



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DE LA
DISPOSICIÓN FINAL DE MERCURIO DE
TERMÓMETROS CLÍNICOS”**

TESIS

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

PRESENTA

David Santiago Cárdenas López

Isaac Romero Mendoza



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA

VOCAL: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

SECRETARIO: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ

1er. SUPLENTE: GEMA LUZ ANDRACA AYALA

2do. SUPLENTE: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

Sitio donde se desarrolló el tema:

**Unidad De Gestión Ambiental (UGA), Facultad De Química, Edificio A, Anexo
Del Laboratorio 2-D, UNAM**

ASESOR DEL TEMA:

DRA. IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA

SUSTENTANTES

DAVID SANTIAGO CÁRDENAS LÓPEZ

ISAAC ROMERO MENDOZA

Índice

Resumen.....	1
Introducción.....	2
Problemática.....	2
Justificación.....	3
Objetivos.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos	4
Alcance	4
Capítulo 1. Antecedentes	5
1.1. Propiedades del Mercurio	5
1.2. Mercurio en el ambiente.....	6
1.3. Usos del Mercurio.....	8
1.4. Efectos a la salud provocados por mercurio.....	10
1.5. Marco Normativo Internacional.....	13
1.6. Mercurio en el sector salud	18
Capítulo 2. Análisis del Ciclo de Vida.....	21
2.1. Historia del ACV.....	21
2.2. Norma ISO 14000	22
2.3. Marco de referencia metodológico para un ACV de acuerdo con los estándares ISO.....	26
2.3.1. Definición del alcance y unidad funcional	26
2.3.2. Consulta de datos de entrada (análisis de inventario).....	26
2.3.3. Planteamiento del flujo de proceso.....	30
2.3.4. Evaluación de impactos	32
2.3.5. Interpretación	34
2.4. Ejemplos de aplicación de ACV.....	34
Capítulo 3. Metodología.....	36
Capítulo 4. Resultados.....	47
4.1. Análisis de Inventario.....	47
4.2. Unidad Funcional.....	52

4.3. Implementación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.	52
4.3.1. Uso del software para desarrollo de ACV.	52
4.3.2. Desarrollo del ACV mediante la resolución de ecuaciones de balance de materia y energía.....	62
4.3.3. Balance de Materia para la Estimación de Impacto Ambiental.....	67
4.4. Comparación entre métodos desarrollados.....	78
Conclusiones.....	79
Bibliografía.....	82
Anexo.....	88

Listado de Tablas

Tabla 1. Principales compuestos de mercurio.....	6
Tabla 2. Criterios de Intervención respecto a valores de Hg detectados en orina.	13
Tabla 3. Contenido de mercurio en dispositivos médicos	19
Tabla 4. Comparación de diferentes alternativas para termómetros libres de Hg.	20
Tabla 5. Principales herramientas utilizadas en la elaboración de ACV.....	24
Tabla 6. Estudios representativos del Análisis de Ciclo de vida.....	34
Tabla 7. Fuentes consultadas para establecer el flujo de materiales en el ACV de termómetros de hospitales en México.....	38
Tabla 8. Descripción de escenarios evaluados.	41
Tabla 9. Empresas prestadoras de servicios de confinamiento de residuos peligrosos industriales. (SEMARNAT, 2019).....	42
Tabla 10. Eco-indicadores evaluados con el Software Umberto®.	43
Tabla 11. Eco-indicadores seleccionados, para el desarrollo del ACV a partir del planteamiento de las ecuaciones transferencia de materia y energía.....	45
Tabla 12. Especificaciones de los flujos provenientes de la base de datos en la disposición final de termómetros de hospitales en México.....	47
Tabla 13. Porcentaje de los flujos evaluados para cada escenario.....	53
Tabla 14. Resultados al balance propuesto para la disposición final del Hg en el Software Umberto®.....	58
Tabla 15. Constantes de Antoine.	67
Tabla 16. Composiciones en el equilibrio del proceso de destilación.....	68
Tabla 17. Rango de temperaturas de aplicación para el proceso seleccionado. ..	68
Tabla 18. Constantes para determinar Cp del agua. (Chase Jr, 1998)	70
Tabla 19. Litros de agua necesarios para el sistema de enfriamiento.....	71
Tabla 20. Características de la bomba B-01.	72
Tabla 21. Factores de emisión, para el cálculo de los impactos ambientales en la destilación.	73
Tabla 22. Emisiones totales del sistema de destilación.	73

Tabla 23. Características físicas y químicas de diésel vendido en México por Pemex.	73
Tabla 24. Factores de emisión, para el cálculo de los impactos seleccionados en la etapa de transporte.	74
Tabla 25. Emisiones totales del transporte para una distancia de 200km.....	74
Tabla 26. Potencial de calentamiento global de los contaminantes de PCG.	75
Tabla 27. Factores de potencial de toxicidad humana.	75
Tabla 28. Factores de potencial de acidificación.....	75
Tabla 29. Factores de potencial de eutrofización.....	76
Tabla 30. Comparativo de impactos obtenidos mediante la resolución de ecuaciones de balance de materia y energía y modelación en software en el proceso de la destilación.....	76
Tabla 31. Comparación de impactos obtenidos mediante la resolución del balance de materia y energía y modelación en software para el transporte al relleno sanitario.....	77

Listado de Figuras

Figura 1. Balances y flujos del mercurio en el ambiente. (Monitoreo y Symon 2013).	8
Figura 2. Usos comunes del mercurio, elaboración propia.	9
Figura 3. Ejemplos de afectaciones a la salud tras exposición crónica y aguda a compuestos de mercurio (Gaioli, et al; 2012).	11
Figura 4. Marco de exposición al mercurio (Poulin y Gibb, 2008).	12
Figura 5. Línea de tiempo de eventos globales sobre el mercurio (García, et al., 2017).	16
Figura 6. Esquema gráfico de las etapas en un ACV (Garraín, 2009).	24
Figura 7. Etapas generales de un bien de consumo, elaboración propia.	27
Figura 8. Esquemización de un sistema genérico.	29

Figura 9. Ejemplo de un diagrama de Árbol de procesos. (Hoof B., 2000).	31
Figura 10. Relación entre emisiones al ambiente, impactos de efectos intermedios, finales y áreas de protección, modificado de (Antón Vallejo, 2004).	33
Figura 11. Metodología del ACV de la disposición final de termómetros de mercurio de uso hospitalario en México.	36
Figura 12. Esquema representativo de un proceso de separación Flash.	44
Figura 13. Diagrama de flujo de disposición final de termómetros de mercurio clínicos en México.	51
Figura 14. Balance de Materia de la disposición de Hg, escenario "a"	54
Figura 15. Balance de Materia de la disposición de Hg, escenario "b"	55
Figura 16. Balance planteado en el software para la disposición final del mercurio de termómetros clínicos.	57
Figura 17. Resultados de impacto, Potencial de Cambio Climático (GWP).	59
Figura 18. Resultados de impacto, Potencial de Acidificación (AP).	60
Figura 19. Resultados de impacto, Potencial de Eutrofización (EP).	60
Figura 20. Resultados de impacto, Potencial de Toxicidad Humana (HTP).	61
Figura 21. Resultados de impacto, Potencial de Ecotoxicidad Marina (MAETP). .	61
Figura 22. Etapas seleccionadas para la estimación de impactos ambientales mediante el desarrollo de ecuaciones de Balance de Materia y Energía de la disposición de Hg.	64
Figura 23. Diagrama de flujo de proceso para destilación de mercurio. Elaboración propia	66

Listado de Ecuaciones.

Ecuación 1. Flujo de contaminante, masa	28
Ecuación 2. Flujo de contaminante, energía.	28
Ecuación 3. Balance General.	29
Ecuación 4. Ecuación de relación entre la temperatura y presión de saturación del vapor.	67

Ecuación 5. Rachfor-Rice.....	67
Ecuación 6. Determinación de los Coeficientes de distribución.	68
Ecuación 7. Ecuación de Rachford-Rice en función de TR y TB.....	68
Ecuación 8. Ecuación de cantidad de transferencia de calor.	69
Ecuación 9. Balance de energía.....	69
Ecuación 10. Ecuación para determinar la masa de gas natural al proceso.	70
Ecuación 11. Sistema de Ecuaciones para determinar la masa de agua necesaria, considerando una eficiencia de 80%.....	71
Ecuación 12. Relación de consumo eléctrico para impulsar la bomba B-01.....	72
Ecuación 13. Ecuación para determinar los kilogramos emitidos de SO ₂ por cantidad.....	74
Ecuación 14. Ecuación para determinar el potencial de calentamiento global.	75
Ecuación 15. Ecuación para determinar el potencial de toxicidad humana.....	75
Ecuación 16. Ecuación para determinar el potencial de acidificación.	76
Ecuación 17. Ecuación para determinar la potencial eutrofización.	76

Resumen.

Este trabajo plantea la evaluación de los impactos ambientales ocasionados por la disposición final del mercurio de termómetros clínicos en México, mediante el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), tomando como procedimiento estandarizado la norma ISO 14040/14044.

El objeto de estudio contempló el análisis de la etapa final de disposición del Hg en México, evaluando dos escenarios, el escenario actual y un escenario en donde se incrementó el porcentaje de mercurio reciclado con respecto a la disposición actual. La Unidad Funcional fue definida como: 2166 kg Hg/año de mercurio, procedente de termómetros clínicos. El vidrio compuesto de los termómetros no fue considerado en los escenarios evaluados.

La Unidad Funcional se estableció a partir de los datos registrados en fuentes oficiales (Gubernamentales y reportes hospitalarios). Las categorías de impacto que fueron evaluadas son: Potencial de Calentamiento Global, Potencial de Acidificación, Potencial de Eutrofización, Ecotoxicidad Marina, Toxicidad Humana.

La evaluación de los impactos ambientales se llevó a cabo mediante el uso del software Umberto

® 5.5, el cual contemplaba la base de datos Ecoinvent (U55_ECOINVENT_LIB), adicionalmente se empleó el uso de ecuaciones de balance de materia y energía en dos subsistemas de la etapa de disposición; la destilación de mercurio y su transporte a un relleno sanitario.

Para realizar el cálculo de la destilación mediante balances de materia y energía se consideró una destilación tipo *flash*, mientras que en el caso de la etapa de transporte se consideró una distancia hacia el relleno de 200 km y un vehículo con capacidad de 16 toneladas

Introducción

Problemática

El mercurio ha tenido un papel importante en la historia de la humanidad, especialmente por las características físicas que este presenta, ya que es un metal líquido a temperatura ambiente con una densidad 13.5 veces mayor que la del agua (IPCS, 2011), ha sido ampliamente usado en minería para extraer metales mediante la formación de amalgamas, también se ha empleado en procesos industriales como la producción de gas cloro y sosa caustica, además de ser ampliamente usado en el sector médico, donde podemos encontrarlo en amalgamas dentales, e instrumentos como termómetros, sondas gástricas y esfigmomanómetros.

La exposición a mercurio produce diversas afectaciones en la salud de las personas, dependiendo del tipo de exposición los efectos adversos pueden presentarse en el sistema nervioso, inmunológico, reproductivo o cardiovascular (Gaioli, et al; 2012), por esta razón se han suscitado eventos catastróficos derivados del mal manejo de este elemento, siendo uno de los más recordados el evento ocurrido en la bahía de Minamata donde miles de personas y animales fueron envenenados con dicho contaminante; este suceso marcó la relación de causalidad entre el mercurio y sus efectos sobre la salud (García, et al., 2017).

Debido a la preocupación por los efectos adversos producidos por este elemento surgió el Convenio de Minamata, que es un tratado internacional jurídicamente vinculante firmado en Japón en 2013 (García, et al., 2017). El convenio tiene por objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de Hg y sus posibles compuestos mediante la puesta en marcha de diferentes medidas, de entre las cuales se pueden destacar el control sobre su suministro y comercio.

Es así como siendo México uno de los países signatarios de este convenio, es necesario llevar a cabo estrategias para reducir paulatinamente su uso. Hablando

específicamente de los centros de salud en México se plantea la sustitución de diferentes equipos que entre sus partes necesitan mercurio para su funcionamiento, debido a esto, el mercurio procedente de estos equipos será dispuesto mediante la gestión actual que se le da a este elemento.

Justificación.

El consumo de termómetros de mercurio en México, como importación neta promedio para el periodo 2002-2007, fue de 3,834,869 unidades por año. La cantidad promedio de contenido de Hg es de 0.61 gramos por unidad; el consumo de mercurio se estimó en aproximadamente 2.3 toneladas más la cantidad de Hg contenido en termómetros producidos en México ($64,937 \times 0.61$ gramos = 40 kg), con lo cual se calculó un total aproximado de 2.4 toneladas (Castro, 2011).

Para realizar este estudio, se consideró lo reportado en el Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio en México sobre la emisión total de mercurio procedente de termómetros clínicos, siendo este valor de 2.166 toneladas para el año 2004.

En México la disposición final actual de mercurio procedente de los termómetros clínicos considera una emisión directa al aire del 10%, 15% es recuperado, 15% es confinado, 26% se dispone en tiraderos a cielo abierto y el restante 34% termina en rellenos sanitarios (INE, 2008). Lo que implica solo una pequeña cantidad de este elemento es recuperada para su uso posterior.

Este trabajo evalúa los impactos ambientales ocasionados por el escenario actual de disposición de este elemento, contemplando solo la etapa de disposición del mercurio, así como la evaluación de un segundo escenario que considera una mayor recuperación del mercurio mediante un proceso de destilación. Los resultados de los impactos ambientales obtenidos en cada escenario permitirán identificar políticas más adecuadas para la disposición final de este residuo.

Objetivos

Objetivo General

Implementar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida basado en la norma ISO 14040:2006; para la disposición final de los residuos de mercurio procedentes de termómetros usados en el sector salud de México.

Objetivos Específicos

1. Realizar la revisión bibliográfica sobre termómetros de Hg de uso hospitalario para establecer la unidad funcional.
2. Establecer los escenarios de la disposición final de mercurio más representativos para ser modelados.
3. Desarrollar el ACV de los residuos de mercurio de termómetros de uso hospitalario, mediante el planteamiento y modelación del flujo del contaminante en las diferentes etapas de su manejo; determinando los impactos potenciales para cada etapa estudiada.
4. Comparar dos métodos diferentes para evaluar un ACV; la modelación con un software comercial especializado y por medio del planteamiento y desarrollo de ecuaciones de balances de materia, con el fin de realizar una comparación entre ambos, identificando de esta manera similitudes, así como las ventajas y desventajas que presenta realizar el análisis por distintos medios.
5. Identificar la etapa del proceso que presenta una mayor carga ambiental en la disposición final del mercurio.

Alcance

- El trabajo se enfocó en la etapa de disposición final de Hg procedente de termómetros de uso clínico en México, como continuación del trabajo publicado en 2015: *Alternatives of management and disposal for mercury*

thermometers at the end of their life from Mexican health care institutions
elaborado por Gavilán García, I. C., Fernández Villagomez, G., Gavilán
García, A., & Alcántara Concepción, V.

- La unidad funcional se estableció a partir de los datos registrados en fuentes oficiales (gubernamentales y reportes hospitalarios).
- Para la modelación se utilizará el programa Umberto® 5.5.
- Para la modelación se tomó como base los datos disponibles en Ecoinvent (U55_ECOINVENT_LIB) del programa Umberto® 5.5.
- Para el método alterno, se planteó y desarrolló el balance de materia y energía para dos etapas representativas del proceso.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1. Propiedades del Mercurio

El mercurio Hg, es un elemento metálico, de color plateado que permanece en estado líquido a temperatura ambiente. Es una sustancia inodora con peso atómico de 200.59 g/mol; en estado sólido presenta una coloración blanca, además de ser dúctil y maleable. Su punto de fusión es de -38.87°C y su punto de ebullición de 357.72°C mientras que su densidad relativa a 25°C es de 13.53 g/cm^3 (IPCS, 2011).

Se puede encontrar en la naturaleza en su estado elemental como metal, en forma de vapor, o como es más común, en combinación con otros elementos formando compuestos orgánicos e inorgánicos, reconociendo tres estados de oxidación; elemental (Hg^0), mercurioso (Hg^+) y mercúrico (Hg^{2+}).

En la Tabla 1, puede apreciarse los principales compuestos de mercurio; en relación con los compuestos inorgánicos, surgen de sus formas catiónicas; siendo sólidos, en forma de polvos blancos o cristalinos, a excepción del sulfuro de mercurio (cinabrio); el cual fue empleado desde los principios de la civilización como pigmento, en la decoración de cuevas, así como de la piel. Los compuestos organometálicos derivados del mercurio se identifican por la unión de uno o dos

átomos de carbono, es decir, forman compuestos del tipo RHg_x y RHgR' . (Yarto, et al., 2005).

Tabla 1. Principales compuestos de mercurio.

Compuestos inorgánicos		Compuestos organometálicos	
Nombre	Formula	Nombre	Formula
Cloruro mercurioso	HgCl	Mercurio divalente	Hg^{2+}
Cloruro mercúrico	HgCl_2	Mercurio metálico	Hg^0
Óxido mercúrico	HgO	Fenil mercurio	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$
Sulfuro mercúrico	HgS	Alcoxilquilo de mercurio	$\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{Hg}^+$
Nitrato de mercurio	$\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$	Metilmercurio	CH_3Hg^+
Sulfato de mercurio	Hg SO_4		

Fuente: Tomado de Galvao y Corey, 1987.

1.2. Mercurio en el ambiente.

El mercurio ha sido un elemento ampliamente usado desde la antigüedad, los egipcios y griegos fabricaban cosméticos y medicamentos a base de esta sustancia la cual fue empleada posteriormente como instrumento de medición. El mercurio presenta una alta tensión superficial, formando pequeñas gotas compactas y esféricas cuando es liberado a la atmósfera. Las gotas, por sí mismas son estables, sin embargo, debido a la alta presión de vapor de mercurio, provoca su rápida volatilización (Rojas, y Gárate, 2011).

Es un elemento que puede encontrarse en estado elemental, presente en el carbón, así como otros combustibles fósiles; las emisiones de mercurio provenientes de fuentes naturales tales como erupciones volcánicas, fuentes geotérmicas, degradación de minerales, incendios forestales, así como su reemisión provocada

por los mecanismos de intercambio de mercurio gaseoso son detectados en las diferentes matrices ambientales tales como aire, agua, hielo y suelo.

Dentro de las fuentes antropogénicas de mercurio podemos mencionar al sector productivo, en actividades como: fabricación de metales, plantas de proceso cloro álcali, procesamiento de minerales, incineradores para residuos médicos e industriales, cementeras, procesamiento de productos químicos, entre otros (Pirrone, et al., 2010).

Una de las principales fuentes de contaminación tiene su origen en la mala disposición de los productos que contienen mercurio y que irremediablemente llegan a tiraderos clandestinos. A nivel internacional una forma para reducir la contaminación provocada por dicha sustancia ha sido la implementación de reglamentos y normas de tal modo que los diferentes procesos de eliminación del residuo contemplen una mejor eficiencia.

De acuerdo con la evaluación mundial sobre el mercurio, del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA); se reporta que los niveles de mercurio en la atmósfera aumentaron desde el inicio de la revolución industrial, de acuerdo con la Figura 1, estos niveles fueron disminuyendo debido a la toma de medidas restrictivas; no obstante, esto no brinda apertura al hecho que es necesario tener conocimiento, debido a la presencia del contaminante en diversas matrices ambientales y su movilidad (PNUMA, 2005).

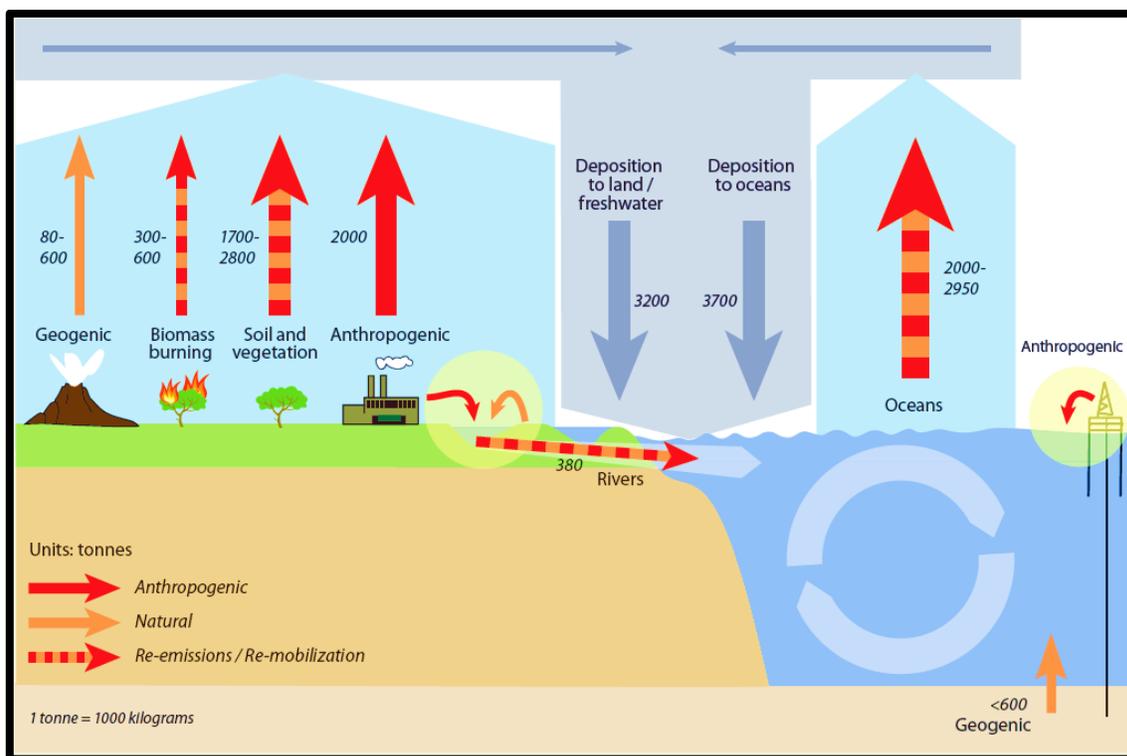


Figura 1. Balances y flujos del mercurio en el ambiente. (Monitoreo y Symon 2013).

A pesar de las iniciativas de reducción de los usos del Hg, su existencia en productos y procesos sigue vigente. Por esta razón, se han generado políticas internacionales para controlar y evaluar el uso del mercurio como producto de consumo en, termómetros, barómetros, termostatos, trompas de vacío, amalgamas dentales, lámparas de mercurio, interruptores eléctricos, así como materias primas en la síntesis de compuestos.

1.3. Usos del Mercurio.

Los compuestos del mercurio han estado presentes en la vida cotidiana más de lo que nos imaginamos (Figura 2). Se utilizaban en baterías, biocidas, en la industria del papel, productos farmacéuticos, pinturas, además como reactivos de laboratorio y en catalizadores industriales; la industria minera, es una de las principales actividades donde su presencia estuvo históricamente relacionada como un

producto principal o como subproducto de la extracción y refinación de diversos metales como el oro y el zinc (Weinberg, 2007).

A nivel doméstico, podía encontrarse en cosméticos, cremas, productos para el cabello, medicamentos, iluminación y termómetros.

