

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Propuesta de incorporación de elementos de economía circular al Convenio de
Minamata sobre mercurio”**

Sharon Castillo Rodríguez

CARTAGO, enero, 2022

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

HOJA DE FIRMAS

“Propuesta de incorporación de elementos de economía circular al Convenio de Minamata sobre mercurio”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

M.Sc. Carlos Calleja Amador
Director

Dra. Lilliana Abarca Guerrero
Lector 1

Dra. Floria Roa Gutiérrez
Lector 2

Dra. ir. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinador COTRAFIG

M.Sc. Ricardo Coy Herrera
Director Escuela de Química

M.Sc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

Le dedico esta investigación a mis padres, porque sin su apoyo y su amor no sería la persona que soy ahora. Porque me dieron la inspiración para crecer siempre y dar lo mejor de mí.

A mi pequeña hermana Paula, porque sin ella mi vida no sería tan divertida y porque me motiva a ser el ejemplo y el apoyo que ella necesita.

“El amor es mejor maestro que el deber”

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, por ser la persona que me apoya diariamente, que me da risas y motivación incondicional, incluso cuando hay momentos tristes.

A mi papá, porque es quien me brinda inspiración para crecer, porque me apoya en todo y siempre cree en mí.

A mi hermana Paula, porque siempre está pendiente, porque le da luz y diversión a mis días.

A Kobu, Kira, Tiliche, Fígaro y Nalita por ser los peluditos de la casa y darme un tipo de amor que los humanos son incapaces de dar.

A Ulises (y Coquito), porque ha sido una motivación increíble en mi crecimiento personal y porque nunca dejó de apoyarme.

A mis amigas y compañeras, María Jesús, Karina y Ashley por alentarme siempre y porque sin ellas no habría disfrutado tanto esta etapa.

A Pamela, porque siempre estuvo dispuesta a brindarme su ayuda y siempre estuvo ahí para mí.

A mi tutor, Carlos Calleja Amador, porque me enseñó el amor por la química y fue quien me inspiró y guio para que este proyecto fuera realidad.

A los profesores de Ingeniería Ambiental y la Escuela de Química por enseñarme que esta carrera es mi vocación.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	Objetivo General.....	3
2.2.	Objetivos Específicos	3
3.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1.	Distribución ambiental del mercurio	4
3.1.1.	Fuentes de emisión.....	5
3.1.2.	Ciclo biogeoquímico del mercurio	7
3.2.	Convenio de Minamata.....	12
3.2.1.	Generalidades del Convenio de Minamata	13
3.2.2.	Principios del Convenio de Minamata.....	14
3.2.3.	Convenio de Minamata en Costa Rica.....	15
3.2.4.	Institucionalidad del Convenio de Minamata	17
3.3.	Economía circular	20
3.3.1.	Definiciones	21
3.3.2.	Principios de la economía circular.....	25
3.3.3.	Economía circular en Costa Rica.....	28
3.4.	Cadena de valor del mercurio	29
3.4.1.	Usos del mercurio en el marco de la economía actual.....	30
3.4.2.	Cadena de valor del mercurio en Costa Rica.....	31
3.4.3.	Transición de la cadena de valor del mercurio a una	
	economía circular.....	33
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	35

4.1.	Indicadores de economía circular	35
4.2.	Matriz de priorización de indicadores	38
4.3.	Entrevistas a expertos	39
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
5.1.	Principios de economía circular en el Convenio de Minamata.....	41
5.1.1.	Producción y consumo.....	41
5.1.2.	Gestión de residuos	43
5.1.3.	Materias primas secundarias	45
5.1.4.	Competitividad e innovación	46
5.1.5.	Principios de economía circular.....	48
5.1.6.	Resultados generales.....	50
5.2.	Priorización de indicadores.....	50
5.3.	Situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata en	
	Costa Rica.....	51
5.4.	Propuesta de inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata	55
5.4.1.	Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio.....	55
5.4.2.	Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	55
5.4.3.	Existencia de un mercado de mercurio reciclado	56
5.4.4.	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como	
	materia prima	57
5.4.5.	Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular.....	57
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
6.1.	Conclusiones.....	58

6.2. Recomendaciones	60
7. BIBLIOGRAFÍA	61
APÉNDICES	69
APÉNDICE 1: ENTREVISTAS A EXPERTOS	70
APÉNDICE 2: ENTREVISTA TRANSCRITA	76
APÉNDICE 3: MATRÍZ DE CALIFICACIÓN DE INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR	79
APÉNDICE 4: MATRÍZ DE PRIORIZACIÓN DE INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo biogeoquímico del mercurio e inventario global para el año 2009.	8
Figura 2. Solubilidad de los minerales de (a)Hg (II) y (b)Hg(I). Fuente: (Lindsay, 1979)..	10
Figura 3. Ciclo del mercurio en cuerpos de agua. Fuente: (Selin, 2009).	11
Figura 4. Mapa de las partes firmantes del Convenio de Minamata. Fuente: (Selin et al., 2018)	12
Figura 5. Esquema de economía lineal. Fuente: (Blanco Cámara, 2018)	21
Figura 6. Esquema de economía circular regenerativa desde el diseño. Fuente: (Ellen MacArthur Foundation, 2013).	23
Figura 7. Pirámide invertida de la jerarquización en la gestión integral de los residuos. Fuente: (Ocampo, 2013)	28
Figura 8. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de producción y consumo.	42
Figura 9. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de gestión de residuos.	44
Figura 10. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de materias primas secundarias.	45
Figura 11. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de competitividad e innovación.....	47
Figura 12. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría principios de economía circular.	48
Figura 13. Calificaciones generales del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular.	50

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Emisiones globales de mercurio de origen natural estimadas para el 2008.....	5
Cuadro 2. Fuentes globales de emisiones de mercurio estimadas para el 2018. Fuente: (UNEP, 2019).....	7
Cuadro 3. Indicadores utilizados para evaluar la inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.	35
Cuadro 4 Indicadores adicionales propuestos para evaluar la incorporación de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.	37
Cuadro 5 Escala de calificación para los indicadores de economía circular.	37
Cuadro 6. Clasificación de los artículos del Convenio de Minamata según la categoría.	38
Cuadro 7. Escala utilizada para evaluar el criterio de calificación del indicador.....	38
Cuadro 8. Escala utilizada para evaluar el criterio de impacto en el Convenio de Minamata.	38
Cuadro 9. Grupos de interés a entrevistar mediante un muestreo de expertos.	40
Cuadro 10. Indicadores con prioridad ante la inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.....	51
Cuadro 11. Análisis FODA de la situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata.	51

LISTA DE ABREVIATURAS

ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de enfermedades (por sus siglas en inglés)
DIGECA	Dirección de Gestión de Calidad Ambiental
Eurostat	European Statistical Office
GASEL	Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral
Hg	Mercurio
MeHg	Metilmercurio
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MS	Ministerio de Salud
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización No Gubernamental
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

RESUMEN

El Convenio de Minamata tiene como objetivo reducir las emisiones y liberaciones de mercurio al ambiente con el fin de proteger la salud humana y los ecosistemas. Dicho Convenio limita la extracción de mercurio virgen y promueve la eliminación definitiva de este elemento mediante técnicas ambientalmente seguras. Sin embargo, este enfoque se considera lineal e ignora la realidad actual en la que todavía existen usos de este elemento para el que no se han desarrollado tecnologías sustitutas. Por ende, es necesario asegurar una reincorporación del mercurio dentro de las cadenas productivas permitidas por medio de un enfoque alternativo, por ejemplo, circular. En consecuencia, esta investigación propone identificar elementos de economía circular en el Convenio y proponer la inclusión de aquellos ausentes. Así, se evaluó la presencia de elementos de economía circular por medio de indicadores cualitativos obtenidos de literatura especializada. Posteriormente, se realizaron entrevistas a expertos y se sometieron los indicadores por medio de una matriz de priorización. Las calificaciones generales para las diferentes categorías de indicadores de economía circular se encuentran por debajo del 50% de cumplimiento. A excepción de la categoría de competitividad e innovación, que cuenta con un cumplimiento del 81%. Se propone incluir en el Convenio de Minamata párrafos enfocados en la jerarquización de la gestión integral de los residuos de mercurio, así como el reciclaje y la existencia de un mercado de mercurio de origen secundario. De igual forma es necesario desarrollar un marco de regulación que asegure la autosuficiencia del abastecimiento de mercurio para los usos permitidos, e impulsar las compras públicas libres de mercurio. Por consiguiente, se concluye que el Convenio de Minamata cuenta con oportunidades de mejora relacionadas con la inclusión de elementos de economía circular

Palabras clave: *Economía circular, Convenio de Minamata, Normativa ambiental, mercurio.*

ABSTRACT

The Minamata Convention aims to reduce emissions and releases of mercury into the environment in order to protect human health. This Convention limits the extraction of virgin mercury and promotes the definitive disposal of this element through environmentally safe techniques. However, this approach is considered linear and ignores the current reality in which there are still uses of this element for which substitute technologies have not been developed. Therefore, it is necessary to ensure a return of mercury within the permitted production chains through a circular approach. Consequently, this research proposes to identify the elements of circular economy in the Convention and propose the inclusion of those absent. Thus, the presence of circular economy elements was evaluated by qualitative indicators from specialized literature. Subsequently, interviews with experts were conducted and indicators were ranked through a prioritization matrix. The overall ratings for the different categories of circular economy indicators are below 50% compliance. Except for the competitiveness and innovation category, which has a compliance of 81%. It is proposed to include in the Minamata Convention paragraphs focused on the hierarchy of the integral management of mercury waste, as well as recycling and the existence of a market for mercury of secondary origin. Similarly, it is necessary to develop a regulatory framework that ensures the self-sufficiency of the supply of mercury for permitted uses, and to promote mercury-free public procurement. Therefore, it is concluded that the Minamata Convention has opportunities for improvement related to the inclusion of circular economy elements

Keywords: *Principles of circular economy, Minamata Convention, circular economy proposal, evaluation of environmental regulations, mercury.*

1. INTRODUCCIÓN

El mercurio es un elemento metálico altamente tóxico para el ser humano (Rice et al., 2014). A pesar de esto, dicha sustancia ha tenido una gran cantidad de usos a lo largo de la historia. Gaioli (2012) argumenta que desde la era industrial los niveles de mercurio ambiental han aumentado de manera desmesurada en virtud de la acción antropogénica. De forma que la salud humana y los ecosistemas se ven en riesgo por las altas concentraciones que se pueden alcanzar en el ambiente. A raíz de esto, surgió el Convenio de Minamata con el fin de proteger la salud humana ante los riesgos que representan las liberaciones antropogénicas de mercurio al ambiente. Además, Henrik Hallgrim (2014) destaca que los principios que sustentan dicho Convenio se basan en la restricción y eliminación de las emisiones antropogénicas de mercurio.

Por otro lado, el mundo ha caído en cuenta que el sistema económico lineal, basado en extraer-producir-usar-desechar, está obsoleto y resulta ser un modelo ineficiente e insostenible para el desarrollo económico. Por esta razón, ha emergido un nuevo sistema conocido como economía circular, el cual está enfocado en reducir los residuos, tanto de materiales como de energía, y reincorporarlos dentro de la cadena productiva (Abad-Segura et al., 2020). Asimismo, Hjort (Best available techniques and sustainable development goals, 2019) señala que en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se plantea la necesidad de alcanzar la producción y el consumo sostenible para el 2030, esto mediante la reducción de residuos y la transición gradual de una economía lineal a una circular.

La importancia de la presente investigación radica en que, para la correcta implementación de políticas de minimización de contaminación, como el Convenio de Minamata, es necesario tomar en cuenta un modelo de economía circular con el fin de reducir la extracción de mercurio y evitar la liberación de sus residuos al ambiente para proteger la salud humana. Además, es necesario que desde el planteamiento del Convenio se contemplen los principios de economía circular que aseguren el autoabastecimiento de mercurio para los usos permitidos a partir de fuentes secundarias.

Por esta razón, se propone evaluar la presencia de principios de economía circular en el Convenio de Minamata por medio de indicadores cualitativos, para determinar los elementos que se encuentran presentes en el Convenio. Además, se pretende analizar la situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata en Costa Rica por medio de entrevistas a expertos. Posteriormente, se realiza una priorización de los indicadores que requieren propuestas de inclusión en el Convenio de Minamata. Esta investigación procura ser una contribución para la mejora constante del Convenio de Minamata. De esta forma, se espera que esta propuesta sea incluida dentro de las negociaciones de las Partes del Convenio. De manera complementaria, se pretende que esta marque un precedente para el análisis de normativa, la vigente y futura, de forma que se orienten las políticas públicas hacia un nuevo paradigma económico más sostenible.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar la incorporación de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la presencia de principios de economía circular en el Convenio de Minamata, a nivel internacional.
- Analizar la situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata en Costa Rica.
- Determinar oportunidades de mejora, prioritarias, del Convenio de Minamata a nivel internacional bajo la perspectiva de economía circular.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Distribución ambiental del mercurio

El mercurio (Hg) es un elemento que existe naturalmente en el ambiente. Sin embargo, este es considerado relativamente raro debido a que su abundancia promedio en la corteza es de 0.08 mg/kg. El mercurio (Hg) se encuentra en cantidades trazas en la mayoría de los materiales geológicos. La principal forma inorgánica del Hg corresponde al sulfuro de mercurio (II) (HgS), conocido como cinabrio (Sparks et al., 1996). Sin embargo, el mercurio también puede ser hallado en tres estados de oxidación (0, 1 + y 2 +). Además, es conocido por formar una gran cantidad de compuestos organometálicos en suelo y sedimentos, como resultado de su tendencia por formar enlaces covalentes con algunos grupos orgánicos (Lindsay, 1979).

Además, dicho elemento ha sido utilizado en sus diferentes formas por el ser humano, gracias a sus propiedades fisicoquímicas. Estos usos incluyen: equipo de laboratorio, electrodos, lámparas ultravioletas, bombas de difusión, amalgamas dentales, baterías, explosivos, catalizadores, plaguicidas y pinturas (Sparks et al., 1996). De la misma forma, Gaioli (2012), destaca que, desde la era industrial los niveles de mercurio ambiental han aumentado de manera desmesurada en virtud de la acción antropogénica. De forma que la salud humana y los ecosistemas se ven en riesgo por las altas concentraciones que se pueden alcanzar en el ambiente.

El mercurio ha sido declarado el tercer elemento o sustancia más tóxica en el planeta por la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés). La exposición al mercurio ha sido asociada a 250 síntomas, los cuales amenazan seriamente la salud humana (Rice et al., 2014). Debido a su alta presión de vapor suele ser volatilizado y se transporta fácilmente entre las diferentes matrices del ambiente, por lo que sus efectos en él y en la salud humana se ven incrementados (Lindsay, 1979). Por esta razón, es necesario conocer las fuentes de emisión del mercurio, su ciclo biogeoquímico y posibles medidas de control con el fin de analizar el Convenio de Minamata desde la perspectiva de economía circular.

3.1.1. Fuentes de emisión

Las fuentes de emisión del mercurio se dividen en dos grandes grupos, las naturales y las antropogénicas. En este apartado se abordarán las emisiones atmosféricas naturales y de origen antropogénico. Posteriormente, se profundizará en el ciclo biogeoquímico del mercurio y las interacciones que dicho elemento tiene en las diferentes fases del ambiente.

Fuentes Naturales

Cuando se habla de emisiones naturales, estas incluyen tanto las emisiones primarias, como los procesos de reemisión de mercurio depositado históricamente sobre superficies terrestres y marinas. Una de las principales fuentes de mercurio natural son los océanos, como se puede observar en el Cuadro 1. Pirrone et al (2010) argumentan que existe una tendencia del mercurio de fluir del océano hacia la atmósfera, la cual se debe a tres factores. En primer lugar, se atribuye al gradiente de concentraciones entre la superficie acuática y el aire. Además, este fenómeno se asocia con la radiación solar que es responsable de la foto-reducción del mercurio, de manera que lo transforma en su forma más volátil, el mercurio metálico (Hg^0). Igualmente, las emisiones de mercurio se relacionan con la temperatura cálida en la capa más superficial del agua que facilita la evaporización del mercurio (Hg).

Cuadro 1. Emisiones globales de mercurio de origen natural estimadas para el 2008.

Fuente: (Pirrone et al., 2010).

