAX | Máximo | Adimensional |
| MIN | Mínimo | Adimensional |
| P | Particulado, en referencia al mercurio | Adimensional |
| SUP | Superior | Adimensional |
| SyR | Referente a los switches y relays | Adimensional |
| agua | Referente a la matriz de agua | Adimensional |
| aire | Referente a la matriz de aire | Adimensional |
| amal | Referente a las amalgamas mercuriales | Adimensional |
| B | Referente a la balanza de 2 000,0 g de capacidad máxima | Adimensional |
| biomasa | Referente a la biomasa | Adimensional |
| carbón | Referente al carbón | Adimensional |
| ce | Referente a la producción de cemento | Adimensional |
| cem | Referente a los cementerios | Adimensional |
| co | Referente a los combustibles derivados del petróleo | Adimensional |
| comp L | Referente a los compuestos químicos de laboratorio | Adimensional |
| cq | Referente al coque de petróleo | Adimensional |
| cre | Referente a las cremaciones | Adimensional |
| d.i. r | Referente a los residuos sólidos desechados informalmente | Adimensional |
| e | Emitido | Adimensional |
| esf | Referente a los esfigmomanómetros | Adimensional |
| flu | Referente a los fluorescentes | Adimensional |
| geotermia | Referente a la energía geotérmica | Adimensional |
| man | Referente a los manómetros | Adimensional |
| n | No amalgamado | Adimensional |
| oro | Referente a la extracción de oro | Adimensional |
| ot eq L | Referente a otros equipos de laboratorio | Adimensional |
| pil | Referente a las pilas | Adimensional |
| poli | Referente a los productos con poliuretano | Adimensional |
| productos | Referente a la matriz de productos | Adimensional |
| r | Recuperado luego del proceso de retorta | Adimensional |
| r inc | Referente a los residuos sólidos incinerados de manera informal | Adimensional |

| | | |
|----------|---|--------------|
| r rell | Referente a los residuos sólidos de los rellenos sanitarios | Adimensional |
| residuos | Referente a la matriz de residuos | Adimensional |
| suelo | Referente a la matriz de suelo | Adimensional |
| t | Total | Adimensional |
| ter | Referente a los termómetros clínicos | Adimensional |
| ter L | Referente a los termómetros de laboratorio | Adimensional |

Superíndices

| | | |
|---|--------------------------------------|--------------|
| 0 | Elemental, en referencia al mercurio | Adimensional |
|---|--------------------------------------|--------------|

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A. (2016). *Termómetros de laboratorio y reactivos en la Universidad de Costa Rica*. Comunicación Personal. 12 de enero de 2016.
- Arce, A. (2015). *Fluorescentes reciclados en Global Electric Electronic Processing*. Comunicación Personal. 23 de septiembre del 2015.
- Arce, A. (2016). *Baterías recicladas en Global Electric Electronic Processing*. Comunicación Personal. 12 de julio de 2016.
- Bolaños, J. A. (2016). *Reportes de emisiones en chimenea de CEMEX, Costa Rica*. Comunicación Personal. 11 de julio de 2016.
- Bisinoti, M. y Jardim, W. (2004). *O Comportamento do Metilmercúrio (MetilHg) no Ambiente*. Química Nova, Vol. 27, No. 4, pp 593-600. ISSN: 1678-7064
- Campos, R. (2016). *Fluorescentes reciclados en Campos y Muñoz Asesores Profesionales S.A.* Comunicación Personal. 17 de abril de 2016.
- CCCB/CRCE Centro Coordinador Convenio Basilea-Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe (2014). *Informe: El Convenio de Minamata sobre el Mercurio y su implementación en la región de América Latina y el Caribe*. Webinteligente, Montevideo, Uruguay
- Contraloría General de la República CGR (2016). *Informe de Auditoría Operativa acerca de la gestión de las Municipalidades para garantizar la prestación eficaz y eficiente del servicio de recolección de residuos ordinarios*. Recuperado de <https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docsweb/auditoria-residuos/>
- Comisión de las Comunidades Europeas (2005). *Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo: Estrategia comunitaria sobre el mercurio*. Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas, Bélgica
- Decreto N° 24 334-S. Diario Oficial La Gaceta. San José, Costa Rica, 14 de junio de 1995.

Decreto N° 27 769-MAG-S. Diario Oficial La Gaceta. San José, Costa Rica, 13 de abril de 1999.

Dirección de Gestión de Calidad Ambiental DIGECA (2016). *Convenio de Minamata sobre mercurio en proceso de ser ratificado*. Recuperado de <http://www.digeca.go.cr/noticias/convenio-de-minamata-sobre-mercurio-en-proceso-de-ser-ratificado>

Dirección General de Aduanas DGA (2016). *Importaciones de productos de interés en el 2014*. Comunicación Personal. 17 de febrero de 2016.

Dirección de Protección al Ambiente Humano (2016a). *Fluorescentes reciclados en Fortech Química*. Comunicación Personal. Sin Fecha.

Dirección de Protección al Ambiente Humano (2016b). *Baterías recicladas en Fortech Química*. Comunicación Personal. Sin Fecha.

Dirección de Protección al Ambiente Humano (2016c). *Consolidados Regionales de Bases de Datos de Reportes Operacionales de Aguas Residuales*. Comunicación Personal. 18 de julio de 2016.

Environmental Protection Agency EPA (2009). *Potential Export of Mercury Compounds from the United States for Conversion to Elemental Mercury*. Oficina de Contaminación y Sustancias Tóxicas. Washington, DC; Estados Unidos.

Esquivel, J. (2016). *Termómetros de laboratorio y reactivos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica*. Comunicación Personal. Sin Fecha.

EURAMET European Association of National Metrology Institutes (2015). *Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighting Instruments*. Recuperado de https://www.euramet.org/get/?tx_stag_base%5Bfile%5D=25228&tx_stag_base%5Bidentifier%5D=%252Fdocs%252FPublications%252Fcalguides%252FI-CAL-GUI-018_Calibration_Guide_No._18_web.pdf&tx_stag_base%5Baction%5D=downloadRaw&tx_stag_base%5Bcontroller%5D=Base

Fernández, B. (2016). *Termómetros de laboratorio y reactivos en la Universidad Estatal a Distancia*. Comunicación Personal. 20 de enero de 2016.

- Gómez, M. (2016). *Cantidad de oro producido mediante rastras en Abangares, Guanacaste*. Comunicación Personal. 6 de junio de 2016.
- González, J. (2016a). *Despacho y existencias de termómetros en el almacén central de la CCSS*. Comunicación Personal. 15 de abril de 2016.
- González, J. (2016b). *Despacho y existencias de amalgamas en el almacén central de la CCSS*. Comunicación Personal. 18 de abril de 2016.
- González, Y. (2016). *Fluorescentes reciclados en Soluciones Integrales de Reciclaje, S.A.* Comunicación Personal. 26 de febrero de 2016.
- Haynes (2012). *Mercury Contamination in Costa Rica* (tesis de pregrado). Wesleyan University, Connecticut
- Higueras y Oyarzun (2016). *Mercurio*. Recuperado de http://www.uclm.es/users/higueras/MGA/Tema08/Minerales_salud_4_3.htm
- Instituto Costarricense de Electricidad ICE (2015). *Índice de Cobertura Eléctrica: 2015*. Recuperado de <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/10261169-f251-465d-9b95-0b17c7baa49e/Cobertura+2013.pdf?MOD=AJPERES&attachment=false&id=1453148700496>
- INEC Instituto Nacional de Estadística y Censos (2014). *Encuesta Nacional de Hogares*. Recuperado de: <http://www.inec.go.cr/flipbook/enaho2014/index.html>
- INEC Instituto Nacional de Estadística y Censos (2011a). *Indicadores demográficos proyectados por año calendario 2011-2025*. Recuperado de http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos/poblacion/estimaciones_y_proyecciones_de_poblacion/estadisticas/resultados/c_06._costa_rica._indicadores_demograficos_proyectados_por_anos_calendario_2011_-_2025.xlsx

INEC Instituto Nacional de Estadística y Censos (2011b). Costa Rica: *Población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia y cantón*. Recuperado de <http://www.inec.go.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion>

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2000). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Recuperado de http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/gpgaum_es.htm

IPEN Red Internacional de Eliminación de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (2014). *Introducción a la contaminación por mercurio y al Convenio de Minamata sobre Mercurio para las ONG*. Estocolmo, Suecia.

Larson, H. (2014). *The Minamata Convention on Mercury: risk in perspective*. The Lancet, 383(9913), p198-199. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)62000-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(13)62000-0)

Ley N° 6797. Diario Oficial La Gaceta. San José, Costa Rica, 4 de octubre de 1982.

Ley N° 8904. Diario Oficial La Gaceta. San José, Costa Rica, 10 de febrero del 2011.

López, A. (2016). *Cantidad de odontólogos incorporados al Colegio de Cirujanos Dentistas de Costa Rica para diciembre del 2014*. Comunicación personal. 6 de octubre de 2016.

Maíz, P. (2008). *Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio, México 2004*. Dirección de Investigación de Residuos y Sitios Contaminados, México, D.F.

Mesén, D. (2016). *Termómetros de laboratorio y reactivos en la Universidad de San José*. Comunicación Personal. Sin Fecha.

Molina, A. (2016a). *Balance Energético Nacional de Costa Rica Periodo 2014*. Comunicación Personal. 26 de septiembre de 2016.

Molina, A. (2016b). *Costa Rica, poderes calóricos y equivalencias energéticas*. Comunicación Personal. 26 de septiembre de 2016.

Montero, M. (2016). *Cómo estimar la precisión de una balanza digital*. Comunicación personal. 26 de octubre del 2016.

Mugica, V., Amador, M., Torres, M. y Figueroa, J (2003). *Mercurio y Metales Tóxicos en Cenizas Provenientes de Procesos de Combustión e Incineración*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, año/vol 19, número 002, pp 93-100.

OIML Organisation Internationale de Métrologie Légale (2006). *Non-automatic weighing instruments, Part 1: Metrological and technical requirements – Tests*. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj56j_lvrPAhWCPD4KHTrjB9sQFggcMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.oiml.org%2Fen%2Ffiles%2Fpdf_r%2Fr076-1-e06.pdf&usq=AFQjCNGiURigjpbpPWJN1GEzC6xf8tuecw&sig2=Suni6BQfNA3HA549YM-tew&bvm=bv.136811127,d.cWw

OMS Organización Mundial de la Salud (2016a). *Mercurio*. Recuperado de http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury/es/

OMS Organización Mundial de la Salud (2016b). *El mercurio y la salud*. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>

Passamonti (2015). *Energía*. Recuperado de <http://inta1a.blogspot.com/2015/04/sistemas.html>

PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2002). *Evaluación Mundial sobre el Mercurio*. Subdivisión de Productos Químicos, Ginebra, Suiza.

PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2012). *Guía Práctica: Reducción del uso de mercurio en la minería de oro artesanal y de pequeña escala*. Subdivisión de Productos Químicos, Ginebra, Suiza.

Pulles, T., Kok, H., Quass, U. (2006). *Application of the emission inventory model TEAM: Uncertainties in dioxin emission estimates for central Europe*. Atmospheric Environment 40 (2006) p. 2321-2332.

- Quirós, P. (2015). *Fluorescentes reciclados en Manejo de Desechos Industriales S.A.* Comunicación Personal. 21 de octubre de 2015.
- Ramos, C., Estévez, S. y Giraldo, E. (2000). *Nivel de contaminación por metilmercurio en la región de la Mojana.* Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA), Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Ramos, M. (2016). *Termómetros de laboratorio y reactivos en la Universidad Latina de Costa Rica.* Comunicación Personal. 12 de febrero de 2016.
- RECOPE Refinadora Costarricense de Petróleo (2015). Manual de Productos. Recuperado de https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2015/08/Manual_Productos_RECOPE_2015.pdf
- Reglamento N° 33 601-MINAE-S. Diario Oficial La Gaceta. San José, Costa Rica, 9 de agosto de 2006.
- Rodríguez, L. (2016). *Termómetros de laboratorios y reactivos en la Universidad Latinoamericana de Ciencia y Tecnología.* Comunicación Personal. 19 de abril de 2016.
- Salas, J. C. (2015). *Fluorescentes reciclados en Fundación Tecnológica de Costa Rica.* Comunicación Personal. 14 de octubre de 2015.
- Sánchez (2015). *Contratación de servicios para la revisión del marco regulatorio y político (existente y requerido) y la capacidad institucional para la implementación del Convenio de Minamata sobre el Mercurio en Costa Rica.* San José, Costa Rica
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Instituto Nacional de Ecología, México, D.F.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT (2013). *Inventario de Emisiones.* Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/calidad-del-aire/inventario-de-emisiones>

- Sibaja, J. P. (2016a). *Cantidad de cemento producido en Costa Rica en el 2014*. Comunicación Personal. 15 de junio de 2016.
- Sibaja, J. P. (2016b). *Cantidad de cremaciones efectuadas en Costa Rica durante el 2014*. Comunicación Personal. 15 de junio de 2016.
- Umaña, W. (2016). *Termómetros de laboratorio y reactivos en la Universidad Nacional de Costa Rica*. Comunicación Personal. Sin Fecha.
- UNEP United Nations Environmental Programme (2013a). *Global Mercury Assessment 2013, Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport*. Subdivisión de Productos Químicos, Ginebra, Suiza.
- UNEP United Nations Environmental Programme (2013b). *Proyecto de Convenio de Minamata sobre el Mercurio*. Subdivisión de Productos Químicos, Ginebra, Suiza.
- UNEP United Nations Environment Programme (2015). *Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Sources, Reference Report and Guideline for Inventory Level 2, Version 1.3, April 2015*. Subdivisión de Productos Químicos, Ginebra, Suiza
- Universidad Nacional Autónoma de México UNAM (2007). *Hoja de seguridad XXI: Mercurio y sales de mercurio*. Facultad de Química. México, D.F.
- University of Warmia and Mazury UWM (2012). *Mercury characteristics*. Recuperado de <http://www.uwm.edu.pl/kchem/mercury/mercury.html#chemical>
- Valverde, J. (2016). *Comunicación de las composiciones de las baterías producidas en Panasonic Costa Rica*. Comunicación Personal. Sin Fecha.