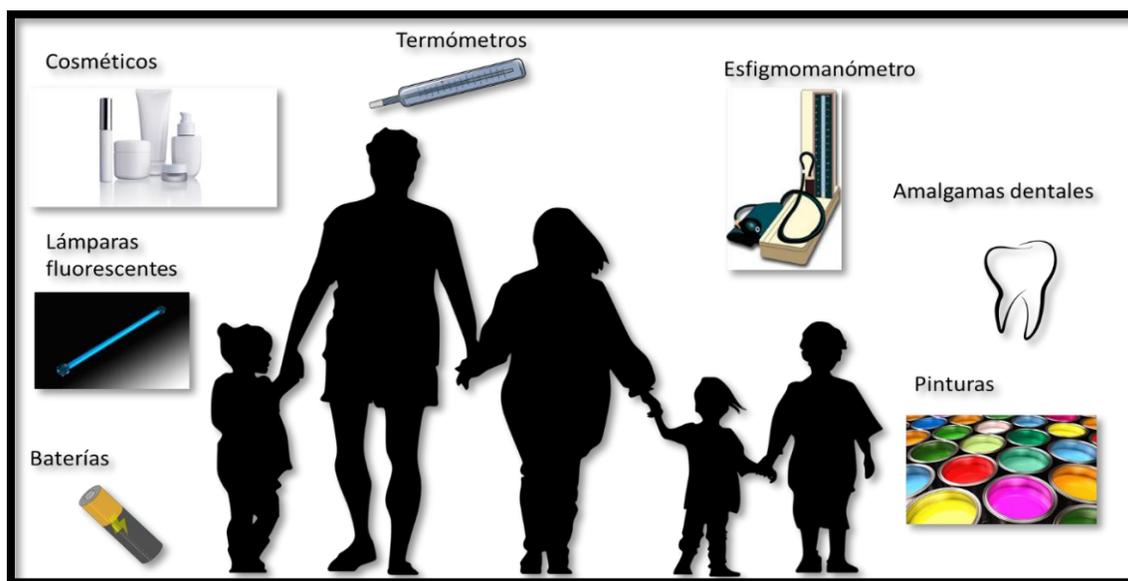


Figura 2. Usos comunes del mercurio, elaboración propia.

En relación con el sector químico, el mercurio toma un papel importante en la industria cloro-alcáli, la cual involucra la producción de NaOH y Cl₂ a partir de salmueras de elevada pureza, donde es utilizada una celda de amalgama constituida por un contenedor de acero por debajo del cual, fluye una capa de mercurio que actúa como cátodo y absorbe el Na⁺ producido en la reacción.

Con respecto a la fundición industrial, existen una gran cantidad de plantas de fundición artesanales en pequeña escala en donde evidentemente, la mayoría no cuentan con los dispositivos adecuados para controlar las emisiones correspondientes derivadas de las diferentes actividades desarrolladas.

Mientras que otro de los principales usos del mercurio durante generaciones, se ha dado en el sector salud, lo cual se abordará más adelante.

1.4. Efectos a la salud provocados por mercurio

Los efectos de la exposición en la población tanto a sustancias orgánicas como inorgánicas de mercurio pueden verse resumidos en el Figura 3; para el caso de la exposición a compuestos orgánicos, el más común, se encuentra la exposición a metilmercurio, que es formado en los mares, lagos y ríos cuando los microorganismos inician su proceso de biotransformación. El metilmercurio se encuentra presente en la mayoría de las especies acuáticas y la principal fuente de exposición humana, es por la ingestión de pescado y otros alimentos de origen marino (Poulin y Gibb, 2008).

Los efectos a la salud asociados al Hg dependen de la vía de exposición a la cual esté propenso un individuo, que a su vez se encuentran relacionadas con la fuente de contaminación; en el Figura 4, se identifican los biomarcadores asociados a las vías de exposición y sus efectos.

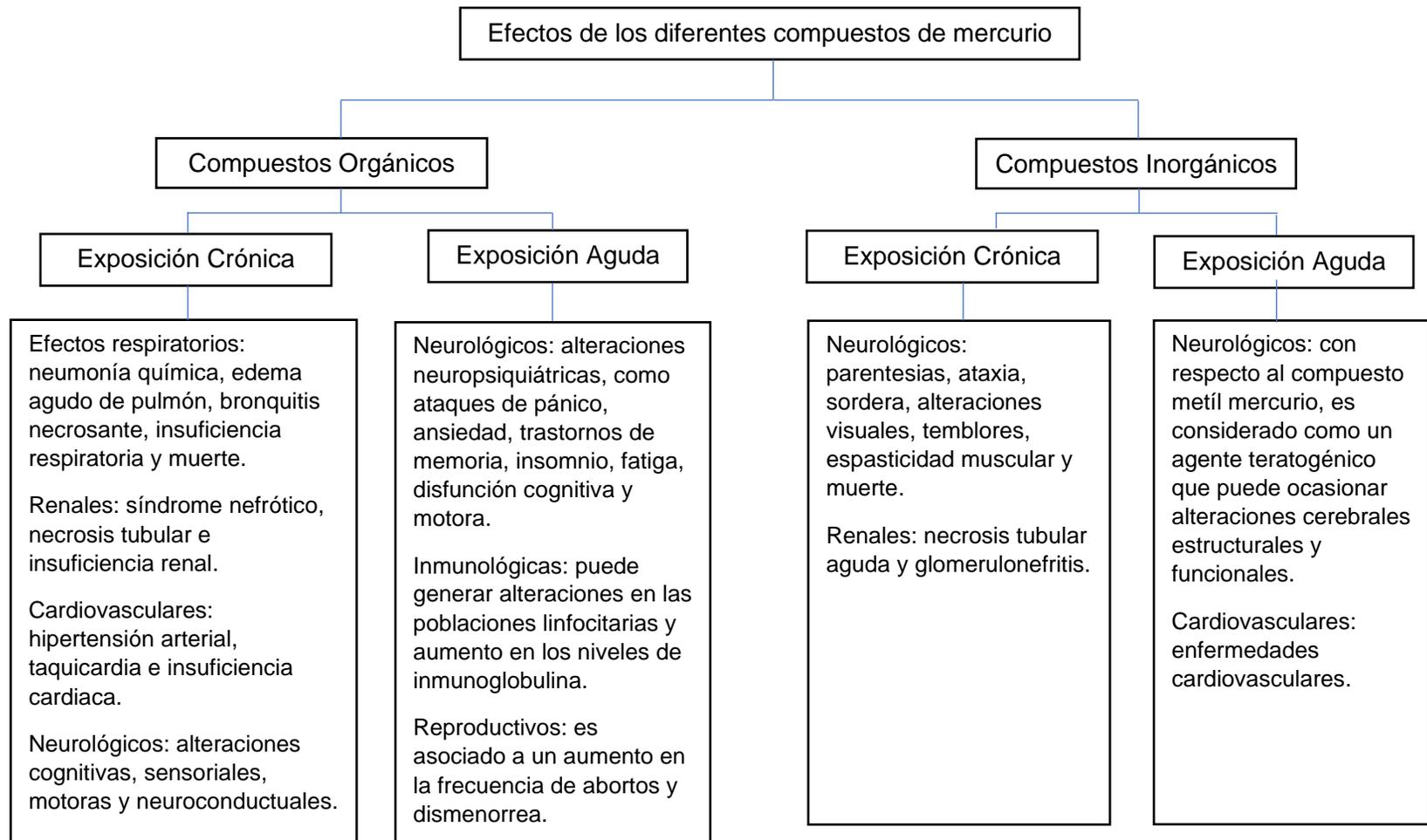


Figura 3. Ejemplos de afectaciones a la salud tras exposición crónica y aguda a compuestos de mercurio (Gaioli, et al; 2012).

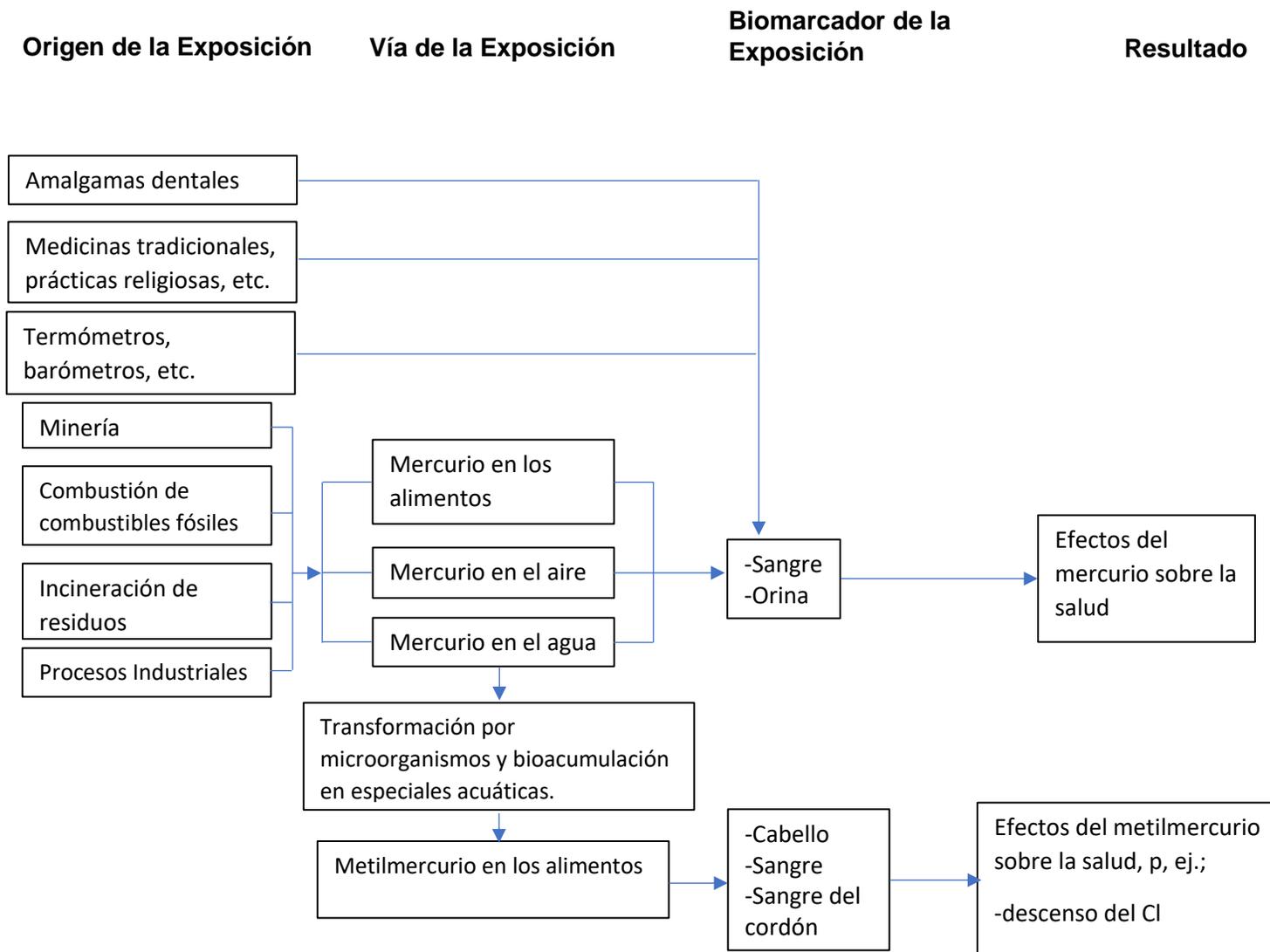


Figura 4. Marco de exposición al mercurio (Poulin y Gibb, 2008).

En caso de una intoxicación por Hg, será necesaria una intervención médica oportuna; en la Tabla 2, se presentan algunos de los valores límites en orina para su diagnóstico y una posible intervención.

Tabla 2. Criterios de Intervención respecto a valores de Hg detectados en orina.

Nivel	Valor urinario	Intervención
Bajo	<20 µg/L	No se requiere
Medio	20-50 µg/L	El valor se encuentra por debajo de los valores que se consideran en riesgo.
Elevado	>50 µg/L	Es necesario un tratamiento para evitar la neurotoxicidad.

Fuente: Tomado de (Gaioli, et al; 2012).

Como se ha visto, el contacto y los efectos del contaminante son un tema relevante y requerido para brindar una atención oportuna de acuerdo con su tipo de exposición; siendo así, los centros de salud lugares en los cuales puede encontrarse de manera indirecta el contacto entre el Hg y los individuos, tomando como escenario la rotura de los termómetros lo cual, representa un peligro potencial para los pacientes ya que la exposición más común al mercurio en dicho sector es debida a la inhalación de los vapores o en su defecto mediante la absorción de la piel que si en su caso no es controlada o se cuenta con un protocolo contra los derrames de Hg, pueden provocar daños a la salud. (Karliner y Harvie, 2013).

1.5. Marco Normativo Internacional.

A nivel internacional la preocupación por controlar las emisiones de mercurio ha ido en aumento, ya que es uno de los contaminantes transfronterizo; las iniciativas vigentes sobre el mercurio tienen como objetivo la reducción o prevención de la liberación de este elemento en el medio ambiente a fin de evitar sus efectos adversos directos e indirectos en el entorno (PNUMA, 2005). En términos generales, las iniciativas pueden agruparse en Normas de calidad ambiental que establecen

una concentración máxima aceptable de Hg en diferentes medios (agua, superficie, aire y suelo, alimentos, etc.).

Debido a incidentes históricos en los que estuvo involucrado el mercurio como contaminante, se considera un elemento que tiene implicaciones políticas y ambientales. A continuación, recopilamos dos de los eventos más representativos.

- 1) En Minamata provincia de Japón, en la década de 1940 la empresa petroquímica Chisso descargó mercurio en la bahía, esto provocó una bioacumulación en los peces y mariscos consumidos por la población, lo que degeneró en que las poblaciones pesqueras aledañas desarrollaran síndromes neurológicos graves y permanentes, reportando de forma oficial 121 víctimas, aunque se cree que miles más fueron afectadas (Nelson, et al., 2011).
- 2) En Irak en el año de 1971 se presentó lo que se conocería como el más grande cuadro de envenenamiento por metilmercurio del que se tenga registro, debido a un cargamento de aproximadamente 95,000 toneladas de semillas destinadas para cultivo, las cuales habían sido tratadas previamente con este compuesto como fungicida, sin embargo, algunas de estas semillas fueron usadas directamente como alimento, el resultado de dicho evento registró 6,530 hospitalizaciones y más de 400 muertes (Nelson, et al., 2011).

Derivado de la preocupación mundial relacionada a incidentes por contaminación con mercurio, el consejo de administración del PNUMA publicó en el 2002 un informe titulado ***Evaluación mundial sobre mercurio***, posteriormente en 2005 el Consejo de Administración del PNUMA integro la Asociación Mundial sobre Mercurio (*Global Mercury Partnership*), la cual cuenta actualmente con las siguientes áreas prioritarias:

- Reducir el mercurio en la minería de oro artesanal y en pequeña escala.
- Control de mercurio por combustión de carbón.
- Reducción del mercurio en el sector cloro-álcali.
- Reducción de mercurio en productos.
- Mercurio diseminado en la atmosfera e investigación de su destino.
- Gestión de residuos de mercurio.
- Suministro y almacenamiento de mercurio.
- Liberaciones de mercurio de la industria del cemento.

En 2009 el Consejo de Gobierno del PNUMA convocó un Comité Intergubernamental de Negociación (INC por sus siglas en ingles), para desarrollar un instrumento global legalmente vinculante (Figura 5).

El convenio de Minamata fue el resultado de tres años, en donde se llevaron a cabo cinco reuniones del INC, a lo cual, se redactó el texto jurídicamente vinculante (de cumplimiento obligatorio para los Estados que lo ratifiquen) del Convenio, el cual de adoptado en 2013 en Kumamoto Japón (García, et al., 2017). Hablando de forma específica, México firmó el documento el 23 de octubre de 2013 y ratifico su participación el 29 de septiembre de 2015.

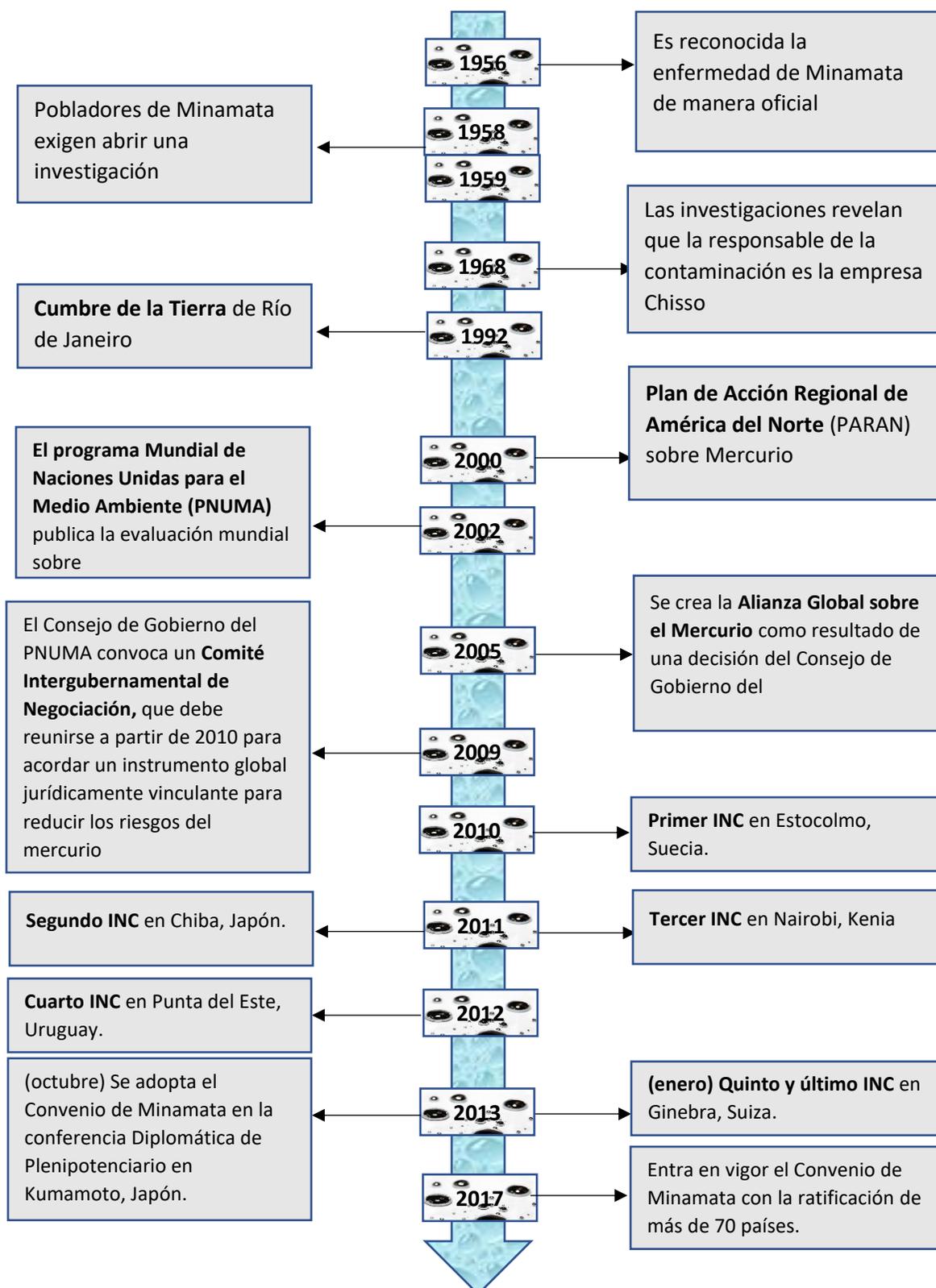


Figura 5. Línea de tiempo de eventos globales sobre el mercurio (García, et al., 2017).

Debido a la persistencia del mercurio en el ambiente, así como la facilidad con la que este se desplaza grandes distancias usando como vector agua y aire, lo que implica que regiones lejanas al punto de emisión pueden quedar contaminadas, bajo esta premisa es que diferentes naciones han señalado la importancia de coordinar esfuerzos para mitigar estos efectos (García, et al., 2017).

La cooperación en el ámbito regional y subregional ha generado convenios jurídicamente vinculantes, así como el acatamiento de reglamentos de importación y exportación que limitan las concentraciones de Hg en determinados productos.

A continuación, se mencionan algunos de los principales instrumentos de regulación:

- **Convenio de Minamata:** El objetivo de este convenio es proteger la salud humana y el ambiente de las emisiones y liberaciones antrópicas de mercurio y sus compuestos (Mendoza y Ize, 2017).

- **Convenio OSPAR** sobre la protección del medio ambiente marino del Atlántico Nordeste, el objetivo es conservar los ecosistemas marinos, la salud humana y restaurar las áreas marinas que hayan sido afectadas negativamente por las actividades humanas mediante la prevención y eliminación de la contaminación y su protección. Este convenio lleva seguimiento de las cargas de mercurio vertidas a cuerpos de agua en la zona del Atlántico Nordeste.

- **Codex Alimentarius:** Colección de normas, códigos y usos, directrices y otras recomendaciones relacionadas con la producción y el procesamiento de alimentos con fines de seguridad alimentaria, la protección de los consumidores y trabajadores en la cadena de suministro de alimentos y la preservación del medio ambiente (Organización Mundial de la Salud, 2018), contiene normas que establecen límites máximos permisibles de mercurio presente en alimentos.

- **Food and Drug Administration (FDA)**, dentro de sus lineamientos se encuentran normas respecto a los niveles de mercurio permisibles en diferentes productos.

- **Reglamento (UE) 2017/852 del parlamento europeo y del consejo de la Unión Europea**: Establece las medidas y condiciones relativas al uso, almacenamiento, compuestos, mezclas, fabricación, uso y el comercio de productos con mercurio, así como a la gestión de residuos de mercurio, con el fin de garantizar la protección de la salud humana y del medio ambiente frente a las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y de compuestos de mercurio (García, et al; 2017).

La legislación de un país normalmente es relativa a la producción, comercialización y uso del mercurio, así como de los productos que lo contienen, mientras que la legislación sobre liberaciones y eliminación de desechos suele ser más general y abarca los metales pesados y determinados contaminantes inorgánicos y orgánicos (PNUMA, 2005). En este sentido el ciclo de vida completo del mercurio no es considerado, debido a que los esfuerzos van dirigidos hacia un control más puntual de este metal.

1.6. Mercurio en el sector salud

A nivel mundial el sector salud es uno de los principales contribuyentes de emisiones de mercurio, además de ser un importante consumidor de este. Como se mencionó anteriormente, debido a sus propiedades físicas ha sido utilizado diversos instrumentos médicos, termómetros, tensiómetros y dilatadores esofágicos (Tabla 3). La prevalencia de estos objetos en hospitales de países en desarrollo genera que tanto pacientes como trabajadores se expongan a este metal en dosis peligrosas cuando alguno de estos dispositivos se rompe o derrama de forma accidental (Karlner y Harvie 2007).

En la Ciudad de México en 2007, en el Hospital de Niños Federico Gómez se estima que al mes la cantidad de termómetros rotos era de 385 termómetros, resultando en un aproximado de 4,620 termómetros al año (SSD/CAATA. 2013).

Estudios demuestran que los equipos usados en centros de salud que contienen mercurio siempre terminan rompiéndose. A sí mismo, es normal que las instituciones médicas no cuenten con protocolos de limpieza para casos de derrames de mercurio, si bien cuando el derrame se produce sobre una superficie no porosa y lisa el mercurio puede ser retirado de forma segura. Sin embargo, cuando se trata de superficies en las cuales el mercurio puede adherirse, su limpieza se hace más complicada e incluso imposible (OMS, 2005).