Fuente	Mercurio (10^3 kg Hg/año)	Contribución %
Océanos	2682	52
Lagos	96	2
Bosques	342	7
Tundra/pradera/sabana/pradera/Chaparral	448	9
Desierto/Metalífero/No vegetal	546	10
Zonas de agricultura	128	2
Evasión después de eventos de agotamiento de mercurio	200	4
Quema de biomasa	675	13
Volcanes y zonas geotérmicas	90	2
Total	5207	100

Por otra parte, las emisiones relacionadas con el suelo y la vegetación tienen un aporte del 7% según se puede observar en el Cuadro 1. Este flujo de mercurio se ve influenciado por condiciones meteorológicas, precipitaciones atmosféricas históricas de Hg y el tipo de vegetación de la zona. Igualmente, las emisiones de mercurio provenientes de la vegetación dependen de muchos factores, incluyendo la absorción del mercurio de la atmósfera, la precipitación atmosférica de Hg sobre el follaje, y la absorción del mercurio de las raíces. No obstante, se debe considerar que la proximidad de la vegetación natural a fuentes de emisión antropogénicas puede aumentar el contenido de mercurio presente en el follaje y las raíces (Pirrone et al., 2010).

Fuentes antropogénicas

El mercurio también es emitido a la atmósfera por fuentes antropogénicas, lo que ha incrementado los flujos de su ciclo natural. Pacyna et al (2010) reportan que el uso de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica o calor es una de las mayores fuente de emisiones de mercurio. Dicha fuente considera tanto la producción de energía a gran escala, como las pequeñas industrias y el sector de calentamiento residencial. Tanto Pirrone et al (2010) y Pacyna et al (2010) argumentan que estos combustibles no contienen grandes concentraciones de mercurio. Sin embargo, señalan que la gran cantidad de carbón que es utilizado, y el hecho de que la mayoría de las emisiones de la combustión van directamente al aire, resultan en que esta sea la mayor fuente de emisiones antropogénicas de mercurio (Yudovich y Ketris, 2005).

Otra fuente importante de emisiones de mercurio (Hg) está relacionada con el procesamiento de minerales. Pacyna et al (2010) reportan que las emisiones de mercurio en este sector se dan debido a las impurezas y al uso de combustibles fósiles. El mercurio puede ser encontrado como impureza en los minerales de cobre, zinc, plomo, níquel y oro. Al mismo tiempo, los autores argumentan que la producción de oro es una fuente significativa de emisiones de Hg debido a que este elemento está presente en los minerales de oro, y también es utilizado en algunos procesos de la extracción. Pirrone et al (2010) destacan que una de las fuentes antropogénicas más críticas es la minería de oro artesanal y a pequeña escala, dado que esta actividad se da en países con economías en transición y suelen carecer de controles adecuados. Tan es así que, en los datos más recientes generados por la UNEP,

se ha determinado que la fuente principal de emisiones de mercurio para el 2018 es la minería artesanal y de pequeña escala, tal y como se puede observar en el cuadro 2.

Cuadro 2. Fuentes globales de emisiones de mercurio estimadas para el 2018. Fuente: (UNEP, 2019)

Fuente	Cantidad (kg)
Minería Artesanal y de Pequeña Escala	837 658
Combustión estacionaria de carbón	473 777
Producción de metales no ferrosos	326 657
Producción de cemento	233 168
Residuos de productos con mercurio añadido	146 938
Monómero de cloro vinílico	58 268
Quema de biomasa	51 860
Producción de metales ferrosos	39 903
Producción de cloro álcali	15 146
Incineración de residuos	14 944
Refinamiento de petróleo	14 377
Combustión estacionaria de petróleo y gas	7 130
Cremación	3 768
Total	2 223 594

Además de los puntos anteriores, se debe considerar que tanto en los desechos industriales como en los municipales se cuenta con presencia de mercurio. En el caso de los desechos industriales, las emisiones de Hg están relacionadas a las fases productivas de los diferentes procesos industriales. Mientras tanto, el mercurio presente en los desechos municipales proviene principalmente del uso de productos con mercurio añadido (Pirrone et al., 2010).

3.1.2. Ciclo biogeoquímico del mercurio

Como se explicó con anterioridad, el mercurio se encuentra naturalmente en el ambiente. Por lo tanto, está sujeto a un ciclo biogeoquímico natural, en el cual ocurre una serie de interacciones entre el suelo, el agua, la atmósfera y los seres vivos (Kothney, 1973).

A pesar de ser un ciclo natural, este se ha visto afectado por las actividades antropogénicas, las cuales han incrementado las concentraciones de mercurio en las distintas fases.

En la Figura 1, se muestra que el mercurio es movilizado desde los reservorios en tierra y océanos a la atmósfera por medio de actividad volcánica, geológica y oceánica. Además, el ciclo biogeoquímico incluye el transporte atmosférico, la deposición en mares y suelo, la re-volatilización, y en última instancia la acumulación en los sedimentos de las profundidades oceánicas. En esta figura, se detallan los flujos de mercurio en toneladas anuales. Además, se denota en color negro los flujos naturales preindustriales, las contribuciones antropogénicas se encuentran en color rojo, y los flujos naturales aumentados por actividad antropogénica se detallan por medio de las líneas punteadas en color rojo y negro (Selin, 2009).

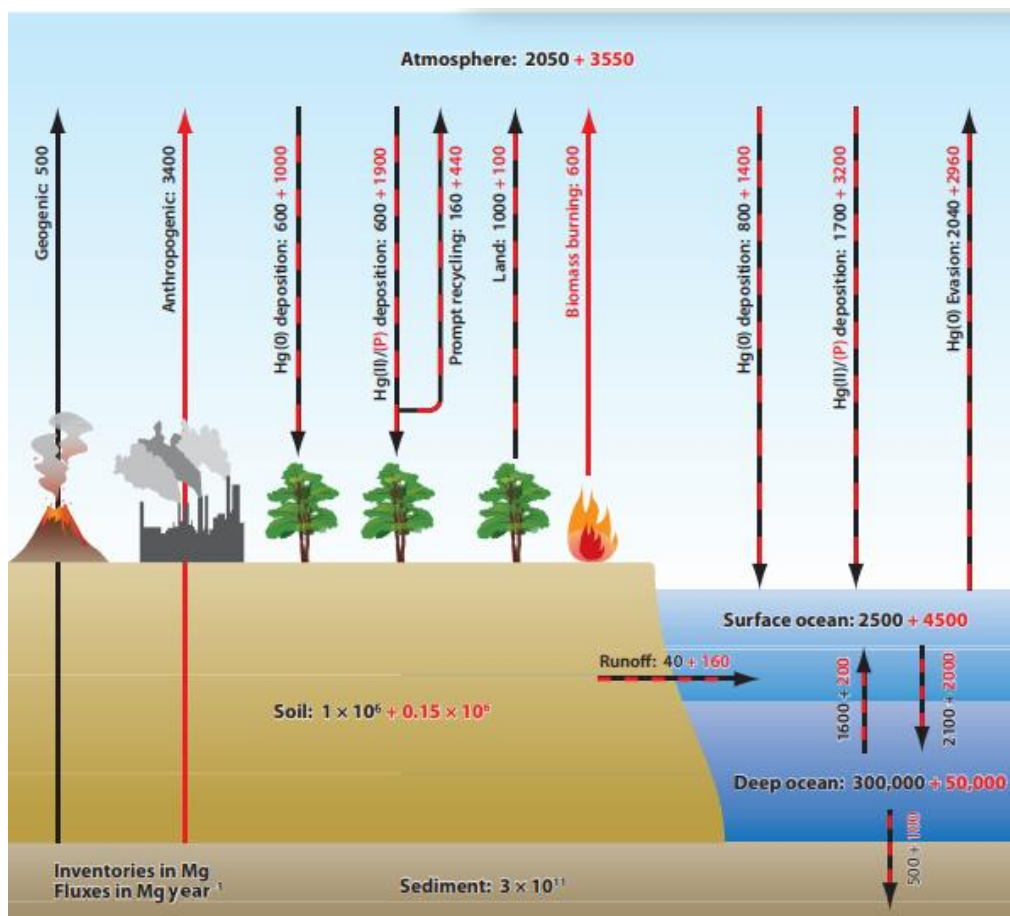


Figura 1. Ciclo biogeoquímico del mercurio e inventario global para el año 2009.

Fuente: (Selin, 2009).

Ciclo atmosférico

El mercurio es considerado uno de los metales pesados más ubicuos debido a su alta presión de vapor. Dicha propiedad facilita una gran incorporación del Hg a la atmósfera. Se estima que 100 000 toneladas anuales de mercurio retornan al suelo por medio de la lluvia en comparación con las 10 000 toneladas minadas al año (Lindsay, 1979). Por lo tanto, resulta importante describir cual es el comportamiento del mercurio en la atmósfera.

El mercurio es emitido en su forma elemental a la atmosfera desde el suelo y las superficies oceánicas, por medio de procesos que involucran la de la transpiración del suelo y de las plantas (Lin y Pehkonen, 1999). Se ha observado que la transpiración de las plantas se da en los primeros minutos después del amanecer, cuando las estomas se abren y liberan el mercurio acumulado durante la noche (Kothney, 1973). Además, se cuenta con emisiones de mercurio antropogénico que incluyen: mercurio elemental Hg (0), mercurio divalente Hg (II) y mercurio asociado con material particulado Hg (Selin, 2009).

Es importante destacar que la principal especie del mercurio en la atmósfera es el mercurio elemental. Este tiene una concentración en el aire de 1.6 ng/m^3 , con un tiempo de vida atmosférico de 0.5 a 1 año. Por otro lado, el Hg (II) y el Hg particulado son más solubles en agua que el Hg (0), por lo que estos no permanecen mucho en la atmósfera, sino que se depositan en los ecosistemas. Por ende, cuenta con un tiempo de vida atmosférico que va de días a semanas, con una concentración de $1\text{-}100 \text{ pg/m}^3$. Como resultado de esto, las emisiones directas de Hg (II) y el Hg particulado tienden a depositarse a un nivel regional (Selin, 2009).

Cabe mencionar que el mercurio experimenta una serie de transformaciones mientras se encuentra en la atmósfera. La principal reacción que experimenta el Hg (0) es la oxidación fotoquímica a Hg (II). De esta manera, el pico de producción de Hg (II) se espera durante el mediodía, cuando la radiación solar es mayor. También se presenta la reducción del Hg (II) a Hg (0) en menor escala (Lin y Pehkonen, 1999).

Ciclo terrestre

El mercurio en suelo se encuentra en sumideros geológicos. No obstante, la mayoría del mercurio global presente en la superficie del suelo proviene de deposiciones atmosféricas. La mayor parte de este mercurio es precipitado como Hg (II), del cual una gran parte es

volatilizada nuevamente. El mercurio recién depositado se encuentra más disponible para la metilación, o para la reducción a Hg elemental el cual es re-volatilizado (Hintelmann et al., 2002). Por otro lado, la porción restante es incorporada a los reservorios terrestres, donde puede permanecer de siglos a milenios. Alrededor del 90% del mercurio terrestre se encuentra en el suelo asociado con la materia orgánica, donde forma fuertes enlaces con grupos sulfuro (Selin, 2009).

En esta fase el mercurio también es propenso a entrar en disolución con corrientes de agua subterránea, donde puede ser metilado o ser incorporado a un cuerpo de agua (Selin, 2009). En la Figura 2(a) se puede observar que los compuestos de HgCl_2 y HgBr_2 suelen ser más solubles que los óxidos e hidróxidos, que a su vez son más solubles que el HgI_2 . Además, en el caso de los compuestos de Hg (I), la mayor solubilidad se presenta HgSO_4 , seguidos del Hg_2Cl_2 , Hg_2Br_2 . Dicho comportamiento se puede observar en la Figura 2(b) (Lindsay, 1979), en esta se muestra que en condiciones acidas la solubilidad aumenta, en tanto que en condiciones alcalinas es disminuye.

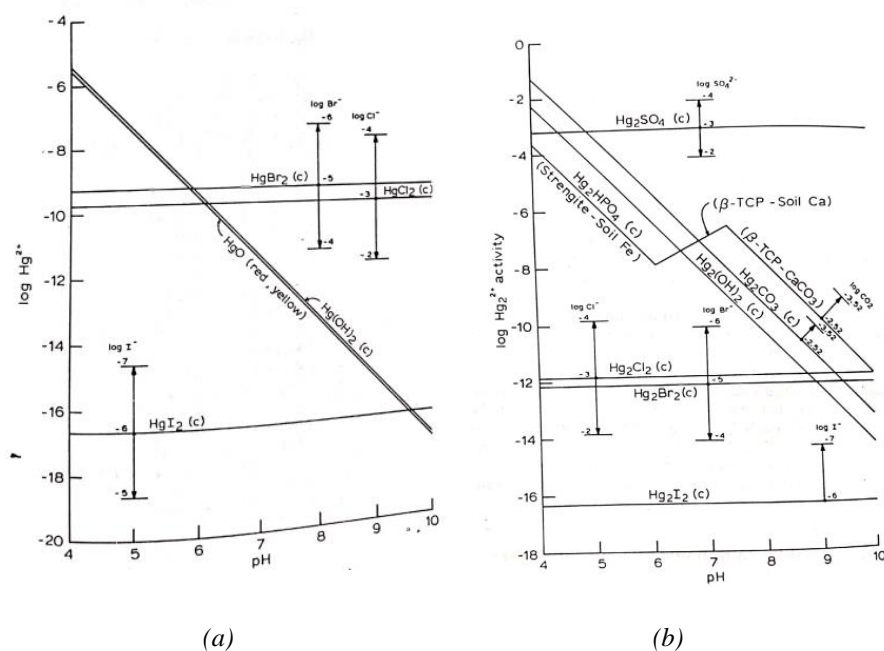


Figura 2. Solubilidad de los minerales de (a) Hg (II) y (b) Hg(I). Fuente: (Lindsay, 1979).

Ciclo acuático

Como se explicó anteriormente, el mercurio proveniente de emisiones atmosféricas se devuelve a la superficie terrestre y acuática por medio de precipitaciones. Una porción del mercurio divalente, depositado en la superficie terrestre o acuática, es convertido en metilmercurio (MeHg), la forma más tóxica de dicho elemento (Selin, 2009). La metilación del mercurio es un proceso biológico facilitado por algunas bacterias reductoras de sulfatos y de hierro. El proceso de metilación tiene lugar importante en las tierras húmedas y en los sedimentos de lagos o ríos (Gilmour et al., 1998).

Como se puede apreciar en la Figura 3, el metilmercurio se puede introducir en la cadena alimenticia de los invertebrados de mayor tamaño. Una vez que es ingerido, experimenta un proceso de bioacumulación en los organismos, debido a que los compuestos orgánicos de mercurio tienen una alta solubilidad en lípidos (Langford, 1999). Posteriormente, el mercurio es biomagnificado a medida que avanza en los niveles superiores de la cadena alimenticia. Este proceso consiste en que la concentración de metilmercurio en los peces depredadores se ve incrementada con respecto a la concentración del agua en un factor mayor a 10^6 (Engstrom, 2007).

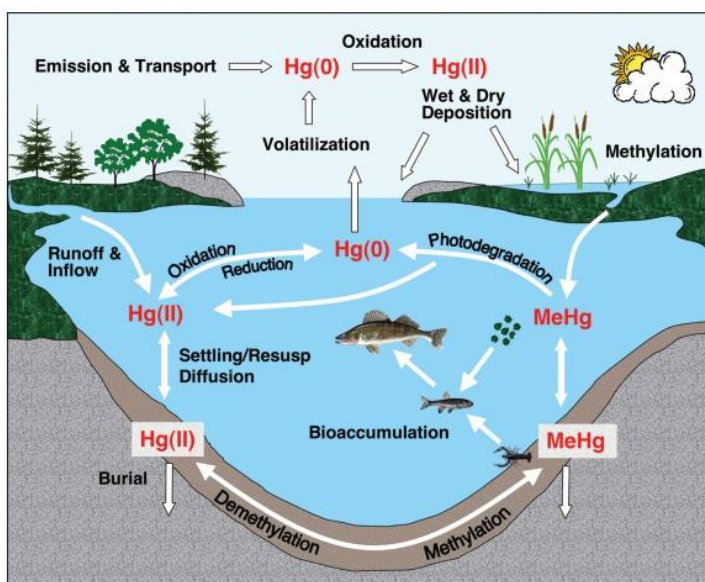


Figura 3. Ciclo del mercurio en cuerpos de agua. Fuente: (Selin, 2009).

Además, en los océanos, las especies de mercurio presentes son el mercurio elemental (Hg^0), el ion mercurio (II) (Hg^{2+}), metilmercurio (Me-Hg), dimetilmercurio ($\text{Me}_2\text{-Hg}$), y mercurio en material particulado (Hg-particulado) y mercurio coloidal (Hg-coloidal). Los océanos juegan un papel importante en la movilización del mercurio, ya que se da un intercambio significativo desde la superficie oceánica hacia la atmósfera, lo que incrementa el tiempo de vida de dicho elemento en la fase gaseosa (Selin, 2009). Cabe mencionar, que el flujo de mercurio entre el océano y la atmósfera depende de la concentración de mercurio elemental (Hg^0) y de la temperatura. Las altas concentraciones de mercurio y las temperaturas cálidas causan un mayor grado de sobresaturación en el agua, por lo que aumenta la transferencia hacia la atmósfera (Strode et al., 2007).