APÉNDICES

A DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE EMISIÓN LOCAL DE MINERÍA DE ORO ARTESANAL CON USO DE MERCURIO, Y SU INCERTIDUMBRE

La caracterización del proceso de extracción de oro del material procesado se hizo de la siguiente manera: se eligieron 3 sitios distintos de procesamiento (cada uno representa una corrida) y se recolectó datos de masa de material rocoso por procesar, masa de mercurio añadido inicialmente, masa de mercurio recuperado luego del proceso de formación de amalgama, masa de la amalgama, masa del mercurio recuperado luego de la separación del oro en la retorta, masa del oro extraído.

Se utilizó una balanza digital de hasta 150,00 kg de capacidad y una mínima división de la escala de 0,01 kg para la medición de la masa del material rocoso por procesar. Esta medición se hizo por etapas, primero pesando la cubeta contenedora de la roca vacía y luego la masa de la cubeta llena de roca, y se restó los datos para conocer el material para procesar. Todo el material fue pesado en cubetas de más o menos 30 kg de capacidad (esta medida es llamada cajuela en la zona), de manera que se hizo muchas mediciones y los resultados finales de cada corrida representan la suma de n cantidades de cubetas llenas de roca.

Para el resto de las mediciones, se usó otra balanza digital con hasta 2 000,0 g de capacidad y una mínima división de la escala de 0,1 g. Las masas de mercurio agregado y mercurio recuperado post formación de amalgama y post fundición en la retorta se determinaron por diferencia, primero pesando el envase vacío y luego con el metal. Las masas de la amalgama y del oro extraído se determinaron directamente, sin necesidad de hacerlo por diferencia.

El material procesado en las 3 corridas fue diferente, pues se trató del material a procesar por el minero en ese día. Así también, la cantidad de mercurio añadida inicialmente fue algo determinado por el minero, y lo único que se hizo en estos casos fue documentar cuánta masa de cada materia prima fue agregada.

El mercurio emitido en el proceso fue calculado mediante la ecuación A.1.

$$Hg_e = Hg_0 - Hg_r - Hg_n \quad (A.1)$$

Donde:

- Hg_e : Mercurio emitido, g
- Hg_0 : Mercurio inicial añadido, g
- Hg_r : Mercurio recuperado tras el proceso de separación de la amalgama en la retorta, g
- Hg_n : Mercurio recuperado porque no se amalgamó, g

El Cuadro A.1 muestra los datos recolectados de la caracterización.

Cuadro A.1 Resultados de la caracterización del proceso de minería artesanal con uso de mercurio en el cantón de Abangares.

| Parámetros | Corrida 1 | Corrida 2 | Corrida 3 |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Cantidad de cajuelas procesadas | 14 | 47 | 4 |
| Material rocoso agregado (kg) | 322,36 | 1 316,00 | 120,87 |
| Mercurio agregado (g) | 1 200,2 | 5 532,4 | 444,6 |
| Envases con mercurio añadido | 3 | 12 | 1 |
| Mercurio recuperado luego de formar la amalgama (g) | 1 157,6 | 5 358,4 | 294,9 |
| Masa de la amalgama (g) | 43,5 | 73,1 | 37,0 |
| Cantidad de amalgamas obtenidas | 1 | 5 | 1 |
| Mercurio recuperado luego de la separación del oro en la retorta (g) | 27,4 | 50,4 | 25,9 |
| Masa del oro extraído (g) | 16,1 | 22,5 | 11,2 |

La incertidumbre de los datos se calculó de la siguiente manera: para cada una de las balanzas utilizadas los componentes de la incertidumbre fueron el error máximo permisible del equipo, la precisión y la resolución del mismo.

- Error máximo permisible. Según las reglas de la resolución 76 de (OIML, 2006), es posible conocer el error máximo permisible de una balanza a partir de su capacidad máxima, su resolución, la cantidad de divisiones de la escala que es posible medir en el instrumento y su capacidad mínima, que también se conoce con ayuda del mismo documento.
- Precisión. Según (EURAMET, 2015), es posible conocer la precisión del instrumento al utilizar un escenario donde se toman dos mediciones de la misma masa en dos

momentos determinados, con una variabilidad de un ± 1 en el último decimal, y luego el valor absoluto de esta variabilidad es dividido entre el número de mediciones. Esto en el caso de pesaje de un material sólido que no absorba humedad, tal como es el material rocoso de la zona o el oro recuperado al final de la extracción. También, se puede utilizar este método cuando la medición no fluctúa entre valores, sino que sí se reporta un dato y se mantiene estable en el tiempo, como fue lo que ocurrió cuando se hicieron las mediciones (Montero, 2016).

- c. Resolución. La resolución de una balanza digital es la mínima masa que es posible medir con el instrumento, dividida entre dos.

Estos tres componentes de la incertidumbre son de distribución rectangular. El Cuadro A.2 resume los valores de estos tres componentes de la incertidumbre, para las dos balanzas usadas.

Cuadro A.2 Componentes de la incertidumbre de las balanzas utilizadas en la caracterización del proceso de minería de oro artesanal

| Balanza | Error máximo permisible EMP (g) | Precisión Y (g) | Resolución R (g) |
|--|---------------------------------|-----------------|------------------|
| Balanza de capacidad máxima de 150,00 kg (B) | 15 | 5 | 5 |
| Balanza de capacidad máxima de 2 000,0 g (b) | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

De esta manera, para las mediciones por diferencia del material rocoso agregado, la incertidumbre al 95 % de la medición es dada por la ecuación A.3. Se divide por raíz de 3 porque cada uno de los componentes presenta una distribución rectangular:

$$U_B = \left[2 \sqrt{\left(\frac{EMP}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Y}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{R}{\sqrt{3}}\right)^2} \right]_B \cdot 2 \cdot n \quad (A.3)$$

Donde:

- U_B : Incertidumbre al 95 % de la medición del material rocoso a procesar en la balanza de capacidad máxima de 150,00 kg, g
- EMP: Error máximo permisible, g
- Y: Precisión, g

- R: Resolución, g
- n: Cantidad de mediciones que se hizo, adimensional

La incertidumbre al 95 % de confianza de las mediciones de mercurio, hechas por diferencia, es dada por la ecuación A.4

$$U_b = \left[2 \sqrt{\left(\frac{EMP}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Y}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{R}{\sqrt{3}}\right)^2} \right]_b \cdot 2 \cdot n \quad (A.4)$$

Donde:

- U_b : Incertidumbre al 95 % de la medición del mercurio en la balanza de capacidad máxima de 2 000,0 g, g

La incertidumbre al 95 % de confianza las mediciones de la amalgama y del oro, hechas directamente, es dada por la ecuación A.5

$$U_b = \left[\sqrt{\left(\frac{EMP}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{Y}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{R}{\sqrt{3}}\right)^2} \right]_b \cdot 2 \cdot n \quad (A.5)$$

Así, el Cuadro A.3 muestra los resultados de la caracterización, pero cada uno de ellos con su incertidumbre asociada. Se siguen a partir de este momento las reglas de cifras significativas.

Cuadro A.3 Resultados de la caracterización del proceso de minería artesanal con uso de mercurio en el cantón de Abangares, con su incertidumbre asociada al 95 % de confianza.

| Parámetros | Corrida 1 | Corrida 2 | Corrida 3 |
|--|---------------|------------|-------------|
| Material rocoso agregado (kg) | 322,4 ± 0,5 | 1 316 ± 2 | 120,9 ± 0,2 |
| Mercurio agregado (g) | 1 200,2 ± 0,6 | 5 532 ± 2 | 444,6 ± 0,2 |
| Mercurio recuperado luego de la formación de la amalgama (g) | 1 157,6 ± 0,6 | 5 358 ± 2 | 294,9 ± 0,2 |
| Masa de la amalgama (g) | 43,5 ± 0,1 | 73,1 ± 0,5 | 37,0 ± 0,1 |
| Mercurio recuperado luego de la separación del oro en la retorta (g) | 27,4 ± 0,2 | 50,4 ± 0,2 | 25,9 ± 0,2 |
| Masa del oro extraído (g) | 16,1 ± 0,1 | 22,5 ± 0,1 | 11,2 ± 0,1 |

Para calcular el mercurio total emitido, descrito en la ecuación A.1, se hace la resta descrita por la ecuación y las incertidumbres de todas las mediciones son sumadas, de modo que $Hg_{e,1} = (15,2 \pm 1,4)$ g. Análogamente, $Hg_{e,2} = (124 \pm 4)$ g, $Hg_{e,3} = (123,8 \pm 0,6)$ g.

La fórmula para calcular incertidumbres, de modo general, se presenta en la ecuación A.6:

$$\Delta X(a, b) = \frac{\partial X}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial X}{\partial b} \Delta b \quad (\text{A.6})$$

Donde:

- ΔX : Incertidumbre de una función X, dependiente de a, b.

Para la razón mercurio emitido (masa de oro)⁻¹, con ayuda de derivación es posible obtener la ecuación A.7.

$$\Delta B = \frac{1}{b} \Delta a - \frac{a}{b^2} \Delta b \quad (\text{A.7})$$

Con ayuda de la ecuación A.7, se obtiene que $B_1 = (0,94 \pm 0,08)$ g Hg (g oro)⁻¹. Análogamente, $B_2 = (5,5 \pm 0,2)$ g Hg (g oro)⁻¹, $B_3 = (11,05 \pm 0,05)$ g Hg (g oro)⁻¹.

La ecuación para el cálculo de la media logarítmica de estos tres factores se muestra en la ecuación A.8

$$M = e^{\left[\frac{\ln B_1 + \ln B_2 + \ln B_3}{3} \right]} \quad (\text{A.8})$$

Y, con ayuda de la ecuación A.6, es posible conocer la fórmula para la incertidumbre. Se muestra en la ecuación A.9.

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial B_1} \Delta B_1 + \frac{\partial M}{\partial B_2} \Delta B_2 + \frac{\partial M}{\partial B_3} \Delta B_3 \quad (\text{A.9})$$

Con

$$\frac{\partial M}{\partial B_1} = e^{\left[\frac{\ln B_1 + \ln B_2 + \ln B_3}{3} \right]} \cdot \frac{1}{3B_1}$$

$$\frac{\partial M}{\partial B_2} = e^{\left[\frac{\ln B_1 + \ln B_2 + \ln B_3}{3} \right]} \cdot \frac{1}{3B_2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial B_3} = e^{\left[\frac{\ln B_1 + \ln B_2 + \ln B_3}{3} \right]} \cdot \frac{1}{3B_3}$$

Seguendo las fórmulas anteriores, es posible obtener la media logarítmica de los datos y su incertidumbre por la ecuación A.9. Finalmente, el factor de emisión a utilizar fue $(3,8 \pm 0,2) \text{ g Hg (g oro)}^{-1}$.

B MEMORIA DE CÁLCULO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Carbón | | | | | | |
| Descripción | Combustión de carbón mineral para su aprovechamiento energético. | | | | | | |
| Metodología | Consumo anual de carbón mineral y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de carbón mineral. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> Actividad <p>El consumo anual de carbón mineral se tomó del Balance Energético Nacional de Costa Rica del año 2014, generado por la Dirección Sectorial de Energía (DSE) del MINAE.</p> <p>MAP: 2 914 t año⁻¹ MIN: 2 622,60 t año⁻¹ MAX: 3 205,40 t año⁻¹</p> Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 0,15 mg kg⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 0,293 mg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,05 mg kg⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,060 mg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,5 mg kg⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,882 mg kg⁻¹</td> </tr> </table> Factores de distribución <p>Aire: 100 %</p> Supuestos <p>Poder calorífico del carbón mineral de 30,56 TJ (1000 t)⁻¹, utilizado por la DSE en el Balance Energético.</p> <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 10 %.</p> | MAP (N1): 0,15 mg kg ⁻¹ | MAP (N2): 0,293 mg kg ⁻¹ | MIN (N1): 0,05 mg kg ⁻¹ | MIN (N2): 0,060 mg kg ⁻¹ | MAX (N1): 0,5 mg kg ⁻¹ | MAX (N2): 0,882 mg kg ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,15 mg kg ⁻¹ | MAP (N2): 0,293 mg kg ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,05 mg kg ⁻¹ | MIN (N2): 0,060 mg kg ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 0,5 mg kg ⁻¹ | MAX (N2): 0,882 mg kg ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{carbón}} = 2\,914 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,15 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}} \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{0,437 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{INF, carbón}} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,914\,000 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,15 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) \cdot \ln\left(3\,205\,400 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(2\,622\,600 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{0,212 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, carbón}} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,914\,000 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,15 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) + \ln\left(3\,205\,400 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(2\,622\,600 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{0,900 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$E_{\text{carbón}} = 2\,914 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,293 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}} \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{0,854 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{INF, carbón}} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,914\,000 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,293 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) \cdot \ln\left(3\,205\,400 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,882 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(2\,622\,600 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,060 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{0,371 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, carbón}} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,914\,000 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,293 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) + \ln\left(3\,205\,400 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,882 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(2\,622\,600 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,060 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{1,966 \text{ kg Hg}}$$