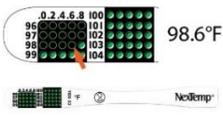
Tabla 3. Contenido de mercurio en dispositivos médicos

Dispositivo	Cantidad aproximada de mercurio
Termómetros clínicos	0.5g – 1.5g
Termómetros de laboratorio	3g – 4g
Tensiómetros de pared y unidades portátiles	110g – 100g
Maloney o Hurst Bougies (Dilatadores esofágicos)	Un tubo puede llegar a contener 1.361g de mercurio
Tubos Cantor	54g – 136g
Tubo Miller Abbott	136g
Tubo Dennis	136g
Catéter Foley	68g

Nota: Tomado de Karliner y Harvie, 2007.

La transición hacia equipos alternativos libres de mercurio se ha dado de forma paulatina en centros de salud, precios similares a los equipos convencionales, además de cumplir con la funcionalidad requerida, Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de diferentes alternativas para termómetros libres de Hg.

Instrumento	Rango °C	Incertidumbre	Fuente de energía	Desventaja	Imagen
Termómetro Digital	32 - 44	±0.1	Batería	Necesita ser calibrado	
Termómetro Timpánico (infrarrojo)	34 – 42	±0.2	Batería	Costo elevado,	
Termómetros desechables	35 - 40	±0.5	No requiere suministro energético	Alto costo, baja sensibilidad.	
Termómetro de mercurio	35 - 42	±0.1	No requiere suministro energético	Potencialmente tóxico	

Nota: Modificado de Global village of Beijing, 2007.

Las alternativas a instrumentos con mercurio de centros de salud ofrecen una amplia variedad, sin embargo, la inversión que se debe realizar para su remplazo es grande, lo que conlleva a una sustitución en forma paulatina, para poder cumplir con los requerimientos restrictivos sobre el uso de mercurio.

Nuestro trabajo se enfoca en la elaboración de un Análisis de Ciclo de Vida en la etapa de disposición del mercurio proveniente de termómetros de centros de salud, para estimar de forma cuantitativa el impacto ambiental que conlleva.

Capítulo 2. Análisis del Ciclo de Vida.

2.1. Historia del ACV

La metodología del análisis de ciclo de vida reconocido con el acrónimo, ACV, es un procedimiento analítico que estudia los aspectos ambientales, así como los impactos a lo largo de las etapas de vida de un producto o alguna actividad; es decir considera toda su historia, desde un origen como materia prima hasta su disposición final como residuo, de la cuna a la tumba (Garraín, 2009).

El desarrollo del ACV se originó casi simultáneamente en Estados Unidos y Europa. El primer ACV fue realizado en 1969 por el *Midwest Research Institute* (MRI) para The Coca-Cola Company, donde el objetivo principal fue disminuir el consumo de recursos y en consecuencia disminuir la cantidad de emisiones al ambiente. Los estudios continuaron durante los años setenta, y grupos como *Franklin Associates Ltd.* Junto con la MRI realizaron más de 60 análisis usando métodos de balance de entradas/salidas e incorporando cálculos de energía (Curran, 1993).

En las décadas de 1970 y 1990, se desarrollaron diferentes formas de aplicar el ACV, y fue empleado por diferentes organizaciones, obteniendo resultados diferentes incluso cuando el objetivo del estudio era el mismo. La *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC); es la principal organización que ha desarrollado y liderado las discusiones científicas acerca del ACV. En 1993, formuló el primer código internacional de prácticas para el ACV (*Code of Practice for Life Cycle Assessment*), con el fin de homogeneizar los diversos estudios realizados para estandarizar la metodología (Rodríguez, 2003). En 1994 la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) apoyo el desarrollo de una estructura de trabajo, para uniformizar métodos, procedimientos y terminologías (Curran, 1993).

2.2. Norma ISO 14000

La Organización Internacional para la Estandarización o “International Organization for Standardization” (ISO), es una organización internacional no gubernamental, compuesta por representantes de los Organismos de Normalización (ONs) nacionales, que produce normas internacionales industriales y comerciales. Estas normas se conocen como ISO y su finalidad es la de coordinar las normativas nacionales, con el propósito de contribuir con la generación de estándares comunes para el desarrollo y transferencia de tecnologías (Uribe y Bejarano, 2013).

La ISO 14000 es una norma internacional voluntaria para la gestión medioambiental, lo que alude a la responsabilidad que tienen los directivos de una corporación, para fijar objetivos medibles, los cuales deberán considerar la condición actual a fin de señalar las estrategias a emplear para conseguir estos objetivos (Clements y Senlle, 1997).

La ISO 14040 es un primer intento de desarrollo de una metodología para la evaluación del ciclo de vida, como un procedimiento estandarizado para la evaluación de sus impactos medioambientales en el sector productivo.

De esta manera, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es un método analítico que permite identificar, cuantificar y caracterizar de forma sistemática las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, así como el uso de materia y energía como las emisiones al entorno, para poder determinar su impacto ambiental potencial, con el fin de generar estrategias de mejora, que permitan gestionar de manera adecuada los residuos, y emisiones generados sin comprometer la productividad del proceso (Rodríguez, 2003).

Un ACV presenta un enfoque sistémico, siendo que la totalidad de las partes de un sistema no pueden ser analizadas en forma individual, sino que es necesario el estudio en conjunto de todos los elementos del sistema (Olivera, et al; 2016).

El ACV abarca el ciclo completo del producto, proceso o actividad, siendo considerado un estudio “de la cuna a la tumba” (como se citó en Ramírez, et al; 2014), es decir, que reconoce todas las etapas de la vida de un producto, servicio, o proceso. Las etapas pueden ser por ejemplo la extracción de materiales, proceso de transformación, distribución, uso y disposición final de residuos.

El análisis de ciclo de vida está estructurado en cuatro fases (Figura 6). Definición de objetivos y alcance del estudio: Incluye tanto la definición exacta del sistema a estudiar, como las siguientes etapas (ISO 14040:2006).

- Alcance y objetivos: define la profundidad que tendrá el estudio, así como sus limitantes.
- Análisis de inventario: La alimentación de los datos de las entradas y salidas de materiales y energía del sistema de estudio definido (ISO 14040:2006).
- Evaluación de impacto: Identificación, caracterización y cuantificación de los efectos sobre el medio ambiente del sistema estudiado (ISO 14040:2006).
- Interpretación de los resultados: Se identifican los puntos significativos basados en los resultados obtenidos en la fase interior, verificando su integridad, sensibilidad y coherencia. Además, se añaden las conclusiones del estudio, así como sus limitaciones y recomendaciones, resaltando que un ACV no predice impactos ambientales de forma precisa, sino que identifica los impactos ambientales potenciales. (ISO 14040:2006).

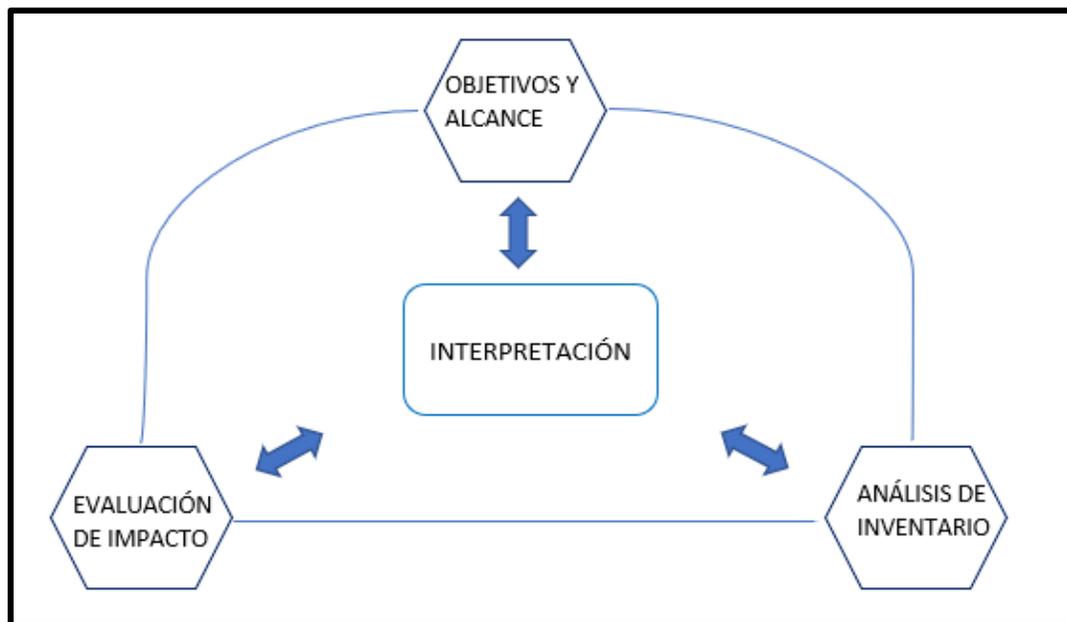


Figura 6. Esquema gráfico de las etapas en un ACV (Garraín, 2009).

El ACV, realizado de acuerdo con lo estipulado en la serie de normas ISO 14040, es una herramienta de gestión ambiental que proporciona una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones adecuadas que podrían plantearse sobre el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes, generando un mejor desempeño ambiental.

Con el paso del tiempo han surgido herramientas tecnológicas basadas en la metodología de ACV, con el propósito de facilitar el cálculo. En su mayoría estos programas cuentan con una base de datos, (Tabla 5) para realizar los cálculos, obteniéndose resultados para las diferentes categorías de impacto seleccionadas.

Tabla 5. Principales herramientas utilizadas en la elaboración de ACV.

Software	Compañía	País	Observaciones
Gabi	Stuttgart University	Germany	En contraste son las herramientas clásicas de ACV, este programa ofrece además un análisis económico.

Simapro	Pré-consultants	The Netherlands	Comparara y analiza complejos productos descomponiéndolos en todos sus materiales y procesos.
Boustead	Bousted Consulting	United Kingdom	Aplicación industria química, plásticos, acero.
LCAit	Chalmers Industritenik	Sweden	Balance de energía y materiales. Aplicación principal en el sector de envases y productos de papel.
Euklid	Frauenhofer - Institut	Germany	Productos industriales.
KCL ECO	Finnish Pulp and Paper Research Institute	Finland	Industria papelera.
WISARD	Pricewaterhouse Coopers	France	Análisis del impacto económico y ambiental del residuo sólido municipal.
Umberto	Ifeu-Institut	Germany	Preparación de ACV, ecobalances empresariales.
Team	Ecobilan	France	Muy completo, su base de datos incluye más de 500 módulos de diferentes sectores.

Fuente: Tomado de Antón Vallejo, 2004.

En su mayoría, estos programas cuentan con una base de datos incorporada, lo que proporciona de cierta manera una documentación actualizada dependiendo del escenario que se desee evaluar y los parámetros que se alimenten al software. Por lo que la ejecución de la metodología es realizada de una manera sistemática, obteniendo resultados, así como su análisis de acuerdo con las diferentes categorías de impacto que se desean analizar.

2.3. Marco de referencia metodológico para un ACV de acuerdo con los estándares ISO.

2.3.1. Definición del alcance y unidad funcional

La unidad funcional, así como el alcance, son vitales a la hora de llevar a cabo un ACV, por lo que es importante definir de una forma escrupulosa cada una. La unidad funcional es concretamente la utilidad que tiene el producto o servicio que se está analizando, y el alcance define la profundidad que tendrá el estudio (Benveniste, et al., 2011).

El alcance de un proyecto debe expresar que incluye y que no incluye el proyecto. Los aspectos más críticos son la selección de la tecnología, suministros de energía, transporte, y selección de materias primas.

Dentro del alcance deben formularse los límites del sistema, suposiciones, así como la región geográfica sobre la que se realiza el estudio.

La unidad funcional como se mencionó anteriormente, es la medida del flujo de referencia al que son alusivos los demás flujos de materia en el sistema, lo que permite una posterior comparación con otros sistemas, es importante resaltar que la selección de una adecuada unidad de medida para el producto o servicio es importante, por ejemplo si realizamos el ACV de un envase de vidrio de una gaseosa, se puede establecer como unidad funcional el peso de los envases de bebidas, sin embargo, no sería una unidad adecuada, debido a que un envase de vidrio tiene una mayor densidad que uno de plástico, lo que ocasionara un problema al compararlos.

2.3.2. Consulta de datos de entrada (análisis de inventario)

Esta es la etapa cuantitativa del proceso, en la cual se obtiene una lista de las cantidades de materiales, energía requerida, emisiones de aire, tierra y agua perteneciente al sistema estudiado. Dichos procesos pueden abarcar varias etapas

Figura 7, la extracción de materia primas, que cuantifican los requerimientos para la obtención de materiales de origen mineral, animal o vegetal, el proceso de fabricación de un producto, la distribución de éste, el consumo y finalmente su etapa de disposición.

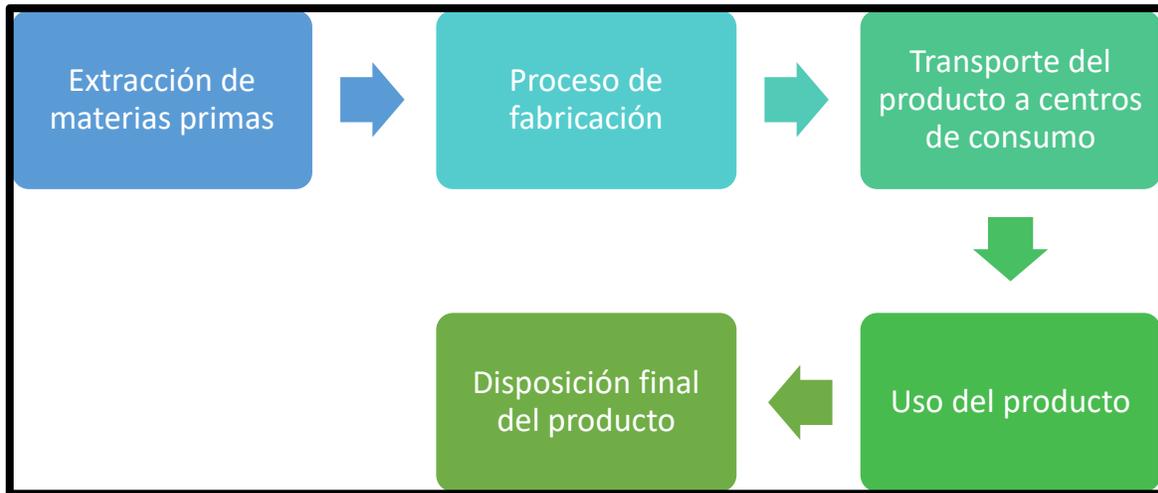


Figura 7. Etapas generales de un bien de consumo, elaboración propia.

En esta fase se asigna una carga ambiental, a las diferentes corrientes de proceso con las cuales se tenga interacción. Es decir, el balance es descrito sobre los flujos de alimentación. Cada flujo de masa en el proceso (kg/s) lleva asociado un eco-vector \mathbf{v}_m cuyos elementos se expresan en masa (kg contaminante por kg de producto) o energía (kJ/kg), para cargas no medibles en unidades de masa como radiación o intensidad acústica (W/m^2). En cada caso de debe expresar en unidades que puedan ser acumuladas y con las cuales se pueda realizar un balance.

$$\mathbf{v}_m [=] \begin{bmatrix} (kg/kg) (CA/kg) \\ \text{Materia prima renovable} \\ \text{Materia prima no renovable} \\ \text{Emisiones a la atmósfera} \\ \text{Vertidos líquidos} \\ \text{Residuos Sólidos} \\ \text{Radiación} \\ \text{Otros impactos ambientales} \end{bmatrix}$$

Fuente: Tomado de Antón Vallejo, 2004

El producto del flujo de masa (FM) expresado en (kg/s) de un proceso por su vector correspondiente v_m proporciona la cantidad de contaminante P en (kg/s) o (CA/s). La cantidad (CA/s) indica la Carga Ambiental por unidad de tiempo en unidades de masa.

Ecuación 1. Flujo de contaminante, masa.

$$FM \cdot v_m = P$$

Análogamente, cada flujo de energía Joules/segundo o watts (J/s ó W) lleva asociado un eco-vector energía v_ϵ correspondiente, cuyos elementos se expresan en masa (kg de contaminante por kj) como en el caso del eco-vector de masa.

El eco-vector de energía v_ϵ , presenta contribuciones análogas a los del eco-vector de masa, de acuerdo con la siguiente definición (Antón Vallejo, 2004):

$$v_\epsilon [=] \begin{bmatrix} (kg/kJ) (CA/kJ) \\ \text{Materia prima renovable} \\ \text{Materia prima no renovable} \\ \text{Emisiones a la atmósfera} \\ \text{Vertidos líquidos} \\ \text{Residuos Sólidos} \\ \text{Radiación} \\ \text{Otros impactos ambientales} \end{bmatrix}$$

Del producto del flujo de energía E (kW) por el vector v_ϵ , resulta el flujo de contaminantes, el vector P (kg/s) o (CA/s), generado en la producción de energía.

Ecuación 2. Flujo de contaminante, energía (Antón Vallejo, 2004).

$$E \cdot v_\epsilon = P$$

Estas expresiones, indican que la carga ambiental de las corrientes de masa y energía pueden ser tratadas en conjunto, puesto que el producto de un flujo por su correspondiente eco-vector, es siempre el flujo de contaminante P expresado en (kg/s) o (CA/s).

Cada corriente de entrada al sistema lleva asociado un eco-vector y su contenido es distribuido entre las corrientes de salida del sistema. El balance de cada uno de

los flujos de contaminante a la salida de proceso debe ser igual a la cantidad de contaminante de las corrientes de entrada más las que se generan en el mismo proceso.

De esta manera, la Figura 8, representa una esquematización general del inventario o balance de carga ambiental de un proceso o producto. Se realiza el balance de materia y energía, segmentando el proceso en unidades o subsistemas y en cada uno de ellos se plantea y resuelve el sistema de ecuaciones que permite calcular los eco-vectores de las corrientes de salida. Por lo que la resolución brinda un conocimiento detallado de la procedencia de la contaminación que se adjudica a cada producto.

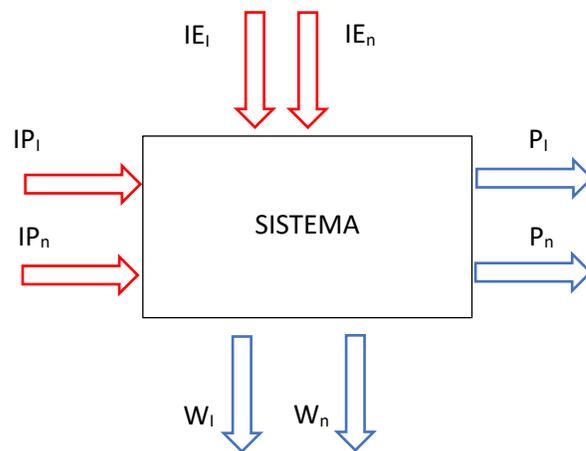


Figura 8. Esquematización de un sistema genérico.

Entendiendo que IP_i son las entradas o flujos másicos donde $i=1$ hasta n , IE_i corresponden a los flujos energéticos, P_i son las corrientes de salida, W_i corresponde a los residuos y $v_{m,\epsilon}$ corresponden a los eco-vectores másico y energéticos de las corrientes.

Ecuación 3. Balance General (Antón Vallejo, 2004).

$$\sum_{i=1}^n IP_i v_{m_{IP_i}} + \sum_{i=1}^n IE_i v_{e_{IE_i}} - \sum_{i=1}^n W_i v_{e_{W_i}} = \sum_{i=1}^n P_i v_{e_{P_i}}$$

Algunos factores que deben tomarse en cuenta para la selección de los datos tienen como condicionantes aspectos tales como: la ubicación geográfica, la tecnología usada en un determinado proceso, tiempo de vigencia, etc. Estos indicadores son entonces de vital importancia para ejercer una interpretación acertada de los resultados del análisis del ciclo de vida.

2.3.3. Planteamiento del flujo de proceso

Para realizar un análisis de ciclo de vida, es necesario contar con los datos que especifiquen todas las entradas y salidas (materia y energía) de un proceso específico (ISO14040:2006). Para todos los procesos es necesario considerar todas las entradas respecto a los materiales, energía, así como emisiones.

a) Materias primas + aditivos; por definición las materias primas son aquellos componentes que se transforman para luego convertirse en bienes de consumo (ISO14040:2006).

b) Energía; es necesario determinar la cantidad de energía que necesita el sistema para poder operar, además de considerar el tipo de insumo energético (vapor, electricidad, etc.)

c) Auxiliares; son todos aquellos materiales que son necesarios en el proceso de transformación, pero no forman parte del producto final (catalizadores, (ISO14040:2006).

d) Residuos sólidos; en este caso, es pertinente contar con información bibliográfica de la cantidad detallada de este tipo de residuos, dependiendo del alcance del proyecto se pueden tomar en consideración los residuos provenientes del proceso de fabricación, o tomar solo en cuenta los residuos al final de la vida útil del producto (ISO14040:2006).

e) Efluentes líquidos; de manera análoga a los residuos sólidos, es necesario contar con información sobre las corrientes líquidas residuales, es importante tener en

cuenta datos como la concentración y sitios de descarga para estos efluentes (ISO14040:2006).

f) Emisiones; nuevamente es importante poseer información detallada sobre las cantidades y el tipo de emisión. En la mayoría de las ocasiones, las emisiones a la atmósfera son resultado de procesos de combustión (ISO14040:2006).

El modelo que se emplea habitualmente para esquematizar el ACV es el árbol de procesos, el cual es un diagrama que resume las diferentes etapas a analizar. En cada una de las secciones del árbol, el producto es sujeto a una transformación (Figura 9). Es importante destacar, que, aunque hoy en día el ACV es una herramienta muy útil y avanzada se fundamenta en estimaciones, sin embargo, la fidelidad de este se verá intrínsecamente relacionada con la confiabilidad de recolección de los datos alimentados del proceso bajo estudio (Hoof, 2000).

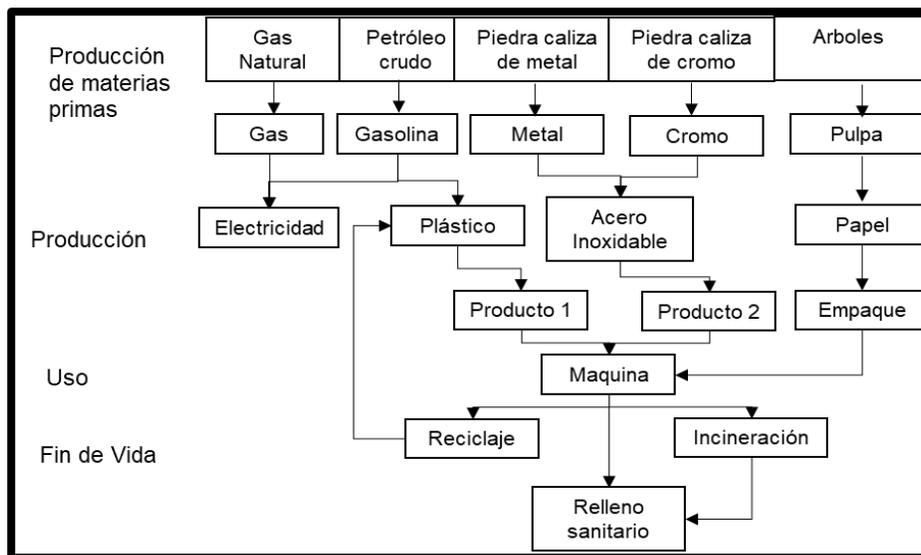


Figura 9. Ejemplo de un diagrama de Árbol de procesos. (Hoof B., 2000).