3.2. Convenio de Minamata

El Convenio de Minamata es un tratado internacional promulgado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Tiene como objetivo reducir las emisiones y liberaciones de mercurio (Hg) en el ambiente con el fin de proteger la salud humana y los ecosistemas. Este convenio fue acordado en Ginebra 2013 y entró en rigor en 2017. Actualmente, el convenio cuenta con 128 países signatarios que apoyan la regulación y el control de dicho elemento, que como es sabido, tiene un amplio uso en objetos y procesos cotidianos (Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2021). En la Figura 4 se muestra el mapa de las partes firmantes del Convenio de Minamata, las cuales se resaltan en coloración azul oscuro



Figura 4. Mapa de las partes firmantes del Convenio de Minamata. Fuente: (Selin et al., 2018)

3.2.1. Generalidades del Convenio de Minamata

Dentro de los aspectos más importantes incluidos en el Convenio de Minamata se encuentra la prohibición del desarrollo de nuevas minas de mercurio elemental (Hg), la eliminación gradual de las minas existentes, así como la reducción del uso del mercurio y sus compuestos tanto en productos como en procesos. Para esto se planteó promover medidas de control de emisiones, así como impulsar nuevas regulaciones relacionadas con la minería artesanal y el control del mercurio. Por último, este Convenio establece regulaciones acerca del almacenamiento del mercurio para su posterior disposición (Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2021).

Además, la Dra. Doris Leuthard presidente de la Confederación Suiza y Ministra de Ambiente, Transporte, Energía y Comunicación de Principios del Convenio de Minamata, señaló en el prólogo del Convenio que este es el primer acuerdo de su tipo que es negociado en el siglo XXI, por lo que tiene un enfoque innovador al abordar la problemática del mercurio a lo largo del ciclo de vida, refiriéndose desde la extracción hasta la gestión de los residuos de mercurio (Hg) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2019).

Definiciones importantes

El Convenio de Minamata (Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2021) define una serie de términos que son importantes para la comprensión de este y de los temas desarrollados posteriormente en este documento, dentro de ellas se destacan las siguientes:

- ✓ **Mercurio:** mercurio elemental (Hg⁰).
- ✓ **Compuesto de mercurio:** se entiende toda sustancia que consiste en átomos de mercurio y uno o más átomos de elementos químicos distintos que puedan separarse en componentes diferentes solo por medio de reacciones químicas.
- ✓ **Producto con mercurio añadido:** todo producto o componente de un producto al que se haya añadido mercurio o un compuesto de mercurio de manera intencional.
- ✓ **Emisiones:** se refiere las emisiones de mercurio o compuestos de mercurio a la atmósfera.

- ✓ **Liberaciones:** son todas aquellas liberaciones de mercurio o compuestos de mercurio al suelo o al agua.
- ✓ **Mejores técnicas disponibles:** se refiere a las técnicas más eficaces para evitar las emisiones y liberaciones de mercurio a la atmósfera, al agua y al suelo, teniendo en cuenta consideraciones económicas y técnicas.
- ✓ **Mejores prácticas ambientales:** es la aplicación de la combinación más adecuada de medidas y estrategias de control ambiental.

3.2.2. Principios del Convenio de Minamata

En primera instancia, uno de los principios que prevalecen a lo largo del Convenio de Minamata es el reconocimiento del mercurio como una sustancia química tóxica de importancia mundial. Dicho convenio enfatiza los efectos negativos sobre la salud humana tras la exposición crónica y aguda (Eriksen & Perrez, 2014). De igual forma, se presentan otros principios, como los de la Declaración de Río, entre ellos el principio de preocupación global y el de la responsabilidad por la salud de las futuras generaciones. Además, Eriksen y Perrez (2014) ha señalado que el Convenio refleja la importancia del apoyo financiero, tecnológico y de capacidad de construcción entre las partes.

Los mismos autores señalan que en el Convenio de Minamata no se encuentra presente el principio Precautorio, sino que solamente está reflejado de manera implícita, debido a que se hace alusión a éste en la Declaración de Río (Eriksen & Perrez, 2014) que lo define como: *“Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente.”* (ONU Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, 1992). Cabe destacar que durante la Convención realizada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para discutir la problemática del mercurio en 2001 sí se habló del principio Precautorio. Sin embargo, en las negociaciones posteriores las distintas delegaciones no le prestaron mucha atención al principio antes mencionado, motivo por el cual no fue incorporado en el Convenio (Eriksen & Perrez, 2014).

El siguiente principio que aparece de manera difusa es el Principio de quien contamina paga, el cual es definido en la Declaración de Río como: *“Los Estados deberán desarrollar la legislación nacional relativa a la responsabilidad y la indemnización respecto de las víctimas de la contaminación y otros daños ambientales.”* (ONU Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, 1992). Sin embargo, a pesar del fuerte apoyo que tuvo dicho principio por parte de los gobiernos, no se logra evidenciar de manera clara la operación y fiscalización de este (Eriksen & Perrez, 2014).

Relacionado con lo anterior, en las discusiones previas a la firma del Convenio de Minamata se habló de principios enfocados “al final del tubo” como alternativa de control para reducir las liberaciones de mercurio al ambiente (Inter-Organization Programme For The Sound Management Of Chemicals, 2002), lo cual permeó hasta la redacción del Convenio que rige actualmente. Esto se puede evidenciar mediante las medidas implementadas en el convenio, las cuales están enfocadas al tratamiento de los y la disminución de liberaciones y emisiones. Por ejemplo, se estipuló que los excesos de mercurio provenientes del sector de cloro álcali se considerarían residuo por lo que debían someterse a un proceso de disposición final (Eriksen & Perrez, 2014).

3.2.3. Convenio de Minamata en Costa Rica

Costa Rica firmó el Texto propuesto para el Convenio de Minamata el 10 de octubre, 2013. Posteriormente, la Asamblea Legislativa aprueba el Convenio de Minamata para su implementación mediante la Ley 9391 el 16 de agosto, 2016 (Asamblea Legislativa Gobierno de Costa Rica, 2016). Costa Rica firmó la ratificación el 19 de enero, 2017, (Rica, 2017). Además, Costa Rica también es parte de otros convenios internacionales que impactan la problemática del mercurio y la aplicación del Convenio de Minamata. Entre ellos está el Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación, que tiene relación con la materia debido a que el mercurio es considerado un residuo peligroso. Asimismo, Costa Rica también es signatario del Convenio de Rotterdam para la Aplicación de Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos, el cual está relacionado al Convenio de Minamata debido a que varios plaguicidas contienen mercurio (Hg) (DIGECA, 2018).

Como signatario del Convenio, Costa Rica ha hecho esfuerzos para su implementación. Entre ellos se asignó a la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA), dependencia del Ministerio de Ambiente y Energía, como ente encargado del cumplimiento del Convenio de Minamata (DIGECA, 2016). Esta entidad reportó que se realizó un plan piloto de sustitución de equipos con mercurio durante los años 2001-2009 en el Hospital de Niños. Eso se logró replicar en 17 hospitales y 3 Áreas de Salud de la Caja Costarricense de Seguro Social. Asimismo, DIGECA afirmó que tanto el MINAE como el Ministerio de Salud han realizado esfuerzos por mejorar las prácticas de extracción en minería artesanal por medio de capacitaciones, estudios e inventarios de uso de mercurio (DIGECA, 2016).

Según la evaluación inicial para la implementación del Convenio de Minamata (DIGECA, 2018), se determinaron una serie de acciones preexistentes para las cuales ya existía normativa que regulaba los aspectos de monitores y control para la gestión del mercurio (Hg) y dentro de las principales se encuentran:

- ✓ La Dirección General de Aduanas cuenta con una partida arancelaria específica para el mercurio y compuestos de mercurio.
- ✓ El país no fabrica productos con mercurio y no se tienen procesos productivos que utilicen dicho metal.
- ✓ El país cuenta con reglamentos sobre límites de emisiones al aire para hornos de fundición de vidrio (Decreto Ejecutivo No. 38237-S), sobre operación y control de emisiones en el proceso de co-incineración (Decreto Ejecutivo No. 39136-S-MINAE.) y el reglamento de requisitos para la utilización de combustibles alternos en hornos cementeros (Decreto Ejecutivo No. 31837-S).
- ✓ En el Decreto Ejecutivo N.º 33601 de uso y vertido de aguas se establecen los parámetros para vertido de Hg: 0.01mg/l al alcantarillado y 0.01 mg/L para cuerpos receptores.
- ✓ Las baterías y fluorescentes se consideran residuos especiales según el Decreto Ejecutivo N°38272.

- ✓ Se cuenta con el Decreto Ejecutivo No. 37757 que regula los Valores Guía en Suelos para la descontaminación de sitios afectados por emergencias ambientales o derrames.

Aunado a lo anterior, la misma evaluación inicial definió una serie de desafíos que el país aún presenta en cuanto al cumplimiento del Convenio de Minamata, dentro de los que destacan la utilización de productos con mercurio añadido. Para lo cual se tiene como estrategia establecer límites de contenido máximo de mercurio en dichos productos (Anexo A, parte I del Convenio) y cuando se considere necesario establecer la prohibición requerida. De igual forma, otra amenaza corresponde a la extracción de oro artesanal y a pequeña escala. Por lo que la evaluación inicial para la implementación del Convenio de Minamata propuso promover la capacitación y sensibilización para el cambio tecnológico (DIGECA, 2018). Sin embargo, un año después 2019 se emite una notificación a la secretaría del Convenio donde se indica que las emisiones por minería artesanal son insignificantes sin las correspondientes estimaciones y liberaciones al ambiente (Soto Montero, 2019).

3.2.4. Institucionalidad del Convenio de Minamata

Para realizar un análisis del sistema de fiscalización del Convenio de Minamata en Costa Rica es necesario hacer un recuento de la estructura institucional existente relacionada al manejo y gestión de sustancias químicas, la cual se presenta a continuación.

3.2.4.1. Instituciones encargadas del seguimiento del Convenio de Minamata en Costa Rica

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE)

A este ministerio le compete formular, planear y ejecutar las políticas de recursos naturales y de protección ambiental. Además, se le atribuye la dirección, el control, la fiscalización, la promoción y el desarrollo de dichas políticas ambientales. Aunado a lo anterior, el MINAE es la autoridad nacional responsable de coordinar los esfuerzos relacionados con la aplicación del Convenio de Minamata (DIGECA, 2018).

Como parte del MINAE también se encuentra la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA) la cual es la encargada de la gestión de sustancias químicas, por lo que tiene como función validar normas técnicas y regulaciones de calidad ambiental, dirigir el

establecimiento de mecanismos y procedimientos de control ambiental, y coordinar el diseño e implementación de mecanismos de abatimiento de la contaminación (Asamblea Legislativa Gobierno de Costa Rica, 2016).

Ministerio de Salud

En segundo lugar, en el Ministerio de Salud se ubica la rectoría del Sector Salud, a esta entidad le corresponde proteger las condiciones ambientales que puedan afectar la salud humana. De igual manera, esta entidad se encarga de establecer políticas, regulaciones, normas técnicas y coordina el control de sustancias peligrosas, manejo de residuos y contaminantes atmosféricos (DIGECA, 2018).

Ministerio de Agricultura y Ganadería

Este ministerio cuenta con Servicio Fitosanitario del Estado, el cual vela porque la comercialización de agroquímicos esté amparada por las regulaciones técnicas y jurídicas vigentes. Además, esta autoridad es la responsable de ejercer controles para la importación de plaguicidas y prohibir el ingreso de plaguicidas peligrosos como aquellos que contengan mercurio (DIGECA, 2018).

Dirección General de Aduanas del Ministerio de Hacienda

Esta institución tiene como objetivo controlar las mercancías que ingresan y salen del territorio nacional, lo cual incluye los intereses ambientales. A esta le compete la implementación de convenios internacionales y la legislación nacional. Por esta razón, se debe tomar en cuenta esta entidad para los movimientos trasfronterizos del mercurio (Poder Ejecutivo, 2021).

Consejo de Salud Ocupacional

Este es un organismo técnico adscrito al Ministerio de Trabajo y Seguridad Social que tiene como función propiciar las mejores condiciones de salud ocupacional dentro de los centros de trabajo (DIGECA, 2018). Por consiguiente, esta institución es la encargada de velar por la seguridad de todos los trabajadores que por las condiciones de los procesos o productos están en contacto con sustancias de mercurio.

Secretaría Técnica de Coordinación para la Gestión de Sustancias Químicas

Dicha institución fue creada como una instancia de apoyo para las autoridades nacionales competentes en la gestión de sustancias químicas peligrosas según el Sistema Globalmente Armonizado (Poder Ejecutivo de Costa Rica, 2017). La Secretaría Técnica de Coordinación para la Gestión de Sustancias Químicas está integrada por representantes del MS, MAG, MINAE, ONG y otras instituciones. Y sus funciones están relacionadas a la ratificación e implementación de los Convenios relacionados con el tema de sustancias químicas, además de apoyar con recomendaciones técnicas y planes de acción relacionados con la materia (DIGECA, 2018; Poder Ejecutivo, 2006).

Ventanilla Única de Plaguicidas

Esta ventanilla fue creada para el registro de plaguicidas de uso agrícola, coadyuvantes y sustancias afines, con el fin de recibir, tramitar y resolver las solicitudes de registro. La misma está relacionada al Convenio de Minamata principalmente por aquellos plaguicidas que contengan mercurio para su registro (DIGECA, 2018).

3.2.4.2. Marco Jurídico del Convenio de Minamata en Costa Rica

En cuanto al marco jurídico que le compete a Costa Rica para cumplir con el Convenio de Minamata se puede determinar que, en primer lugar, el artículo 3 del Convenio establece la obligatoriedad de prohibición de nueva minería de mercurio. Para el cumplimiento de dicho artículo, la legislación nacional cuenta con el Código de Minería que regula toda actividad de exploración y explotación de minería metálica. De igual forma, el país no cuenta con reservas de mercurio ni plantas de cloro-álcali, por lo que no se requiere tomar medidas regulatorias al respecto (MINAE, 2018).

El Convenio de Minamata regula los productos con mercurio añadido. El artículo 4 del Convenio prohíbe la fabricación, importación y exportación de productos con mercurio añadido después de la fecha de eliminación de 2020 y que se encuentren en la lista taxativa de la parte I del anexo A. En Costa Rica se comercializan artículos con mercurio añadido tales como baterías, interruptores, lámparas, aparatos de medición no electrónicos y amalgamas dentales. De los cuales solamente los cosméticos y los plaguicidas se encuentran regulados a nivel nacional. Mientras tanto, no existe una restricción específica sobre usos de

productos con mercurio añadido en la legislación nacional, por lo que se deben tomar acciones en torno a esta sección del Convenio (MINAE, 2018).

También regula los procesos de fabricación que utilizan mercurio o compuestos de mercurio. Dentro de los más significativos que describe el Convenio se encuentran: el mercurio como catalizador para producir cloro en las plantas cloro-álcali con celdas de mercurio y el mercurio como catalizador para producir cloruro de vinilo monómero como precursor del PVC. Sin embargo, ninguno de estos procesos se realiza en Costa Rica por lo que no existe normativa nacional relacionada (MINAE, 2018).

Adicionalmente, en relación con la extracción de oro artesanal, Costa Rica presenta un fuerte aparato legal en términos de minería, y específicamente para esta actividad en pequeña escala. Se cuenta con el Reglamento de la Actividad Minera y en pequeña escala para subsistencia familiar por parte de Cooperativas Mineras, Decreto No. 37225. DIGECA (MINAE, 2018) en su estudio del marco jurídico determina que en vista que la legislación nacional completa los requerimientos legales necesarios para el cumplimiento del Convenio, no es necesario llevar a cabo acciones para este artículo.

3.3. Economía circular

En los apartados anteriores se ha profundizado en la problemática de contaminación con mercurio y en el abordaje que le da el Convenio de Minamata a la misma. Sin embargo, Hjort (2019) señala que en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se plantea la necesidad de alcanzar la producción y el consumo sostenible para el 2030, esto mediante la reducción de residuos y la transición gradual de una economía lineal a una circular.