| Nombre de la fuente | Derivados del petróleo y coque de petróleo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Descripción | Combustión de combustibles derivados del petróleo y coque de petróleo para su aprovechamiento energético. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Metodología | Consumo anual de combustibles derivados del petróleo y de coque de petróleo, y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de combustible derivado del petróleo y coque de petróleo. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> Actividad <p>Los combustibles derivados del petróleo considerados fueron: gasolina súper, gasolina regular, fuel oil (búnker), diésel, queroseno, jet fuel, gasóleo (mezcla de diésel y búnker) y el IFO 380 (mezcla de búnker, gasóleo y diésel).</p> <p>El consumo anual de combustibles derivados del petróleo y coque de petróleo se tomó del Balance Energético Nacional de Costa Rica del año 2014, generado por la DSE del MINAE.</p> <table> <thead> <tr> <th>Derivados de petróleo</th> <th>Coque de petróleo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MAP: 1 994 081,95 t año⁻¹</td> <td>MAP: 98 883,00 t año⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN: 1 794 673,76 t año⁻¹</td> <td>MIN: 88 994,70 t año⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX: 2 193 490,15 t año⁻¹</td> <td>MAX: 108 771,30 t año⁻¹</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> Factores de emisión <table> <thead> <tr> <th>Derivados de petróleo</th> <th>Coque de petróleo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MAP (N1): 0,005 5 mg kg⁻¹</td> <td>MAP (N1): 0,055 mg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,001 mg kg⁻¹</td> <td>MIN (N1): 0,01 mg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,01 mg kg⁻¹</td> <td>MAX (N1): 0,1 mg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAP (N2): 0,003 2 mg kg⁻¹</td> <td>MAP (N2): 0,032 mg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N2): 0,001 mg kg⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,01 mg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N2): 0,01 mg kg⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,1 mg kg⁻¹</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> Factores de distribución <p>Aire: 100 %</p> | Derivados de petróleo | Coque de petróleo | MAP: 1 994 081,95 t año ⁻¹ | MAP: 98 883,00 t año ⁻¹ | MIN: 1 794 673,76 t año ⁻¹ | MIN: 88 994,70 t año ⁻¹ | MAX: 2 193 490,15 t año ⁻¹ | MAX: 108 771,30 t año ⁻¹ | Derivados de petróleo | Coque de petróleo | MAP (N1): 0,005 5 mg kg ⁻¹ | MAP (N1): 0,055 mg kg ⁻¹ | MIN (N1): 0,001 mg kg ⁻¹ | MIN (N1): 0,01 mg kg ⁻¹ | MAX (N1): 0,01 mg kg ⁻¹ | MAX (N1): 0,1 mg kg ⁻¹ | MAP (N2): 0,003 2 mg kg ⁻¹ | MAP (N2): 0,032 mg kg ⁻¹ | MIN (N2): 0,001 mg kg ⁻¹ | MIN (N2): 0,01 mg kg ⁻¹ | MAX (N2): 0,01 mg kg ⁻¹ | MAX (N2): 0,1 mg kg ⁻¹ |
| Derivados de petróleo | Coque de petróleo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MAP: 1 994 081,95 t año ⁻¹ | MAP: 98 883,00 t año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MIN: 1 794 673,76 t año ⁻¹ | MIN: 88 994,70 t año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MAX: 2 193 490,15 t año ⁻¹ | MAX: 108 771,30 t año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Derivados de petróleo | Coque de petróleo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MAP (N1): 0,005 5 mg kg ⁻¹ | MAP (N1): 0,055 mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MIN (N1): 0,001 mg kg ⁻¹ | MIN (N1): 0,01 mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MAX (N1): 0,01 mg kg ⁻¹ | MAX (N1): 0,1 mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MAP (N2): 0,003 2 mg kg ⁻¹ | MAP (N2): 0,032 mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MIN (N2): 0,001 mg kg ⁻¹ | MIN (N2): 0,01 mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MAX (N2): 0,01 mg kg ⁻¹ | MAX (N2): 0,1 mg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Uso de poderes caloríficos de cada derivado del petróleo y del coque de petróleo sugeridos por la DSE en el Balance Energético.</p> <p>Densidad de cada derivado del petróleo y del coque de petróleo, según RECOPE (2015).</p> <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 10 %.</p> <p>Factor MAP del inventario N1 calculado como media aritmética entre los factores MIN y MAX usados.</p> <p>Factor MAP del inventario N2 mediante la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de dicha distribución se encuentra a la mitad del intervalo</p> |
|--|---|

Para el inventario N1

$$E_{co} = 1\,944\,081,95 \frac{t}{año} \cdot 0,0055 \frac{mg\ Hg}{kg} \left(\frac{1000\ kg}{1\ t} \right) \left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^6\ mg\ Hg} \right) = \mathbf{10,967\ kg\ Hg}$$

Emisión de coque de petróleo, análogamente: $E_{cq} = \mathbf{5,439\ kg\ Hg}$

$$L_{INF, co} = e^{\left[\frac{\ln\left(1\,944\,081\,950 \frac{kg}{año} \cdot 0,0055 \frac{mg\ Hg}{kg}\right) - \ln\left(1\,794\,673\,760 \frac{kg}{año} \cdot 0,001 \frac{mg\ Hg}{kg}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^6\ mg\ Hg} \right) = \mathbf{5,324\ kg\ Hg}$$

$$L_{SUP, co} = e^{\left[\frac{\ln\left(1\,944\,081\,950 \frac{kg}{año} \cdot 0,0055 \frac{mg\ Hg}{kg}\right) + \ln\left(2\,193\,490\,150 \frac{kg}{año} \cdot 0,01 \frac{mg\ Hg}{kg}\right) - \ln\left(1\,794\,673\,760 \frac{kg}{año} \cdot 0,001 \frac{mg\ Hg}{kg}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^6\ mg\ Hg} \right) = \mathbf{22,591\ kg\ Hg}$$

Límites de la incertidumbre para el coque de petróleo, análogamente: $L_{INF, cq} = \mathbf{2,640\ kg\ Hg}$, y

$L_{SUP, cq} = \mathbf{11,203\ kg\ Hg}$

Para el inventario N2

$$F_{MAP, CO} = e^{\left[\ln\left(0,001 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right) + \frac{\ln\left(0,01 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(0,001 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{0,0032 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}}$$

Factor de emisión MAP de coque de petróleo, análogamente: $F_{MAP, cq} = \mathbf{0,032 \text{ mg kg}^{-1}}$

$$E_{CO} = 1\,944\,081,95 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,0032 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}} \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{6,306 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de coque de petróleo, análogamente: $E_{cq} = \mathbf{3,127 \text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, CO} = e^{\left[\ln\left(1\,944\,081\,950 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,0032 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) - \frac{\ln\left(2\,193\,490\,150 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(1\,794\,673\,760 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,001 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{3,061 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, CO} = e^{\left[\ln\left(1\,944\,081\,950 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,0032 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) + \frac{\ln\left(2\,193\,490\,150 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(1\,794\,673\,760 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 0,001 \frac{\text{mg Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{12,989 \text{ kg Hg}}$$

Límites de la incertidumbre para el coque de petróleo, análogamente: $L_{INF, cq} = \mathbf{1,518 \text{ kg Hg}}$, y

$L_{SUP, cq} = \mathbf{6,441 \text{ kg Hg}}$

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Nombre de la fuente | Biomosas | | | | | | |
| Descripción | Combustión de biomasa para su aprovechamiento energético. | | | | | | |
| Metodología | Consumo anual de biomasa, y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de biomasa. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> Actividad <p>Las biomosas utilizadas en Costa Rica para aprovechamiento energético fueron la leña, el bagazo, la cascarilla del café, la cascarilla del arroz, la cáscara del coquito de la palma y la fibra del mesocarpio de la palma.</p> <p>El consumo anual de biomosas se tomó del Balance Energético Nacional de Costa Rica del año 2014, generado por la DSE del MINAE.</p> <p>MAP: 2 439 549,00 t año⁻¹ MIN: 1 707 684,30 t año⁻¹ MAX: 3 171 413,70 t año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> Factores de emisión <table> <tr> <td>MAP (N1): 0,03 g t⁻¹</td> <td>MAP (N2): 0,002 6 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,007 g t⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,000 26 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,07 g t⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,026 g t⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> Factores de distribución <p>Aire: 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Supuestos <p>Uso de poderes caloríficos de cada biomasa sugeridos por la DSE en el Balance Energético.</p> <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 %.</p> | MAP (N1): 0,03 g t ⁻¹ | MAP (N2): 0,002 6 g t ⁻¹ | MIN (N1): 0,007 g t ⁻¹ | MIN (N2): 0,000 26 g t ⁻¹ | MAX (N1): 0,07 g t ⁻¹ | MAX (N2): 0,026 g t ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,03 g t ⁻¹ | MAP (N2): 0,002 6 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,007 g t ⁻¹ | MIN (N2): 0,000 26 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 0,07 g t ⁻¹ | MAX (N2): 0,026 g t ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{biomasa}} = 2\,439\,549 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,03 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = 73,186 \text{ kg Hg}$$

$$L_{\text{INF, biomasa}} = e^{\left[\ln\left(2\,439\,549 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,03 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \frac{\ln\left(3\,171\,413,7 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,07 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(1\,707\,684,3 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,007 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{31,488 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, biomasa}} = e^{\left[\ln\left(2\,439\,549 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,03 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) + \frac{\ln\left(3\,171\,413,7 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,07 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(1\,707\,684,3 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,007 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{170,104 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$E_{\text{biomasa}} = 2\,439\,549 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,0026 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{6,343 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{INF, biomasa}} = e^{\left[\ln\left(2\,439\,549 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,0026 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \frac{\ln\left(3\,171\,413,7 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,026 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(1\,707\,684,3 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,00026 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{1,404 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, biomasa}} = e^{\left[\ln\left(2\,439\,549 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,0026 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) + \frac{\ln\left(3\,171\,413,7 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,026 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(1\,707\,684,3 \frac{\text{t}}{\text{año}} - 0,00026 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{28,658 \text{ kg Hg}}$$

| | |
|---------------------|--|
| Nombre de la fuente | Geotermia |
| Descripción | Producción de electricidad con energía geotérmica. |
| Metodología | Producción anual de electricidad con energía geotérmica, y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilowatt-hora de energía eléctrica producida con energía geotérmica. |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La producción anual de electricidad con energía geotérmica se tomó del Balance Energético Nacional de Costa Rica del año 2014, generado por la DSE del MINAE.</p> <p>MAP: 1 538 135,68 MWh año⁻¹ MIN: 1 384 322,12 MWh año⁻¹ MAX: 1 691 949,25 MWh año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <p>MAP (N2): 0,045 g MWh⁻¹ MIN (N2): 0,000 75 g MWh⁻¹ MAX (N2): 0,9 g MWh⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Factor de 3,6 TJ GWh⁻¹, utilizado por la DSE en el Balance Energético.</p> <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 10 %.</p> |

Para el inventario N2

$$E_{\text{geotermia}} = 1\,538\,135,68 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 0,045 \frac{\text{g Hg}}{\text{MWh}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{69,216 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{INF, geotermia}} = e^{\left[\frac{\ln\left(1\,538\,135,68 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 0,045 \frac{\text{g Hg}}{\text{MWh}}\right) \ln\left(1\,691\,949,25 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 0,9 \frac{\text{g Hg}}{\text{MWh}}\right) - \ln\left(1\,384\,322,12 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 0,000\,75 \frac{\text{g Hg}}{\text{MWh}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{8,437 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, geotermia}} = e^{\left[\frac{\ln\left(1\,538\,135,68 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 0,045 \frac{\text{g Hg}}{\text{MWh}}\right) + \ln\left(1\,691\,949,25 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 0,9 \frac{\text{g Hg}}{\text{MWh}}\right) - \ln\left(1\,384\,322,12 \frac{\text{MWh}}{\text{año}} \cdot 0,000\,75 \frac{\text{g Hg}}{\text{MWh}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{567,869 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|----------------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Extracción de oro c/amalgama | | | | | | |
| Descripción | Extracción de oro de manera artesanal con el método de amalgamación con mercurio. | | | | | | |
| Metodología | Extracción anual de oro, y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de oro extraído. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La extracción anual de oro por el método de amalgamación con mercurio y uso de rastras, retortas, telas filtrantes y demás equipos y técnicas artesanales, para el año 2014 fue brindada por la Dirección de Geología y Minas del MINAE.</p> <p>MAP: 350 kg año⁻¹ MIN: 245 kg año⁻¹ MAX: 455 kg año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 0,1 g g⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 3,8 g g⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,01 g g⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,944 1 g g⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 1,0 g g⁻¹</td> <td>MAX (N2): 11,053 6 g g⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 20 %, Agua: 40 %, Suelo: 40 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 %.</p> <p>Para el inventario N2 los factores MIN y MAX fueron obtenidos como los valores mínimos y máximos entre las mediciones que se hizo en la zona, mientras se practicaba la actividad. Se midió la masa de mercurio perdida durante el procesamiento de una masa medida de oro extraída.</p> <p>El factor MAP se calculó como una media logarítmica de todos los datos recopilados, siguiendo las indicaciones del apéndice A.</p> | MAP (N1): 0,1 g g ⁻¹ | MAP (N2): 3,8 g g ⁻¹ | MIN (N1): 0,01 g g ⁻¹ | MIN (N2): 0,944 1 g g ⁻¹ | MAX (N1): 1,0 g g ⁻¹ | MAX (N2): 11,053 6 g g ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,1 g g ⁻¹ | MAP (N2): 3,8 g g ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,01 g g ⁻¹ | MIN (N2): 0,944 1 g g ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 1,0 g g ⁻¹ | MAX (N2): 11,053 6 g g ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{oro, aire}} = 350 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 0,1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \cdot 0,2 = 7,000 \text{ kg Hg}$$

Emisión de extracción de oro al agua, análogamente: $E_{\text{oro, agua}} = 14,000 \text{ kg Hg}$

Emisión de extracción de oro al suelo, análogamente: $E_{\text{oro, suelo}} = 14,000 \text{ kg Hg}$