La fidelidad de los resultados tiene una gran influencia en un patrón de producción, consumo y disposición de algún producto, por lo que es indispensable la credibilidad de los estudios. Es común que no existan datos para todas las entradas y salidas para un determinado proceso, en este tipo de casos lo habitual es tomar algún proceso similar o equivalente y someterlo a un minucioso análisis para determinar

si es factible usar datos de procesos similares (Sánchez C., 2012). Por ejemplo, si no se cuenta con datos para un intercambiador de placas se podría usar datos de un intercambiador de tubos y coraza.

2.3.4. Evaluación de impactos

La etapa de evaluación de impacto de un ACV tiene como objetivo evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales. De manera general esta etapa implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos y con los eco-indicadores de esas categorías.

De esta manera es posible realizar el cálculo de los parámetros que contribuyen al impacto ambiental en cada una de las fases del proceso, de este modo evaluando cada uno de dichos impactos y su afectación al ambiente.

Las emisiones al ambiente están relacionadas con los impactos que generan *endpoints* (Figura 10), sin embargo, existe una categoría intermedia *midpoints*, estas categorías se encuentran más cercanas a las emisiones generadas, lo que permite estudiar de mejor manera el efecto que tienen. En cambio, las categorías de impacto finales están relacionadas de forma directa con el daño que generan a la sociedad, lo que le da una mayor relevancia a nivel global. Finalmente, las áreas de protección están relacionadas al sector que es necesario cuidar para evitar afectaciones (Antón Vallejo, 2004).

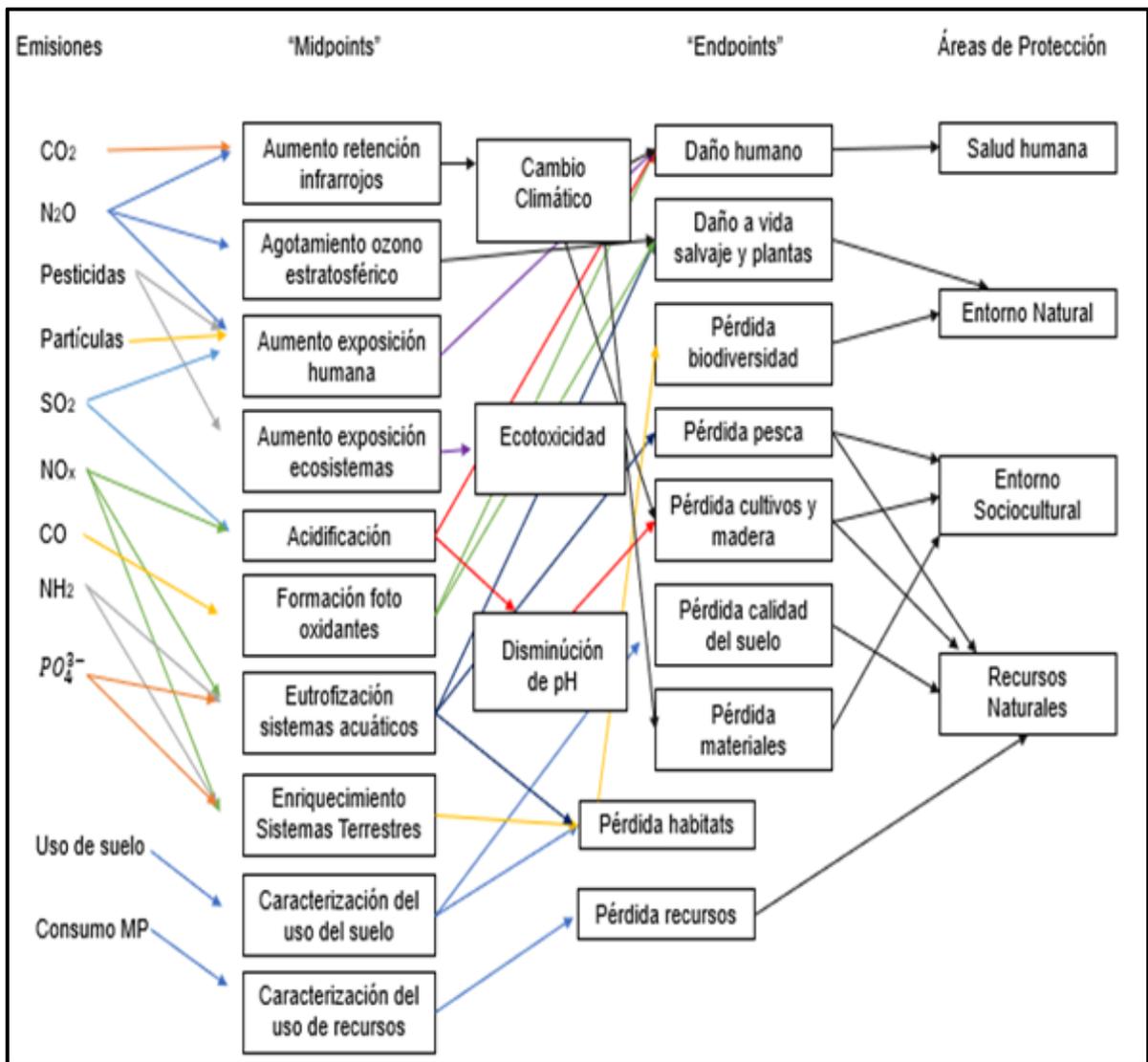


Figura 10. Relación entre emisiones al ambiente, impactos de efectos intermedios, finales y áreas de protección, modificado de (Antón Vallejo, 2004).

2.3.5. Interpretación

La interpretación es la fase final, en la que se analizan los resultados obtenidos de los datos del inventario con las evaluaciones de impacto en las etapas de proceso. De esta manera, es posible llegar a conclusiones sobre el proceso desarrollado, con objeto de lograr una buena toma de decisiones, permitiendo determinar la fase del ciclo de vida en la cual, se producen las principales cargas ambientales.

La interpretación debe tener en cuenta que los resultados obtenidos están basados en un enfoque relativo debido a que depende directamente de la calidad de los datos, por lo que no refleja impactos reales, si no potenciales.

2.4. Ejemplos de aplicación de ACV

La metodología de análisis de ciclo de vida ha sido aplicada por varios años a diferentes objetivos de estudio, Tabla 6, de acuerdo con las necesidades para determinar los impactos ambientales provocados debido a diferentes actividades y productos

Tabla 6. Estudios representativos del Análisis de Ciclo de vida.

Objeto de estudio	Ejemplo de estudio	Referencia
Planeación	<i>The application of life cycle assessment to process optimization.</i> (La aplicación del análisis de ciclo de vida para la optimización de procesos.)	Azapagic, y Clift, 1999
Proceso	<i>Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel.</i> (Análisis de ciclo de vida de varios sistemas de cultivo utilizados para producir biocombustibles: bioetanol y biodiesel.)	Kim y Dale, 2005

Construcción	<i>Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification.</i> (Análisis de ciclo de vida en edificios: metodología ACV avanzada y simplificada como complemento para la certificación de edificios.)	Bribián, Usón y Scarpellini, 2009
Disposición final	<i>Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration.</i> (Análisis de ciclo de vida (ACV) de las estrategias de gestión de residuos: vertederos, plantas de clasificación e incineración.)	Cherubini, Bargigli y Ulgiati, 2009
Producto	Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas	Benveniste, et al., 2011
Servicios	<i>Restaurant and food service life cycle assessment and development of a sustainability standard</i> (Análisis de ciclo de vida del servicio de restaurantes y alimentos y desarrollo de un estándar de sostenibilidad.)	Baldwin, Wilberforce, y Kapur, 2011

Debido a los resultados que se obtienen de un ACV, es conveniente aplicar este estudio para facilitar y fundamentar tomas de decisiones, con el fin de que estas ofrezcan soluciones considerando la parte ambiental y en algunos casos económica. Debido al interés generalizado en materia ambiental, desarrollar esta clase de estudios, podrá formar parte integral del desarrollo de proyectos.

Capítulo 3. Metodología

Como se describió en el Capítulo 2, un ACV se divide en diferentes etapas en cumplimiento con la norma ISO 14040:2006; la cual establece la metodología de evaluación ambiental permitiendo cuantificar impactos ambientales potenciales de un producto o servicio a lo largo de las diferentes fases de su existencia.

Con el fin de desarrollar de forma clara y apropiada este trabajo, se tomó la decisión de desarrollar la metodología en cinco etapas, las cuales se presentan esquemáticamente en el siguiente diagrama.

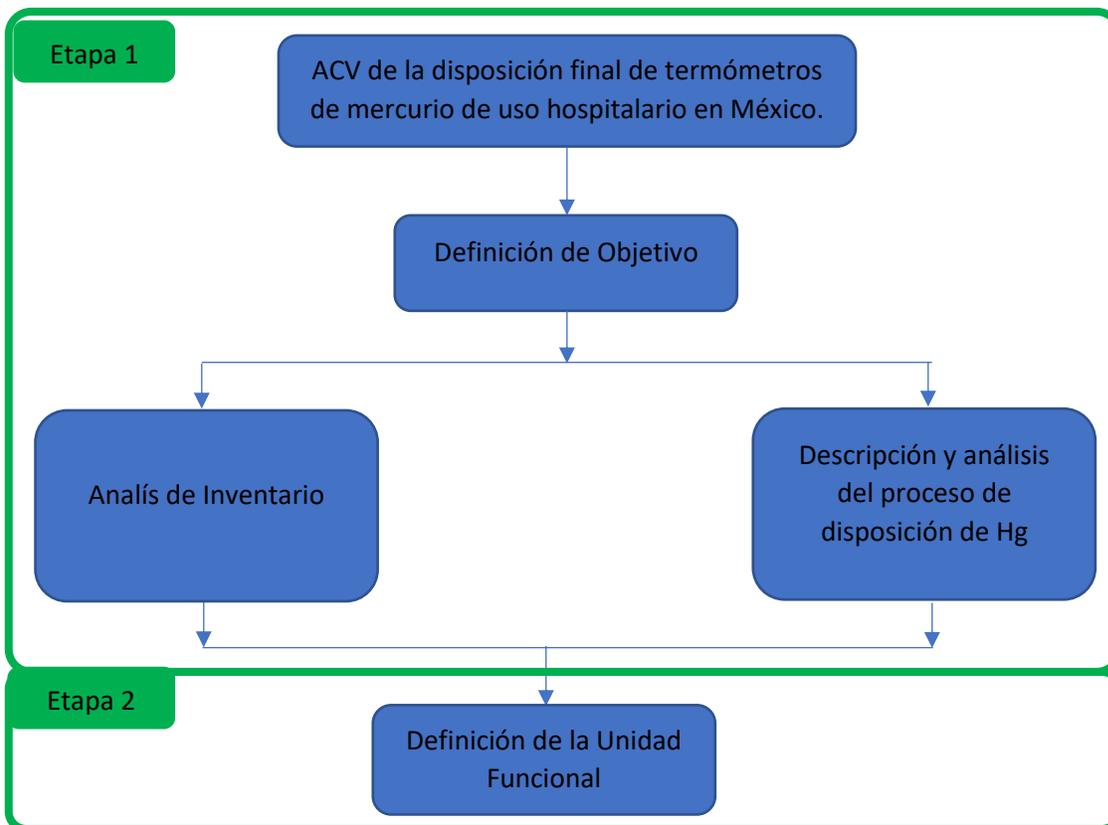


Figura 11. Metodología del ACV de la disposición final de termómetros de mercurio de uso hospitalario en México.

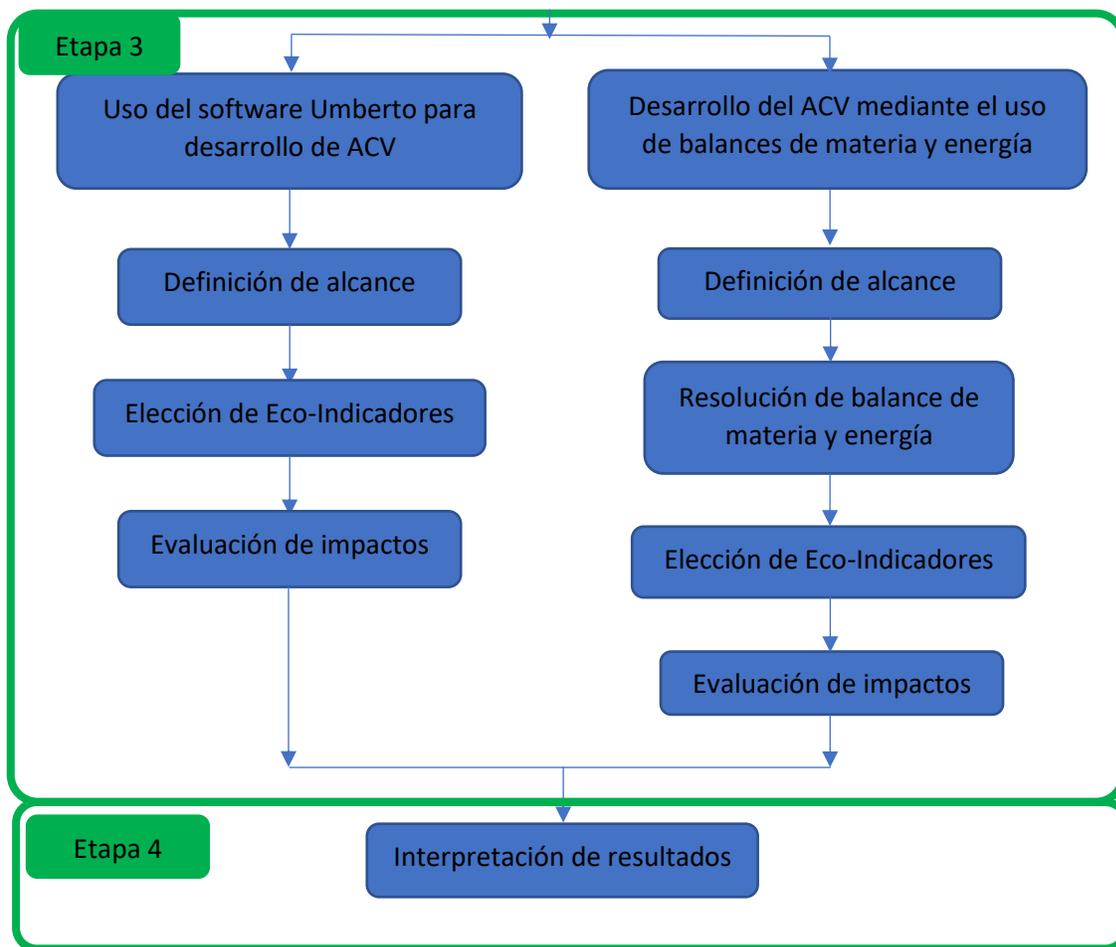


Figura 11. Continuación.

La Etapa 1, consistió en la definición de los objetivos del estudio del ACV.

- Determinar los posibles impactos ambientales producidos en la etapa final de disposición del mercurio de los termómetros clínicos de la Ciudad de México.
- Elaborar dos casos que contrasten de forma representativa los impactos entre el escenario actual y uno que contemple el reciclaje de Hg.
- Comparar los resultados del ACV en etapas específicas, obtenidas a partir de diferentes herramientas; una mediante el uso de un software especializado y la otra mediante el planteamiento de los balances de materia y energía correspondientes.

Una vez establecidos los objetivos, se procedió a recabar la información disponible para analizar el inventario de datos que permitiera establecer los escenarios a estudiar.

Se recabó toda la información disponible en fuentes oficiales (gubernamentales y reportes hospitalarios) de México sobre la cantidad de termómetros de mercurio usados en el sector salud, que concentran los datos sobre la problemática de la liberación del Hg (Tabla 7), para poder generar un diagrama de flujo sobre la disposición final de este, cuya representación se basó en un modelo que permitiera analizar gráficamente las diferentes rutas que siguen los residuos de mercurio hasta su último destino.

Tabla 7. Fuentes consultadas para establecer el flujo de materiales en el ACV de termómetros de hospitales en México.

Dato Reportado	Referencia
Hg de termómetros rotos y sustituidos	INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 134)
Emisión directa al aire	INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133) PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.
Envío a reciclaje	INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133) PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.
Disposición final de residuos	INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133) PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.

<p>Confinamiento como residuos peligrosos</p>	<p>INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133)</p> <p>SGPA. 2011. Integración y actualización del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos (INGRP) en México. SEMARNAT</p> <p>PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.</p>
<p>Disposición como sólido-urbano</p>	<p>INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133)</p> <p>SGPA. 2011. Integración y actualización del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos (INGRP) en México. SEMARNAT</p> <p>PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.</p>
<p>Disposición en relleno sanitario</p>	<p>Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2006. Número de instalaciones y capacidad de disposición de residuos sólidos urbanos: 1999 a 2006, DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales, México.</p>
<p>Disposición en sitio no controlado</p>	<p>Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2006. Número de instalaciones y capacidad de disposición de residuos sólidos urbanos: 1999 a 2006, DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales, México.</p>

Una vez revisada y analizada la información existente, se definieron los factores de distribución de las emisiones de mercurio identificadas para los flujos del escenario actual los siguientes porcentajes:

- ❖ 10% al aire
- ❖ 15% a confinamiento de residuos peligrosos
- ❖ 60% a residuos
- ❖ 15% en función al tratamiento.

La Etapa 2, consistió en el establecimiento de la Unidad Funcional del estudio; como se mencionó en el Capítulo 2, sección 2.3.1, esta debe describirse y decretarse apropiadamente, para establecer las limitaciones y alcances en la estimación de los impactos ambientales.

La Unidad Funcional fue definida como: La cantidad total de mercurio procedente de termómetros clínicos. El vidrio que compone el cuerpo de los termómetros no fue considerado en los escenarios evaluados.

Una vez definida la Unidad Funcional, se procedió con el desarrollo del ACV (Etapa 3), utilizando el software Umberto® 5.5, el cual contemplaba la base de datos Ecoinvent (U55_ECOINVENT_LIB) para el cálculo y determinación de los impactos ambientales, referentes a cada uno de los escenarios programados.

El alcance se delimitó tomando en cuenta los aspectos de la norma ISO 14041:2006 enunciada en el capítulo 2, sección 2.3.1. Los límites del sistema fueron definidos de tal manera que el balance solo considere la cantidad total de mercurio liberado de los termómetros a nivel nacional; se establecieron como etapas siguientes:

1. Emisiones a la atmósfera,
2. La disposición en un tiradero a cielo abierto
3. Reciclaje
4. Confinamiento como residuo peligroso
5. Disposición en un relleno sanitario.

Las etapas forman en conjunto el escenario de disposición referente al mercurio, se estableció un escenario que representa la gestión actual, así como un escenario en el que podría presentar un reciclaje del 60% del elemento. Los escenarios representan la combinación de dos opciones para las distintas fases de un sistema de gestión (Tabla 8).

Tabla 8. Descripción de escenarios evaluados.

a) Escenario actual:	b) Escenario 60% reciclaje:
10% Emisiones al aire	10% Emisiones al Aire
15% Reciclaje	60% Reciclaje
15% Confinamiento controlado	15% Confinamiento controlado
34% Relleno Sanitario	9% Relleno Sanitario
26% Tiradero	6% Tiradero

Para las diferentes rutas de transporte se designaron las siguientes distancias; el recorrido hacia los sitios de disposición final, tales como, el relleno sanitario para el cual se estableció una longitud de 200 km; así mismo, la distancia al tiradero a cielo abierto fue considerada igual.

Para el caso de confinamiento se debe tomar en cuenta que en México solo hay 3 sitios autorizados para contener residuos peligrosos industriales (Tabla 9); por lo que la distancia promedio para el confinamiento fue definida a 500 km, por su parte, la distancia estimada a la zona de reciclaje se estableció a 400 km.

Tabla 9. Empresas prestadoras de servicios de confinamiento de residuos peligrosos industriales. (SEMARNAT, 2019)

Empresa	Estado	Capacidad (ton/año)
Tecnología Ambiental Especializada, S.A. de C.V.	Coahuila	715,836
Sociedad Ecológica Mexicana del Norte, S.A. de C.V.	Coahuila	541,542
*Residuos Industriales Multiquim, S.A. de C.V.	Nuevo León	660,000

Para la etapa del reciclaje, se consideró un proceso de destilación de etanol de un efluente proveniente de un biorreactor de fermentación de azúcar de remolacha, debido a que, dentro de la base de datos del software, este proceso era el que más se ajustaba a una destilación de mercurio, concretamente debido a que se trataba de una destilación de dos componentes con variables de operación de temperaturas y presiones relativamente bajas. Para su transporte posterior, se contempló el uso de un vehículo terrestre de motor diesel con capacidad de 3.5 a 7.5 toneladas.

Las categorías de impacto relacionadas a la implementación de la metodología pueden ir desde un nivel global, como una contribución al calentamiento global y al agotamiento de la capa de ozono, hasta impactos locales, tales como la formación de smog fotoquímico y lluvia ácida. Las categorías comúnmente estudiadas son:

1. Calentamiento global
2. Agotamiento del ozono estratosférico
3. Acidificación
4. Contaminación fotoquímica
5. Eutrofización

6. Toxicidad humana
7. Ecotoxicidad
8. Agotamiento de los recursos.

A continuación, se presenta una descripción más detallada de cada categoría de impacto, seleccionada y evaluada por el software (Tabla 10).

Tabla 10. Eco-indicadores evaluados con el Software Umberto®.

Eco-Indicador	Unidades de medida
Potencial de Calentamiento Global (GWP)	Emisión de Gases de efecto invernadero al aire: CH ₄ , N ₂ O y CFC. (kg CO ₂ eq)
Potencial de acidificación (AP)	Emisión de sustancias acidificantes al aire, NO _x , NH ₃ y SO ₂ . (kg SO ₂ eq)
Potencial de Eutrofización (EP)	Emisión de nitrógeno en los ambientes continentales y el fósforo en ambientes marinos (kg (PO ₄) ³⁻)
Ecotoxicidad marina (MAETP)	Emisión de compuestos tipo Hg, Cd, Pb, etc., (kg 1,4-DCB-eq)
Toxicidad Humana (HTP)	Emisión de compuestos tipo Dioxina o PBDEs (kg 1-4-DCB-eq).

Modificado de Monteiro y Freire, 2012.

Acrónimos:

Global Warming Potential (GWP)

Acidification Potential (AP)

Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP)

Human Toxicity Potential (HTP)

Eutrophication Potential (EP)

CFCs: Clorofluorocarbonos

1,4-DCB-eq: 1,4-Dichlorobenzene

PBDEs: Polybrominated diphenyl ethers

A sí mismo, en la etapa 3, se desarrollaron las Ecuaciones de Balance de Materia y Energía (EBMyE) con el fin de aplicar la metodología del ACV a dos subsistemas

de flujo de proceso; en específico, la destilación de mercurio y su transporte a un relleno sanitario.