De igual manera, el Convenio de Minamata es una política que apunta hacia la minimización de la contaminación, por lo que requiere el reemplazo de mercurio virgen por el uso de mercurio secundario, además de otros controles. De esta forma, los modelos de economía circular vienen a solventar dicha necesidad, en concordancia con los ODS (Hjort et al., 2019). Por esta razón, en el siguiente apartado se abordan conceptos claves de la economía circular con el fin de analizar el Convenio de Minamata desde esta perspectiva.

3.3.1. Definiciones

Economía lineal

En la actualidad, se posee un modelo económico heredado de la Revolución Industrial. Es a partir de dicho evento histórico que se impulsó el desarrollo económico bajo la perspectiva de “*extraer-fabricar-eliminar*” lo cual es conocido como economía lineal (Falappa et al., 2019). Relacionado a lo anterior, Sauvé (Sauvé et al., 2016) define la economía lineal como: “*la producción y el consumo de bienes que, de manera parcial, ignora las externalidades ambientales ligadas a la extracción de materia prima virgen, de generación de desechos y de contaminación.*”

Durante dicho periodo histórico se fue construyendo la cultura del consumo, por lo que las sociedades humanas han buscado adquirir bienes constantemente con el fin de reemplazar todos aquellos objetos que han sido obsoletos (Falappa et al., 2019). Como consecuencia se provocó un ciclo de generación de residuos basado en la Figura 5.



Figura 5. Esquema de economía lineal. Fuente: (Blanco Cámara, 2018)

Economía circular

Una de las definiciones más recientes de economía circular que incorpora elementos multidisciplinares corresponde a la descrita por la *Ellen MacArthur Foundation* (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Esta consiste en que la economía circular es un sistema industrial que es regenerativo por intención y diseño. De forma que reemplaza el concepto de “*fin de la vida útil*” con la restauración, el cambio hacia energía renovable, la eliminación de sustancias químicas tóxicas, y apunta a la eliminación de los residuos por medio del diseño de los materiales, productos y sistemas dentro del modelo de negocio.

En la Figura 6 se puede observar cómo se conceptualiza el esquema de economía circular desde el diseño de los bienes. En ella se pueden distinguir dos grandes ciclos: en color verde, el de los materiales biológicos y en color azul, el de los materiales técnicos. Los materiales biológicos corresponden a todos aquellos de origen natural, como la comida, algodón o madera (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

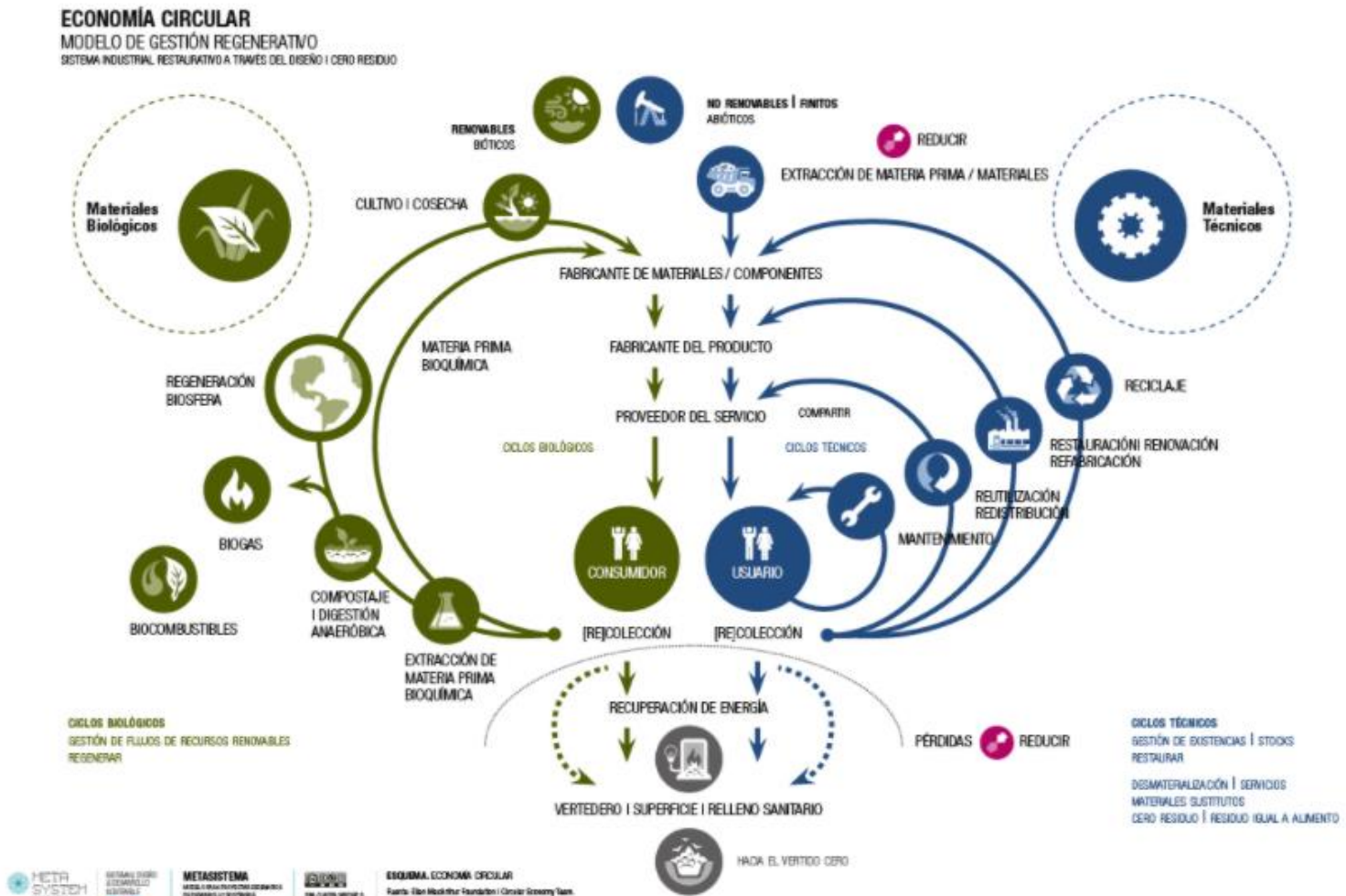


Figura 6. Esquema de economía circular regenerativa desde el diseño. Fuente: (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

El ciclo biológico está compuesto por procesos regenerativos como el compostaje o la digestión anaerobia y generan como resultado mejoras en los sistemas vivos, como el suelo. Mientras tanto, los materiales técnicos se refieren a los materiales sintéticos. Estos son devueltos al ciclo por medio de estrategias como el reúso, la reparación, la remanufactura y reciclaje. Al final de ambos ciclos, los materiales que no pudieron ser valorizados, proceden a una fase de disposición final que suele consistir en recuperación energética, o en su defecto, a un relleno sanitario (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Conceptos importantes

A continuación, se definen algunos conceptos relevantes para el entendimiento de la economía circular y para el correcto desarrollo de los apartados siguientes.

- ✓ **Modularidad:** Se refiere a modificar los factores que intervienen en un proceso para obtener distintos resultados. La modularidad en el diseño se presenta cuando el proceso puede ser dividido a través de módulos independientes. En la producción, esto se logra cuando la manufactura se realiza por medio de componentes independientes y su ensamblaje. Finalmente, la modularidad en el uso se presenta cuando los usuarios pueden mezclar y ajustar componentes para obtener productos de alta flexibilidad (Hernandez Alvarado y Pastraña Pama, 2017).
- ✓ **Versatilidad:** Según la Real Academia Española (2020) este concepto hace referencia a la capacidad de adaptarse con facilidad y rapidez a diversas funciones.
- ✓ **Adaptabilidad:** Es la capacidad para afrontar los cambios en diversas situaciones sin que ello resulte en la reducción de la eficacia. Supone la posibilidad de cambiar nuevos enfoques en función de los requerimientos, cuestionando las estrategias anteriores para encontrar opciones de mejora (Recursos y Habilidades Consultoría, 2021).
- ✓ **Cadena de valor:** Es un concepto teórico que describe el modo en que se desarrollan las acciones y actividades de una empresa. Con base en la definición de cadena, es posible hallar en ella diferentes "eslabones" que

intervienen en un proceso económico (Instituto Nacional de la Economía Social, 2021).

3.3.2. Principios de la economía circular

Principios termodinámicos de la economía circular

El concepto de economía circular fue utilizado formalmente por primera vez por Pearce y Turner en el año 1990, dos estudiantes de economía y economía de los recursos naturales que expusieron la idea de que “*todo puede ser una entrada para todo lo demás*” (Rizos, Tuokko, & Behrens, 2017; McGregor, 1991). Los autores analizaron de manera crítica el modelo tradicional de economía lineal que ha regido la producción desde la revolución industrial y se basaron en los principios de la primera y segunda ley de la termodinámica para desarrollar el concepto (Rizos et al., 2017).

Se debe recordar que la primera ley de la termodinámica es postulada como: “*Aunque la energía tome muchas formas, la cantidad total es constante, y cuando la energía desaparece en una forma, aparece simultáneamente en otras formas.*” Dicha ley contempla que, al estudiar un proceso compuesto por el sistema y los alrededores, la energía total permanece constante (Smith et al., 1997). Dicho concepto aplica de igual forma para la conservación de la materia, puesto que los procesos productivos hacen uso de la energía para la transformación de materias primas en productos terminados. Por lo tanto, los recursos naturales utilizados en cualquier proceso productivo volverán al medio ambiente en forma de residuos o emisiones (Rizos et al., 2017). De igual forma, dichos residuos pueden retornar dentro de la cadena productiva y ser transformados.

Complementariamente, la segunda ley de la termodinámica está definida como: “*La cantidad de entropía del universo tiende a incrementarse en el tiempo*” (Smith et al., 1997). De acuerdo con esta ley, existen límites físicos que impiden la configuración de un sistema en el que todos los residuos se reciclan y se transforman de nuevo en recursos naturales con una eficiencia del 100% (Rizos et al., 2017). Sin embargo, Prigogine (1990) describió que el teorema de mínima producción de entropía permite que un sistema evolucione hacia un mínimo nivel de actividad compatible con los flujos que los alimentan. Si se entiende la “*entropía*” como “*el número de alternativas en que se puede configurar la transformación*”

de las materias primas”, entonces cuanto mayor sea el número de procesos involucrados, mayor será la cantidad de residuos generados. En consecuencia, en la economía circular una alta entropía se asocia con procesos ineficientes que conducen a la producción de residuos no reutilizables. De esta manera, la economía circular se basa en trabajar bajo el teorema de mínima producción de entropía para generar la menor cantidad de residuos.

Principios prácticos de la economía circular

Anteriormente, se explicó que la economía circular se basa en la conservación de la materia y en la mínima producción de entropía. Esto con el fin de garantizar que los recursos utilizados sean reincorporados al sistema. Dicho sistema económico tiene una serie de principios descritos por la *Ellen MacArthur Foundation* (Ellen MacArthur Foundation, 2013) y Esposito (Esposito et al., 2018), los cuales permiten la aplicación de los fundamentos teóricos del modelo. Tales principios se definen a continuación.

- ✓ **Diseñar sin residuos:** En este modelo los residuos, el desperdicio o la “*basura*” no existen, desde la concepción del diseño se escogen los componentes para encajar dentro de un ciclo de materiales con el fin de trabajar mediante una producción mínima de entropía (Ellen MacArthur Foundation, 2013).
- ✓ **Desarrollar resiliencia por medio de la diversidad.** El modelo de economía circular prioriza la modularidad, versatilidad y adaptabilidad, mediante sistemas con muchas conexiones y escalas con el fin de que sean más resilientes ante cambios externos (Ellen MacArthur Foundation, 2013).
- ✓ **Pensamiento sistémico:** Este se refiere a la habilidad de entender cómo las diferentes partes influyen el funcionamiento de un todo. De esta manera, dicho principio describe que se debe considerar las distintas relaciones de una cadena productiva con la infraestructura, el ambiente y el contexto social (Ellen MacArthur Foundation, 2013).
- ✓ **Uso de energías renovables:** Si se desea plantear un modelo de economía circular, este debería empezar enfocándose en la energía utilizada en los procesos productivos. Esto con el fin de que la energía utilizada pueda cerrar los ciclos regenerativos (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

- ✓ **Pensamiento en cascadas:** Relacionado a que los cambios producidos en la economía y en el entorno se pueden dar a través de un enfoque “de arriba hacia abajo”, o bien de “abajo hacia arriba”. Este principio apunta a hacer crecer los organismos, o en este caso, productos y estructuras de manera sistemática como lo hace la naturaleza célula por célula, o bien componente por componente en el caso de los productos. Esto permite que los materiales que un organismo o producto utiliza puedan ser completamente reutilizados por otro de manera cíclica (Esposito et al., 2018).

Metodología de las 6Rs

La metodología de la 6R se define como: “*Un sistema de ciclo cerrado, con múltiples ciclos de vida para una manufactura sostenible*”. Dicho acercamiento se encuentra relacionado con los principios de la economía circular mediante la aplicación de conceptos a los procesos productivos como los que se observaron en la Figura 6. A continuación, se explicarán los conceptos de dicha metodología descritos por Jawahir (2016).

- ✓ **Reducir:** el cual se enfoca en las primeras fases del ciclo de vida del producto y significa reducir cualquier clase de recurso en la pre-manufactura, disminuir uso de energía y materiales durante la manufactura; y reducción de emisiones y desechos durante la fase de uso.
- ✓ **Reusar:** se refiere a la reutilización del producto completo o de sus componentes completos, luego del primer ciclo de vida, con el fin de utilizar una menor cantidad de materiales vírgenes.
- ✓ **Reciclar:** involucra el proceso de convertir los componentes en nuevos materiales o productos, que de otra manera serían considerados desechos.
- ✓ **Recuperar:** incluye recolectar los productos al final de la fase de uso, para ser desensamblados y clasificados para su utilización en ciclos de vida posteriores.
- ✓ **Rediseñar:** se refiere a pensar en el diseño de la siguiente generación de productos que utilizaría los componentes, materiales y recursos recuperados del ciclo de vida previo.

- ✓ **Re manufacturar:** se basa en reprocesar productos que ya han sido utilizados para la restauración del estado original del producto, con el fin de poder reutilizar las partes la mayor cantidad de veces posibles sin tener una pérdida en la funcionalidad.

Jerarquización en la gestión integral de los residuos

Relacionado con la metodología de las 6Rs y los principios de economía circular, se encuentra la jerarquización en la gestión integral de los residuos. Ocampo (2013) destaca que esta jerarquización está inspirada en el concepto de las 3R que inicialmente consistía en “Reducir, reutilizar y reciclar”. No obstante, con el pasar del tiempo se han añadido otros términos a este concepto como los que se definieron en el apartado anterior. De esta forma se llegó a la jerarquización que se presenta en la Figura 7. En ella se muestra que el primer paso a considerar es rechazar, en el caso que esto no sea viable se debe reducir, de lo contrario reciclar, valorizar y tratar; y en última instancia se debe optar por una disposición final de los residuos.



Figura 7. Pirámide invertida de la jerarquización en la gestión integral de los residuos. Fuente: (Ocampo, 2013)

3.3.3. Economía circular en Costa Rica

Como parte de las actividades realizadas por Costa Rica para incentivar la economía circular se encuentra una serie de capacitaciones realizadas por DIGECA con el fin de introducir conceptos, oportunidades, retos y ejemplos de la economía circular a nivel global,

regional y nacional (Díaz Segura, 2019). En dichas capacitaciones se aborda la tendencia emergente de la economía circular a nivel internacional y nacional.

Dentro de las iniciativas se destaca la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021 junto con la Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR) 2016-2021 amparados en la Ley para la Gestión Integral de Residuos N.º 8839 que presenta una serie de principios base de economía circular (Centro de Innovación y Economía Circular, 2019).

El país también ha realizado una serie de esfuerzos relacionados con la producción y consumo sostenibles. Dentro de este marco se desarrolló la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible 2018-2030 publicada en la Gaceta el 3 de mayo del 2018 (Poder Ejecutivo, Gobierno de Costa Rica, 2018). Dicha política es parte de la normativa relacionada con una migración hacia la economía circular, ya que esta contempla un enfoque de ciclo de vida y de desarrollo sostenible como plan para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Recientemente los ministros de Ambiente de América Latina y el Caribe lanzaron la Coalición de Economía Circular, de la cual Costa Rica forma parte como miembro del comité directivo para el periodo 2021-2022. Esta iniciativa responde a los esfuerzos de recuperación post-COVID-19 (Nairobi, 2021). El objetivo principal de la coalición es crear una perspectiva regional común, además de ser una plataforma para compartir conocimiento, herramientas y apoyar la transición hacia la economía circular desde un enfoque de ciclo de vida de los productos (Coalición de Economía Circular, 2021).