Emisión de extracción de oro total: $E_{\text{oro}} = 35,000 \text{ kg Hg}$

$$L_{\text{INF, oro}} = e^L \left[\ln \left(350 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 0,1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) \cdot \frac{\ln \left(455 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) - \ln \left(245 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right)}{\sqrt{12}} \right] = 7,747 \text{ kg Hg}$$

$$L_{\text{SUP, oro}} = e^L \left[\ln \left(350 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 0,1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) + \frac{\ln \left(455 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) - \ln \left(245 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right)}{\sqrt{12}} \right] = 158,135 \text{ kg Hg}$$

Para el inventario N2

$$E_{\text{oro, aire}} = 350 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 3,8 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \cdot 0,2 = 266,000 \text{ kg Hg}$$

Emisión de extracción de oro al agua, análogamente: $E_{\text{oro, agua}} = 532,000 \text{ kg Hg}$

Emisión de extracción de oro al suelo, análogamente: $E_{\text{oro, suelo}} = 532,000 \text{ kg Hg}$

Emisión de extracción de oro total: $E_{\text{oro}} = 1\,330,000 \text{ kg Hg}$

$$L_{\text{INF, oro}} = e^L \left[\ln \left(350 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 3,8 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) \cdot \frac{\ln \left(455 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 11,0536 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) - \ln \left(245 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 0,9441 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right)}{\sqrt{12}} \right] = 556,761 \text{ kg Hg}$$

$$L_{\text{SUP, oro}} = e^L \left[\ln \left(350 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 3,8 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) + \frac{\ln \left(455 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 11,0536 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right) - \ln \left(245 \frac{\text{kg oro}}{\text{año}} \cdot 0,9441 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg oro}} \right)}{\sqrt{12}} \right] = 3\,235,233 \text{ kg Hg}$$

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Cemento | | | | | | |
| Descripción | Producción de cemento. | | | | | | |
| Metodología | Producción anual de cemento, y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de cemento producido. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La producción anual de cemento con uso de combustibles alternativos, o co-incineración de residuos sólidos, en Costa Rica durante el 2014 fue un dato brindado por la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA) del MINAE.</p> <p>MAP: 1 488 600 t año⁻¹ MIN: 1 339 740 t año⁻¹ MAX: 1 637 460 t año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 0,13 g t⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 0,008 91 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,032 g t⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,000 49 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,75 g t⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,163 93 g t⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Inventario N1: Aire: 75 %, Productos: 25 %</p> <p>Inventario N2: Aire: 60 %, Productos: 20 %, Residuos: 20 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 10 %.</p> <p>Para el inventario N2 los factores MIN y MAX fueron obtenidos como los valores mínimos y máximos entre las mediciones que se hizo semestralmente en los gases de chimenea, entre enero del 2013 y enero del 2016.</p> <p>El factor MAP se calculó como una media logarítmica de todos los datos recopilados, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 0,13 g t ⁻¹ | MAP (N2): 0,008 91 g t ⁻¹ | MIN (N1): 0,032 g t ⁻¹ | MIN (N2): 0,000 49 g t ⁻¹ | MAX (N1): 0,75 g t ⁻¹ | MAX (N2): 0,163 93 g t ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,13 g t ⁻¹ | MAP (N2): 0,008 91 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,032 g t ⁻¹ | MIN (N2): 0,000 49 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 0,75 g t ⁻¹ | MAX (N2): 0,163 93 g t ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{ce, \text{aire}} = 1\,488\,600 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,13 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{1000 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,75 = \mathbf{145,139 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de producción de cemento en los productos, análogamente: $E_{ce, \text{productos}} = \mathbf{48,380 \text{ kg Hg}}$

Emisión de producción de cemento total: $E_{ce} = \mathbf{193,518 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF}, ce} = e^{\left[\frac{\ln\left(1\,488\,600 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,13 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \frac{\ln\left(1\,637\,460 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,75 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(1\,339\,740 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,032 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{1000 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{73,469 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP}, ce} = e^{\left[\frac{\ln\left(1\,488\,600 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,13 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) + \frac{\ln\left(1\,637\,460 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,75 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(1\,339\,740 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,032 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{1000 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{509,728 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$E_{ce, \text{aire}} = 1\,488\,600 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 0,008\,91 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{1000 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,6 = \mathbf{7,954 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de producción de cemento en los productos, análogamente: $E_{ce, \text{productos}} = \mathbf{2,651 \text{ kg Hg}}$

Emisión de producción de cemento en los residuos, análogamente: $E_{ce, \text{residuos}} = \mathbf{2,651 \text{ kg Hg}}$

Emisión de producción de cemento total: $E_{ce} = \mathbf{13,257 \text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, ce} = e^{\left[\ln\left(1\,488\,600 \frac{t}{\text{año}} - 0,008\,91 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \frac{\ln\left(1\,637\,460 \frac{t}{\text{año}} - 0,163\,93 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \ln\left(1\,339\,740 \frac{t}{\text{año}} - 0,000\,49 \frac{\text{g Hg}}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}.$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{1000 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{2,335 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, ce} = e^{\left[\ln\left(1\,488\,600 \frac{t}{\text{año}} - 0,008\,91 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) + \frac{\ln\left(1\,637\,460 \frac{t}{\text{año}} - 0,163\,93 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \ln\left(1\,339\,740 \frac{t}{\text{año}} - 0,000\,49 \frac{\text{g Hg}}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}.$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{1000 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{75,249 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|---------------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Nombre de la fuente | Termómetros | | | | | | |
| Descripción | Uso de termómetros clínicos con mercurio. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de termómetros clínicos importados, cantidad de termómetros despachados a las diferentes áreas de salud y termómetros existentes en el almacén central de la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS); y factor de emisión de masa de mercurio en cada termómetro clínico. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La cantidad de termómetros importados se obtuvieron de la Dirección General de Aduanas (DGA) del Ministerio de Hacienda, en tanto que la cantidad de termómetros despachados y almacenados en el almacén central de la CCSS se obtuvo de (González, 2016a).</p> <p>MAP: 381 626 U año⁻¹ MIN: 267 138 U año⁻¹ MAX: 496 114 U año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 1 g U⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 0,866 g U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,5 g U⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,5 g U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 1,5 g U⁻¹</td> <td>MAX (N2): 1,5 g U⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 10 %, Agua: 30 %, Residuos: 60 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 % y se redondeó al número entero más cercano.</p> <p>Masa de cada termómetro clínico: 4 g.</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 1 g U ⁻¹ | MAP (N2): 0,866 g U ⁻¹ | MIN (N1): 0,5 g U ⁻¹ | MIN (N2): 0,5 g U ⁻¹ | MAX (N1): 1,5 g U ⁻¹ | MAX (N2): 1,5 g U ⁻¹ |
| MAP (N1): 1 g U ⁻¹ | MAP (N2): 0,866 g U ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,5 g U ⁻¹ | MIN (N2): 0,5 g U ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 1,5 g U ⁻¹ | MAX (N2): 1,5 g U ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{ter, aire}} = 381\,626 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,1 = \mathbf{38,163 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros clínicos en el agua, análogamente: $E_{\text{ter, agua}} = \mathbf{114,488 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de termómetros clínicos en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{ter, residuos}} = \mathbf{228,976 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros clínicos total: $E_{\text{ter}} = \mathbf{381,626 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, ter}} = e^{\left[\frac{\ln\left(381\,626 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) \cdot \ln\left(496\,114 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 1,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(267\,138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{232,432 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, ter}} = e^{\left[\ln\left(381\,626 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(496\,114 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 1,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(267\,138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{626,585 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, ter}} = e^{\left[\ln\left(0,5 \frac{\text{g}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(1,5 \frac{\text{g}}{\text{U}}\right) - \ln\left(0,5 \frac{\text{g}}{\text{U}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{0,866 \frac{\text{g}}{\text{U}}}$$

$$E_{\text{ter, aire}} = 381\,626 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 0,866 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,1 = \mathbf{33,050 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros clínicos en el agua, análogamente: $E_{\text{ter, agua}} = \mathbf{99,149 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de termómetros clínicos en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{ter, residuos}} = \mathbf{198,299 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros clínicos total: $E_{\text{ter}} = 330,498 \text{ kg Hg}$

$$L_{\text{INF, ter}} = e^{\left[\ln\left(381\,626 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 0,866 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \frac{\ln\left(496\,114 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 1,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(267\,138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = 201,292 \text{ kg Hg}$$

$$L_{\text{SUP, ter}} = e^{\left[\ln\left(381\,626 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 0,866 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(496\,114 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 1,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(267\,138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = 542,639 \text{ kg Hg}$$

| | | | | | | | |
|--------------------------------|--|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Nombre de la fuente | Termómetros laboratorio | | | | | | |
| Descripción | Uso de termómetros de laboratorio con mercurio. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de termómetros de laboratorio existentes en las universidades públicas y privadas que imparten carreras en las que se requieren estos instrumentos, y factor de emisión de masa de mercurio en cada termómetro de laboratorio. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> Actividad <p>La cantidad de termómetros de laboratorio existentes en las universidades se consultó a cada universidad de interés, obteniendo una respuesta de todas las universidades públicas y de tres de las ocho universidades privadas consultadas.</p> <p>MAP: 2 730 U año⁻¹ MIN: 1 911 U año⁻¹ MAX: 3 549 U año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> Factores de emisión <table> <tr> <td>MAP (N1): 12 g U⁻¹</td> <td>MAP (N2): 3,162 g U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 3 g U⁻¹</td> <td>MIN (N2): 2 g U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 21 g U⁻¹</td> <td>MAX (N2): 5 g U⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> Factores de distribución <p>Aire: 10 %, Agua: 30 %, Residuos: 60 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 % y se redondeó al número entero más cercano.</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 12 g U ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g U ⁻¹ | MIN (N1): 3 g U ⁻¹ | MIN (N2): 2 g U ⁻¹ | MAX (N1): 21 g U ⁻¹ | MAX (N2): 5 g U ⁻¹ |
| MAP (N1): 12 g U ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g U ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 3 g U ⁻¹ | MIN (N2): 2 g U ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 21 g U ⁻¹ | MAX (N2): 5 g U ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{ter L, aire}} = 2\,730 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 12 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,1 = \mathbf{3,276 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros de laboratorio en el agua, análogamente:

$$E_{\text{ter L, agua}} = \mathbf{9,828 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros de laboratorio en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{ter L, residuos}} = \mathbf{19,656 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros de laboratorio total: $E_{\text{ter L}} = \mathbf{32,760 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, ter L}} = e^{\left[\ln \left(2\,730 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 12 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \right) - \frac{\ln \left(3\,549 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 21 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \right) - \ln \left(1\,911 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 3 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{15,623 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, ter L}} = e^{\left[\ln \left(2\,730 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 12 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \right) + \frac{\ln \left(3\,549 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 21 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \right) - \ln \left(1\,911 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 3 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{68,693 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, ter L}} = e^{\left[\ln \left(2 \frac{\text{g}}{\text{U}} \right) + \frac{\ln \left(5 \frac{\text{g}}{\text{U}} \right) - \ln \left(2 \frac{\text{g}}{\text{U}} \right)}{2} \right]} = \mathbf{3,162 \frac{\text{g}}{\text{U}}}$$

$$E_{\text{ter L, aire}} = 2\,730 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,1 = \mathbf{0,863 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros de laboratorio en el agua, análogamente:

$$E_{\text{ter L, agua}} = \mathbf{2,590 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de termómetros de laboratorio en los residuos, análogamente:

$E_{\text{ter L, residuos}} = \mathbf{5,180 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de termómetros de laboratorio total: $E_{\text{ter L}} = \mathbf{8,633 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, ter L}} = e^{\left[\ln\left(2\,730 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \frac{\ln\left(3\,549 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(1\,911 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{5,542 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, ter L}} = e^{\left[\ln\left(2\,730 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(3\,549 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(1\,911 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{13,448 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Switches/relays | | | | | | |
| Descripción | Uso de switches y relays eléctricos con mercurio. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de costarricenses en el año 2014, y factor de emisión de masa de mercurio asociado al uso de switches y relays eléctricos por habitante. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La población nacional para el 2014 fue tomada de (INEC, 2011a), que se tomó como el valor MAP.</p> <p>MAP: 4 773 130 hab año⁻¹ MIN: 4 713 169 hab año⁻¹ MAX: 4 832 234 hab año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 0,135 g hab⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 0,071 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,02 g hab⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,02 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,25 g hab⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,25 g hab⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 10 %, Suelo: 10 %, Residuos: 80 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Los valores MIN y MAX de actividad fueron tomados como la población nacional para el 2013 y 2015, respectivamente, según (INEC, 2011a).</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Se consideró el porcentaje de electrificación a nivel nacional del año 2014 como 99,3 % según (Instituto Costarricense de Electricidad, 2015).</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 0,135 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,071 g hab ⁻¹ | MIN (N1): 0,02 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,02 g hab ⁻¹ | MAX (N1): 0,25 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,25 g hab ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,135 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,071 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,02 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,02 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 0,25 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,25 g hab ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{SyR, aire}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,135 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,1 \cdot 0,993 = \mathbf{63,986 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de switches y relays eléctricos con mercurio en el suelo, análogamente:

$$E_{\text{SyR, suelo}} = \mathbf{63,986 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de switches y relays eléctricos con mercurio en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{SyR, residuos}} = \mathbf{511,890 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de switches y relays eléctricos con mercurio total, $E_{\text{SyR}} = \mathbf{639,862 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, SyR}} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,135 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) \cdot \ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,25 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,02 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{306,413 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, SyR}} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,135 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,25 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,02 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{1\,336,179 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, SyR}} = e^{\left[\ln\left(0,02 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(0,25 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(0,02 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{0,071 \frac{\text{g}}{\text{hab}}}$$

$$E_{\text{SyR, aire}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,071 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,1 = \mathbf{33,515 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de switches y relays eléctricos con mercurio en el suelo, análogamente:

$$E_{\text{SyR, suelo}} = \mathbf{33,515 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de switches y relays eléctricos con mercurio en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{SyR, residuos}} = \mathbf{268,119 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de switches y relays eléctricos con mercurio total, $E_{\text{SyR}} = \mathbf{335,149 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, SyR}} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,071 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,02 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{160,494 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, SyR}} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,071 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,25 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,02 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{699,868 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|---------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Nombre de la fuente | Fluorescentes | | | | | | |
| Descripción | Uso de lámparas y bombillas fluorescentes. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de lámparas y bombillas fluorescentes importadas, cantidad de lámparas y bombillas fluorescentes recicladas durante el año de estudio; y factor de emisión de masa de mercurio en cada lámpara y bombilla fluorescente. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La cantidad de lámparas y bombillas fluorescentes importadas se obtuvieron de la DGA del Ministerio de Hacienda, en tanto que la cantidad de lámparas y bombillas fluorescentes recicladas se obtuvo de la consulta directa a 6 de los gestores de este tipo de aparatos en el país.</p> <p>MAP: 4 440 962 U año⁻¹ MIN: 3 108 673 U año⁻¹ MAX: 5 773 251 U año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 25 mg U⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 14,142 mg U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 10 mg U⁻¹</td> <td>MIN (N2): 5 mg U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 40 mg U⁻¹</td> <td>MAX (N2): 40 mg U⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 5 %, Residuos: 95 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 % y se redondeó al número entero más cercano.</p> <p>Masa de cada fluorescente: 100 g.</p> <p>No hubo distinción entre tipos de fluorescentes tanto en la importación como en el reciclaje, de manera que se asumió que todos pesaban lo mismo y tenían la misma concentración de mercurio para hacer el cálculo.</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> | MAP (N1): 25 mg U ⁻¹ | MAP (N2): 14,142 mg U ⁻¹ | MIN (N1): 10 mg U ⁻¹ | MIN (N2): 5 mg U ⁻¹ | MAX (N1): 40 mg U ⁻¹ | MAX (N2): 40 mg U ⁻¹ |
| MAP (N1): 25 mg U ⁻¹ | MAP (N2): 14,142 mg U ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 10 mg U ⁻¹ | MIN (N2): 5 mg U ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 40 mg U ⁻¹ | MAX (N2): 40 mg U ⁻¹ | | | | | | |

| | |
|--|--|
| | <p>Para el inventario N2 se tomó el factor MIN como el valor mínimo del rango para lámparas compactas, y el factor MAX como el máximo del rango para lámparas de extremo doble.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> |
|--|--|

Para el inventario N1

$$E_{\text{flu, aire}} = 4\,440\,962 \frac{U}{\text{año}} \cdot 25 \frac{\text{mg Hg}}{U} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) \cdot 0,05 = 5,551 \text{ kg Hg}$$

Emisión de uso de lámparas y bombillas fluorescentes en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{flu, residuos}} = 105,473 \text{ kg Hg}$$

Emisión de uso de lámparas y bombillas fluorescentes en total: $E_{\text{flu}} = 111,024 \text{ kg Hg}$

$$L_{\text{INF, flu}} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,440\,962 \frac{U}{\text{año}} \cdot 25 \frac{\text{mg Hg}}{U}\right) \cdot \ln\left(5\,773\,251 \frac{U}{\text{año}} \cdot 40 \frac{\text{mg Hg}}{U}\right) - \ln\left(3\,108\,673 \frac{U}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{mg Hg}}{U}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = 62,231 \text{ kg Hg}$$

$$L_{\text{SUP, flu}} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,440\,962 \frac{U}{\text{año}} \cdot 25 \frac{\text{mg Hg}}{U}\right) + \ln\left(5\,773\,251 \frac{U}{\text{año}} \cdot 40 \frac{\text{mg Hg}}{U}\right) - \ln\left(3\,108\,673 \frac{U}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{mg Hg}}{U}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = 198,073 \text{ kg Hg}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, flu}} = e^{\left[\ln\left(5 \frac{\text{mg}}{U}\right) + \frac{\ln\left(40 \frac{\text{mg}}{U}\right) - \ln\left(5 \frac{\text{mg}}{U}\right)}{2} \right]} = 14,142 \frac{\text{mg}}{U}$$

$$E_{\text{flu, aire}} = 4\,440\,962 \frac{U}{\text{año}} \cdot 14,142 \frac{\text{mg Hg}}{U} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) \cdot 0,05 = 3,140 \text{ kg Hg}$$

Emisión de uso de lámparas y bombillas fluorescentes en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{flu, residuos}} = \mathbf{59,664 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de lámparas y bombillas fluorescentes en total: $E_{\text{flu}} = \mathbf{62,805 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, flu}} = e^{\left[\ln\left(4\,440\,962 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 14,142 \frac{\text{mg Hg}}{\text{U}}\right) - \frac{\ln\left(5\,773\,251 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 40 \frac{\text{mg Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(3\,108\,673 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{28,819 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, flu}} = e^{\left[\ln\left(4\,440\,962 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 14,142 \frac{\text{mg Hg}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(5\,773\,251 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 40 \frac{\text{mg Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(3\,108\,673 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{136,868 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|--|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Pilas | | | | | | |
| Descripción | Uso de pilas con mercurio. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de pilas importadas, cantidad de pilas recicladas durante el año de estudio; y factor de emisión de masa de mercurio en cada pila. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La cantidad de pilas importadas se obtuvieron de la DGA del Ministerio de Hacienda, en tanto que la cantidad de pilas recicladas se obtuvo de la consulta directa a 6 de los gestores de este tipo de aparatos en el país.</p> <p>MAP: 33 076,59 kg año⁻¹ MIN: 23 153,61 kg año⁻¹ MAX: 42 999,57 kg año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 7 g kg⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 5,313 g kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 3,5 g kg⁻¹</td> <td>MIN (N2): 2,656 g kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 10,5 g kg⁻¹</td> <td>MAX (N2): 7,969 g kg⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Residuos: 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 %.</p> <p>No hubo distinción entre tipos de pilas tanto en la importación como en el reciclaje, de manera que se asumió para el inventario N1 una concentración de mercurio promedio entre las celdas de botón de zinc-aire (12 kg t⁻¹), las celdas alcalinas de botón (5 kg t⁻¹) y las celdas de botón de óxido de plata (4 kg t⁻¹) para obtener el factor MAP.</p> <p>Al no haber distinción entre tipos de pilas tanto en la importación como en el reciclaje, se asumió para el inventario N2 una concentración de mercurio promedio entre las celdas de botón de zinc-aire (12 kg t⁻¹), las celdas alcalinas de botón (5 kg t⁻¹), las celdas de botón de óxido de plata (4 kg t⁻¹) y las alcalinas, de formas distintas a las de celda de botón (0,25 kg t⁻¹) para obtener el factor MAP.</p> | MAP (N1): 7 g kg ⁻¹ | MAP (N2): 5,313 g kg ⁻¹ | MIN (N1): 3,5 g kg ⁻¹ | MIN (N2): 2,656 g kg ⁻¹ | MAX (N1): 10,5 g kg ⁻¹ | MAX (N2): 7,969 g kg ⁻¹ |
| MAP (N1): 7 g kg ⁻¹ | MAP (N2): 5,313 g kg ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 3,5 g kg ⁻¹ | MIN (N2): 2,656 g kg ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 10,5 g kg ⁻¹ | MAX (N2): 7,969 g kg ⁻¹ | | | | | | |

| |
|---|
| Los factores MIN y MAX para el inventario N1 y para el inventario N2 fueron tomados como $\pm 50\%$ del factor MAP. |
|---|

Para el inventario N1

$$E_{pil} = 33\,076,59 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 7 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{231,536 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{INF, pil} = e^{\left[\frac{\ln\left(33\,076,59 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 7 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(42\,999,57 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 10,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(23\,153,61 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 3,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{141,019 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, pil} = e^{\left[\frac{\ln\left(33\,076,59 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 7 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) + \ln\left(42\,999,57 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 10,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(23\,153,61 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 3,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{380,155 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$E_{pil} = 33\,076,59 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 5,313 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{175,719 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{INF, pil} = e^{\left[\frac{\ln\left(33\,076,59 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 5,313 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(42\,999,57 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 7,969 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(23\,153,61 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 2,656 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{107,023 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, pil} = e^{\left[\frac{\ln\left(33\,076,59 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 5,313 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) + \ln\left(42\,999,57 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 7,969 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right) - \ln\left(23\,153,61 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot 2,656 \frac{\text{g Hg}}{\text{kg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{288,511 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Productos con poliuretano | | | | | | |
| Descripción | Uso de productos con poliuretano. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de costarricenses en el año 2014, y factor de emisión de masa de mercurio asociado al uso de productos con poliuretano por habitante. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La población nacional para el 2014 fue tomada de (INEC, 2011a), que se tomó como el valor MAP.</p> <p>MAP: 4 773 130 hab año⁻¹ MIN: 4 713 169 hab año⁻¹ MAX: 4 832 234 hab año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 0,03 g hab⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 0,022 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,01 g hab⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,01 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,05 g hab⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,05 g hab⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 10 %, Agua: 5 %, Residuos: 85 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Los valores MIN y MAX de actividad fueron tomados como la población nacional para el 2013 y 2015, respectivamente, según (INEC, 2011a).</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Se consideró el porcentaje de electrificación a nivel nacional del año 2014 como 99,3 % según (Instituto Costarricense de Electricidad, 2015).</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 0,03 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,022 g hab ⁻¹ | MIN (N1): 0,01 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,01 g hab ⁻¹ | MAX (N1): 0,05 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,05 g hab ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,03 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,022 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,01 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,01 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 0,05 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,05 g hab ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{poli, aire}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,03 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,1 = \mathbf{14,219 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de productos de poliuretano en el agua, análogamente: $E_{\text{poli, agua}} = \mathbf{7,110 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de poliuretano en los residuos, análogamente: $E_{\text{poli, residuos}} = \mathbf{120,863 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de poliuretano total: $E_{\text{poli}} = \mathbf{142,192 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, poli}} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,03 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{88,710 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, poli}} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,03 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{227,917 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, poli}} = e^{\left[\ln\left(0,01 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(0,05 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(0,01 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{0,022 \frac{\text{g}}{\text{hab}}}$$

$$E_{\text{poli, aire}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,022 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,1 = \mathbf{10,598 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de productos de poliuretano en el agua, análogamente: $E_{\text{poli, agua}} = \mathbf{5,299 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de poliuretano en los residuos, análogamente: $E_{\text{poli, residuos}} = \mathbf{90,086 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de poliuretano total: $E_{\text{poli}} = \mathbf{105,983 \text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, poli} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,022 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{66,120 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, poli} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,022 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{169,879 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Nombre de la fuente | Amalgamas | | | | | | | | | | | | |
| Descripción | Uso de amalgamas dentales con mercurio. | | | | | | | | | | | | |
| Metodología | <p>Para el inventario N1 se utilizó la cantidad de costarricenses en el año 2014, y factor de emisión de masa de mercurio asociado al uso de amalgamas dentales por habitante.</p> <p>Para el inventario N2 se consideró la cantidad de amalgamas importadas, la cantidad de amalgamas despachadas a las diferentes áreas de salud y las amalgamas existentes en el almacén central de la CCSS; y factor de emisión de masa de mercurio en cada amalgama dental.</p> | | | | | | | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> Actividad <p>Para el caso del inventario N1 la población nacional para el 2014 fue tomada de (INEC, 2011a), que se tomó como el valor MAP.</p> <p>Para el caso del inventario N2 la cantidad de amalgamas importadas se obtuvieron de la DGA del Ministerio de Hacienda, en tanto que la cantidad de amalgamas despachadas y almacenadas en el almacén central de la CCSS se obtuvo de (González, 2016a).</p> <table> <tr> <td>MAP (N1): 4 773 130 hab año⁻¹</td> <td>MAP (N2): 2 897 000 U año⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 4 713 169 hab año⁻¹</td> <td>MIN (N2): 2 027 900 U año⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 4 832 234 hab año⁻¹</td> <td>MAX (N2): 3 766 100 U año⁻¹</td> </tr> </table> Factores de emisión <table> <tr> <td>MAP (N1): 0,2 g hab⁻¹</td> <td>MAP (N2): 383,406 mg U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,05 g hab⁻¹</td> <td>MIN (N2): 350 mg U⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,2 g hab⁻¹</td> <td>MAX (N2): 420 mg U⁻¹</td> </tr> </table> Factores de distribución <p>Inventario N1: Aire: 2 %, Agua: 33,2 %, Suelo: 4,8 %, Productos: 3,6 %, Residuos: 33,6 %. El restante 22,8 % no se contabiliza en ninguna matriz.</p> <p>Inventario N2: Agua: 30 %, Suelo: 8 %, Productos: 6 %, Residuos: 16 %. El restante 40 % no se contabiliza en ninguna matriz.</p> Supuestos <p>Los valores MIN y MAX de actividad fueron tomados como la población nacional para el 2013 y 2015, respectivamente, según (INEC, 2011a).</p> | MAP (N1): 4 773 130 hab año ⁻¹ | MAP (N2): 2 897 000 U año ⁻¹ | MIN (N1): 4 713 169 hab año ⁻¹ | MIN (N2): 2 027 900 U año ⁻¹ | MAX (N1): 4 832 234 hab año ⁻¹ | MAX (N2): 3 766 100 U año ⁻¹ | MAP (N1): 0,2 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 383,406 mg U ⁻¹ | MIN (N1): 0,05 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 350 mg U ⁻¹ | MAX (N1): 0,2 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 420 mg U ⁻¹ |
| MAP (N1): 4 773 130 hab año ⁻¹ | MAP (N2): 2 897 000 U año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MIN (N1): 4 713 169 hab año ⁻¹ | MIN (N2): 2 027 900 U año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MAX (N1): 4 832 234 hab año ⁻¹ | MAX (N2): 3 766 100 U año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MAP (N1): 0,2 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 383,406 mg U ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MIN (N1): 0,05 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 350 mg U ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MAX (N1): 0,2 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 420 mg U ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |

| | |
|--|--|
| | <p>Masa de cada cápsula de amalgama: 1 g.</p> <p>Factor de odontólogos en el país por cada 1000 habitantes, para el año 2014 en Costa Rica: 1,006 05</p> <p>Factor de odontólogos en el país por cada 1000 habitantes, sugerido por (UNEP, 2015): 0,829 19</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se tomó como igual al factor MAX sugerido.</p> <p>Para el inventario N2, el porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 % y se redondeó al número entero más cercano.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> |
|--|--|