El alcance de estos subsistemas consideró una destilación tipo *flash* (Figura 12), donde la energía requerida para llevar a cabo este proceso unitario fue suministrada por: un calentador a fuego directo, se consideraron dos intercambiadores de calor de doble tubo para enfriar las corrientes de salida del tanque de separación, y un sistema de bombeo con el fin de impulsar el agua de enfriamiento para los enfriadores.

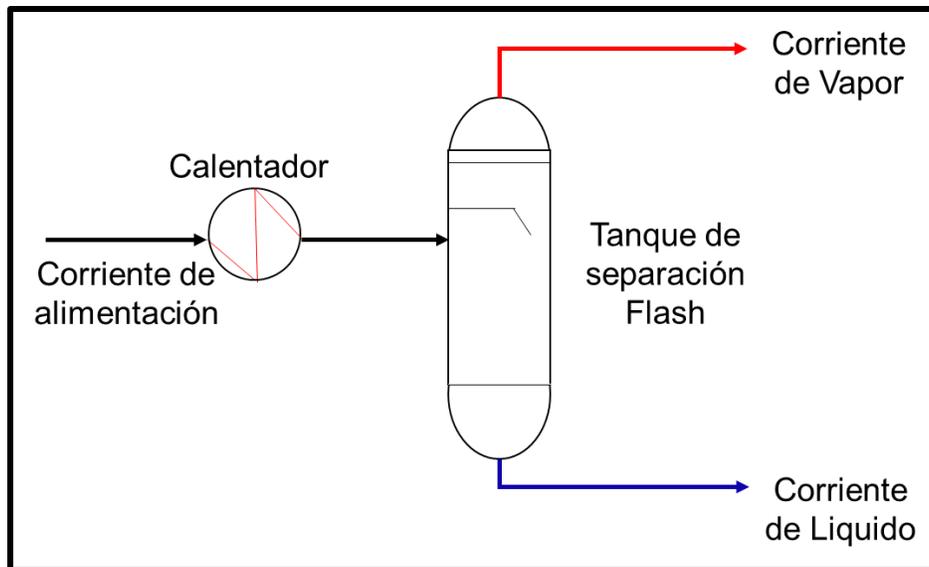


Figura 12. Esquema representativo de un proceso de separación Flash.

Para la corriente de entrada al equipo de destilación se asumió que contenía trazas de agua debido a una posible condensación de humedad ambiental, mientras que, para el subsistema de transporte, se consideró el mismo escenario aplicado en el análisis hecho con el software Umberto®, una distancia de 200 km al relleno sanitario con la diferencia de tomar el transporte terrestre con una capacidad de 16 toneladas, con respecto a los diferentes camiones de carga disponibles de la Ciudad de México.

La resolución de la separación *flash*, se realizó mediante el uso de las ecuaciones de Rachford Rice, debido a que pueden modelar el equilibrio líquido-vapor de una corriente que contenga más de un componente, teniendo como variables de proceso la presión y temperatura (Seader y Henley, 2006).

El balance de energía en el intercambiador y en el tanque *flash* se resolvió mediante la determinación de las cargas térmicas requeridas para cada proceso. En el caso de la bomba, se estimó el consumo eléctrico requerido para impulsar el agua de enfriamiento. Para el balance de materia del autotransporte empleado, se determinaron los litros de diésel necesarios para completar el recorrido hacia el relleno sanitario.

Las cargas ambientales para estos subsistemas se determinaron mediante las emisiones directas de, CH₄, CO₂, NO_x, SO₂, N₂O, m³ de agua requerida y kW de energía consumida por la bomba. Los eco-indicadores empleados se expresan en la Tabla 11.

Tabla 11. Eco-indicadores seleccionados, para el desarrollo del ACV a partir del planteamiento de las ecuaciones transferencia de materia y energía.

Eco-Indicador	Unidades de medida
Potencial de Calentamiento Global (GWP)	Emisión de Gases de efecto invernadero al aire: CH ₄ , N ₂ O y CFC. (kg CO ₂ eq)
Potencial de acidificación (AP)	Emisión de sustancias acidificantes al aire, NO _x , NH ₃ y SO ₂ . (kg SO ₂ eq)
Potencial de Eutroficación (EP)	Emisión de nitrógeno en los ambientes continentales y el fósforo en ambientes marinos (kg (PO ₄) ³⁻)
Toxicidad Humana (HTP)	Emisión de compuestos tipo Dioxina o PBDEs (kg 1-4-DCB-eq).

A diferencia del análisis realizado con el software, no se estimó el Eco-indicador de toxicidad marina debido a que no se cuenta con información necesaria para poder determinar el impacto a partir de las emisiones del proceso.

Finalmente, en la Etapa 4, en esta etapa se llevó a cabo la comparación de los resultados de impactos obtenidos en la Etapa 3, entre el escenario actual (escenario "a") y el escenario que involucra la recuperación de un 60% del elemento contaminante (escenario "b"), posteriormente se realizó la interpretación de los resultados calculados para la etapa de transporte y destilación mediante las ecuaciones de balance de materia y energía con los obtenidos del software del escenario "a", con el fin de cumplir los objetivos propuestos en dicho trabajo.

Capítulo 4. Resultados.

En el capítulo anterior, se ha descrito la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo, en este sentido, se describirán de manera más específica algunos aspectos ya mencionados en el capítulo 3.

4.1. Análisis de Inventario

Como se mencionó anteriormente, el análisis de inventario consistió en la adquisición de los datos de entradas para nuestro sistema (Tabla 12), en dicha tabla, se asignaron los factores de distribución de las emisiones correspondientes a cada flujo del proceso; con los cuales se generó el diagrama general de la disposición final de termómetros de mercurio en México (Figura 13).

Tabla 12. Especificaciones de los flujos provenientes de la base de datos en la disposición final de termómetros de hospitales en México.

Datos Reportados		Referencia
Hg de termómetros rotos y sustituidos	2166 kg de Hg	INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 134)
Emisión directa al aire	216.6 kg de Hg	INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133) PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.
Envío a reciclaje	324.9 kg de Hg	INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133)

		<p>PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.</p>
<p>Disposición final de residuos</p>	<p>1624.5 kg de Hg</p>	<p>INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133)</p> <p>PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.</p>
<p>Confinamiento como residuos peligrosos</p>	<p>324.9 kg de Hg</p>	<p>INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133)</p> <p>SGPA. 2011. Integración y actualización del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos (INGRP) en México. SEMARNAT</p> <p>PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.</p>
<p>Disposición como sólido-urbano</p>	<p>1299.6 kg de Hg</p>	<p>INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT. (pag 133)</p> <p>SGPA. 2011. Integración y actualización del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos (INGRP) en México. SEMARNAT</p>

		PNUMA. 2005. Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de Mercurio. Ginebra, Suiza.
Disposición en relleno sanitario	740.77 kg de Hg	Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2006. Número de instalaciones y capacidad de disposición de residuos sólidos urbanos: 1999 a 2006, DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales, México.
Disposición en sitio no controlado	558.83 kg de Hg	Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2006. Número de instalaciones y capacidad de disposición de residuos sólidos urbanos: 1999 a 2006, DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales, México.

El consumo de termómetros de mercurio en México, como importación neta promedio para el periodo 2002-2007, fue de 3,834,869 unidades por año (Castro, 2011). La cantidad promedio de contenido de Hg es de 0.61 gramos por unidad; el consumo de mercurio se estimó en aproximadamente 2.3 toneladas más la cantidad de Hg contenido en termómetros producidos en México ($64,937 \times 0.61$ gramos = 40 kg), con lo cual se calculó un total aproximado de 2.4 toneladas.

Para realizar este estudio, se consideró lo reportado en el Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio en México sobre la emisión total de mercurio procedente de termómetros clínicos, siendo este valor de 2.166 toneladas para el año 2004.

Las liberaciones de Mercurio derivadas de otros tipos de termómetros (por ejemplo, termómetros para medir temperatura ambiente, termómetros industriales y de

aplicaciones especiales, así como los termómetros de laboratorio), no fueron incluidos debido a la falta de información confiable sobre cada una de las actividades.

Es importante mencionar que estas liberaciones no incluyen emisiones por la producción de termómetros, debido a que no existen datos registrados en México para el 2004. Sin embargo, se cree que estas liberaciones son considerablemente inferiores a las de los termómetros médicos.

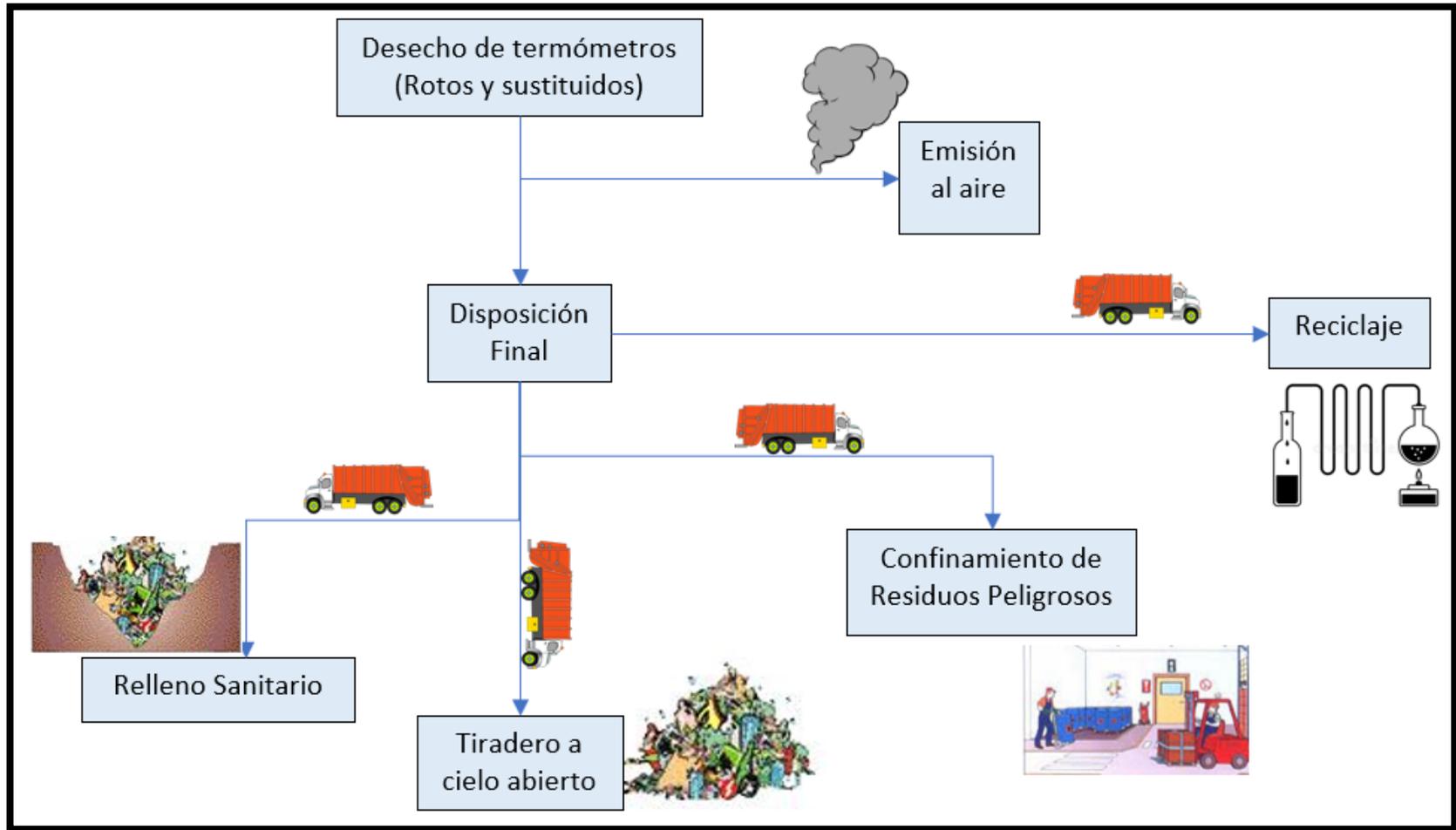


Figura 13. Diagrama de flujo de disposición final de termómetros de mercurio clínicos en México.

4.2. Unidad Funcional

Tomando como base los datos de la Tabla 12, la Unidad Funcional fue definida como: 2166 kg Hg/año de mercurio, procedente de termómetros clínicos. El vidrio compuesto de los termómetros no fue considerado en los escenarios evaluados, esta unidad funcional seleccionada, proporciona una correlación similar a los datos recopilados de la literatura, así como su fácil manejo e interpretación en los balances de salida del proceso.

4.3. Implementación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

4.3.1. Uso del software para desarrollo de ACV.

Como se mencionó anteriormente, Umberto® es una herramienta analítica que permite realizar la evaluación de impactos ambientales, mediante el uso del modelo de flujo, el cual plantea de forma gráfica los insumos tanto de servicios (vapor, agua de enfriamiento, electricidad, etc.) así como la corriente principal que va vinculada de forma directa con la Unidad Funcional definida. Los datos resultantes se pueden presentar en tablas o bien en gráficos de barras que proporcionan información sobre todas las entradas y salidas hacia y desde el entorno, involucradas en el proceso.

A partir de los datos recolectados del inventario, se desarrollaron los casos propuestos para esta etapa. El escenario “a” representa la gestión actual de la disposición final de mercurio, y el escenario “b” evalúa condiciones con una mejor gestión ambiental. La tabla 13, representa los flujos propuestos para los dos casos evaluados, mientras que las Figuras 14 y 15 muestran los flujos másicos que sigue el contaminante antes de llegar a su última etapa de disposición para cada corriente.

Tabla 13. Porcentaje de los flujos evaluados para cada escenario.

a) Escenario actual:	b) Escenario 60% reciclaje:
10% Emisiones al aire	10% Emisiones al Aire
15% Reciclaje	60% Reciclaje
15% Confinamiento controlado	15% Confinamiento controlado
34% Relleno Sanitario	9% Relleno Sanitario
26% Tiradero	6% Tiradero

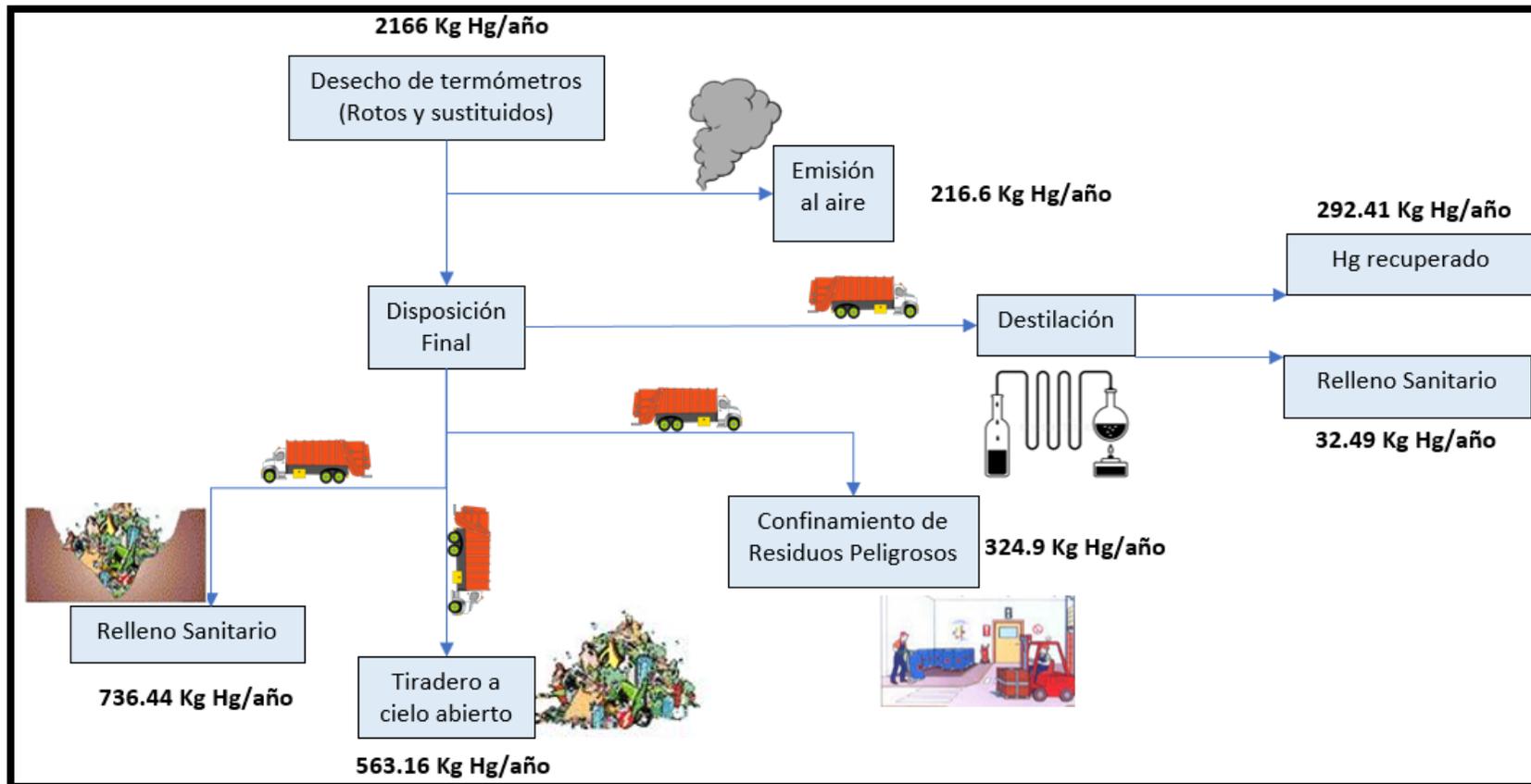


Figura 14. Balance de Materia de la disposición de Hg, escenario “a”.

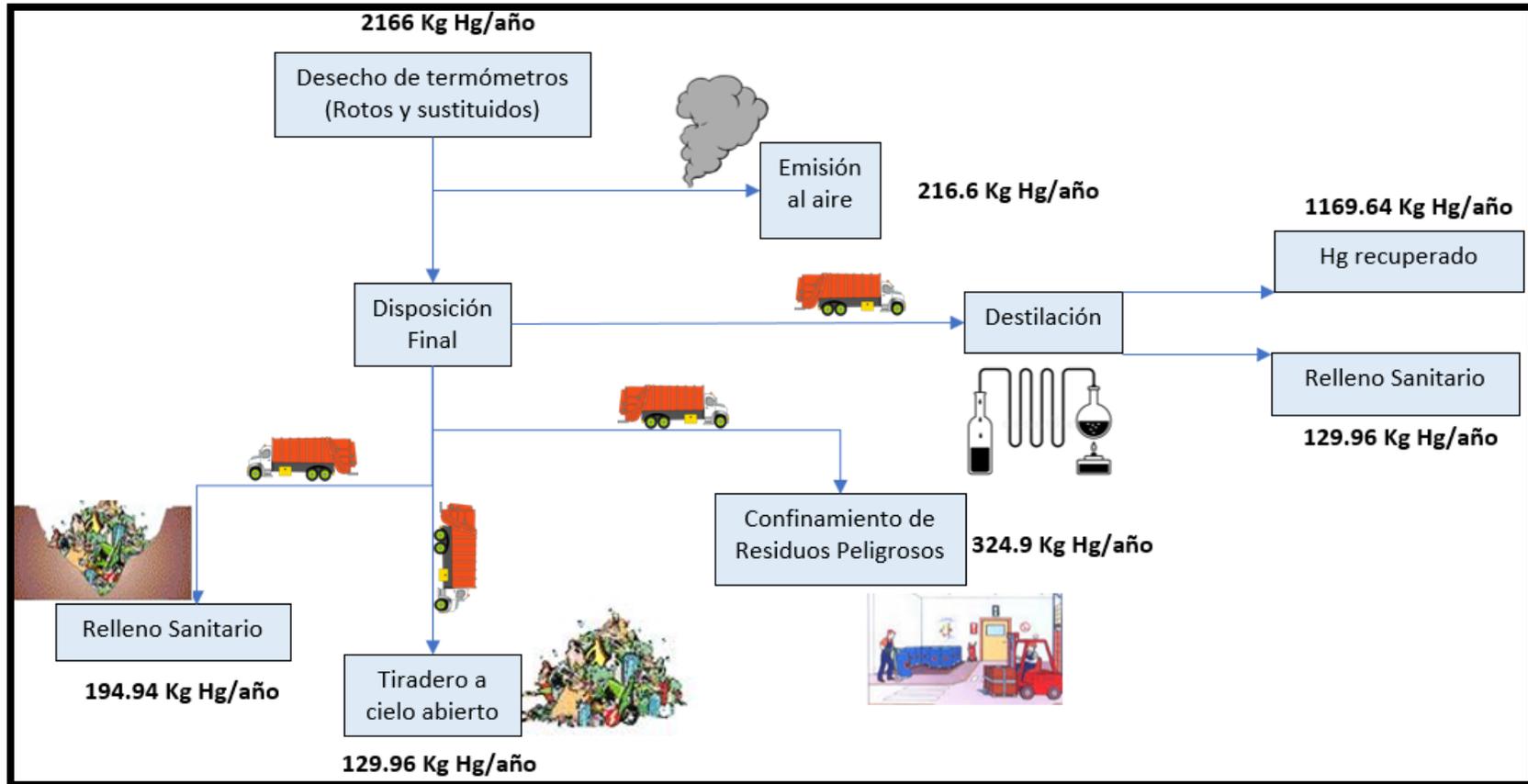


Figura 15. Balance de Materia de la disposición de Hg, escenario “b”.

Las especificaciones del sistema fueron establecidas con base a las limitaciones de la accesibilidad de la información; debido a que existe una restringida cantidad de estudios referentes a termómetros de Hg en México al final de su vida útil. Se consideró que la etapa de reciclaje es llevada a cabo por un proceso de destilación, la base de datos de Umberto® no cuenta con un proceso unitario de destilación de mercurio, por lo que se tomó como proceso representativo, una destilación de etanol, la cual considera variables de proceso más cercanas a las usadas en una destilación de mercurio al considerar presiones bajas y separación de una mezcla de pocos componentes. Otros de las condiciones estipuladas en la base de datos del software fueron:

- El transporte: fue modelado, tomando en cuenta un medio móvil terrestre con capacidad de carga de un rango de 3.5 a 7.5 toneladas, con un motor diésel de cuatro tiempos.
- Para el relleno sanitario se seleccionó de la base de datos el proceso de *Sanitary Landfill* el cual cuenta con las siguientes características; residuos sólidos municipales con un porcentaje de humedad del 22.9%.
- La etapa de destilación fue modelada con una eficiencia de separación de 95% con respecto a la alimentación.
- En el caso del confinamiento de residuos peligrosos, toma el sistema de residuos como un depósito subterráneo con 0% de agua.
- El tiradero a cielo abierto está conformado por una densidad de 1000 kg de residuos por m³ y una profundidad de 20m usando un horno de arco eléctrico de acero de baja aleación para incinerar.

Como se mencionó en el capítulo 3; las distancias asignadas para el relleno sanitario y el tiradero a cielo abierto consideraron una longitud equivalente aproximada de 200 km; mientras que para el confinamiento de residuos peligrosos fue asociada una longitud de 500 km. Finalmente la distancia estimada a la zona de reciclaje fue de 400 km.