3.4. Cadena de valor del mercurio

En los apartados anteriores se ha realizado una recopilación de la distribución del mercurio, su ciclo biogeoquímico y las principales fuentes de emisión de mercurio (Hg). De igual forma, se recapitaron los principales aspectos del Convenio de Minamata, así como los fundamentos de la economía circular. Todo esto con el fin de realizar un análisis del Convenio de Minamata desde la perspectiva de economía circular. Sin embargo, resulta preciso detallar los usos que recibe el mercurio en la actualidad en un marco de economía lineal, así como las posibilidades para reinsertar dicho elemento dentro de la cadena de valor.

3.4.1. Usos del mercurio en el marco de la economía actual

Como se detalló en el primer apartado, el mercurio tiene una gran cantidad de usos en diferentes procesos. El Convenio de Minamata (Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2021) realiza una división de los usos en dos categorías: “*Productos con mercurio añadido*” y “*Procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio*” las cuales se detallan a continuación.

Productos con mercurio añadido

El Convenio de Minamata (Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2021) define los productos con mercurio añadido como: “*aquellos productos o componentes de un producto al que se haya añadido mercurio o un compuesto de mercurio de manera intencional*”; dentro de estos se encuentran los siguientes.

- ✓ Baterías
- ✓ Interruptores y relés
- ✓ Lámparas: fluorescentes compactas (CFL), fluorescentes lineales (LFL), lámparas de vapor de mercurio a alta presión (HPMV), lámparas fluorescentes de cátodo frío y lámparas fluorescentes de electrodo externo (CCFL y EEFL) para pantallas electrónicas.
- ✓ Cosméticos
- ✓ Plaguicidas, biocidas y antisépticos de uso tópico
- ✓ Aparatos de medición no electrónicos: barómetros, higrómetro, manómetros, termómetros, esfigmomanómetros.
- ✓ Amalgama dental

Procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio

En este apartado no se incluyen los procesos en los que se utilizan productos con mercurio añadido, los procesos de fabricación de productos con mercurio añadido ni los procesos en que se traten desechos que contengan mercurio (Convenio de Minamata sobre el Mercurio, 2021). Dentro de estos se encuentran aquellos procesos que utilicen Hg o sus compuestos en alguna de sus fases productivas, los principales son:

- ✓ Producción de cloro-álcali (producción electrolítica de cloro elemental (Cl_2), hidróxido de sodio (NaOH) e hidrógeno elemental (H_2))
- ✓ Producción de acetaldehído ($\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{H}$) en la que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio como catalizador
- ✓ Producción de monómeros de cloruro de vinilo ($\text{H}_2\text{C}=\text{CHCl}$)
- ✓ Metóxido o etóxido sódico o potásico ($\text{CH}_3\text{O}^-\text{Na}^+$, $\text{CH}_3\text{O}^-\text{K}^+$, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}^-\text{Na}^+$, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}^-\text{Na}^+$)
- ✓ Producción de poliuretano en la que se utilizan catalizadores que contienen mercurio
- ✓ Extracción de oro artesanal y en pequeña escala

3.4.2. Cadena de valor del mercurio en Costa Rica

En cuanto a la cadena de valor del mercurio en el país es necesario destacar que existen dos principales usos del mercurio. En primer lugar, existe la minería artesanal de extracción de oro. Además, tiene un uso significativo de productos con mercurio añadido los cuales se detallan a continuación (DIGECA, 2018).

Minería de oro artesanal

La minería de oro es una actividad económica que se realiza principalmente en el cantón de Abangares, pero también se efectúa en Miramar y Corcovado. El proceso se realiza de manera artesanal, donde para extraer la piedra se utilizan herramientas como el pico y la pala. Una vez recolectado este material, se almacena en sacos para ser triturado en quebradores rústicos. Posteriormente, las rocas se muelen en las rastras con agua y mercurio. Como resultado se obtiene un material sobrante, conocido como colas, que se acumulan cerca de donde se procesa el oro (Fernández Villalobos et al., 2017). Por otro lado, se obtiene la amalgama de oro con mercurio, la cual es filtrada con una manta y luego se quema en una retorta, donde el mercurio es evaporado y el oro sólido permanece como residuo en el recipiente. Cabe destacar que durante todo el proceso se utiliza protección personal mínima que se reduce a guantes y mascarilla, según detallan otros autores (Villalobos, 2019).

El mercurio es comprado en el mercado informal proveniente de México y Nicaragua. El mercurio procedente de México es más puro y de mejor calidad que el proveniente de

Nicaragua. Dicho metal es transportado en envases plásticos sin rotulación alguna, y en ocasiones se moviliza por medio de envases de refrescos de marcas comerciales conocidas, en presentaciones de 1 kilogramo, el cual es vendido a un precio promedio de $\$53\,750/\text{kg}$. Si el proceso se realiza en condiciones técnicas adecuadas, el mercurio es recuperado en la retorta en el proceso de las rastras, y es reutilizado hasta que este se evapora en su totalidad (DIGECA, 2018).

Existen dos sustitutos para el mercurio en la actividad minera artesanal. El primero corresponde a la gravimetría, la selección de las tecnologías depende del depósito mineral, del tamaño del grano y de la mineralogía del oro. Dentro de las opciones recomendadas se encuentran las canaletas, los concentradores centrífugos, los concentradores en espiral, ciclón, mesas concentradoras o vibratorias, flotación e imanes. Los resultados de las pruebas con dichas tecnologías dieron rendimientos del 14,3% al 65,7%, superiores a los alcanzados con el uso del mercurio que es de aproximadamente un 40% (DIGECA, 2018).

Otra de las opciones para sustituir el mercurio es utilizar cianuro. Según el estudio realizado por DIGECA (DIGECA, 2018) este requiere una mayor industrialización que la necesaria para el uso de mercurio, pero se puede obtener una recuperación del 90% y un mayor kilataje. Cabe mencionar que el cianuro utilizado en la extracción es destruido mediante un proceso INCO que es utilizado por muchas plantas alrededor del mundo. No se ahondará en su descripción pues no se considera viable en la escala artesanal.

Productos con mercurio añadido

Los productos con mercurio añadido incluyen baterías, interruptores y relés, lámparas fluorescentes compactas, lineales, de vapor de mercurio a alta presión, de cátodo frío y de electrodo externo, cosméticos, plaguicidas, aparatos médicos de medición no electrónicos y amalgamas dentales (DIGECA, 2018). Todos estos productos con mercurio añadido se importan de diferentes países manufactureros. A excepción de los cosméticos, que, según el Ministerio de Salud, es prohibido el ingreso de mercurio en cosméticos. Otro caso particular es el de los plaguicidas. Todos los plaguicidas que contienen mercurio están prohibidos desde 1998 (DIGECA, 2018).

El mercurio contenido dentro de estos productos puede llegar a ser liberado al ambiente cuando estos se rompen, derraman o finalizan su vida útil y se convierten en residuos (Fernández Villalobos et al., 2017). Como parte del ciclo de vida de estos artículos, es preciso que los residuos generados a partir de ellos sean gestionados de manera adecuada para minimizar las emisiones y liberaciones de Hg al ambiente. A continuación, se detalla la gestión que se les brinda en Costa Rica.

En el caso de las luminarias, se pueden encontrar dos tipos de técnicas de gestión en el país. La primera es la separación física, la cual consiste en capturar el mercurio contenido en la lámpara en un filtro de carbón activado por medio de una succión al vacío, Finalmente, el gestor exporta los residuos a alguna empresa extranjera que pueda darles la debida disposición o reciclaje (Fernández Villalobos et al., 2017). La segunda opción tecnológica es la inertización en frío. En esta el objetivo es convertir el mercurio en un sólido inerte con baja lixiviabilidad. En el proceso, el fluorescente se tritura y se hace reaccionar con azufre para formar HgS, el cual es un compuesto muy estable. Este residuo se almacena ya sea en contenedores o recipientes especiales. Antes de enviar los residuos al relleno, se les realiza una prueba de movilidad del mercurio (Fernández Villalobos et al., 2017).

Sin embargo, según Fernández Villalobos (2017), el resto de los productos con mercurio añadido tienen el mismo destino de la mayoría de los residuos ordinarios en Costa Rica. Para el 2014 se recuperó únicamente el 1,26% del total de residuos sólidos ordinarios recolectados. El 98,74% restante fueron residuos recolectados sin separación y enviados a rellenos sanitarios. Por lo tanto, estos son una combinación de ordinarios, especiales y hasta peligrosos, lo que resulta en la liberación de mercurio por su acumulación.

3.4.3. Transición de la cadena de valor del mercurio a una economía circular

Hasta el momento se han mencionado los usos que tiene el mercurio a lo largo de su cadena de valor. Según Fernández Villalobos (2017) en el país no se recicla el mercurio que se logra recuperar, sino que se inmoviliza o se exporta para su disposición final. Sin embargo, para una transición a la economía circular, es necesario evaluar las opciones tecnológicas para la reincorporación del mercurio en la cadena productiva. Por esta razón, a continuación, se hace una breve descripción de los posibles métodos de reciclaje de mercurio.

Los avances tecnológicos han permitido que el reciclaje de mercurio sea más factible y eficiente. Las compañías recicladoras han logrado diseñar procesos de recuperación de Hg del 99% de mercurio de manera segura. Así, el mercurio recolectado de estos procesos puede ser utilizado en nuevos productos (DeFoe, 2013). Una de las empresas que ha desarrollado dicha tecnología ha sido Veolia, de los Estados Unidos de América. Dicha empresa utiliza un proceso de separación seca para el reciclaje de lámparas, y es capaz de procesar de 20 000 a 40 000 lámparas en 8 horas con una tasa de recuperación mayor al 99%. Veolia (2021) detalla que la composición de los residuos que procesa es de 96% vidrio, 2% aluminio, menos del 2% fósforo y menos del 1% es mercurio. También mencionan que realizan el reciclaje de baterías que contienen mercurio, las cuales llevan un proceso de destilado en retorta *in situ* de forma que el mercurio es recuperado como un producto (Veolia, 2021).

La compañía japonesa Nomura Kohsan Co. (United Nations Industrial Development Organization Investment and Technology Promotion Office, 2021) ha desarrollado una tecnología que permite la recolección y el reciclaje de mercurio. Este proceso radica en el tueste del Hg, que consiste en llevar los materiales a altas temperaturas para cambiar sus propiedades físicas y químicas sin derretir el material. Dicha compañía utiliza temperaturas entre 600°C y 800°C para vaporizar el mercurio en los residuos. Posteriormente, el vapor de mercurio pasa por una torre de enfriamiento y un lavador de gases y es recuperado. Para evitar emisiones trazas a la atmósfera, la empresa emplea un proceso de adsorción de mercurio al final del proceso. Esta tecnología tiene como ventaja que posee la habilidad de reciclar una gran variedad de productos con mercurio añadido al mismo tiempo (United Nations Industrial Development Organization Investment and Technology Promotion Office, 2021).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Indicadores de economía circular

La metodología aplicada en la investigación está basada en la propuesta por la European Statistical Office (Eurostat), la cual plantea 10 indicadores para evaluar el progreso hacia la economía circular (Eurostat, 2019). La Eurostat mide dicho progreso por medio de un indicador general denominado “*tasa de circularidad*”, el cual resume los resultados de los 10 indicadores mencionados. Mientras mayor sea este indicador, mayor es la reincorporación de materiales dentro de la cadena productiva (Eurostat, 2019). Sin embargo, esta es una metodología cuantitativa, la cual no se ajusta a las necesidades de análisis del Convenio de Minamata. Por esta razón se realizó una selección de los indicadores que tienen relación con el Convenio adaptándose de forma que puedan ser utilizados para el análisis de este documento de manera cualitativa, lo cual se puede observar en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Indicadores utilizados para evaluar la inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.

Categoría de progreso hacia la economía circular	Indicador de cumplimiento con criterios de economía circular por categoría¹	Adaptación propuesta para valorar el apego del Convenio de Minamata a los principios de la economía circular
Producción y consumo	Autosuficiencia de las materias primas	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima
	Contratación pública con criterios ecológicos	Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular
	Generación de residuos	Identificación de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio Inventario de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio
Gestión de residuos	Tasa de reciclaje	Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio
	Flujo de residuos específicos	Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio

¹ Según la metodología propuesta por la Eurostat (Eurostat, 2019).

		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio
Materias primas secundarias ²	Contribución de materiales reciclados a la demanda de materias primas	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio
	Intercambio de materiales entre países de la Unión Europea y el resto del mundo	Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países
Competitividad e innovación	Inversión privada bruta en bienes tangibles	Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio
	Patentes relacionadas con el reciclaje y materias primas secundarias	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio

Además, en relación con los principios de economía circular, se propone incorporar los indicadores mostrados en el Cuadro 4. Asimismo, para cada uno de los indicadores seleccionados se plantea utilizar una escala de cumplimiento de los criterios por evaluar para cada uno de los artículos. Dicha escala se detalla en el Cuadro 5.

² Las materias primas secundarias se refieren a los residuos de un proceso que se utilizan como materias primas en un proceso diferente de la valorización de residuos (Real Academia Española, 2020).

Cuadro 4 Indicadores adicionales propuestos para evaluar la incorporación de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.

Categoría de progreso hacia la economía circular	Principio	Indicador de cumplimiento con criterios de economía circular
Principios de economía circular	Diseñar sin residuos	Minimización de residuos de mercurio
	Resiliencia por medio de la diversidad	Diversificación de sustitutos para el mercurio
	Pensamiento sistémico y pensamiento en cascadas	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio
	Uso de energías renovables	Uso de energías renovables
	Jerarquización en la gestión integral de los residuos	Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio

Cuadro 5 Escala de calificación para los indicadores de economía circular.

Estado	Calificación
No cumple ³	0
Cumple parcialmente ⁴	5
Cumple ⁵	10

Posteriormente, se clasificaron los artículos según las categorías de progreso hacia la economía circular, como se observa en el Cuadro 6. De esta manera cada artículo es evaluado mediante los indicadores de cumplimiento pertenecientes a la categoría correspondiente. Sin embargo, se excluyen los artículos 1, 6, 15, 20, 21, 23-35 porque son de índole administrativo. Una vez realizado el análisis de cada artículo según los criterios se procede a calcular una calificación general y por categorías de progreso para conocer la situación actual del Convenio de Minamata en el contexto de economía circular.

³ No cumple: No se menciona en el artículo.

⁴ Cumple parcialmente: Se identifica al menos una mención relacionada al indicador en el artículo.

⁵ Cumple: Se identifica más de una mención relacionada al indicador en el artículo.

Cuadro 6. Clasificación de los artículos del Convenio de Minamata según la categoría.

Categoría de progreso hacia la economía circular	Artículos por evaluar según la categoría
Producción y consumo	3, 4, 5, 7, 10
Gestión de residuos	4, 5, 7, 8, 9, 11, 12
Materias primas secundarias	3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11
Competitividad e innovación	12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 22
Principios de economía circular	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 18

4.2. Matriz de priorización de indicadores

Una vez evaluados los indicadores de economía circular, es necesario priorizarlos para ser incluidos en el texto del Convenio. Dicha priorización se realiza bajo dos criterios: la calificación obtenida del indicador y el impacto en el Convenio de Minamata. En el caso de la calificación obtenida se utilizará la escala mostrada en el Cuadro 7. Mientras que, para el criterio de impacto se establece la escala inspirada en el método MoSCoW (Sagrado et al., 2018), la cual está definida en el Cuadro 8.

Cuadro 7. Escala utilizada para evaluar el criterio de calificación del indicador.

Valor	Clasificación según calificación del indicador
5	0%-20%
4	21%-40%
3	41%-60%
2	61%-80%
1	81%-100%

Cuadro 8. Escala utilizada para evaluar el criterio de impacto en el Convenio de Minamata.

Valor	Significado
4	Indicador fundamental y obligatorio para satisfacer las necesidades de la economía circular.
3	Indicadores que deberían ser cumplidos en la medida de lo posible.
2	Indicadores que son interesantes que se incluyan, son indicadores adicionales que se incluyen en caso de disponer de los recursos.
1	Indicadores que están descartados por el momento, pero que podrían ser incluidos en el futuro.

Tras asignar un valor de ambos criterios a cada indicador, se procede a calcular un promedio ponderado. Para esto se le asigna un peso de 60% al criterio de calificación del indicador y 40% al impacto en el Convenio de Minamata. Esta relación 60-40 se origina de la distribución de los indicadores de calificación y de impacto respectivamente. Una vez calculada la calificación final se priorizan aquellos indicadores que cuenten con una nota mayor o igual a 4 en una escala del 1 al 5, siendo el 5 el valor con mayor prioridad y 1 el de menor prioridad.