Para el inventario N1

$$E_{\text{amal, aire}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,2 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot \frac{1,00605 \left(\frac{\text{odon}}{10^3 \text{ hab}} \right)}{0,82919 \left(\frac{\text{odon}}{10^3 \text{ hab}} \right)} \cdot 0,02 = \mathbf{23,165 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio en el agua, análogamente: $E_{\text{amal, agua}} = \mathbf{384,535 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio en el suelo, análogamente: $E_{\text{amal, suelo}} = \mathbf{55,595 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio en los productos, análogamente:
 $E_{\text{amal, productos}} = \mathbf{41,697 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio en los residuos, análogamente:
 $E_{\text{amal, residuos}} = \mathbf{389,168 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio total: $E_{\text{amal}} = \mathbf{894,159 \text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, amal} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,2 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,2 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot \frac{1,00605}{0,82919} \left(\frac{\text{odon}/10^3 \text{ hab}}{\text{odon}/10^3 \text{ hab}} \right) \cdot 0,772 = \mathbf{594,960 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, amal} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,2 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,2 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,05 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot \frac{1,00605}{0,82919} \left(\frac{\text{odon}/10^3 \text{ hab}}{\text{odon}/10^3 \text{ hab}} \right) \cdot 0,772 = \mathbf{1\,343,824 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{MAP, amal} = e^{\left[\ln\left(350 \frac{\text{mg}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(420 \frac{\text{mg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(350 \frac{\text{mg}}{\text{U}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{383,406 \frac{\text{mg}}{\text{U}}}$$

$$E_{amal, agua} = 2\,897\,000 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 383,406 \frac{\text{mg Hg}}{\text{U}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) \cdot 0,3 = \mathbf{333,218 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio en el suelo, análogamente: $E_{amal, suelo} = \mathbf{88,858 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio en los productos, análogamente:

$$E_{amal, productos} = \mathbf{66,644 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio en los residuos, análogamente:

$$E_{amal, residuos} = \mathbf{177,716 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de amalgamas de mercurio total: $E_{amal} = \mathbf{666,436 \text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, amal} = e^{\left[\ln\left(2\,897\,000 \frac{U}{año} \cdot 383,406 \frac{mg\ Hg}{U}\right) - \frac{\ln\left(3\,766\,100 \frac{U}{año} \cdot 420 \frac{mg\ Hg}{U}\right) - \ln\left(2\,027\,900 \frac{U}{año} \cdot 350 \frac{mg\ Hg}{U}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^6\ mg\ Hg} \right) \cdot 0,6 = \mathbf{528,800\ kg\ Hg}$$

$$L_{SUP, amal} = e^{\left[\ln\left(2\,897\,000 \frac{U}{año} \cdot 383,406 \frac{mg\ Hg}{U}\right) + \frac{\ln\left(3\,766\,100 \frac{U}{año} \cdot 420 \frac{mg\ Hg}{U}\right) - \ln\left(2\,027\,900 \frac{U}{año} \cdot 350 \frac{mg\ Hg}{U}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^6\ mg\ Hg} \right) \cdot 0,6 = \mathbf{839,895\ kg\ Hg}$$

Emisión de uso de esfigmomanómetros en los residuos, análogamente: $E_{\text{esf, residuos}} = 5,088 \text{ kg Hg}$

Emisión de uso de esfigmomanómetros total: $E_{\text{esf}} = 8,480 \text{ kg Hg}$

$$L_{\text{INF, esf}} = e^{\left[\ln\left(106 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 80 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) \cdot \frac{\ln\left(138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 85 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(74 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 70 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = 6,698 \text{ kg Hg}$$

$$L_{\text{SUP, esf}} = e^{\left[\ln\left(106 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 80 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 85 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(74 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 70 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = 10,737 \text{ kg Hg}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, esf}} = e^{\left[\ln\left(70 \frac{\text{g}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(85 \frac{\text{g}}{\text{U}}\right) - \ln\left(70 \frac{\text{g}}{\text{U}}\right)}{2} \right]} = 77,136 \frac{\text{g}}{\text{U}}$$

$$E_{\text{esf, aire}} = 106 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 77,136 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,1 = 0,818 \text{ kg Hg}$$

Emisión de uso de esfigmomanómetros en el agua, análogamente: $E_{\text{esf, agua}} = 2,453 \text{ kg Hg}$

Emisión de uso de esfigmomanómetros en los residuos, análogamente: $E_{\text{esf, residuos}} = 4,906 \text{ kg Hg}$

Emisión de uso de esfigmomanómetros total: $E_{\text{esf}} = 8,176 \text{ kg Hg}$

$$L_{\text{INF, esf}} = e^{\left[\ln\left(106 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 77,136 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \frac{\ln\left(138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 85 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(74 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 70 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{6,458 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, esf}} = e^{\left[\ln\left(106 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 77,136 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) + \frac{\ln\left(138 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 85 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right) - \ln\left(74 \frac{\text{U}}{\text{año}} \cdot 70 \frac{\text{g Hg}}{\text{U}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{10,352 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Manómetros | | | | | | |
| Descripción | Uso de manómetros con mercurio. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de costarricenses en el año 2014, y factor de emisión de masa de mercurio asociado al uso de manómetros por habitante. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La población nacional para el 2014 fue tomada de (INEC, 2011a), que se tomó como el valor MAP.</p> <p>MAP: 4 773 130 hab año⁻¹ MIN: 4 713 169 hab año⁻¹ MAX: 4 832 234 hab año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 0,005 0 g hab⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 0,005 0 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,004 5 g hab⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,004 5 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,005 5 g hab⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,005 5 g hab⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 10 %, Agua: 30 %, Residuos: 60 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Los valores MIN y MAX de actividad fueron tomados como la población nacional para el 2013 y 2015, respectivamente, según (INEC, 2011a).</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Se consideró el porcentaje de electrificación a nivel nacional del año 2014 como 99,3 % según (Instituto Costarricense de Electricidad, 2015).</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 0,005 0 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,005 0 g hab ⁻¹ | MIN (N1): 0,004 5 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,004 5 g hab ⁻¹ | MAX (N1): 0,005 5 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,005 5 g hab ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,005 0 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,005 0 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,004 5 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,004 5 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 0,005 5 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,005 5 g hab ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{man, aire}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,0 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1\text{ kg Hg}}{10^3\text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,1 = \mathbf{2,370\text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de manómetros con mercurio en el agua, análogamente: $E_{\text{man, agua}} = \mathbf{7,110\text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de manómetros con mercurio en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{man, residuos}} = \mathbf{14,219\text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de manómetros con mercurio total, $E_{\text{man}} = \mathbf{23,699\text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, man}} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,0 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) \cdot \ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,004\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1\text{ kg Hg}}{10^3\text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{22,204\text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, man}} = e^{\left[\frac{\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,0 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,004\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1\text{ kg Hg}}{10^3\text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{25,293\text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, man}} = e^{\left[\ln\left(0,004\,5 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(0,005\,5 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(0,004\,5 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{0,005\,0 \frac{\text{g}}{\text{hab}}}$$

$$E_{\text{man, aire}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,0 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1\text{ kg Hg}}{10^3\text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,1 = \mathbf{2,358\text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de manómetros con mercurio en el agua, análogamente: $E_{\text{man, agua}} = \mathbf{7,074\text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de manómetros con mercurio en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{man, residuos}} = \mathbf{14,148\text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de manómetros con mercurio total, $E_{\text{man}} = \mathbf{23,580\text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, man} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,0 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,004\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{22,093 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, man} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,0 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,004\,5 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{25,167 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Químicos de laboratorio | | | | | | | | | | | | |
| Descripción | Uso de químicos de laboratorio con mercurio. | | | | | | | | | | | | |
| Metodología | <p>Para el inventario N1 se utilizó la cantidad de costarricenses en el año 2014, y factor de emisión de masa de mercurio asociado al uso de químicos de laboratorio por habitante.</p> <p>Para el inventario N2 se consideró la cantidad de químicos de laboratorio importados, la cantidad de químicos de laboratorio obtenidos mediante consulta a las universidades públicas y privadas que imparten carreras en las que se requieren estos reactivos; y factor de emisión de mercurio total en los reactivos reportados.</p> | | | | | | | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> Actividad <p>Para el caso del inventario N1 la población nacional para el 2014 fue tomada de (INEC, 2011a), que se tomó como el valor MAP.</p> <p>Para el caso del inventario N2 la cantidad de químicos de laboratorio importados se obtuvieron de la DGA del Ministerio de Hacienda, en tanto que la cantidad de químicos de laboratorio utilizados en las universidades fueron reportados por las mismas: todas las públicas y solamente tres de las ocho privadas que se consultó reportaron sus químicos de laboratorio con mercurio.</p> <table> <tr> <td>MAP (N1): 4 773 130 hab año⁻¹</td> <td>MAP (N2): 214,01 kg año⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 4 713 169 hab año⁻¹</td> <td>MIN (N2): 149,81 kg año⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 4 832 234 hab año⁻¹</td> <td>MAX (N2): 278,21 kg año⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> Factores de emisión <table> <tr> <td>MAP (N1): 0,01 g hab⁻¹</td> <td>MAP (N2): 1 kg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,005 g hab⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,95 kg kg⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,015 g hab⁻¹</td> <td>MAX (N2): 1,05 kg kg⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> Factores de distribución <p>Agua: 33 %, Residuos: 67 %.</p> <ul style="list-style-type: none"> Supuestos <p>Los valores MIN y MAX de actividad fueron tomados como la población nacional para el 2013 y 2015, respectivamente, según (INEC, 2011a).</p> | MAP (N1): 4 773 130 hab año ⁻¹ | MAP (N2): 214,01 kg año ⁻¹ | MIN (N1): 4 713 169 hab año ⁻¹ | MIN (N2): 149,81 kg año ⁻¹ | MAX (N1): 4 832 234 hab año ⁻¹ | MAX (N2): 278,21 kg año ⁻¹ | MAP (N1): 0,01 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 1 kg kg ⁻¹ | MIN (N1): 0,005 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,95 kg kg ⁻¹ | MAX (N1): 0,015 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 1,05 kg kg ⁻¹ |
| MAP (N1): 4 773 130 hab año ⁻¹ | MAP (N2): 214,01 kg año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MIN (N1): 4 713 169 hab año ⁻¹ | MIN (N2): 149,81 kg año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MAX (N1): 4 832 234 hab año ⁻¹ | MAX (N2): 278,21 kg año ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MAP (N1): 0,01 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 1 kg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MIN (N1): 0,005 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,95 kg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |
| MAX (N1): 0,015 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 1,05 kg kg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | |

| | |
|--|--|
| | <p>Se consideró el porcentaje de electrificación a nivel nacional del año 2014 como 99,3 % según (Instituto Costarricense de Electricidad, 2015).</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Para el inventario N2, el porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 %.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se tomó como 1, puesto que los reportes de la cantidad de reactivos fueron dados en cantidad de mercurio equivalente.</p> <p>Para el inventario N2, los factores MIN y MAX se tomaron como un $\pm 5\%$ del factor MAP, pero únicamente para el cálculo de la incertidumbre de la actividad.</p> |
|--|--|

Para el inventario N1

$$E_{\text{comp L, agua}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,33 = \mathbf{15,641 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de compuestos químicos de laboratorio con mercurio en los residuos, análogamente: $E_{\text{comp L, residuos}} = \mathbf{31,756 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de compuestos químicos de laboratorio con mercurio total: $E_{\text{comp L}} = \mathbf{47,397 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, comp L}} = e^{\left[\ln \left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \right) - \frac{\ln \left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,015 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \right) - \ln \left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{34,268 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, comp L}} = e^{\left[\ln \left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,01 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \right) + \frac{\ln \left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,015 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \right) - \ln \left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,005 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{65,556 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$E_{\text{comp L, agua}} = 214,01 \frac{\text{kg Hg}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg Hg}} \cdot 0,33 = \mathbf{70,623 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de compuestos químicos de laboratorio con mercurio en los residuos, análogamente: $E_{\text{comp L, residuos}} = \mathbf{143,385 \text{ kg Hg}}$