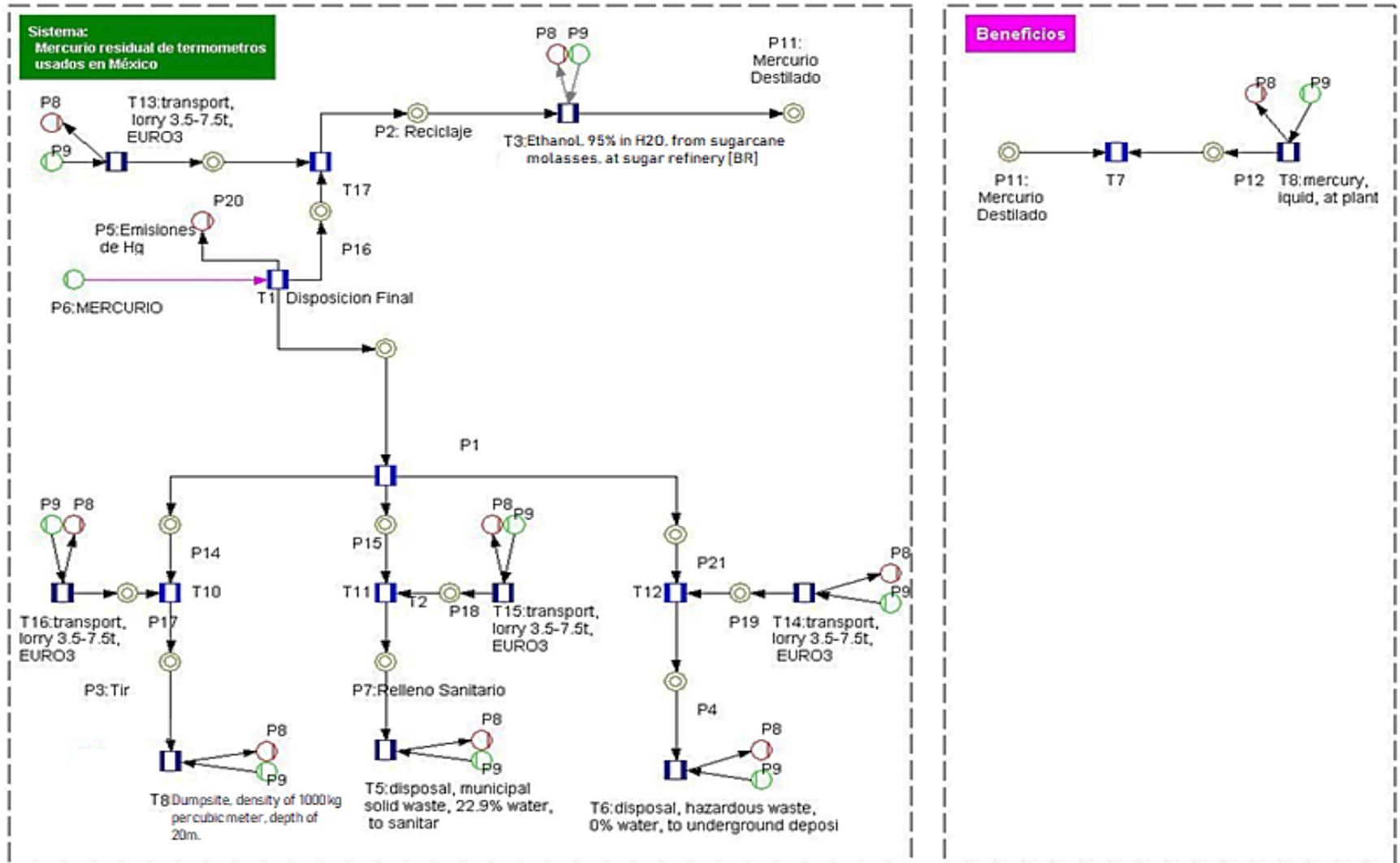


Figura 16. Balance planteado en el software para la disposición final del mercurio de termómetros clínicos.

Una vez que se ingresan los datos de entrada al software (Figura 16), se seleccionaron los eco-indicadores descritos en el capítulo anterior. En la Tabla 14 se presentan los resultados para los escenarios propuestos. Adicionalmente se estimaron los beneficios al considerar que el Hg recuperado del proceso de destilación puede ser reutilizado y de esta manera no es necesaria la extracción de esta misma cantidad a partir de un proceso minero.

Tabla 14. Resultados al balance propuesto para la disposición final del Hg en el Software Umberto®.

Eco-Indicadores		Esc. Base	Esc. Rec. 60%
GWP (kg CO₂eq)	Impacto	1443	1538
	Hg virgen	-4050	-16201
	TOTAL	-2607	-14663
AP (kg SO₂ eq)	Impacto	3	9
	Hg virgen	-29	-115
	TOTAL	-26	-106
EP (kg PO₄ eq)	Impacto	5	15
	Hg virgen	-8	-30
	TOTAL	-3	-15
HTP (kg 1,4-DCB eq)	Impacto	0,19	0,20
	Hg virgen	-0,23	-0,93
	TOTAL	-0.04	-0.73
MAETP (kg 1,4-DCB eq)	Impacto	860	3161
	Hg virgen	-12735	-50939
	TOTAL	-11875	-47778

Para cada una de las gráficas de resultados, los números 1 y 2 representan el escenario base; siendo el número 1 las contribuciones de cada sub-etapa y el número 2, el balance neto para dicho escenario. Los números 3 y 4 representan el

escenario que contempla un 60% en el reciclaje; siendo el número 3 las contribuciones de cada sub-etapa y el número 4 el balance neto del escenario.

Los resultados mostraron que, al considerar solo los impactos directos de cada escenario, el que presenta un mayor efecto, corresponde al que propone una destilación del 60% del mercurio total, sin embargo, al incluir los impactos ambientales que se evitan en el proceso de extracción de minerales para la obtención de Hg, es notorio que recuperar esa cantidad propuesta o incluso tratar de reciclar un mayor porcentaje del flujo de alimentación disminuye el impacto ambiental total de los indicadores propuestos; además, se identificó la etapa de destilación como la más contaminante, esto, debido a los servicios de energía que implica llevar a cabo dicho proceso.

De acuerdo con las gráficas de resultados (Figuras 17-21), la destilación de Hg es el proceso que genera mayores impactos en el sistema, seguido por la disposición en el tiradero a cielo abierto, ya que ambos representan en todos los casos más del 50% de los impactos totales.

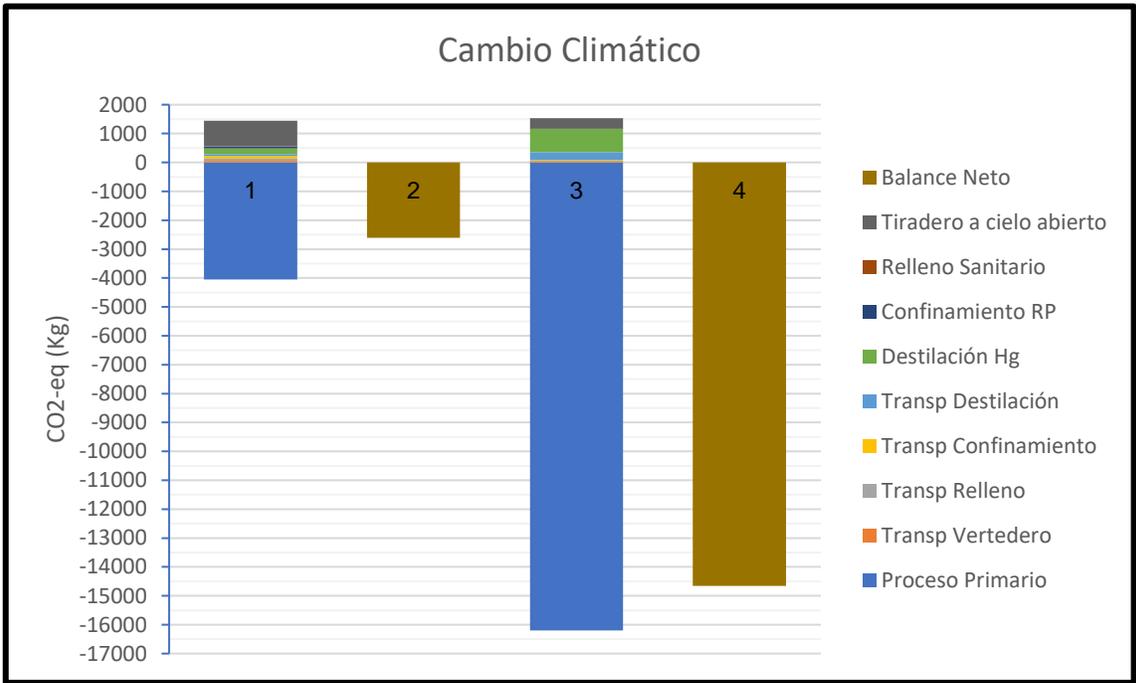


Figura 17. Resultados de impacto, Potencial de Cambio Climático (GWP).

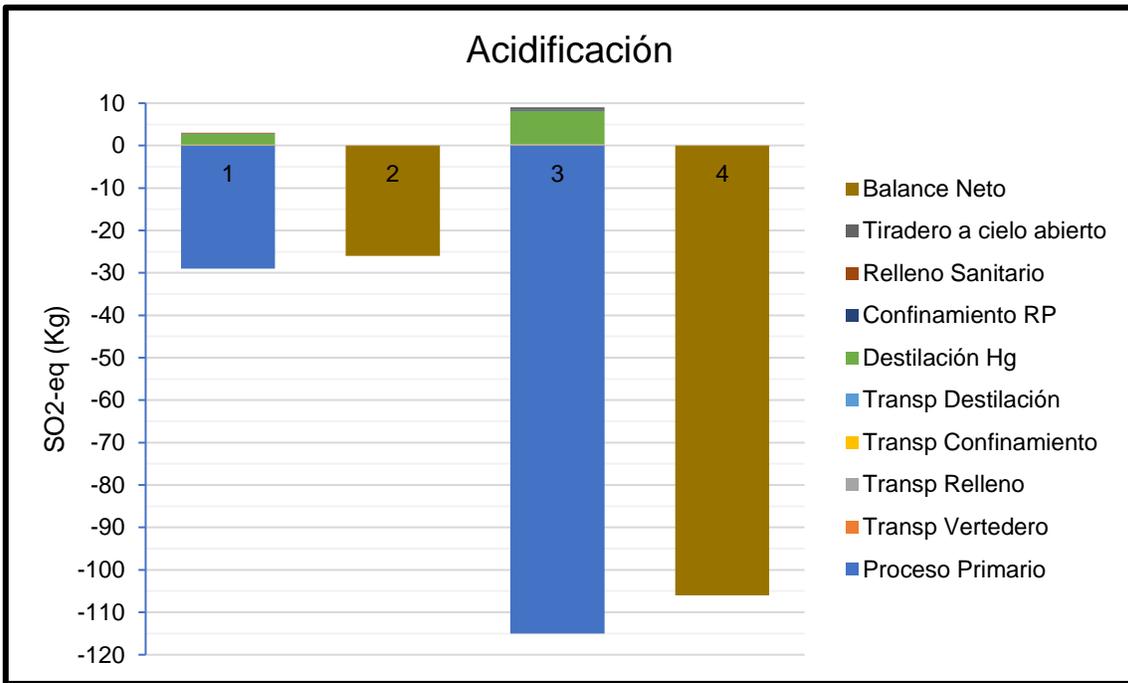


Figura 18. Resultados de impacto, Potencial de Acidificación (AP).

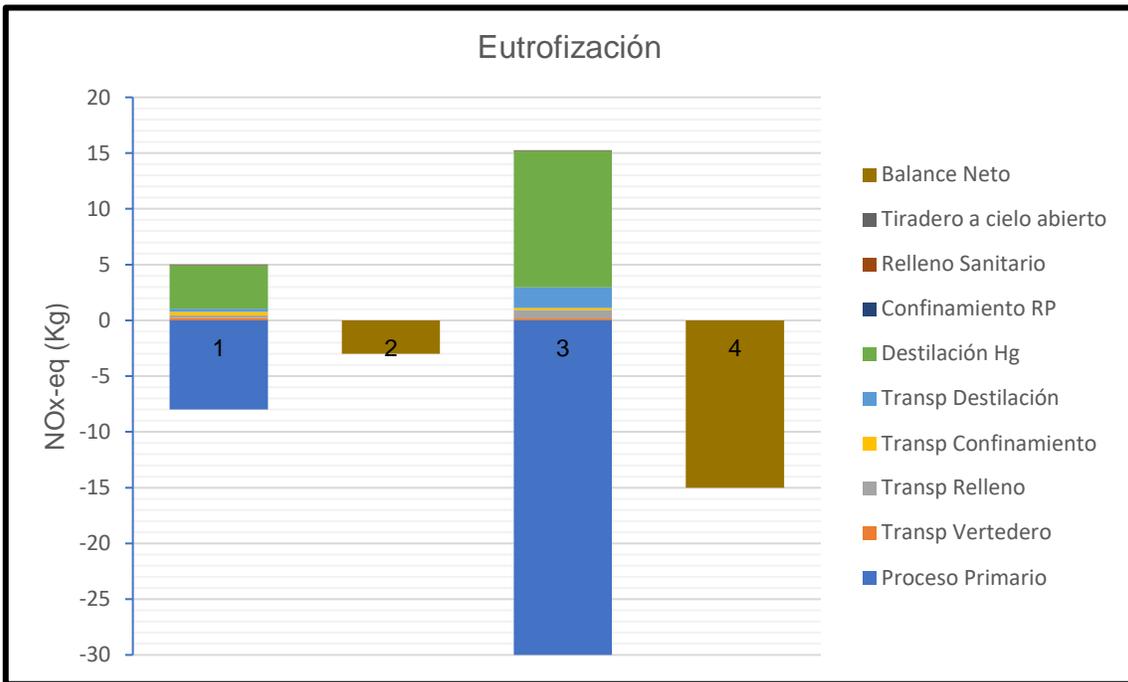


Figura 19. Resultados de impacto, Potencial de Eutrofización (EP).

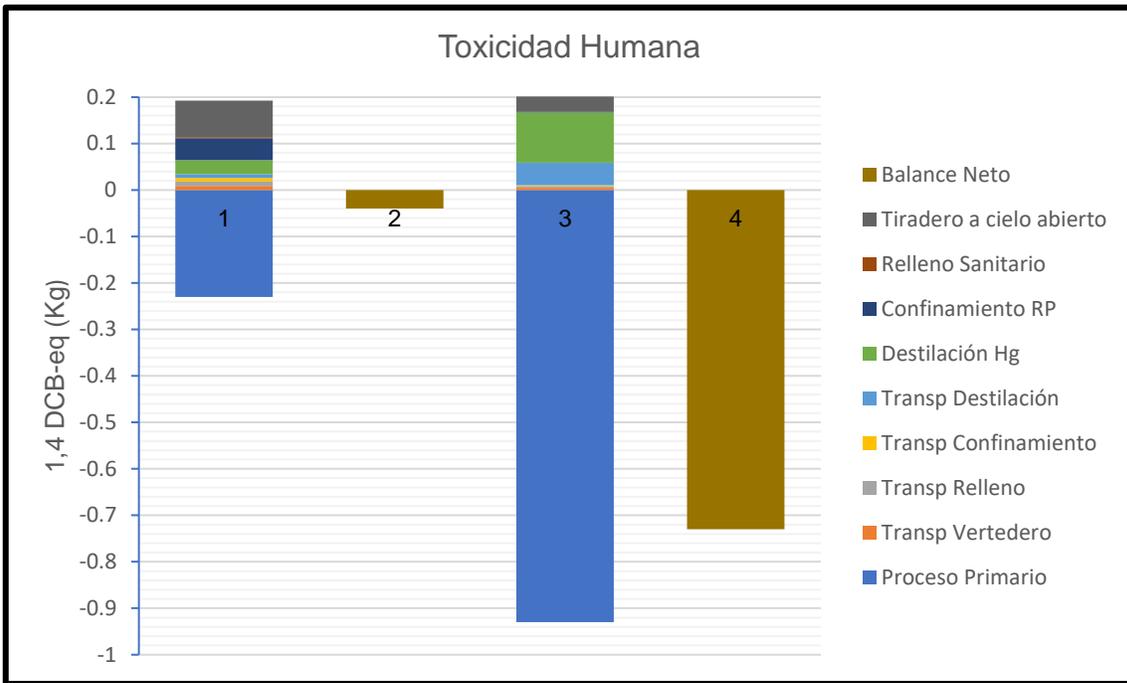


Figura 20. Resultados de impacto, Potencial de Toxicidad Humana (HTP).

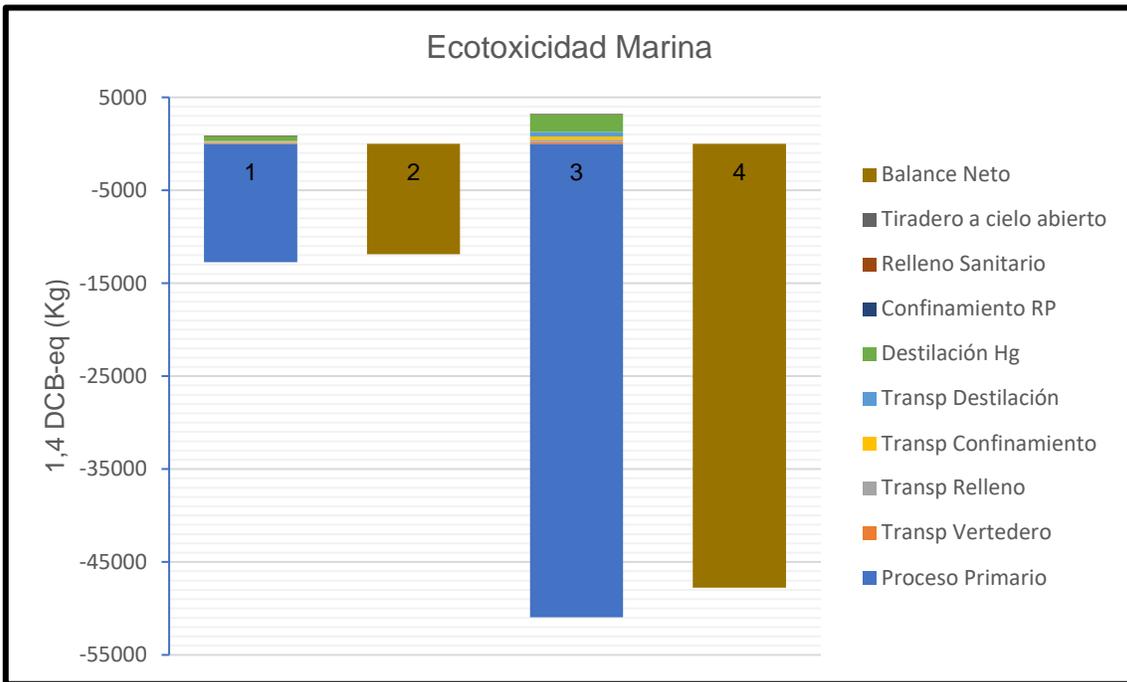


Figura 21. Resultados de impacto, Potencial de Ecotoxicidad Marina (MAETP).

En el caso de la categoría de cambio climático (GWP), en términos de emisiones, la etapa más importante del sistema es el vertedero a cielo abierto, cuyo potencial es mayor a comparación que el transporte del material, lo anterior se confirma, debido, a que el modelo considera una quema de los desechos en dicha disposición.

Para las categorías de acidificación y eutrofización, la destilación de mercurio en el proceso de reciclaje es la etapa más contaminante, lo cual puede estar relacionado directamente con la emisión y descarga del proceso de destilación del etanol biogénico obtenido, cuyo argumento se ha mencionado anteriormente; al no contar con datos directos, el método permite emplear un proceso similar a manera de realizar la operación estudiada.

En el caso de la categoría de toxicidad humana, la tercera etapa más importante del proceso de manejo es la disposición en el vertedero a cielo abierto que representa el 40% del total de los impactos en esta categoría, el cuarto proceso más contaminante es la suma del transporte a los sitios de eliminación de desechos peligrosos y no peligrosos, debido a la distancia y consumo de combustible.

4.3.2. Desarrollo del ACV mediante la resolución de ecuaciones de balance de materia y energía.

Una de las alternativas que existen para llevar acabo un ACV, es desarrollar el cálculo mediante la realización de los balances de materia y energía, a manera de determinar los diferentes eco-indicadores, basándose principalmente en datos de emisiones y consumo de energía requeridos por cada etapa.

Esta opción tiene como principal ventaja el uso de datos, provenientes de un balance generado de forma específica para cada fase, permitiendo obtener resultados que describan de mejor modo los impactos ambientales. Para el caso del balance de materia del proceso de producción, puede ser desarrollado por sistemas, donde se entiende por sistema, a una porción arbitraria o la totalidad de un proceso definido para su análisis.

En este sentido pueden presentarse dos casos diferentes para estimar las corrientes de entrada y salida de cada sistema:

- a) Si cada corriente de un proceso que ingresa y sale puede medirse y analizarse, entonces existe poca necesidad de calcular el balance de materiales (Himmelblau, 1974).
- b) Cuando existe uno o más puntos de un proceso, donde no es posible recolectar la información necesaria, si se dispone de la cantidad de datos necesarios de otros valores, es posible conocer las cantidades y composiciones de las corrientes del sistema (Himmelblau, 1974).

El balance de energía está relacionado con las corrientes de materia, dividiéndose en tres tipos, energía interna (U), energía potencial (P) y energía cinética (K). Adicionalmente se consideran dos tipos de energía que es transportada a través de los límites del sistema, la cual puede transferirse como calor (Q) y trabajo (W) (Himmelblau, 1974).

Las limitantes para este escenario únicamente son los desarrollos correspondientes a cada etapa del sistema, así como el conocimiento de los eco-indicadores de los productos que intervienen en cada periodo del proceso para de esta forma, determinar los posibles impactos ambientales.

Para este trabajo se realizaron las ecuaciones de balances de materia y energía a dos etapas representativas, la destilación del Hg, debido a que fue el subproceso más contaminante con respecto a los resultados de la aplicación del software; y el transporte hacia el tiradero a cielo abierto, ya que está presente de forma ubicua en cualquier etapa (Figura 22).