4.3. Entrevistas a expertos

Se realizó un muestreo cualitativo a expertos siguiendo la metodología descrita por Hernández Sampieri (2014). La muestra cualitativa contempla la elaboración de seis entrevistas semiestructuradas a expertos en la problemática del mercurio, del Convenio de Minamata o actores principales de la utilización del mercurio según lo que se muestra en el Cuadro 9. La totalidad de las entrevistas presentan preguntas de opinión, de conocimiento y de antecedentes, las cuales se realizaron por videollamada por las restricciones debido al COVID-19. (Apéndice 1). Dichas entrevistas fueron analizadas posteriormente por medio de un análisis FODA.

Cuadro 9. Grupos de interés a entrevistar mediante un muestreo de expertos.

N.º	Grupos de interés	Objetivo de la entrevista
1	Experto de la Dirección de Geología y Minas	Describir la gestión que los mineros artesanales le dan al mercurio, cómo se ven afectados en su actividad por el uso de mercurio desde el aspecto económico y de salud. Además, se busca indagar en el seguimiento que se le brinda a la minería artesanal.
2	Experto de la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA)	Examinar los desafíos que reconoce DIGECA para la implementación del Convenio de Minamata, acciones tomadas y oportunidades de mejora en la institucionalidad y en el Convenio. Indagar en los motivos por los cuales no se contemplaron elementos de economía circular en el Convenio de Minamata, además identificar los aspectos del Convenio que buscan mejorar.
3	Experto colaborador de sector privado	Describir la perspectiva del sector privado que utiliza productos con mercurio añadido, las posibilidades del reciclaje de mercurio, experiencia con el cumplimiento del Convenio y oportunidades de mejora de este.
4	Experto del Ministerio de Salud	Describir la experiencia del sector salud al utilizar productos con mercurio añadido, las posibilidades del reciclaje de mercurio o disminución de uso, experiencia con el cumplimiento del Convenio y oportunidades de mejora de este.
5	Experto en economía circular	Indagar en la experiencia que existe acerca de la transición de modelos lineales a circulares. Recopilar criterios técnicos por considerar al proponer la inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata
6	Miembro de GASEL (Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral del TEC)	Detectar cómo la institución le ha dado seguimiento al cumplimiento del Convenio de Minamata desde una perspectiva de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Conocer la metodología de sistematización de datos relacionados al mercurio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presenta la calificación de los indicadores de cumplimiento de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata, adaptados de acuerdo con la metodología explicada en el capítulo anterior. Posteriormente, se muestran los indicadores prioritarios a incluir en el Convenio según los criterios evaluados. Seguidamente, se expone un análisis de la situación actual del seguimiento del Convenio en Costa Rica con base en las entrevistas a expertos. Por último, al recopilar los resultados de las tres secciones mencionadas anteriormente, se presenta una propuesta de inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.

5.1. Principios de economía circular en el Convenio de Minamata

El Convenio de Minamata fue evaluado mediante la metodología de indicadores de progreso hacia la economía circular, descrita en la sección 4.1. Mediante este método se logró asignar una calificación en escala del 0 al 100. Así, se contextualizó el Convenio de Minamata según su apego a los principios de la economía circular. Esto con el fin de determinar oportunidades de mejora que posee el texto. A continuación, se detallan las calificaciones obtenidas por categorías y se describen los hallazgos derivados de la evaluación.

5.1.1. Producción y consumo

La producción y consumo son partes fundamentales en el ciclo de la economía circular. Ya que, de este eslabón derivan acciones como el diseño con minimización de residuos y el abastecimiento a largo plazo de mercurio. En esta categoría se obtuvo una calificación de 40%, lo cual evidencia que el Convenio no cuenta con un enfoque de economía circular satisfactorio en cuanto a la producción y consumo de mercurio. En la Figura 8 se muestra el desglose de calificaciones para cada uno de los indicadores evaluados en dicha sección.

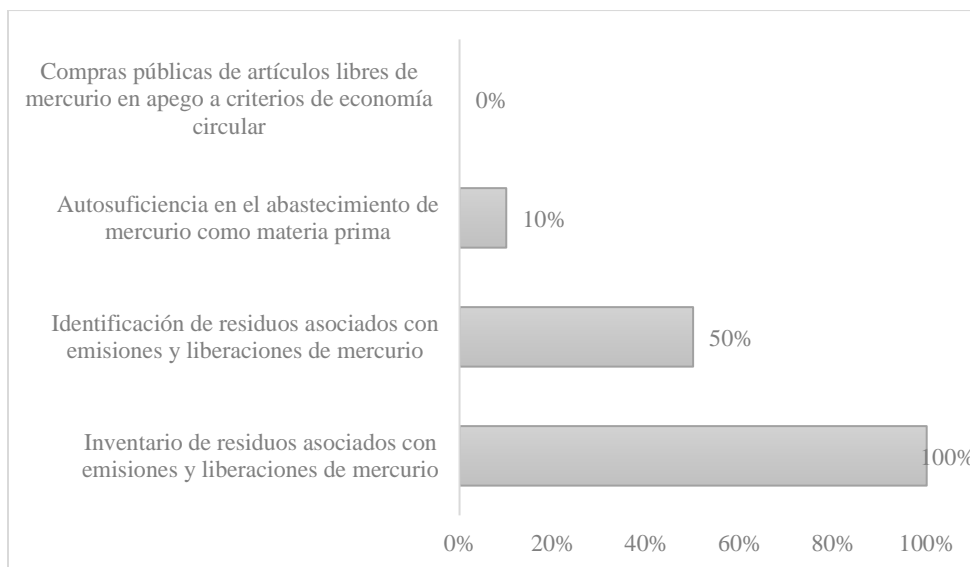


Figura 8. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de producción y consumo.

De la Figura 8 se puede identificar que las compras públicas de artículos libres de mercurio corresponden al principal punto crítico de la categoría. Resulta importante incluir en el Convenio estrategias que apunten hacia las compras públicas. Pues, este sector cumple un papel muy importante en la aplicación del Convenio de Minamata. Por lo que la función no debe ser solamente de regulación y fiscalización, sino que debe tomar un empoderamiento activo en la aplicación del Convenio. Por ende, es importante que se indiquen los lineamientos para las compras públicas dentro del documento del Convenio de Minamata. Ya que, de lo contrario, no se asegura un incentivo por parte del sector público que favorezca las compras públicas libres de mercurio.

Posteriormente, la autosuficiencia de abastecimiento de mercurio como materia prima para las actividades lícitas resulta vital para la continuidad de estas. Sin embargo, en la Figura 8 se observa que solamente se cumple con un 10% de este indicador. El párrafo 2 del artículo 10 estipula que cada Parte velará por que el almacenamiento provisional del mercurio destinado a usos permitidos se dé de manera ambientalmente racional. Lo anterior vela por el cumplimiento de este indicador. Sin embargo, está escrito de manera implícita y es el único párrafo en el Convenio en el que se hace referencia a la autosuficiencia de abastecimiento de mercurio.

Además, en el artículo 3 del Convenio se prohíbe la nueva extracción primaria de mercurio, y se da un periodo de 15 años después de la entrada en vigor del Convenio para detener la extracción existente. Lo anterior no asegura que exista autosuficiencia de abastecimiento de mercurio. Pues para esto se requiere el cumplimiento de la jerarquización de gestión de residuos y buscar la recuperación antes de la eliminación. Es relevante tomar en cuenta el suministro de mercurio considerando que este es un recurso no renovable. En caso contrario, se puede caer en un escenario donde la mayor parte del mercurio disponible se encuentre inmovilizado como residuo. En este caso se correría el riesgo de experimentar un desabastecimiento de mercurio para los usos permitidos.

En cuanto a la identificación e inventario de residuos de mercurio se cuenta con una mayor calificación, 50% y 100% respectivamente. En general, el Convenio de Minamata estipula en repetidas ocasiones la creación de un inventario de mercurio para las fuentes pertinentes. Además, la herramienta Toolkit (UNEP, 2019) para la cuantificación de mercurio, es una guía creada por la PNUMA para crear un inventario detallado que incluya cada una de las posibles fuentes pertinentes. Como se puede observar en la Figura 8, a pesar de contar con una buena calificación en el indicador del inventario, el indicador de identificación de residuos presenta una menor calificación (50%). Esta diferencia se debe a que la identificación de residuos de mercurio no presenta una guía para determinar las fuentes pertinentes que se deben incluir en el inventario. Por lo tanto, la identificación de fuentes de mercurio se puede ver afectada por la falta de lineamientos. Hasta donde se tiene conocimiento, existe un grupo técnico que ha discutido los lineamientos del Convenio. Por lo tanto, esta es una actividad en progreso en la actualidad, lo cual se considera un importante avance.

5.1.2. Gestión de residuos

La gestión de residuos sólidos representa una parte clave en la transición hacia la economía circular. Ya que según el manejo que se les dé podrán ser reincorporados dentro de la cadena productiva, o bien, finalizar su vida útil. El Convenio de Minamata obtuvo una calificación de 29% en la categoría de la gestión de residuos, lo cual demuestra oportunidades de mejora en este ámbito. Además, en la Figura 9 se observa el desglose de las calificaciones para cada indicador de la categoría.

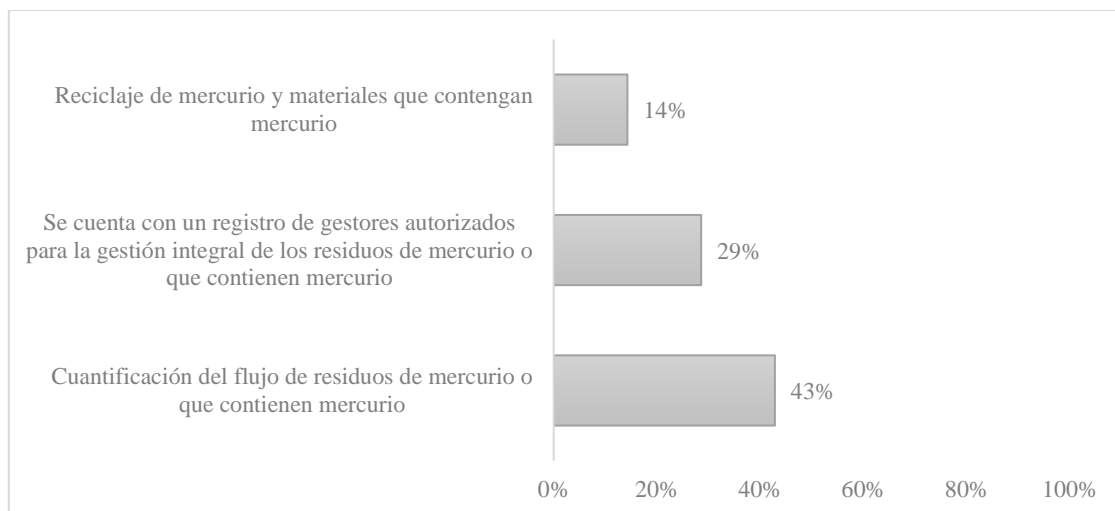


Figura 9. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de gestión de residuos.

El principal punto crítico de esta sección corresponde al reciclaje de mercurio, el cual tiene una calificación de 14%. Esto se debe a que en el Convenio se estipula que las Partes adoptarán medidas para ocuparse de los productos con mercurio añadido, las emisiones y liberaciones para evitar el desvío de estos residuos. Dentro de estas medidas puede incluirse la recuperación y reciclaje del mercurio. Sin embargo, en la mayoría del Convenio se muestra de manera implícita y no impulsa el reciclaje como acción primordial. Por otro lado, la única mención del reciclaje se encuentra en el artículo 11 párrafo 3 b). Este estipula que cada Parte adoptará medidas para que los desechos de mercurio sean recuperados, reciclados, regenerados o reutilizados directamente solo para un uso permitido o para la eliminación ambientalmente racional. Lo cual no prioriza la reincorporación del mercurio dentro de las cadenas productivas permitidas.

El siguiente indicador corresponde a un registro de gestores autorizados para la gestión integral de residuos de mercurio, el cual obtuvo una calificación de 29%. El Convenio menciona que se debe dar el uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para controlar las emisiones y liberaciones ambientales. Dentro de este concepto se puede considerar contar con un registro de gestores autorizados. Sin embargo, esto se encuentra solamente de manera sobreentendida. Es relevante que el texto del Convenio de Minamata incluya dentro de sus lineamientos, la creación un registro de gestores autorizados.

Esto con el fin de facilitar el seguimiento al cumplimiento del Convenio y asegurar la correcta gestión de los residuos de mercurio.

El último indicador de esta categoría corresponde a la cuantificación del flujo de mercurio, el cual presenta la mejor calificación de la sección, correspondiente a 43%. Esta mejoría se debe a que dicho indicador está relacionado con el indicador de inventario de mercurio perteneciente a la categoría de “Producción y Consumo”. El Convenio de Minamata establece que se debe crear un inventario de mercurio con las fuentes pertinentes. Lo cual puede facilitar la cuantificación del flujo de mercurio, mas no lo asegura. Por ende, se debe hacer hincapié en la oportunidad de mejora que presenta el Convenio, ya que las mediciones de flujo que provocan los usos de mercurio lícitos permiten proyectar la exposición que tienen los seres humanos a este elemento tóxico.

5.1.3. Materias primas secundarias

Este concepto se refiere a los residuos de un proceso que se utilizan como materias primas en un proceso diferente de la valorización de residuos (Real Academia Española, 2020). La utilización de materias primas secundarias resulta vital para el cumplimiento del Convenio de Minamata. Sin embargo, esta categoría tiene una calificación general de 25%, lo cual demuestra una importante oportunidad de mejora en el texto. En la Figura 10 se muestra el desglose de calificaciones para los indicadores de la categoría.

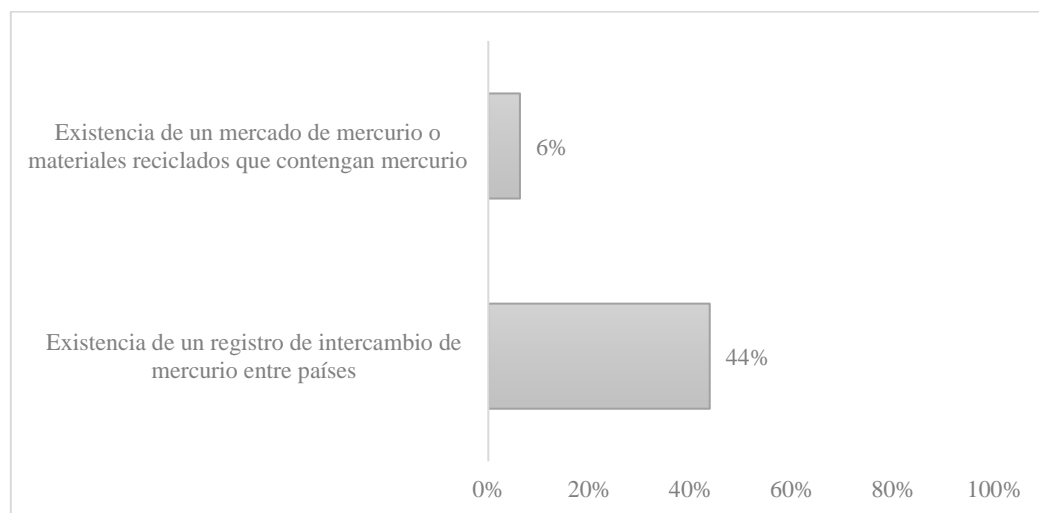


Figura 10. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de materias primas secundarias.

Para que se dé el uso de materias primas secundarias debe existir un mercado de mercurio reciclado. Sin embargo, el indicador que mide este avance tiene una calificación de 6%. La única alusión implícita está presente en el párrafo 3 b) del artículo 11, que estipula que cada Parte adoptará las medidas apropiadas para que los residuos de mercurio sean recuperados, reciclados, regenerados o reutilizados directamente. No obstante, el Convenio de Minamata tiene una oportunidad para impulsar un mercado de mercurio reciclado y favorecer el intercambio de materias primas secundarias, dado que en un futuro solamente se podrá hacer uso de mercurio secundario para los usos que requieren de este elemento.

Asimismo, es importante contar con un registro de intercambio de mercurio entre países. El indicador que mide este cumplimiento presenta una calificación de 44%. En este caso el párrafo 6 a) del artículo 3 explica que no se permite la exportación de mercurio salvo un consentimiento por escrito. Además, el párrafo 3 del artículo 10 y el párrafo 1 del artículo 11 establecen que el movimiento transfronterizo se debe dar según los lineamientos del Convenio de Basilea. Lo cual permite que el intercambio transfronterizo se dé de manera autorizada. Sin embargo, no se menciona el establecimiento de un registro del intercambio transfronterizo que permita darle un seguimiento a los flujos y el movimiento del mercurio entre diferentes naciones.