Emisión de uso de compuestos químicos de laboratorio con mercurio total:
 $E_{\text{comp L}} = \mathbf{214,008 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, comp L}} = e^{\left[\ln\left(214,01 \frac{\text{kg Hg}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg Hg}}\right) \frac{\ln\left(149,81 \frac{\text{kg Hg}}{\text{año}} \cdot 1,05 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg Hg}}\right) - \ln\left(278,21 \frac{\text{kg Hg}}{\text{año}} \cdot 0,95 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg Hg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} = \mathbf{173,890 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, comp L}} = e^{\left[\ln\left(214,01 \frac{\text{kg Hg}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg Hg}}\right) + \frac{\ln\left(149,81 \frac{\text{kg Hg}}{\text{año}} \cdot 1,05 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg Hg}}\right) - \ln\left(278,21 \frac{\text{kg Hg}}{\text{año}} \cdot 0,95 \frac{\text{kg Hg}}{\text{kg Hg}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} = \mathbf{263,382 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Otros equipos de laboratorio | | | | | | |
| Descripción | Uso de otros equipos de laboratorio con mercurio. | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de costarricenses en el año 2014, y factor de emisión de masa de mercurio asociado al uso de otros equipos de laboratorio con mercurio por habitante. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>La población nacional para el 2014 fue tomada de (INEC, 2011a), que se tomó como el valor MAP.</p> <p>MAP: 4 773 130 hab año⁻¹ MIN: 4 713 169 hab año⁻¹ MAX: 4 832 234 hab año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 0,04 g hab⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 0,034 6 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,02 g hab⁻¹</td> <td>MIN (N2): 0,02 g hab⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 0,06 g hab⁻¹</td> <td>MAX (N2): 0,06 g hab⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Agua: 33 %, Residuos: 67 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Los valores MIN y MAX de actividad fueron tomados como la población nacional para el 2013 y 2015, respectivamente, según (INEC, 2011a).</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Se consideró el porcentaje de electrificación a nivel nacional del año 2014 como 99,3 % según (Instituto Costarricense de Electricidad, 2015).</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 0,04 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,034 6 g hab ⁻¹ | MIN (N1): 0,02 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,02 g hab ⁻¹ | MAX (N1): 0,06 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,06 g hab ⁻¹ |
| MAP (N1): 0,04 g hab ⁻¹ | MAP (N2): 0,034 6 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,02 g hab ⁻¹ | MIN (N2): 0,02 g hab ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 0,06 g hab ⁻¹ | MAX (N2): 0,06 g hab ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{\text{ot eq L, agua}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,04 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,33 = \mathbf{62,564 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de otros equipos de laboratorio con mercurio en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{ot eq L, residuos}} = \mathbf{127,024 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de otros equipos de laboratorio con mercurio total, $E_{\text{ot eq L}} = \mathbf{189,589 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, ot eq L}} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,04 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,06 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,02 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{137,073 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, ot eq L}} = e^{\left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,04 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,06 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,02 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{262,225 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, ot eq L}} = e^{\left[\ln\left(0,02 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) + \frac{\ln\left(0,06 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right) - \ln\left(0,02 \frac{\text{g}}{\text{hab}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{0,034\,6 \frac{\text{g}}{\text{hab}}}$$

$$E_{\text{ot eq L, agua}} = 4\,773\,130 \frac{\text{hab}}{\text{año}} \cdot 0,034\,6 \frac{\text{g Hg}}{\text{hab}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,993 \cdot 0,33 = \mathbf{54,182 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de otros equipos de laboratorio con mercurio en los residuos, análogamente:

$$E_{\text{ot eq L, residuos}} = \mathbf{110,006 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de uso de otros equipos de laboratorio con mercurio total, $E_{\text{ot eq L}} = \mathbf{164,189 \text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, ot eq L} = e^L \left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{hab}{año} \cdot 0,034 \frac{g\ Hg}{hab}\right) - \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{hab}{año} \cdot 0,06 \frac{g\ Hg}{hab}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{hab}{año} \cdot 0,02 \frac{g\ Hg}{hab}\right)}{\sqrt{12}} \right]$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{118,709\ kg\ Hg}$$

$$L_{SUP, ot eq L} = e^L \left[\ln\left(4\,773\,130 \frac{hab}{año} \cdot 0,034 \frac{g\ Hg}{hab}\right) + \frac{\ln\left(4\,832\,234 \frac{hab}{año} \cdot 0,06 \frac{g\ Hg}{hab}\right) - \ln\left(4\,713\,169 \frac{hab}{año} \cdot 0,02 \frac{g\ Hg}{hab}\right)}{\sqrt{12}} \right]$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) \cdot 0,993 = \mathbf{227,093\ kg\ Hg}$$

| | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Nombre de la fuente | Rellenos sanitarios | | | | | | |
| Descripción | Emisión de mercurio asociada a la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios. | | | | | | |
| Metodología | Masa de residuos sólidos depositada en los rellenos sanitarios, y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de residuos sólidos depositados en rellenos sanitarios. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>Las toneladas de residuos sólidos que fueron depositadas en los rellenos sanitarios se obtuvieron de un informe de auditoría escrito por la Contraloría General de la República (CGR) en el 2016 sobre la gestión de las Municipalidades para garantizar la prestación eficaz y eficiente del servicio de recolección de residuos ordinarios, desarrollado con datos de todas las Municipalidades del país en el año 2014.</p> <p>MAP: 949 400 t año⁻¹ MIN: 854 460 t año⁻¹ MAX: 1 044 340 t año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 5 g t⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 3,162 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 1 g t⁻¹</td> <td>MIN (N2): 1 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 10 g t⁻¹</td> <td>MAX (N2): 10 g t⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 1 %, Agua: 0,01 %. El restante 98,99 % no se contabiliza en ninguna matriz.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 10 %.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 5 g t ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g t ⁻¹ | MIN (N1): 1 g t ⁻¹ | MIN (N2): 1 g t ⁻¹ | MAX (N1): 10 g t ⁻¹ | MAX (N2): 10 g t ⁻¹ |
| MAP (N1): 5 g t ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 1 g t ⁻¹ | MIN (N2): 1 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 10 g t ⁻¹ | MAX (N2): 10 g t ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{r \text{ rell, aire}} = 949\,400 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,01 = \mathbf{47,470 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios en el agua, análogamente:

$$E_{r \text{ rell, agua}} = \mathbf{0,475 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios total, $E_{r \text{ rell}} = \mathbf{47,945 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, r rell}} = e^{\left[\ln\left(949\,400 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) \cdot \frac{\ln\left(1\,044\,340 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(854\,460 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,0101 = \mathbf{23,276 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, r rell}} = e^{\left[\ln\left(949\,400 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 5 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) + \frac{\ln\left(1\,044\,340 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right) - \ln\left(854\,460 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,0101 = \mathbf{98,758 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP, r rell}} = e^{\left[\ln\left(1 \frac{\text{g}}{\text{t}}\right) + \frac{\ln\left(10 \frac{\text{g}}{\text{t}}\right) - \ln\left(1 \frac{\text{g}}{\text{t}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{3,162 \frac{\text{g}}{\text{t}}}$$

$$E_{r \text{ rell, aire}} = 949\,400 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{\text{t}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,01 = \mathbf{30,023 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios en el agua, análogamente:

$$E_{r \text{ rell, agua}} = \mathbf{0,300 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios total, $E_{r \text{ rell}} = \mathbf{30,323 \text{ kg Hg}}$

$$L_{INF, r\text{rell}} = e^{\left[\ln\left(949\,400 \frac{t}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \frac{\ln\left(1\,044\,340 \frac{t}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \ln\left(854\,460 \frac{t}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,0101 = \mathbf{14,721 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, r\text{rell}} = e^{\left[\ln\left(949\,400 \frac{t}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) + \frac{\ln\left(1\,044\,340 \frac{t}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \ln\left(854\,460 \frac{t}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) \cdot 0,0101 = \mathbf{62,460 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|--------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Nombre de la fuente | Quema informal de residuos | | | | | | |
| Descripción | Emisión de mercurio asociada a la quema de residuos sólidos. | | | | | | |
| Metodología | Masa de residuos sólidos que se incineró informalmente (se quemó), y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de residuos sólidos incinerados informalmente (quemados). | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>Las toneladas de residuos sólidos que fueron dispuestos alternativamente a los rellenos sanitarios se obtuvieron de un informe de auditoría escrito por la CGR en el 2016 sobre la gestión de las Municipalidades para garantizar la prestación eficaz y eficiente del servicio de recolección de residuos ordinarios, desarrollado con datos de todas las Municipalidades del país en el año 2014.</p> <p>Adicionalmente, la Encuesta Nacional de Hogares (INEC, 2014) se determinó que el 67,83 % de las personas que no disponen sus residuos sólidos en el camión recolector elige quemarla.</p> <p>MAP: 306 146,33 t año⁻¹ MIN: 214 302,43 t año⁻¹ MAX: 397 990,23 t año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 5 g t⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 3,162 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 1 g t⁻¹</td> <td>MIN (N2): 1 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 10 g t⁻¹</td> <td>MAX (N2): 10 g t⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 %.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 5 g t ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g t ⁻¹ | MIN (N1): 1 g t ⁻¹ | MIN (N2): 1 g t ⁻¹ | MAX (N1): 10 g t ⁻¹ | MAX (N2): 10 g t ⁻¹ |
| MAP (N1): 5 g t ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 1 g t ⁻¹ | MIN (N2): 1 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 10 g t ⁻¹ | MAX (N2): 10 g t ⁻¹ | | | | | | |

| | |
|--|--|
| | <p>El informe de auditoría utilizado no presentaba el dato de las toneladas recolectadas para 13 cantones: Buenos Aires, Dota, Guácimo, Guatuso, Hojanca, La Cruz, León Cortés, Liberia, San Ramón, Tarrazú, Tilarán, Turrialba y Zarcero; lo que presentaba un desajuste entre las toneladas dispuestas en rellenos sanitarios a nivel nacional y la suma del reporte cantonal. Se supuso que cada uno de sus habitantes generó la misma cantidad de residuos, para distribuir la diferencia de las toneladas faltantes para que el dato de la suma cantonal coincidiera con el dato reportado para la actividad a nivel nacional, de manera que se pudiese completar el cálculo.</p> |
|--|--|

Para el inventario N1

$$E_{r, inc} = 306\,146,33 \frac{t}{año} \cdot 5 \frac{g\,Hg}{t} \left(\frac{1\,kg\,Hg}{10^3\,g\,Hg} \right) = 1\,530,732\,kg\,Hg$$

$$L_{INF, r, inc} = e^{\left[\frac{\ln\left(306\,146,33 \frac{t}{año} \cdot 5 \frac{g\,Hg}{t}\right) \cdot \ln\left(397\,990,23 \frac{t}{año} \cdot 10 \frac{g\,Hg}{t}\right) - \ln\left(214\,302,43 \frac{t}{año} \cdot 1 \frac{g\,Hg}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\,kg\,Hg}{10^3\,g\,Hg} \right) = 658,590\,kg\,Hg$$

$$L_{SUP, r, inc} = e^{\left[\ln\left(306\,146,33 \frac{t}{año} \cdot 5 \frac{g\,Hg}{t}\right) + \frac{\ln\left(397\,990,23 \frac{t}{año} \cdot 10 \frac{g\,Hg}{t}\right) - \ln\left(214\,302,43 \frac{t}{año} \cdot 1 \frac{g\,Hg}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\,kg\,Hg}{10^3\,g\,Hg} \right) = 3\,557,813\,kg\,Hg$$

Para el inventario N2

$$F_{MAP, r, inc} = e^{\left[\ln\left(1 \frac{g}{t}\right) + \frac{\ln\left(10 \frac{g}{t}\right) - \ln\left(1 \frac{g}{t}\right)}{2} \right]} = 3,162 \frac{g}{t}$$

$$E_{r, inc} = 306\,146,33 \frac{t}{año} \cdot 3,162 \frac{g\,Hg}{t} \left(\frac{1\,kg\,Hg}{10^3\,g\,Hg} \right) = 968,120\,kg\,Hg$$

$$L_{\text{INF}, r \text{ inc}} = e^{\left[\ln\left(306\,146,33 \frac{t}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \frac{\ln\left(397\,990,23 \frac{t}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \ln\left(214\,302,43 \frac{t}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{416,529 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP}, r \text{ inc}} = e^{\left[\ln\left(306\,146,33 \frac{t}{\text{año}} \cdot 3,162 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) + \frac{\ln\left(397\,990,23 \frac{t}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{g Hg}}{t}\right) - \ln\left(214\,302,43 \frac{t}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g Hg}}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{2\,250,159 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|--------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Nombre de la fuente | Disposición informal de residuos | | | | | | |
| Descripción | Emisión de mercurio asociada a la disposición informal de residuos sólidos | | | | | | |
| Metodología | Masa de residuos sólidos que se desechó informalmente (se tiró a ríos o a terrenos baldíos, o se enterró), y factor de emisión de masa de mercurio en cada kilogramo de residuos sólidos desechados informalmente. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>Las toneladas de residuos sólidos que fueron dispuestas alternativamente a los rellenos sanitarios se obtuvieron de un informe de auditoría escrito por la CGR en el 2016 sobre la gestión de las Municipalidades para garantizar la prestación eficaz y eficiente del servicio de recolección de residuos ordinarios, desarrollado con datos de todas las Municipalidades del país en el año 2014.</p> <p>Adicionalmente, la Encuesta Nacional de Hogares (INEC, 2014) se determinó que el 32,17 % de las personas que no disponen sus residuos sólidos en el camión recolector elige quemarla.</p> <p>MAP: 145 223,26 t año⁻¹ MIN: 101 656,28 t año⁻¹ MAX: 188 790,24 t año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 5 g t⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 3,162 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 1 g t⁻¹</td> <td>MIN (N2): 1 g t⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 10 g t⁻¹</td> <td>MAX (N2): 10 g t⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Aire: 10 %, Agua: 10 %, Suelo: 80 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 %.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 5 g t ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g t ⁻¹ | MIN (N1): 1 g t ⁻¹ | MIN (N2): 1 g t ⁻¹ | MAX (N1): 10 g t ⁻¹ | MAX (N2): 10 g t ⁻¹ |
| MAP (N1): 5 g t ⁻¹ | MAP (N2): 3,162 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 1 g t ⁻¹ | MIN (N2): 1 g t ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 10 g t ⁻¹ | MAX (N2): 10 g t ⁻¹ | | | | | | |

| | |
|--|--|
| | <p>El informe de auditoría utilizado no presentaba el dato de las toneladas recolectadas para 13 cantones: Buenos Aires, Dota, Guácimo, Guatuso, Hojanca, La Cruz, León Cortés, Liberia, San Ramón, Tarrazú, Tilarán, Turrialba y Zarcero; lo que presentaba un desajuste entre las toneladas dispuestas en rellenos sanitarios a nivel nacional y la suma del reporte cantonal. Se supuso que cada uno de sus habitantes generó la misma cantidad de residuos, para distribuir la diferencia de las toneladas faltantes para que el dato de la suma cantonal coincidiera con el dato reportado para la actividad a nivel nacional, de manera que se pudiese completar el cálculo.</p> |
|--|--|