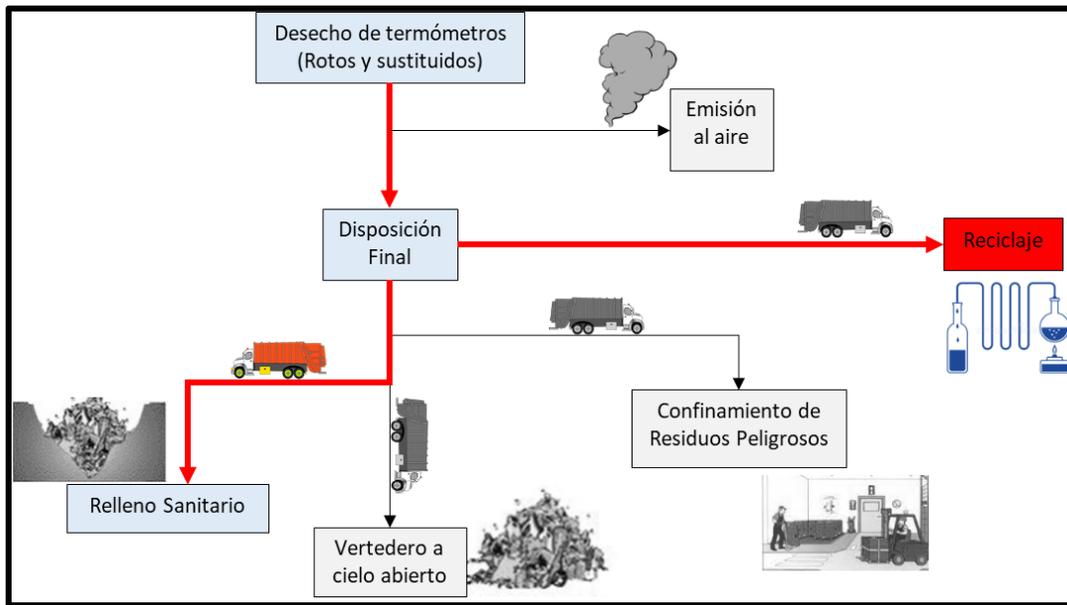


Figura 22. Etapas seleccionadas para la estimación de impactos ambientales mediante el desarrollo de ecuaciones de Balance de Materia y Energía de la disposición de Hg.

Para poder calcular los impactos provocados por una destilación de mercurio fue necesario desarrollar la ingeniería conceptual definiendo parámetros de operación (temperatura y presión), así como el modelo empleado. En el caso de la etapa de transporte se consideraron datos de la literatura.

El proceso de destilación (Figura 23) se planteó con las siguientes características:

- Se usó el modelo de flash isotérmico, en el que los cálculos realizados fueron desarrollados mediante el uso de las ecuaciones de Rachford-Rice.
- La corriente de alimentación (F) considero como componentes: mercurio y trazas de agua.
- La corriente de vapor a la salida del flash (V) contiene un 10% del mercurio de la corriente de entrada, la corriente (L) contiene un 90% de la corriente de alimentación.
- La eficiencia de operación para cada intercambiador de calor fue de 80%.

- La potencia de la bomba empleada para impulsar el agua de enfriamiento se consideró de 1 (hp) caballo de fuerza.
- La eficiencia de transferencia de calor para la caldera se consideró de 40%.

Para determinar los impactos ambientales por transporte se tomó en cuenta lo siguiente:

- Transporte con capacidad de carga de 16 toneladas.
- Motor diésel de 4 tiempos.
- Distancia recorrida de 200 km.
- Uso de características del Diesel en México

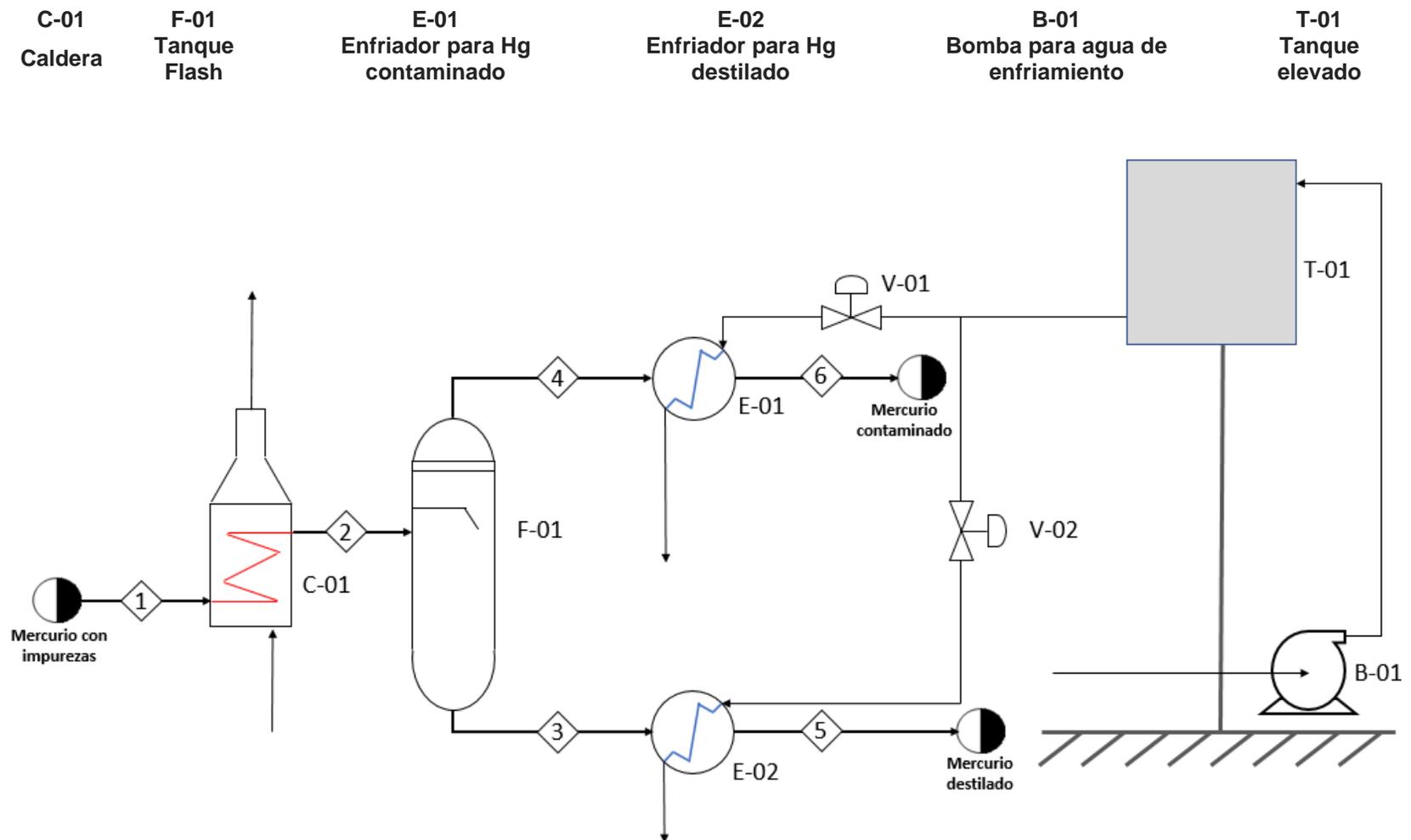


Figura 23. Diagrama de flujo de proceso para destilación de mercurio. Elaboración propia

4.3.3. Balance de Materia para la Estimación de Impacto Ambiental.

Una vez definido el alcance, se plantearon las ecuaciones para resolver el tanque *flash*. La resolución para determinar las fracciones en el equilibrio para cumplir la restricción impuesta al 90% de Hg proveniente de la corriente de entrada, fue planteando un sistema de ecuaciones a partir de las ecuaciones de Antoine, para de esta manera, determinar la presión de saturación (Ec. 4). El equilibrio de fases se determinó utilizando la ecuación de Rachford-Rice (Ec 5), y determinando los coeficientes de distribución (Ec 6). En la Tabla 15 se presentan las constantes de Antoine que fueron utilizadas.

Tabla 15. Constantes de Antoine.

Constantes	A	B	C	Fuente
Agua	3.55959	643.748	-198.043	(Liu y Lindsay, 1970)
Mercurio	4.85767	3007.129	-10.001	(Hicks, 1963)

Ecuación 4. Ecuación de relación entre la temperatura y presión de saturación del vapor.

$$P_{sat} = 10^{\left(A - \frac{B}{T+C}\right)}$$

Posteriormente se estimaron los coeficientes de distribución, mediante la presión de saturación y la presión de operación. Una vez obtenidas las variables para el sistema de ecuaciones, se procedió a realizar la iteración del sistema para cumplir con los requerimientos impuestos, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 16, en la cual se observan el balance molar y másico para el tanque Flash (F-01).

Ecuación 5. Rachford-Rice.

$$f\left(\frac{V}{F}\right) = \sum_{i=1}^c \frac{z_i(k_i - 1)}{1 + \frac{V}{F}(k_i - 1)} = 0$$

Ecuación 6. Determinación de los Coeficientes de distribución.

$$k_i = \frac{P_{sat}}{P_{sis}}$$

Tabla 16. Composiciones en el equilibrio del proceso de destilación.

Corriente	2		3		4	
	Flujo	Fracción Mol	Flujo	Fracción Mol	Flujo	Fracción Mol
Hg mol/día	1619.722	0.994	1457.750	0.9995	161.972	0.946
H2O mol/día	10.000	0.006	0.702	0.0005	9.298	0.054
Flujo Molar Total (mol/día)	1629.722		1458.452		171.270	
Flujo Másico Total (kg/día)	325.080		292.423		32.658	

La temperatura de operación del sistema fue de 353.6 °C.

Para determinar la temperatura de burbuja y rocío (Tabla 17), se implementaron las ecuaciones de Rachford-Rice en función de temperatura de burbuja (T_B) y rocío (T_R). Ec 7. En la tabla 17 se citaron los valores de T_R y T_B utilizados para los cálculos.

Ecuación 7. Ecuación de Rachford-Rice en función de T_R y T_B .

$$f(T_R) = \sum_{i=1}^c \frac{y_i}{k_i} - 1 = 0 \quad f(T_B) = \sum_{i=1}^c k_i x_i - 1 = 0$$

Tabla 17. Rango de temperaturas de aplicación para el proceso seleccionado.

Temperatura de Proceso	°C
Temperatura de rocío	319.34
Temperatura de burbuja	356.30

Para calcular la energía necesaria en la caldera (C-01), se empleó la ecuación de cantidad de calor transferido (Ec. 8), la cual está en función del calor específico de los componentes, la diferencia de temperatura (dT), entre la temperatura ambiente y la temperatura de burbuja, así como de la entalpía de vaporización.

Ecuación 8. Ecuación de cantidad de transferencia de calor.

$$Q = \sum_{i=1}^c m_i \int_{T_1}^{T_2} C_{p_i} dT + m_i \lambda_i [=] \frac{J}{día}$$

Donde:

- Q= Cantidad de calor
- λ_i = Entalpía de vaporización del componente "i" (J/mol).
- m_i = Flujo molar (mol/día).
- C_{p_i} =Calor específico del componente "i" (J/K mol).
- F_4 = Flujo molar de la corriente cuatro (mol/día).

A partir de la Ec.8, se plantea el balance de energía para la caldera, la cual queda expresada en la Ec. 9. Además, la capacidad calorífica es expresada en función de la temperatura del sistema, por lo que las constantes de Antoine asociadas al agua se presentan en la tabla 18, mientras que la capacidad calorífica del mercurio se toma como un dato constante, ya que no se cuenta con información de la ecuación desarrollada en función de la temperatura.

Ecuación 9. Balance de energía.

$$Q_{C-01} = m_{H_2O} \int_{T_{amb}}^{T_B} C_{p_{H_2O}} dT + F_4 * y_{H_2O} \lambda_{m_{H_2O}} + m_{Hg} \int_{T_{amb}}^{T_B} C_{p_{Hg}} dT + F_4 * y_{Hg} \lambda_{Hg}$$

$$m_{H_2O} = F_2 * Z_{H_2O}$$

$$m_{Hg} = F_2 * Z_{Hg}$$

$$Cp_{H_2O} = A + B \frac{T}{1000} + C \left(\frac{T}{1000} \right)^2 + D \left(\frac{T}{1000} \right)^3 + E \left(\frac{1000}{T} \right)^2 \quad [=] \frac{J}{mol K}$$

Donde:

- F_4 = Flujo molar de la corriente cuatro (mol/día).

Tabla 18. Constantes para determinar Cp del agua. (Chase Jr, 1998)

A	B	C	D	E
-203.606	1523.29	-3196.413	2474.455	3.8553

Cp del mercurio (Chang, 2008)

$$Cp_{Hg} = 27.98 \frac{J}{mol K}$$

La cantidad de calor necesaria al aplicar el balance fue de un total de 23792.93 kJ/día considerando una eficiencia de transferencia de calor de 40%.

Para determinar la cantidad de gas natural necesario se empleó la ecuación 10.

Ecuación 10. Ecuación para determinar la masa de gas natural al proceso.

$$F_{GN} = \frac{Q_{C-01}}{0.89 * 0.4 * P \cdot C_{GN}} \quad [=] \frac{kg}{día}$$

Donde:

- P.C_{GN} es el poder calorífico del gas natural (kJ/kg)
- 0.4 es factor de eficiencia de intercambio de calor en la caldera
- 0.89 es factor de eficiencia de quemador de la caldera.
- El gas natural requerido para este sistema es de 1.48kg.

El cálculo llevado a cabo para resolver los intercambiadores (E-01, E-02) y determinar la masa de agua de enfriamiento necesaria se realizó mediante el

sistema de ecuaciones, Ec 11; reportando la cantidad de agua necesaria en la Tabla 19.

Ecuación 11. Sistema de Ecuaciones para determinar la masa de agua necesaria, considerando una eficiencia de 80%.

$$Q_{E-01} = m_{H_2O} \int_{T_{amb}}^{T_B} C_{p_{H_2O}} dT + m_{H_2O} \lambda_{m_{H_2O}} + m_{Hg} \int_{T_{amb}}^{T_B} C_{p_{Hg}} dT + m_{Hg} \lambda_{Hg} [=] \frac{J}{dia}$$

$$m_{H_2O} = F_4 * y_{H_2O}$$

$$m_{Hg} = F_4 * y_{Hg}$$

$$m_{H_2O}^{E-01} = \frac{Q_{E-01}}{PM_{H_2O} \rho_{H_2O} \int_{T_1}^{T_2} C_{p_{H_2O}} dT} [=] \frac{L}{dia} \quad T_1 = 25, \quad T_2 = 60$$

$$Q_{E-02} = m_{H_2O} \int_{T_{amb}}^{T_B} C_{p_{H_2O}} dT + m_{Hg} \int_{T_{amb}}^{T_B} C_{p_{Hg}} dT [=] \frac{J}{dia}$$

$$m_{H_2O}^{E-02} = \frac{Q_{E-02}}{PM_{H_2O} \rho_{H_2O} \int_{T_1}^{T_2} C_{p_{H_2O}} dT} [=] \frac{L}{dia} \quad T_1 = 25, \quad T_2 = 60$$

Donde:

- PM_{H_2O} = Peso molecular del agua.
- ρ_{H_2O} = Densidad del agua.
- PM_{Hg} = Peso molecular del Hg.
- ρ_{Hg} = Densidad del Hg.

Tabla 19. Litros de agua necesarios para el sistema de enfriamiento.

Intercambiadores	Litros de agua
E-01	97.79
E-02	103.11

Con el volumen total de agua requerido para los enfriadores, se determinó el consumo eléctrico necesario para impulsar la bomba (B-01), de un caballo de fuerza (Tabla 20).

Tabla 20. Características de la bomba B-01.

Caudal “Q” (L/min)	116
Consumo eléctrico (Wh/día)	27,208
Altura máxima (m)	36
Máxima profundidad de succión (m)	8
Frecuencia (r/min)	3,450

Ecuación 12. Relación de consumo eléctrico para impulsar la bomba B-01.

$$Wh_{cons} = \frac{L}{Q} * \frac{Ce}{1440} [=] Wh$$

Donde:

- L= Volumen de agua bombeados (L)
- Q=Caudal de la bomba (L/min)
- Ce= Consumo eléctrico del motor (Wh/día)

Como resultado, se obtuvo un consumo eléctrico total de 32.68 Wh.

Finalmente, para determinar los impactos ambientales seleccionados se tomaron en cuenta los factores de emisión reportados en Tabla 21, multiplicando dichos factores por los resultados obtenidos del balance de materia y energía.

Tabla 21. Factores de emisión, para el cálculo de los impactos ambientales en la destilación.

Factor	Cantidad
kg CO₂/ kJ de gas natural	5.7756X10 ⁻⁵
kg CO₂/ m³ de agua	0.788
kg CO₂/ Wh de electricidad generada	0.000582
g SO₂/ Wh de electricidad generada	42
g NO_x/ Wh de electricidad generada	18
kg NO_x/ kJ de gas natural	2.7778X10 ⁻⁸

Fuente: Tomado de INECC, 2014.

Tabla 22. Emisiones totales del sistema de destilación.

kg CO₂	Kg CH₄	kg SO₂	kg NO_x
8.79	0.1479	0.001372676	0.002240577

Para determinar las emisiones de gases resultantes del transporte se emplearon las siguientes ecuaciones.

Tabla 23. Características físicas y químicas de diésel vendido en México por Pemex.

Diesel	
ρ (kg/m³)	832
PC (MJ/l)	35.86
PC (MJ/kg)	45.1
Cont. Azufre en ppm	10.37
Cont. Azufre %m/m	0.001037

Fuente: Tomado de SEDEMA, 2017.

El rendimiento promedio de combustible diésel en un transporte con capacidad para 16 toneladas es de 25L de diésel por cada 100km recorridos (Telematics, 2019), por lo tanto, para un recorrido de 200 km el combustible total necesario es de 50L.

Las emisiones de CO₂, CH₄, NO_x y N₂O se calcularon empleando el poder calorífico del diesel y la cantidad total de combustible consumido con lo cual se obtuvo la cantidad requerida para impulsar el vehículo. Posteriormente mediante los factores de emisión reportados en la Tabla 24 se estimaron los kg de cada contaminante; en el caso de las emisiones de SO₂, se empleó la ecuación 13.

Tabla 24. Factores de emisión, para el cálculo de los impactos seleccionados en la etapa de transporte.

Factor de Emisión	Valor
kg CO₂/ TJ del combustible	74100
g NO_x/ km recorrido	0.08
kg N₂O/ TJ del combustible	3.9
kg CH₄/ TJ del combustible	3.9

Fuente: Tomado de (IPCC, 2006).

Ecuación 13. Ecuación para determinar los kilogramos emitidos de SO₂ por cantidad.

$$ESO_2 = 2(CC_J)(\rho_J)(S_J)[=]kg \text{ de } SO_2$$

Donde:

ESO₂=Emisión de azufre del combustible.

CC_J= Consumo total de combustible (m³)

ρ_J= densidad del combustible (kg/m³)

S_J= %m/m de contenido de azufre en el combustible.

Tabla 25. Emisiones totales del transporte para una distancia de 200km.

kg CO₂	kg CH₄	kg SO₂	kg NO_x	Kg N₂O
132.8613	0.0069927	0.0862784	0.016	0.0069927

Para determinar los impactos ambientales se utilizaron los factores reportados en las Tablas 26-29 de cada contaminante emitido.

Tabla 26. Potencial de calentamiento global de los contaminantes de PCG.

Contaminante	WGP ₂₀	WGP ₁₀₀	WGP ₅₀₀
CO ₂ (Dióxido de carbono)	1	1	1
CH ₄ (Metano)	35	11	4
N ₂ O (Óxido Nitroso)	260	270	170

Fuente: Tomado de Heijungs., 1992

Ecuación 14. Ecuación para determinar el potencial de calentamiento global.

$$PCG = Emisión\ al\ aire\ [kg_{gas}] * PCG_n \left[\frac{kg\ CO_2\ eq}{kg_{gas}} \right] [=] kg\ CO_2\ eq$$

Tabla 27. Factores de potencial de toxicidad humana.

Contaminante	F(TH)
1,4-DCB (1,4 Diclorobenceno)	1
NO _x (Óxidos de Nitrógeno)	8.041
SO ₂ (Dióxido de azufre)	12.37

Fuente: Tomado de Heijungs., 1992

Ecuación 15. Ecuación para determinar el potencial de toxicidad humana.

$$PTH = Emisión\ al\ aire\ [kg_{gas}] * F(TH) \left[\frac{kg\ 1,4 - DCB\ eq}{kg_{gas}} \right] [=] kg\ 1,4 - DCB\ eq$$

Tabla 28. Factores de potencial de acidificación.

Contaminante	F(PA)
NO _x (Óxidos de Nitrógeno)	0.7
SO ₂ (Dióxido de azufre)	1

Fuente: Tomado de Heijungs., 1992

Ecuación 16. Ecuación para determinar el potencial de acidificación.

$$PA = \text{Emisión al aire [kg}_{gas}] * F(PA) \left[\frac{kg SO_2 eq}{kg_{gas}} \right] [=] kg SO_2 eq$$

Tabla 29. Factores de potencial de eutrofización.

Contaminante	F(PE)
NO_x (Óxidos de Nitrógeno)	0.13
(PO₄)³⁻ (Fosfato)	1

Fuente: Tomado de Heijungs., 1992

Ecuación 17. Ecuación para determinar la potencial eutrofización.

$$PE = \text{Emisión al aire [kg}_{gas}] * F(PE) \left[\frac{kg PO_4^{3-} eq}{kg_{gas}} \right] [=] kg PO_4^{3-} eq$$

A partir de aplicar los factores de emisión a cada uno de los resultados obtenidos del proceso, se obtienen los Eco-indicadores para el escenario actual de disposición final del mercurio, siendo, las etapas seleccionadas a comparar, la destilación del mercurio (Tabla 30) y el transporte al relleno sanitario (Tabla 31).

Tabla 30. Comparativo de impactos obtenidos mediante la resolución de ecuaciones de balance de materia y energía y modelación en software en el proceso de la destilación.

Método	Eco-indicadores			
	WGP (Kg CO ₂ eq)	AP (kg SO ₂ eq)	EP (Kg (PO ₄) ³⁻ eq)	HT (kg 1, 4-DCB- eq)
Resolución de ecuaciones de BMyE	8.7892	0.0029	0.0017	0.0345
Software	199.1512	2.5193	3.8967	0.0298

Fuente: Tomado de Heijungs., 1992

Tabla 31. Comparación de impactos obtenidos mediante la resolución del balance de materia y energía y modelación en software para el transporte al relleno sanitario.

Método	Eco-indicadores			
	WGP (Kg CO ₂ eq)	AP (kg SO ₂ eq)	EP (Kg (PO ₄) ³⁻ eq)	HT (kg 1, 4-DCB-eq)
Resolución de ecuaciones de BMyE	134.679402	0.0974784	0.00208	1.196021443
Software	77.1136	0.0583	0.2351	0.0097

Fuente: Tomado de Heijungs., 1992

Los resultados obtenidos al resolver el sistema de ecuaciones contrastan de manera evidente con los calculados mediante la simulación. En el caso particular de la destilación, para el potencial de calentamiento global se aprecia una diferencia de más del 90% con respecto a lo reportado por el software. Caso similar, ocurre con los demás potenciales evaluados.

Para los potenciales aplicados en el transporte, las magnitudes varían en un 50% respecto a los obtenidos con el software. Sin embargo, esto puede justificarse debido a las consideraciones propuestas para cada análisis. El software nos proporciona una base de datos, en donde no podemos modificar la información que ha sido recabada, mientras en la segunda metodología, es posible definir las características del diésel, así como el rendimiento del mismo transporte terrestre.

En el caso de la destilación, podemos atribuir las diferencias en los resultados a que el calor específico del mercurio es de una magnitud inferior, por lo que la cantidad de energía requerida es baja, además de que la separación de una mezcla de etanol-agua implica el uso de una mayor cantidad de equipos debido a que tiende a formar azeótropos.

Para el subsistema del transporte, como se ha mencionado, el software contempla un determinado tipo de camión de carga, mientras que en nuestro caso nos guiamos

por los valores característicos de la disponibilidad en México y, las características del diésel en nuestro país.

4.4. Comparación entre métodos desarrollados.

Actualmente el uso de softwares especializados en ACV's ha facilitado en gran medida el cálculo de impactos ambientales, como resultado de tener una base de datos que se ha venido actualizando año tras año.