5.1.4. Competitividad e innovación

En términos de economía circular, la competitividad e innovación juegan un papel significativo. Esto se debe a que los modelos circulares requieren de un cambio de paradigma económico y de producción, por lo que la innovación constante es lo que permite la transición. En esta categoría se obtuvo una calificación general de 81%, lo cual resulta bastante alentador. En la Figura 11 se presenta el desglose de calificaciones de los indicadores evaluados en la sección.

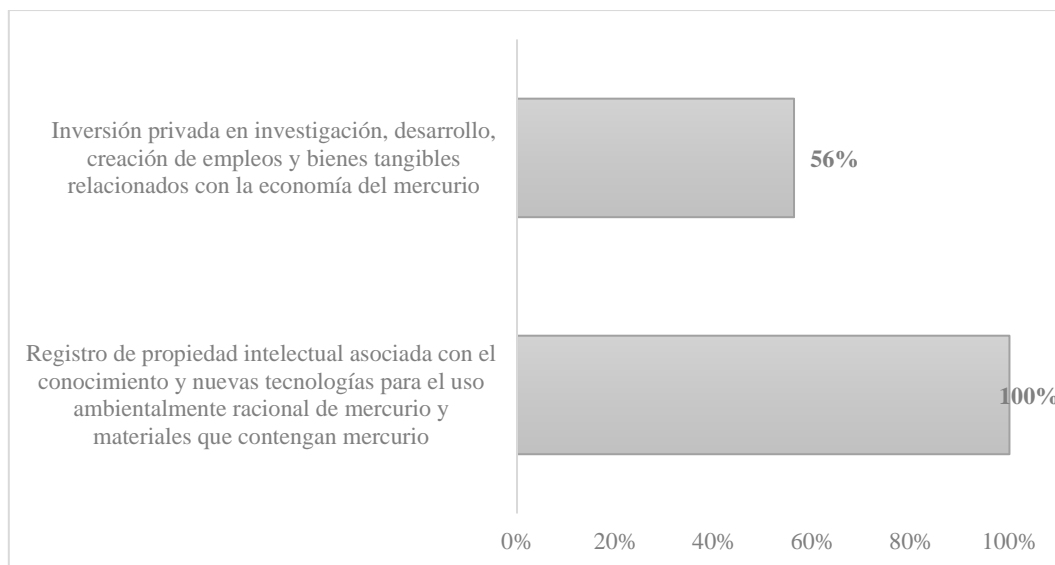


Figura 11. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría de competitividad e innovación.

La calificación tan alta de la categoría se debe a que los indicadores evaluados se refieren a la inversión privada y el registro de propiedad intelectual. Y es importante reconocer que el Convenio de Minamata posee grandes fortalezas en este ámbito. El texto del convenio presenta artículos dedicados a la investigación, la información y el conocimiento. Ejemplos de esto son el artículo 17 de *“Intercambio de Información”*, el 18 de *“Información, sensibilización y formación del público”* y el 19 de *“Investigación, desarrollo y vigilancia”*. En estos artículos se alienta el intercambio de información científica, técnica, económica, jurídica, sobre reducción, eliminación y alternativas viables al mercurio. En consecuencia, el Convenio cuenta con una calificación perfecta para el indicador de registro de propiedad intelectual.

Además, el Convenio de Minamata establece en el artículo 13 de *“Recursos y mecanismos financieros”* lo relacionados con la inversión y al financiamiento. El párrafo 1 de este artículo establece que cada parte se compromete a facilitar recursos destinados a la aplicación del Convenio. Dentro de estos se encuentra financiamiento nacional, multilateral, bilateral y participación del sector privado. Sin embargo, no tiene una calificación tan alta como el indicador de registro de propiedad intelectual, debido a que esta es la única sección del Convenio en el que se hace alusión a los recursos financieros. Al mismo tiempo, la mayoría de este artículo está orientada hacia un financiamiento público y el apoyo entre

Partes. Lo que deja como oportunidad de mejora incentivar al sector privado a invertir en desarrollo, investigación y bienes tangibles relacionados a la economía circular del mercurio.

5.1.5. Principios de economía circular

Los principios de economía circular corresponden a una categoría de progreso adicional a la metodología propuesta por la Eurostat (Eurostat, 2019). Esta categoría contempla los conceptos más básicos de la económica circular como parte de los indicadores por evaluar. En esta se obtuvo una calificación general de 36%. Lo cual evidencia un espacio para la mejora del Convenio en términos de economía circular. En la Figura 12 se observa el desglose de las calificaciones de cada uno de los indicadores evaluados en la categoría presente.

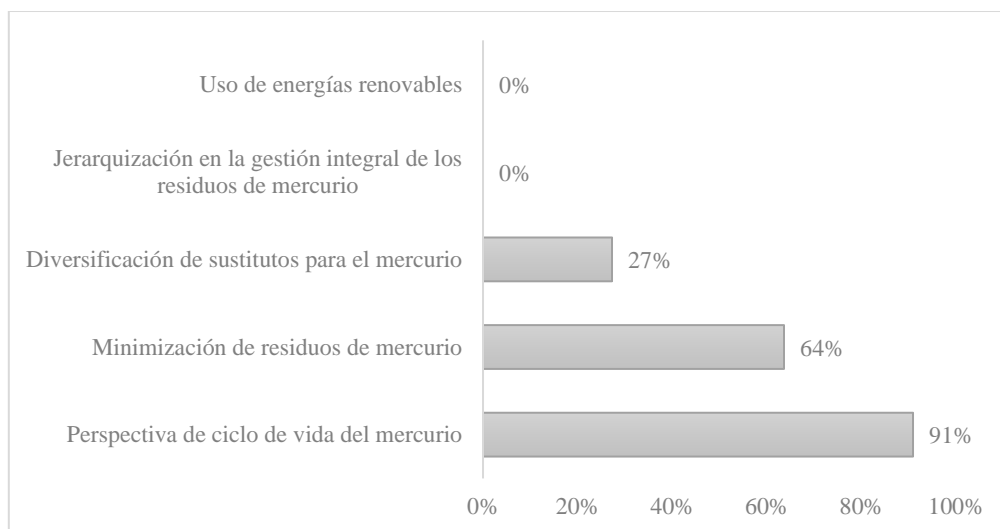


Figura 12. Calificaciones del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular de la categoría principios de economía circular.

En dicha figura se pueden observar dos puntos críticos que corresponden al uso de energías renovables y la jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio. En ambos casos se tiene una calificación de 0% debido a que no se logra identificar ninguna mención a lo largo del Convenio. En el caso del uso de energías renovables, es importante que el Convenio impulse la migración hacia estas. Se debe tomar en cuenta que una de las fuentes significativas de las emisiones de mercurio está relacionada al uso de combustibles fósiles. Además, si se quiere plantear un sistema de economía circular, es necesario que tanto

los materiales como las fuentes de energía puedan cerrar los ciclos regenerativos de las distintas cadenas productivas.

El siguiente punto crítico evidente es la jerarquización en la gestión integral de los residuos. Se debe reconocer que la mera existencia del Convenio de Minamata avala los primeros pasos de la pirámide: rechazar y reducir. El Convenio busca minimizar y eliminar, cuando sea viable, el uso de mercurio, lo cual es un aspecto positivo. Sin embargo, el documento no puntualiza en un sistema de jerarquización para el manejo de los residuos de mercurio. En el artículo 11 no se hace distinción en cuanto a la prioridad entre procesos como el reciclaje y la eliminación, sino que son tratados en conjunto como la misma clase de gestión de residuos. Es importante que el Convenio especifique que los residuos de mercurio deben ser recuperados, reutilizados o reciclados, siempre que sea viable, y optar como último paso por una disposición final o eliminación.

Posteriormente, se logró identificar en algunas secciones del documento el indicador de diversificación de sustitutos para el mercurio. Algunas de estas secciones alientan a las Partes a intercambiar información sobre nuevos avances tecnológicos y alternativas sin mercurio. En específico el párrafo 2 del artículo 7 de *“Extracción de oro artesanal y en pequeña escala”* especifica que cada Parte adoptará medidas para reducir, y cuando sea viable, eliminar el uso de mercurio. Conjuntamente, el párrafo 4 c) del mismo artículo incentiva la cooperación entre Partes para la promoción de investigaciones sobre prácticas alternativas sostenibles que no utilicen mercurio.

Los indicadores que mejor calificación presentan son los de minimización de residuos de mercurio y el de perspectiva de ciclo de vida. Como se mencionó anteriormente el Convenio en general busca la minimización de residuos de mercurio, y siempre que sea viable su eliminación. Por lo tanto, cuenta con una mejor calificación, en comparación con otros indicadores. Sin embargo, es importante que este concepto sea descrito de una manera clara, e incluso ser definido en el artículo 2 de *“Definiciones”*. Con esto se podrían definir metas de reducción medibles, significativas y adecuadas para cada Parte. Por último, en cuanto al indicador de perspectiva de ciclo de vida se cuenta con una calificación alta. Esto se debe a que la totalidad del Convenio contempla las diferentes fases del ciclo de vida del mercurio,

lo cual es mencionado desde el prólogo. Este aspecto permite atacar la problemática desde un punto de vista mucho más integral.

5.1.6. Resultados generales

Como se explicó anteriormente, el Convenio de Minamata cuenta con una serie de oportunidades de mejora para alcanzar un mayor progreso hacia la economía circular. En la Figura 13 se evidencia que las categorías con calificaciones más bajas son: Materias primas secundarias, Gestión de residuos y Principios de economía circular. De igual forma, la categoría de Producción y Consumo puede estar sujeta a mejoras, dado que su calificación está por debajo del 50%. Sin embargo, es necesario realizar una priorización de cada uno de los indicadores con el fin de optimizar los esfuerzos que puede realizar la Secretaría del Convenio de Minamata.

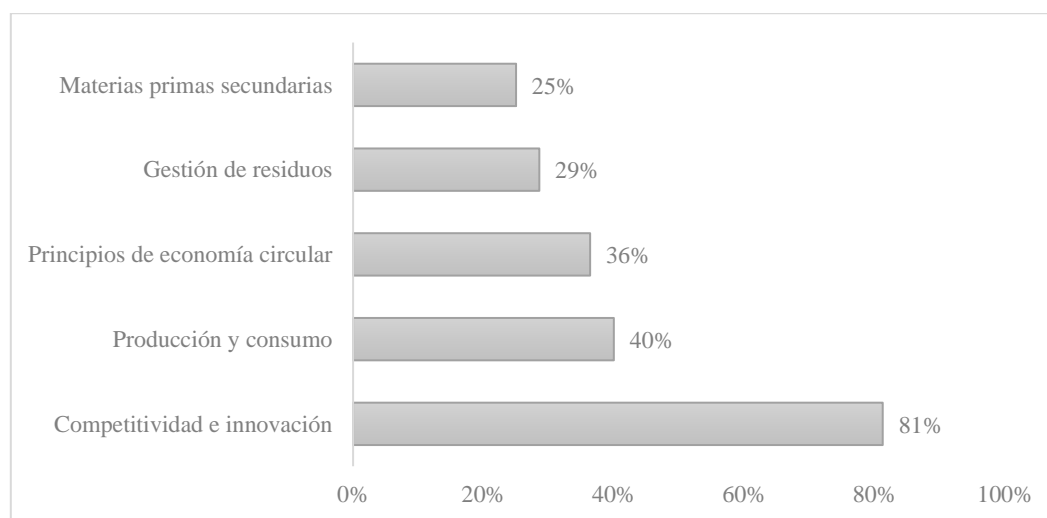


Figura 13. Calificaciones generales del Convenio de Minamata por indicadores de economía circular.

5.2. Priorización de indicadores

Tras realizar la matriz de priorización se concluye que los indicadores que requieren prioridad en la inclusión de elementos de economía circular son los que se establecen en el Cuadro 10. Dichos indicadores pertenecen a categorías variadas, por lo que se asegura una inclusión integral de estos en el Convenio. Así mismo, anteponer estos indicadores no implica descartar los demás, pues el cambio de paradigma económico es paulatino. Por ende, el Convenio de Minamata debe ir evolucionando en materia de economía circular a medida que

se genera el cambio en la sociedad. De esta forma se podrán retomar los demás indicadores una vez que los prioritarios hayan cumplido con las necesidades del Convenio.

Cuadro 10. Indicadores con prioridad ante la inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata.

Categoría	Indicador	Calificación
Materias primas secundarias	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	4,6
Principios de economía circular	Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	4,6
Producción y consumo	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima	4,2
Producción y consumo	Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular	4,2
Gestión de residuos	Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	4,0

5.3. Situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata en Costa Rica

Por medio de las entrevistas a expertos se logró recopilar información acerca de la situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata. Con el fin de sintetizar la información se presenta un análisis FODA en el Cuadro 11. Dicho análisis reúne los criterios de miembros de DIGECA, Ministerio de Salud, Dirección de Geología y Minas, sector privado y expertos en economía circular.

Cuadro 11. Análisis FODA de la situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata.

Fortalezas	Oportunidades
Existen regulaciones nacionales para pinturas, agroquímicos, cementeras y cosméticos.	Realizar estudios epidemiológicos para identificar afectaciones en la salud (principalmente de mineros).
Se realizó una recolección general de artículos con mercurio añadido con el fin de exportar para su adecuada disposición.	Ampliar lista de productos con mercurio añadido para los que ya existen sustitutos.
Ha existido inversión por parte de la empresa privada por sustituir e investigar alternativas de productos	Creación de un reglamento para ajustar la regulación del Convenio al contexto del país.
	Una de las tres minas con concesión en Abangares está desarrollando una nueva metodología que

<p>con mercurio añadido como las lámparas de los proyectores.</p> <p>Costa Rica cuenta con conciencia ambiental que permite realizar cambios más fácilmente que en otros países.</p> <p>Existe un sistema para atender denuncias ambientales (SITADA) incluyendo las relacionadas a la minería ilegal.</p> <p>Una de las minas con concesión en Abangares utiliza cianuración y trata los residuos de los “coligalleros”.</p> <p>Existe coordinación entre instituciones como DIGECA, Ministerio de Salud y el Ministerio de Hacienda para darle seguimiento al Convenio.</p> <p>Costa Rica ha tenido un cambio positivo en la gestión de residuos sólidos.</p>	<p>requiere reactivos de menor peligrosidad y de uso comercial.</p> <p>Decreto para prohibir los productos de la Parte 1 del Anexo A se encuentra a la espera de ser firmado.</p> <p>Inclusión de elementos de economía circular en la aplicación del Convenio de Minamata a nivel nacional.</p> <p>Introducción de un enfoque integral y de la economía circular como eje transversal en diversa normativa.</p> <p>Realizar consultas públicas más inclusivas que incluyan organizaciones informales.</p> <p>Actualización de conocimientos en programas de estudios universitarios para promover ideas innovadoras y no perpetuar patrones de consumo.</p>
---	--

Debilidades	Amenazas
<p>Falta de financiamiento para las tecnologías sustitutas del mercurio.</p> <p>Resistencia al cambio por tecnologías sustitutas e ideas innovadoras.</p> <p>Falta de incentivos por parte del sector público para impulsar el cambio tecnológico.</p> <p>La mayoría de la minería de oro en el país es ilegal o informal.</p> <p>La minería artesanal no cuenta con controles adecuados.</p> <p>La minería ilegal solamente recibe seguimiento por medio de visitas de la Dirección de Geología y Minas si se realizan denuncias.</p>	<p>La inclusión de elementos de economía circular puede causar rechazo por parte de los países firmantes.</p> <p>El incremento en el valor del oro aumenta el interés por la minería.</p> <p>Existencia de mercado negro de mercurio proveniente de Nicaragua y México.</p> <p>Las negociaciones para modificar el Convenio de Minamata son muy largas.</p> <p>La falta de sensibilidad para desarrollar políticas públicas deja por fuera sectores pequeños y/o vulnerables que son actores importantes en el seguimiento del Convenio de Minamata y en el desarrollo de modelos de economía circular.</p>

Dificultad para diferenciar los productos que contienen mercurio por falta de etiquetado.	Falta de transparencia con el consumidor evita el consumo informado.
Falta de cuantificación del mercurio utilizado en minería artesanal y por ende el liberado al ambiente.	
Falta de trazabilidad del mercurio.	