Para el inventario N1

$$E_{d.i.r, aire} = 145\,223,26 \frac{t}{año} \cdot 5 \frac{g\ Hg}{t} \left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) \cdot 0,1 = \mathbf{72,612\ kg\ Hg}$$

Emisión de residuos sólidos desechados informalmente en el agua, análogamente:

$$E_{d.i.r, agua} = \mathbf{72,612\ kg\ Hg}$$

Emisión de residuos sólidos desechados informalmente en el suelo, análogamente:

$$E_{d.i.r, suelo} = \mathbf{580,893\ kg\ Hg}$$

Emisión de residuos sólidos desechados informalmente total, $E_{d.i.r} = \mathbf{726,116\ kg\ Hg}$

$$L_{INF, d.i.r} = e^{\left[\ln\left(145\,223,26 \frac{t}{año} \cdot 5 \frac{g\ Hg}{t}\right) - \frac{\ln\left(188\,790,24 \frac{t}{año} \cdot 10 \frac{g\ Hg}{t}\right) - \ln\left(101\,656,28 \frac{t}{año} \cdot 1 \frac{g\ Hg}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) = \mathbf{312,408\ kg\ Hg}$$

$$L_{SUP, d.i.r} = e^{\left[\ln\left(145\,223,26 \frac{t}{año} \cdot 5 \frac{g\ Hg}{t}\right) + \frac{\ln\left(188\,790,24 \frac{t}{año} \cdot 10 \frac{g\ Hg}{t}\right) - \ln\left(101\,656,28 \frac{t}{año} \cdot 1 \frac{g\ Hg}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) = \mathbf{1\ 687,681\ kg\ Hg}$$

Para el inventario N2

$$F_{MAP, d.i. r} = e^{\left[\ln\left(\frac{g}{t}\right) + \frac{\ln\left(\frac{10g}{t}\right) - \ln\left(\frac{1g}{t}\right)}{2} \right]} = 3,162 \frac{g}{t}$$

$$E_{d.i. r, aire} = 145\,223,26 \frac{t}{año} \cdot 3,162 \frac{g\ Hg}{t} \left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) \cdot 0,1 = 45,924\ kg\ Hg$$

Emisión de residuos sólidos desechados informalmente en el agua, análogamente:

$$E_{d.i. r, agua} = 45,924\ kg\ Hg$$

Emisión de residuos sólidos desechados informalmente en el suelo, análogamente:

$$E_{d.i. r, suelo} = 367,389\ kg\ Hg$$

Emisión de residuos sólidos desechados informalmente total, $E_{d.i. r} = 459,236\ kg\ Hg$

$$L_{INF, d.i. r} = e^{\left[\ln\left(145\,223,26 \frac{t}{año} \cdot 3,162 \frac{g\ Hg}{t}\right) \frac{\ln\left(188\,790,24 \frac{t}{año} \cdot 10 \frac{g\ Hg}{t}\right) - \ln\left(101\,656,28 \frac{t}{año} \cdot 1 \frac{g\ Hg}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) = 197,584\ kg\ Hg$$

$$L_{SUP, d.i. r} = e^{\left[\ln\left(145\,223,26 \frac{t}{año} \cdot 3,162 \frac{g\ Hg}{t}\right) + \frac{\ln\left(188\,790,24 \frac{t}{año} \cdot 10 \frac{g\ Hg}{t}\right) - \ln\left(101\,656,28 \frac{t}{año} \cdot 1 \frac{g\ Hg}{t}\right)}{\sqrt{12}} \right]} \cdot \left(\frac{1\ kg\ Hg}{10^3\ g\ Hg} \right) = 1\,067,383\ kg\ Hg$$

| | | | | | | | |
|-----------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Nombre de la fuente | Aguas residuales | | | | | | |
| Descripción | Emisión de mercurio asociada a la disposición de aguas residuales | | | | | | |
| Metodología | Caudal anual de aguas residuales dispuestas luego de su tratamiento, y factor de emisión de masa de mercurio en cada litro de aguas residuales dispuestas luego de su tratamiento. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>Se utilizó las bases de datos de la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud, en la que algunos establecimientos con ciertos códigos CIU (Clasificación Industrial Internacional Uniforme) específicos reportaron la concentración de metales pesados en sus aguas residuales, además de su caudal de aguas residuales.</p> <p>MAP: 2 390 702,55 m³ año⁻¹ MIN: 1 673 491,79 m³ año⁻¹ MAX: 3 107 913,32 m³ año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 5,25 mg m⁻³</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 2,236 mg m⁻³</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 0,5 mg m⁻³</td> <td>MIN (N2): 0,5 mg m⁻³</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 10 mg m⁻³</td> <td>MAX (N2): 10 mg m⁻³</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Agua: 90 %, Residuos: 10 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 30 %.</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 5,25 mg m ⁻³ | MAP (N2): 2,236 mg m ⁻³ | MIN (N1): 0,5 mg m ⁻³ | MIN (N2): 0,5 mg m ⁻³ | MAX (N1): 10 mg m ⁻³ | MAX (N2): 10 mg m ⁻³ |
| MAP (N1): 5,25 mg m ⁻³ | MAP (N2): 2,236 mg m ⁻³ | | | | | | |
| MIN (N1): 0,5 mg m ⁻³ | MIN (N2): 0,5 mg m ⁻³ | | | | | | |
| MAX (N1): 10 mg m ⁻³ | MAX (N2): 10 mg m ⁻³ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{A.R., \text{ agua}} = 2\,390\,702,55 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 5,25 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) \cdot 0,9 = \mathbf{11,296 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de aguas residuales en los residuos, análogamente: $E_{A.R., \text{ residuos}} = \mathbf{1,255 \text{ kg Hg}}$

Emisión de aguas residuales total, $E_{A.R.} = \mathbf{12,551 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF}, A.R.} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,390\,702,55 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 5,25 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) \cdot \ln\left(3\,107\,913,32 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) - \ln\left(1\,673\,491,79 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{4,421 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP}, A.R.} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,390\,702,55 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 5,25 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) + \frac{\ln\left(3\,107\,913,32 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) - \ln\left(1\,673\,491,79 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{35,634 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{\text{MAP}, A.R.} = e^{\left[\ln\left(0,5 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) + \frac{\ln\left(10 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) - \ln\left(0,5 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right)}{2} \right]} = \mathbf{2,236 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}}$$

$$E_{A.R., \text{ agua}} = 2\,390\,702,55 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 2,236 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) \cdot 0,9 = \mathbf{4,811 \text{ kg Hg}}$$

Emisión de aguas residuales en los residuos, análogamente: $E_{A.R., \text{ residuos}} = \mathbf{0,535 \text{ kg Hg}}$

Emisión de aguas residuales total, $E_{A.R.} = \mathbf{5,346 \text{ kg Hg}}$

$$L_{\text{INF, A.R.}} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,390\,702,55 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 2,236 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) - \ln\left(3\,107\,913,32 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) - \ln\left(1\,673\,491,79 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{1,883 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{\text{SUP, A.R.}} = e^{\left[\frac{\ln\left(2\,390\,702,55 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 2,236 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) + \ln\left(3\,107\,913,32 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 10 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right) - \ln\left(1\,673\,491,79 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \cdot 0,5 \frac{\text{mg Hg}}{\text{m}^3}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^6 \text{ mg Hg}} \right) = \mathbf{15,177 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Crematorios | | | | | | |
| Descripción | Emisión de mercurio asociada a la cremación de personas | | | | | | |
| Metodología | Cremaciones anuales realizadas por los establecimientos autorizados, y factor de emisión de masa de mercurio en cuerpo cremado. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> Actividad <p>Se utilizó los datos proporcionados por la DIGECA del MINAE, quienes a su vez hicieron la consulta directamente a todos los establecimientos con permiso de cremación de personas.</p> <p>MAP: 904 cadáveres año⁻¹ MIN: 814 cadáveres año⁻¹ MAX: 995 cadáveres año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 2,5 g cadáver⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 2 g cadáver⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 1 g cadáver⁻¹</td> <td>MIN (N2): 1 g cadáver⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 4 g cadáver⁻¹</td> <td>MAX (N2): 4 g cadáver⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> Factores de distribución <p>Aire: 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> Supuestos <p>Porcentaje de desviación de actividad MIN y MAX necesarios para el cálculo de la incertidumbre tomado como del 10 % y se redondeó al número entero más cercano.</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 2,5 g cadáver ⁻¹ | MAP (N2): 2 g cadáver ⁻¹ | MIN (N1): 1 g cadáver ⁻¹ | MIN (N2): 1 g cadáver ⁻¹ | MAX (N1): 4 g cadáver ⁻¹ | MAX (N2): 4 g cadáver ⁻¹ |
| MAP (N1): 2,5 g cadáver ⁻¹ | MAP (N2): 2 g cadáver ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 1 g cadáver ⁻¹ | MIN (N2): 1 g cadáver ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 4 g cadáver ⁻¹ | MAX (N2): 4 g cadáver ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{cre} = 904 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2,5 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = 2,260 \text{ kg Hg}$$

$$L_{INF, cre} = e^{\left[\ln\left(904 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2,5 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \frac{\ln\left(995 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(814 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{1,429 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, cre} = e^{\left[\ln\left(904 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2,5 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \frac{\ln\left(995 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(814 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{3,573 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{MAP, cre} = e^{\left[\ln\left(1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) + \frac{\ln\left(4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}}$$

$$E_{cre} = 904 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{1,808 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{INF, cre} = e^{\left[\ln\left(904 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \frac{\ln\left(995 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(814 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{1,143 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, cre} = e^{\left[\ln\left(904 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \frac{\ln\left(995 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(814 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{2,859 \text{ kg Hg}}$$

| | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Nombre de la fuente | Cementerios | | | | | | |
| Descripción | Emisión de mercurio asociada al entierro de personas en los cementerios | | | | | | |
| Metodología | Cantidad de personas enterradas en los cementerios, y factor de emisión de masa de mercurio en cuerpo enterrado. | | | | | | |
| Fuente de datos | <ul style="list-style-type: none"> • Actividad <p>Se utilizó los datos de las defunciones totales para el 2014 según (INEC, 2011a) y se le restó el dato de las cremaciones de dicho año, de manera que se obtuviera la cantidad de cuerpos enterrados en los cementerios durante el año de estudio.</p> <p>MAP: 19 840 cadáveres año⁻¹ MIN: 19 499 cadáveres año⁻¹ MAX: 20 193 cadáveres año⁻¹</p> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">MAP (N1): 2,5 g cadáver⁻¹</td> <td style="width: 50%;">MAP (N2): 2 g cadáver⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MIN (N1): 1 g cadáver⁻¹</td> <td>MIN (N2): 1 g cadáver⁻¹</td> </tr> <tr> <td>MAX (N1): 4 g cadáver⁻¹</td> <td>MAX (N2): 4 g cadáver⁻¹</td> </tr> </table> <ul style="list-style-type: none"> • Factores de distribución <p>Suelo: 100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> • Supuestos <p>El dato de actividad MIN se obtuvo como la resta entre las defunciones totales del 2013 y el valor MIN de actividad de las cremaciones.</p> <p>El dato de actividad MAX se obtuvo como la resta entre las defunciones totales del 2015 y el valor MAX de actividad de las cremaciones.</p> <p>Para el inventario N1 el factor MAP se calculó con una media aritmética entre los factores MIN y MAX a utilizar.</p> <p>Para el inventario N2 el factor MAP se calculó con la ecuación 3.3, suponiendo una distribución normal logarítmica y asumiendo que la media de esta distribución está a la mitad de este intervalo.</p> | MAP (N1): 2,5 g cadáver ⁻¹ | MAP (N2): 2 g cadáver ⁻¹ | MIN (N1): 1 g cadáver ⁻¹ | MIN (N2): 1 g cadáver ⁻¹ | MAX (N1): 4 g cadáver ⁻¹ | MAX (N2): 4 g cadáver ⁻¹ |
| MAP (N1): 2,5 g cadáver ⁻¹ | MAP (N2): 2 g cadáver ⁻¹ | | | | | | |
| MIN (N1): 1 g cadáver ⁻¹ | MIN (N2): 1 g cadáver ⁻¹ | | | | | | |
| MAX (N1): 4 g cadáver ⁻¹ | MAX (N2): 4 g cadáver ⁻¹ | | | | | | |

Para el inventario N1

$$E_{cem} = 19\,840 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2,5 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{49,600 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{INF, cem} = e^{\left[\frac{\ln\left(19\,840 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2,5 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(19\,499 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(20\,193 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{32,908 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, cem} = e^{\left[\frac{\ln\left(19\,840 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2,5 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(19\,499 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(20\,193 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{74,758 \text{ kg Hg}}$$

Para el inventario N2

$$F_{MAP, cem} = e^{\left[\ln\left(1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) + \frac{\ln\left(4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{2} \right]} = \mathbf{2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}}$$

$$E_{cem} = 19\,840 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}} \left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{39,680 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{INF, cem} = e^{\left[\frac{\ln\left(19\,840 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(19\,499 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(20\,193 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{26,327 \text{ kg Hg}}$$

$$L_{SUP, cem} = e^{\left[\frac{\ln\left(19\,840 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 2 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(19\,499 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 4 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right) - \ln\left(20\,193 \frac{\text{cadáveres}}{\text{año}} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{cadáver}}\right)}{\sqrt{12}} \right]}$$

$$\left(\frac{1 \text{ kg Hg}}{10^3 \text{ g Hg}} \right) = \mathbf{59,807 \text{ kg Hg}}$$