Si bien, los diferentes programas existentes ofrecen ventajas al momento de realizar el análisis, ya que, al usar su base de datos asociada, proporciona un desarrollo simplificado, obteniendo resultados de una forma más rápida para cualquier escenario dispuesto. Existen programas de uso libre, sin embargo, tienen desventajas como no contar con una base de datos actualizada

Al realizar un análisis de ciclo de vida sin la ayuda de un software especializado, la principal desventaja está en la dificultad para conseguir información de los flujos de materiales, especialmente en las etapas fuera del proceso de producción, debido que encontrar datos de uso y mantenimiento de un producto presentará una mayor dificultad al momento de buscarlos, dependiendo de diferentes factores (tipo de producto, país de origen, etc.), por lo que generar la base de datos, representa la principal dificultad, ya que, se tiene por objetivo, recolectar los datos más actualizados para obtener un resultado de caso, de mayor precisión y más cercano al contexto en el que se está desarrollando.

Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo el Análisis de Ciclo de Vida basado en la norma ISO 14040:2006; para la disposición final de los residuos de mercurio procedentes de termómetros usados en el sector salud de México, para lo cual se realizó la revisión bibliográfica correspondiente, quedando definida la unidad funcional para 2166 kg de mercurio.

Los resultados obtenidos del ACV permitieron identificar la etapa más contaminante del proceso analizado, así como el caso de estudio que mejor desempeño ambiental representa en los escenarios planteados; ya sea mediante la ruta de la disposición final actual del Hg, o la ruta de incrementar el reciclaje del mercurio, existiendo un impacto positivo comparado con la extracción del recurso natural, debido a que implica una disminución en los Eco-indicadores evaluados (Calentamiento Global, Acidificación; Eutrofización, Toxicidad Humana y Ecotoxicidad Marina). De esta manera, se identificó la etapa de destilación como la más contaminante, debido a los diferentes servicios de energía que implica llevar a cabo una destilación en el proceso.

De entre estos dos escenarios (Disposición actual de Hg, y el contemplar un reciclaje de un 60% de Hg) los resultados indican que los impactos ambientales son menores cuanto más mercurio es recuperado.

Los resultados obtenidos por medio del planteamiento y resolución de las ecuaciones de balance de materia y energía presentaron una diferencia importante con respecto a los obtenidos para la etapa de destilación mediante el uso del software, ya que la energía necesaria para llevar a cabo la destilación de mercurio es significativamente menor a comparación de una destilación de etanol.

Como hemos mencionado, la causa principal entre la gran diferencia de resultados obtenidos se atribuye a las características de cada modelo de destilación, ya que en el caso de la destilación de mercurio la separación de componentes se puede

realizar mediante una destilación tipo flash, mientras que, dentro de la base de datos del software, plantea una destilación de etanol, en la cual, es necesario una mayor cantidad de equipos, así como servicios para poder llevar a cabo la separación del producto con las especificaciones establecidas al proceso.

El cálculo realizado para la etapa de transporte también mostro diferencias significativas entre el realizado al plantear las ecuaciones y el que proporciona la simulación, esta vez siendo mayor el obtenido a través del cálculo, debido a que el software estima las emisiones con base en el peso que transporta el automotor, es decir que hace una diferenciación en cuanto a la cantidad que contamina portar 1 tonelada a llevar 10 toneladas, mientras que los datos existentes para los camiones de la Ciudad de México, basan los factores de emisión en la carga máxima que estos pueden llevar.

La confiabilidad de los datos existentes otorga un estimado, el cual posee una incertidumbre que puede ser importante dependiendo de la calidad de los datos alimentados al programa; y como pudimos comprobar, proporcionaron uno de los principales fundamentos al momento de desarrollar el análisis de ciclo de vida.

Entre las consideraciones que deben ser tomadas para revisar los resultados, está la zona geográfica con la que se simula el escenario, en este caso la base de datos de Umberto® está en su mayoría basada en datos europeos, por lo que existe un sesgo al obtener los resultados debido a las diferencias en cuanto infraestructura instalada para el manejo adecuado de los residuos.

Los resultados de la evaluación del análisis del ciclo de vida nos permitieron identificar la necesidad de promover una política para aumentar el reciclaje de mercurio en México. Esta acción tendrá beneficios significativos en términos de protección de la salud y el medio ambiente. Una política más apropiada podría considerar que el total del mercurio que se dispone en los tiraderos a cielo abierto, y los rellenos sanitarios sea reciclada.

Considerando y obteniendo una visión más allá del desarrollo de este estudio, un aspecto que debería ser considerado para poder contemplar un panorama más amplio es el análisis de ciclo de vida de los termómetros digitales, ya que son la primer alternativa de sustitución de termómetros de mercurio en centros de salud, estos instrumentos de medición cuentan con diferentes componentes a diferencia de su homólogo analógico (cubierta plástica, batería, sensor de temperatura, circuito impreso, microprocesador, *display*) lo que podría implicar que los afectos ambientales resultantes de la extracción de materias primas, transporte, procesos de transformación y ensamblado, distribución, uso y disposición final sean mayores que los producidos por la producción de termómetros de mercurio considerando estas mismas etapas.

De esta forma se contempla que, al realizar un análisis comparativo de los termómetros de mercurio y digitales, desde la obtención de las materias primas hasta la etapa de disposición final, se podrían tener elementos más robustos para dictar políticas públicas hacia un manejo sustentable de termómetros de Hg.

Bibliografía

- Antón Vallejo, M. A. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de <https://www.tesisenred.net/handle/10803/6827>
- Azapagic, A., y Clift, R. (1999). The application of life cycle assessment to process optimisation. *Computers & Chemical Engineering*, 23 (10), 1509-1526.
- Baldwin, C., Wilberforce, N., y Kapur, A. (2011). Restaurant and food service life cycle assessment and development of a sustainability standard, *LCA, For Energy Systems and Food Products* 16 (1), 40-49.
- Benveniste, G., Gazulla, C., Fullana, P., Celades, I., Ros, T., Zaera, V. y Godes, B. (2011). Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas. *Informes de la Construcción*, 63(522), 71-81.
- Bribián, A., y Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44 (12), 2510-2520.
- Castro Díaz José. (2011). Informe sobre el mercado del mercurio en México. Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA).
- Chang, R. (2008). Físicoquímica para las ciencias químicas y biológicas. México: McGraw-Hill.
- Chase Jr., MW (1998) NIST-JANAF Thermochemical Tables. 4ª Edición, J. Phys. Chem. Árbitro. Datos, monografía 9, 1-1951
- Clements, R. B., y Senlle, A. (1997). Guía completa de las normas ISO 14000 (No. 332.72/C62cE). Gestión 2000, recuperado de https://fumigacionessanam.com.ar/pdf/ISO_14000-guia.pdf
- Curran, MA (1993). Evaluación del ciclo de vida ambiental de base amplia. *Ciencia y tecnología ambiental*, 27 (3), 430-436.

- Gaioli, M., Amoedo D., y Gonzáles, D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el medio ambiente. *Arch Argent Pediatr*, 110(3), 259-264.
- Galvão, L., y Corey, G. 1987. Mercurio. Metepec, Edo. de México, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, OPS/OMS. Serie Vigilancia, 7.
- García, C., et al. (2017). El Convenio de Minamata. Así actúa Colombia frente al mercurio. Cali, Colombia: WWF-Colombia.
- Garraín Cordero, D. (2009). Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de análisis de ciclo de vida.
- Gavilán García, I. C., Fernández Villagomez, G., Gavilán-García, A., & Alcántara-Concepcion, V. (2015). Alternatives of management and disposal for mercury thermometers at the end of their life from Mexican health care institutions. *Journal of Cleaner Production*, 86, 118-124.
- Global village of Beijing. (2007). Market Research Report on Chinese Mercury-free Thermometers and Sphygmomanometers. Recuperado de [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/13832/China -
_GVB_Non](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/13832/China_-_GVB_Non)
- Heijungs, R., Guinée, JB, Huppes, G., Lankreijer, RM, Udo de Haes, HA, Wegener Sleeswijk, A., y De Goede, HP (1992). Evaluación del ciclo de vida ambiental de los productos: guía y antecedentes (parte 1).
- Himmelblau, D. M. (1974). *Principios y cálculos básicos de la ingeniería*. New Jersey. USA: CECSA.
- Hoof, Bart V. (2000). Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y su aplicación en Colombia. Universidad de Los Andes. Santa Fé de Bogotá.
- INE. 2008. Informe Final – Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio de México 2004. SEMARNAT.
- INECC, 2014. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Recuperado de:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf

- IPCC. 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. vol. 2, capítulo 3. Combustión Movil. Recuperado de https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf
- IPCS, Ficha de Seguridad (2001). Programa Internacional de Seguridad Química. Naciones Unidas (mercurio). Recuperado de: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/0a100/nspn0056.pdf>
- Karliner, J., y Harvie, J. (2013). Movimiento mundial para el cuidado de la salud libre de mercurio. Salud sin Daño. Recuperado de https://saludsindanio.org/sites/default/files/documentsfiles/1456/Movimiento_Libre_de_Mercurio.pdf
- Kim, S., y Dale, BE (2005). Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. *Biomass and Bioenergy* 29 (6), 426-439.
- Mendoza, C., y Ize, A. (2017). Las sustancias químicas en México. Perspectivas para un manejo adecuado. Revista Internacional de Contaminación ambiental. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v33n4/0188-4999-rica-33-04-719.pdf>
- Monitoreo, A., & Symon, C. (2013). Informe de antecedentes técnicos de AMAP / PNUMA para la evaluación mundial de mercurio 2013: informe técnico final; salida
- Monteiro, H. y Freire, F. (2012). Evaluación del ciclo de vida de una casa con paredes exteriores alternativas: Comparación de tres métodos de evaluación de impacto. *Energía y edificios*, 47 , 572-583.
- Nelson, L., Lewin, N., Howland, M., Hoffman, R., Goldfrank, L., y Flomenbaum, N. (2011). Mercury. En Sue Young-Jin. (Ed), *Goldfrank's*

Toxicologic Emergencies (pp. 1299-1307). New York, EUA: McGraw-Hill Medical.

- NTC ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006).
- Olivera, A., Cristobal, S., y Saizar, C. (2016). Análisis de ciclo de vida ambiental, económico y social. Una herramienta para la evaluación de impactos y soporte para la toma de decisiones. *Innotec gestión, (7 ene-dic), 20-27.*
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). El Mercurio en el Sector Salud. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/medicalwaste/mercurio_es.pdf
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Entendiendo el Codex Alimentarius. Organización de Alimentos y Agricultura.
- Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R., Friedli, H., Leaner, J., y Telmer, K. (2010). Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. *Atmospheric Chemistry and Physics, 10(13), 5951-5964.*
- PNUMA, Productos Químicos. (2005). Evaluación mundial sobre el mercurio. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Ginebra, Suiza. Recuperado de https://saludsindanio.org/sites/default/files/documents-files/1401/Evaluacion_Mundial_Mercurio.pdf
- Poulin, J., y Gibb, H. (2008). Mercurio: Evaluación de la carga de morbilidad ambiental a nivel nacional y local. Recuperado de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78130/9789243596570_spa.pdf;jsessionid=799DB648EE4296820E0D914567B4EDE1?sequence=1
- Ramírez, A. A., Carmona, L. G., y Romero, S. A. (2014). Análisis de ciclo de vida en el sector agrícola: el caso del municipio de Viotá, Cundinamarca (Colombia). *Ambiente y Desarrollo, 18(35), 117-133.*
- Rojas, J., y Gárate, Z. (2011). Biorremediación de la Contaminación por Mercurio en la Minería Informal. *Minería y medioambiente, 31.*

- Rodríguez, B. R. (2003). El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. Boletín iIE, 91-97
- Sánchez, C. G. (2012). Análisis de ciclo de vida aplicado a la gestión de residuos Urbanos del Distrito Nacional de la República Dominicana. 10.13140/RG.2.1.2574.1846.
- Seader, J. D., Henley, E. J. (2006). Separation process principles. United States of America: John Wiley & Sons.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2006. Número de instalaciones y capacidad de disposición de residuos sólidos urbanos: 1999 a 2006, DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales, México.
- SEDEMA, 2017. Calidad de las gasolinas y diésel comercializados en la ZMVM, parte 1. Ciudad de México, México. Recuperado de: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/5a6/90c/eea/5a690ceaa7509761801425.pdf>
- SEMARNAT. (2019). Empresas autorizadas para el manejo de residuos peligrosos. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/empresas-autorizadas-para-el-manejo-de-residuos-peligrosos>.
- SGPA. 2011. Integración y actualización del Inventario Nacional de Generación de Residuos Peligrosos (INGRP) en México. SEMARNAT.
- SSD/CAATA. (2013). Avances en la sustitución del mercurio en hospitales de México (2007-2009). Recuperado de <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11044-advances-in-mercury-substitution-in-mexican-hospitals-2007-2009-es.pdf>
- Telematics. (16 de enero de 2019). ¿Conoces el consumo de diésel de un camión por km?. TomTom Telematics. Recuperado de: https://telematics.tomtom.com/es_es/webfleet/blog/conoces-el-consumo-de-diesel-de-un-camion-por-km/

- Uribe, R. P. y Bejarano, A. (2013). Sistema de gestión ambiental: Serie ISO 14000. *Escuela de Administración de Negocios*, (62), 89-106.
- Weinberg, Jack. (2007). Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG. Recuperado de https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf
- Yarto, M., Gavilán, A., y Castro, J. (2004). La contaminación por mercurio en México. *Gaceta Ecológica*, (72), 21-34.

Anexo

Simulación de Proceso de Separación, empleando en Aspen Plus®.

Correspondiente a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se llevó a cabo una simulación del proceso de separación de una mezcla de agua con etanol, para cotejar los resultados obtenidos mediante el uso del software Umberto®, evaluando los impactos ambientales ocasionados en el proceso de destilación (PCG, PTH, PA, PE), empleando los factores descritos en el Capítulo 3. Metodología del ACV.

Es requerido separar una alimentación de una mezcla de etanol/agua, la cual tiene como restricción que la corriente de producto final debe ser mayor a 98% mol de pureza de producto etanol. Dicho proceso fue llevado a cabo mediante la simulación en Aspen Plus®; el tren de separación para la mezcla inicial puede ser visualizado esquemáticamente en el Diagrama A1; los equipos principales y fundamentales para poder llevar a cabo el proceso de separación de dicha mezcla consisten en un sistema de dos columnas de destilación en donde las variables de operación; número de etapas, relación de reflujo, especificaciones en las corrientes de salida con respecto a la pureza y recuperación del producto fueron definidas.

Como primer paso en Aspen, es necesario seleccionar los componentes con los cuales será modelado el proceso. Se seleccionó el método NRTL-RK y fueron asignados los equipos para llevar a cabo dicha operación.

En el Diagrama A1, como se ha mencionado puede verse el DFP realizado en el simulador con los equipos contemplados para realizar la destilación. Partiendo de la corriente ST-01 en la cual la mezcla es alimentada a la bomba para de esta manera, ser impulsada al mezclador; el cual exhibirá su función una vez que el producto de la segunda columna de destilación COL-2 sea enviado a manera de recirculación de proceso. Las dos columnas funcionan como el segmento principal del complejo, ya que, con dicho tren de proceso, garantizamos la obtención del producto con una cantidad mayor a 98% mol de pureza de etanol de la mezcla alimentada.

Mientras que para poder disponer del producto a condiciones estándar de presión y temperatura disponemos de los equipos conectados a los fondos de la segunda columna de destilación.

Diagrama A1. Diagrama de flujo de proceso para una destilación de una mezcla etanol-agua.

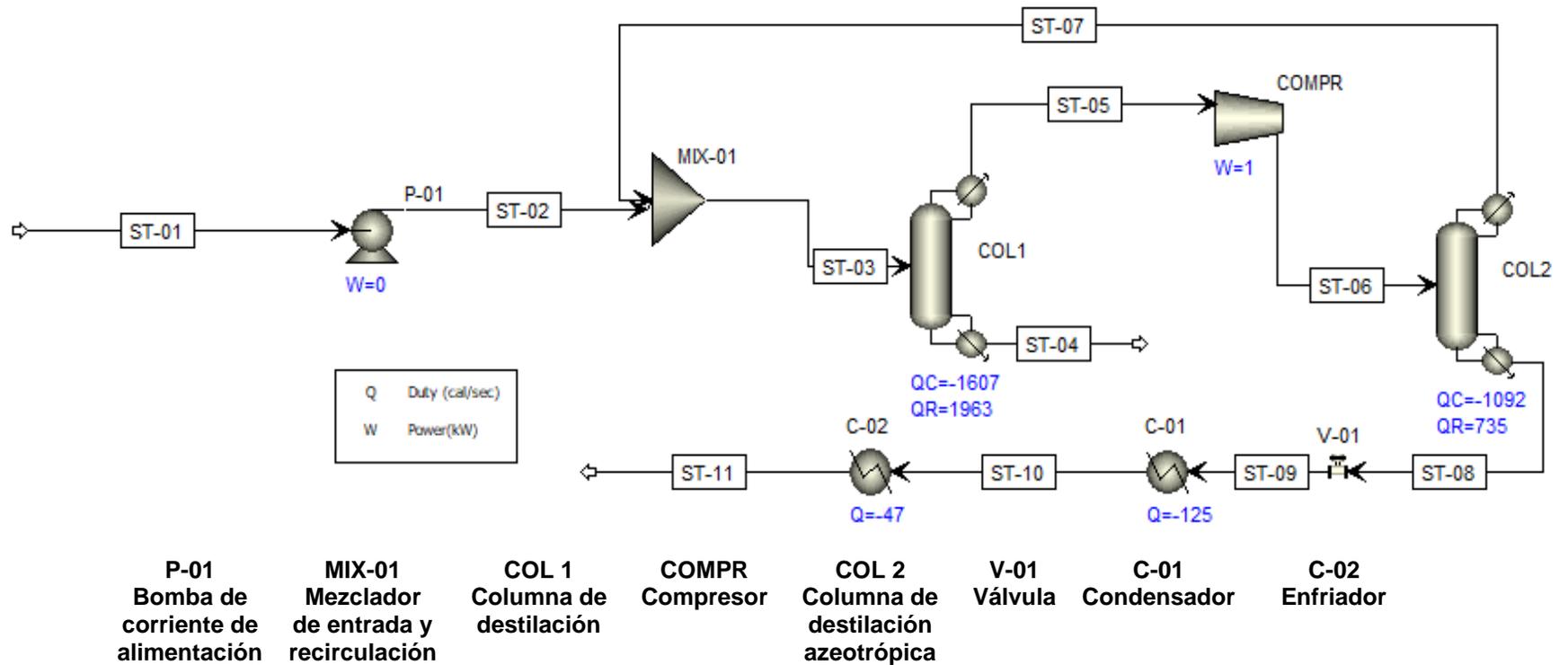


Tabla A1. Especificación de equipos.

Bomba (P-01)	
Presión de salida	1.5 bar
Mezclador (MIX-01)	
Fases validas	Liquido-Vapor
Columna de separación COL 1	
Presión en la alimentación	1.5 bar
Numero de platos	30
Tipo de condensador	Vapor-Parcial
Reboiler	kettle
Plato de alimentación	25
Caída de presión por plato	0.2 in H ₂ O
Compresor (COMPR)	
Presión de salida	22 bar
Tipo	Isoentropico
Columna de separación COL 2	
Presión en la alimentación	22 bar
Numero de platos	75
Tipo de condensador	Vapor-Parcial
Reboiler	kettle
Plato de alimentación	20
Caida de presión por plato	0.2 in H ₂ O
Válvula (V-01)	
Presión de salida	1 atmosfera
Tipo	Isoentropico
Condensador (C-01)	
Tipo	Cambio de fase, de vapor a liquido
Enfriador (C-02)	
Temperatura de salida	25°C
Tipo	Isobarico

Tabla A2. Resultados de las corrientes.

	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Fracción Vapor	Fracción Líquido	Flujo Molar (kmol/hr)	Flujo Másico (Kg/hr)	Flujo volumétrico (L/min)
ST-01	25	1.01	0	1	0.573	13.54	0.248
ST-02	25	1.5	0	1	0.573	13.54	0.248
ST-03	72.8	1.5	0	1	0.625	15.65	0.310
ST-04	58.6	0.24	0	1	0.469	8.89	0.157
ST-05	29.1	0.1	1	0	0.156	6.76	653.211
ST-06	343.5	22	1	0	0.156	6.76	5.652
ST-07	179.3	20	1	0	0.052	2.11	1.370
ST-08	180.9	20.37	0	1	0.104	4.65	0.135
ST-09	78.2	1.01	0.460	0.546	0.104	4.65	22.729
ST-10	78.2	1.01	0	1	0.104	4.65	0.105
ST-11	25	1.01	0	1	0.104	4.65	0.097

Tabla A3. Resultados de la bomba P-01.

Electricidad (kW)	0.0006804
Flujo volumétrico (L/min)	0.0006804
Diferencia de presión (bar)	0.247996
NPSH disponible (m*kgf/kg)	0.48675
Trabajo total requerido (kW)	0.0006804
Presión de salida (bar)	1.5
Temperatura de salida (°C)	25.0385

Tabla A4. Resultado del mezclador MIX-01.

Temperatura de salida (°C)	72.83
Presión de salida (bar)	1.5
Fracción vapor	0

Tabla A5. Resultados COL 1

Condensador	
Temperatura (°C)	29.075
Calor (cal/sec)	-1607.4
Flujo de destilado (kmol/hr)	0.1563
Reflux (kmol/hr)	0.5697
Relación de reflujo	3.6444
Rehervidor	
Temperatura (°C)	58.608
Calor (cal/sec)	1962.725
Flujo hacia el fondo (kmol/hr)	0.469
Flujo de evaporación (kmol/hr)	0.6792

Tabla A6. Resultados del Compresor

Potencia total requerida (kW)	1.10021
Presión de salida (bar)	22
Temperatura de salida (°C)	343.487
Fracción vapor	1

Tabla A7. Resultados COL-2

Condensador	
Temperatura (°C)	179.27
Calor (cal/sec)	-1092.0
Flujo de destilado (kmol/hr)	0.0521
Reflux (kmol/hr)	0.569
Relación de reflujo	10.919
Rehervidor	
Temperatura (°C)	180.935
Calor (cal/sec)	734.92
Flujo hacia el fondo (kmol/hr)	0.104
Flujo de evaporación (kmol/hr)	0.401

Tabla A8. Resultados Válvula V-01

Presión de salida (bar)	1.01325
Caída de presión (bar)	19.3554
Temperatura de salida (°C)	78.1978

Tabla A9. Resultados del condensador C-01.

Temperatura de salida (°C)	78.20
Presión de salida (bar)	1.01325
Fracción vapor	0
Flujo de calor (cal/sec)	-124.95

Tabla A10. Resultados del Condensador C-02.

Temperatura de salida (°C)	25
Presión de salida (bar)	1.01325
Fracción vapor	0
Flujo de calor (cal/sec)	-47.1897

Tabla A11. Impactos ambientales generados por el proceso de destilación.

Tipo de combustible empleado	Eco-indicadores			
	PCG (Kg CO ₂ eq)	PA (kg SO ₂ eq)	PE (Kg (PO ₄) ³⁻ eq)	TH (kg 1, 4-DCB- eq)
Gas natural	167.080271	0.1180548	0.01047593	1.41062597