Actualmente, el seguimiento del Convenio de Minamata en Costa Rica tiene dos líneas principales: la minería de oro artesanal o en pequeña escala y los productos importados con mercurio añadido. Los expertos entrevistados coinciden en que la minería artesanal de oro presenta dificultades para el seguimiento del Convenio. Esto se debe a que se practica de manera ilegal e informal, y sólo se le da seguimiento a estas actividades ilícitas en caso de que se presente una denuncia. De igual forma, existe poca información acerca de los residuos con mercurio generados a partir de la actividad minera artesanal. Además, este sector cuenta con limitaciones económicas para optar por tecnologías alternas de extracción. En contraparte, el interés por la minería de oro sigue en aumento debido a su alza en el valor. Asimismo, los “*coligalleros*” han expresado a los expertos que no presentan afectaciones en la salud a pesar de estar en contacto con el mercurio. Los expertos consultados señalan que estas afirmaciones se pueden deber a la falta de estudios epidemiológicos que correlacionen los efectos en la salud con el uso del mercurio (Gómez, 2021).

Por otro lado, la minería legal que cuenta con concesiones en la zona de Abangares recibe un seguimiento continuo por parte de la Dirección de Geología y Minas. Actualmente existen tres concesiones otorgadas en la zona, una de ellas ha estado inactiva en los últimos años. Las otras dos presentan métodos alternativos al mercurio, como la cianuración, y el desarrollo de una nueva metodología que busca utilizar reactivos de uso comercial. Dicha metodología busca ser patentada próximamente y se espera que pueda ser un insumo para la sustitución del mercurio en la minería artesanal (Gómez, 2021).

En cuanto al uso de productos con mercurio añadido, estos son importados y se les da seguimiento por medio del Ministerio de Hacienda. Cabe aclarar que el mercurio utilizado para la minería artesanal entra al país de manera ilegal, por lo que el Ministerio de Hacienda no cuenta con esos registros. Por otro lado, los productos con mercurio añadido importados

por la vía legal son registrados por la Oficina Técnica de Aduanas. Una de las dificultades que se presentan en este ámbito corresponden a las limitaciones que existen para diferenciar los artículos que contienen mercurio de los que no. En contraparte, la normativa preexistente que regula límites máximos de pinturas, cosméticos, agroquímicos y cementeras facilitan la regulación de estos productos.

En el caso del sector privado, se externó el caso de éxito de la empresa al desarrollar un sustituto para las lámparas de los proyectores, los cuales históricamente han contenido 20 mg de Hg/lámpara. A partir de 2010 se realizó un cambio hacia una tecnología completamente libre de mercurio y plomo. Esta experiencia demostró la fortaleza que presenta el sector privado en inversión para la investigación y desarrollo de sustitutos. El cambio realizado por la empresa presentó una serie de desafíos como lo es la competencia de tecnologías más baratas que incluyen mercurio, la resistencia al cambio y la falta de incentivos por parte del sector público (García, 2021).

Tras conversar con los expertos se coincide en que la inclusión de elementos de economía circular es una oportunidad de mejora para el texto del Convenio de Minamata, así como para la aplicación del Convenio a nivel nacional. Según la Dra. Lilliana Abarca Guerrero, concedora de temas en economía circular, los principales actores para un cambio en esta materia son el sector privado, el sector público y la academia (Abarca Guerrero, 2021). El sector privado juega un papel importante como inversor en investigación y nuevas tecnologías para el manejo de residuos y sustitutos de materiales como el mercurio. El sector público establece mecanismos de control por medio de políticas públicas. Es necesario que estas regulaciones cuenten con un enfoque integral, de modo que la economía circular sea un eje transversal en diversas normativas. Esto con el fin de adaptarse ante los cambios que se presentan en el paradigma económico e impactar de manera positiva otros ejes en materia ambiental. De manera conjunta, la academia es protagonista en el desarrollo de nuevos productos, ideas y metodologías. Por lo tanto, este sector debe impulsar la actualización de conocimientos en los programas de estudios universitarios e incentivar la formación constante de los profesores, con el fin de no perpetuar los mismos patrones de consumo en los futuros profesionales.

5.4. Propuesta de inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata

5.4.1. Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio

Costa Rica ha adoptado dicha jerarquización para los residuos sólidos ordinarios dentro de la Ley para la Gestión Integral de Residuos N°8839 (Asamblea Legislativa, 2019). Dicha inclusión ha permitido definir un marco de acción para que las políticas y planes nacionales en materia de residuos vayan acorde a las necesidades globales de reducción de residuos. Es por esto, que resulta apropiado realizar una adaptación de esta jerarquización en el Convenio de Minamata. Por ende, se considera que en el artículo 11 “*Desechos de mercurio*” del Convenio debe existir un párrafo que establezca estas prioridades, de la siguiente manera.

“Cada Parte debe procurar la gestión integral de residuos de mercurio de acuerdo con el siguiente orden jerárquico:

- ✓ *Evitar la generación de residuos de mercurio en su origen, mediante la utilización de tecnologías sustitutas.*
- ✓ *Reducir al máximo la generación de residuos de mercurio en su origen.*
- ✓ *Reutilizar los residuos de mercurio generados ya sea en la misma cadena de producción o en otros procesos permitidos.*
- ✓ *Valorizar los residuos de mercurio mediante recuperación, reciclaje o regeneración solo para un uso permitido.*
- ✓ *Tratar los residuos de mercurio generados antes de realizar la eliminación definitiva.*
- ✓ *Disponer la menor cantidad de residuos de mercurio.”*

5.4.2. Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio

Es necesario crear un sistema de flujo circular para aquellos usos del mercurio permitidos que no cuentan con tecnologías sustitutas. Por ende, para impulsar la valorización del mercurio, previo a su disposición final, es relevante involucrar a los productores en la gestión de los residuos de mercurio generados en toda la cadena productiva. Tal es el caso de Costa Rica, que en la Ley para la Gestión Integral de Residuos (Asamblea Legislativa, 2019)

incluye un apartado dedicado a la responsabilidad extendida al productor, con el fin de gestionar los residuos especiales declarados por el Ministerio de Salud. Así, se propone establecer un párrafo dedicado a la responsabilidad extendida al productor o importador de productos con mercurio añadido, en el artículo 11 “*Desechos de mercurio*”.

“Cada Parte en cuyo territorio se produzcan o importen productos con mercurio añadido velará por que el productor o importador establezca un programa efectivo de recuperación, reúso, reciclaje u otro medio de valorización para los residuos derivados del uso o consumo de productos con mercurio añadido.”

Por otro lado, en cuanto a la minería de oro artesanal, el párrafo 2 del artículo 7 del Convenio busca que se elimine el uso de mercurio y de compuestos de mercurio, siempre que sea viable. Sin embargo, este planteamiento ignora la realidad de muchos “*coligalleros*” e impulsa una sustitución abrupta del mercurio. Por lo tanto, se propone impulsar en el artículo 7 de “*Extracción de oro artesanal y en pequeña escala*” del Convenio de Minamata el acompañamiento a los mineros artesanales, en busca de metodologías que les permita recuperar el mercurio y gestionarlo de manera integral.

“En caso de ser inviable la eliminación o reducción del mercurio en procesos de extracción y tratamiento de oro artesanales y en pequeña escala, cada Parte velará por el acompañamiento a los mineros artesanales para buscar metodologías que permitan recuperar el mercurio y gestionarlo en concordancia con la jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio.”

5.4.3. Existencia de un mercado de mercurio reciclado

Actualmente el artículo 3 “*Fuentes de suministro y comercio de mercurio*” del Convenio de Minamata estipula que ninguna Parte permitirá la exportación de mercurio salvo que sea para un uso permitido o para su almacenamiento provisional ambientalmente racional. Sin embargo, dicho enunciado no especifica que el comercio del mercurio debe ser de origen secundario. Tampoco detalla que se debe asegurar la gestión de un comercio seguro con el fin de prevenir el desvío de mercurio. Por ende, se propone añadir el siguiente párrafo al artículo 3.

“Cada Parte procurará que el comercio de mercurio sea de origen secundario y asegurará que los movimientos de mercurio se den bajo prácticas de seguridad estrictas. Para esto cada Parte planteará estrategias para gestionar el comercio y prevenir el desvío de mercurio y compuestos de mercurio.”

5.4.4. Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima

Las propuestas anteriores colaboran con autoabastecimiento de mercurio como materia prima. Sin embargo, para asegurar que se cuenta con la cantidad suficiente de mercurio secundario es necesario contar con inventarios de la demanda de mercurio de los usos permitidos. Esto facilita darles trazabilidad a los usos vigentes y permite registrar las actividades que requieren mercurio. Por ende, se propone incluir en el artículo 3 de *“Fuentes de suministro y comercio”* el siguiente párrafo.

“Las Partes, en cuyo territorio exista actividad relacionada con los usos permitidos del mercurio, se esforzarán por completar un registro e inventario de la demanda de mercurio de los usos permitidos.”

5.4.5. Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular

Dentro de las debilidades halladas en el seguimiento del Convenio de Minamata se destacó la falta de incentivos por parte del sector público hacia los productos libres de mercurio. Se considera que las compras públicas de las Partes deben apoyar la sustitución del mercurio. Esto con el fin de incentivar el desarrollo de nuevas tecnologías libres de mercurio. Por ende, se propone incluir el siguiente párrafo al artículo 3 de *“Fuentes de consumo y comercio”*.

“Cada Parte velará por que las Instituciones Públicas promuevan la compra y la utilización de productos libres de mercurio, así como de productos que contengan mercurio reciclado que cumplan las especificaciones técnicas requeridas.”

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En la evaluación de la presencia de principios de economía circular en el Convenio de Minamata se determinó que el mismo cuenta con oportunidades de mejora relacionadas con la inclusión de elementos de economía circular. Las calificaciones generales para las diferentes categorías de indicadores de economía circular utilizadas en este estudio se encuentran por debajo del 50% de cumplimiento. A excepción de la categoría de competitividad e innovación, que cuenta con un cumplimiento del 81%.

Según el análisis de la situación actual del seguimiento del Convenio de Minamata en Costa Rica, se presentan diversas fortalezas y debilidades. Dentro de las fortalezas identificadas se destaca la existencia de normativa que regula el contenido de mercurio en diferentes productos, la coordinación entre instituciones para darle seguimiento al Convenio y la conciencia ambiental de la cultura costarricense. Las principales debilidades son la falta de capacidad de control e implementación de las regulaciones, la falta de inspección regular de los sitios y empresas que involucran procesos con mercurio. Así como el monitoreo de la exposición de los operarios que laboran en dichas empresas, la minería ilegal o informal de oro artesanal, la dificultad para financiar el cambio a tecnologías sustitutivas de mercurio y la falta de incentivos por parte del sector público. Asimismo, una oportunidad de mejora para la aplicación del Convenio de Minamata en Costa Rica es la introducción de un enfoque integral, que incluya la economía circular como eje transversal en diversa normativa nacional. Sin embargo, la negociación de este tipo de enmiendas tanto a nivel nacional como del Convenio de Minamata suelen ser extensas.

Se determinaron las oportunidades de mejora prioritarias del Convenio de Minamata en materia de economía circular. En consecuencia, se propone la redacción de párrafos enfocados en la jerarquización de la gestión integral de los residuos de mercurio, así como el reciclaje y la existencia de un mercado de mercurio de origen secundario. De igual forma es necesario desarrollar un marco de regulación que asegure la autosuficiencia del abastecimiento de mercurio para los usos permitidos, e impulsar las compras públicas libres de mercurio. Esto con el fin de disminuir el uso del mercurio sin ignorar la realidad actual en

la que todavía existen usos de este elemento para el que no se han desarrollado tecnologías sustitutas.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda tomar en consideración aspectos de economía circular para el desarrollo de la normativa actual y venidera. Asimismo, se sugiere actualizar los planes de estudios universitarios que forman a los nuevos profesionales. Esto para evitar perpetuar los mismos patrones de consumo y generar un cambio en el paradigma económico actual.

Se recomienda desarrollar una metodología estandarizada para evaluar el cumplimiento de la normativa en cuestiones de economía circular. El desarrollo de dicha metodología facilita evaluar la adaptabilidad que tienen las regulaciones ante el cambio que requieren los sistemas económicos actuales, con el fin de asegurar la sostenibilidad de los medios productivos en el tiempo.

Como recomendación para la evaluación de normativa se sugiere utilizar indicadores preexistentes de metodologías para medir la economía circular y adaptarlos para un análisis cualitativo. Además, se recomienda utilizar metodologías para priorizar las acciones según las necesidades de cada contexto.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abad-Segura, E., Batlles de la Fuente, A., González-Zamar, M.-D., & Belmonte-Ureña, L. J. (2020). Effects of Circular Economy Policies on the Environment and Sustainable Growth: Worldwide Research. *Sustainability*, 12(5792). doi:doi:10.3390/su12145792
- Abarca Guerrero, L. (2021). Entrevista experto en economía circular, comunicación personal.
- Asamblea Legislativa. (2019). Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839. San José: La Gaceta.
- Asamblea Legislativa Gobierno de Costa Rica. (2016). *Convenio de Minamata sobre el Mercurio*. San José: La Gaceta. Recuperado el 29 de Marzo de 2021, de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_norma.aspx?para m1=NRM&nValor1=1&nValor2=82755&nValor3=105958&strTipM=FN
- Blanco Cámara, M. (2018). *La Economía Circular y su perspectiva de mercado*. Recuperado el 5 de Abril de 2021, de <https://relevocontigo.com/la-economia-circular-y-su-perspectiva-de-mercado/>
- Centro de Innovación y Economía Circular. (2019). *Economía circular y políticas públicas: Estado del arte y desafíos para la construcción de un marco político de promoción de economía circular en América Latina*. (CIEC) Recuperado el 7 de Abril de 2021, de https://dialogopolitico.org/wp-content/uploads/2019/12/Economia_Circular_y_Politiclas_Publicas.pdf
- Coalición de Economía Circular. (Febrero de 2021). *Perspectiva general*. Recuperado el 7 de Abril de 2021, de <https://www.coalicioneconomiacircular.org/>
- Convenio de Minamata sobre el Mercurio. (2021). *Mercury Convention-Texto y anexos*. (UNEP) Recuperado el 23 de Marzo de 2021, de <http://www.mercuryconvention.org/Convenio/Texto/tabid/5690/language/es-CO/Default.aspx>

- DeFoe, D. (Junio de 2013). *Understanding Mercury Waste & Mercury Recycling Process*. (The Retrofit Companies, Inc.) Recuperado el 21 de Mayo de 2021, de <https://retrofitcompanies.com/understanding-mercury-waste-mercury-recycling-process/>
- Díaz Segura, M. (2019). *Economía Circular: Concepto y Aplicaciones*. (DIGECA) Recuperado el 7 de Abri de 2021, de <http://www.digeca.go.cr/economia-circular-concepto-y-aplicaciones>
- DIGECA. (2016). *Gestión de Sustancias Químicas/Mercurio Convenio de Minamata*. Recuperado el 29 de Marzo de 2021, de <http://www.digeca.go.cr/areas/mercurio-convenio-de-minamata>
- DIGECA. (2018). *Análisis Socioeconómico: Minería de Oro Artesanal y Sustitución de Productos Anexo A, parte I*. (DIGECA) Retrieved Abril 9, 2021, from http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/4_analisis_socioeconomico_mineria_de_oro_artesanal_y_sustitucion_de_productos_anexo_a_parte_1.pdf
- DIGECA. (2018). *Evaluación inicial para la implementación del Convenio de Minamata (MIA) sobre mercurio*. San José. Recuperado el 29 de Marzo de 2021, de http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/1_evaluacion_inicial_para_la_implementation_del_convenio_de_minamata_sobre_mercurio.pdf
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy. Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Recuperado el 5 de Abril de 2021, de <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy. Opportunities for the consumer goods sector*. Recuperado el 5 de Abril de 2021, de https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/TCE_Report-2013.pdf
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *What is a circular economy? A framework for an economy that is restorative and regenerative by design*. (Ellen MacArthur

- Foundation) Recuperado el 20 de Marzo de 2021, de <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept>
- Engstrom, D. (2007). Fish respond when the mercury rises. *Proc. Natl. Acad. Sci*, 104.
- Eriksen, & Perrez. (Julio de 2014). The Minamata Convention: A Comprehensive Response to a Global Problem. *Reciel*, 23(2), 195-210. doi:10.1111/reel.12079
- Esposito, M., Tse, T., & Soufani, K. (2018). Introducing a Circular Economy: New Thinking with New Managerial and Policy Implications. *California Management Review*, 60(3), 5-19. doi:doi:10.1177/0008125618764691
- Eurostat. (2019). *Circularity rate*. (Eurostat) Recuperado el 3 de Agosto de 2021, de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flows_in_the_circular_economy#Circularity_rate
- Eurostat. (2019). *Which indicators are used to monitor the progress towards a circular economy?* (European Commission) Recuperado el 2021 de Julio de 28, de <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/indicators>
- Falappa, M. B., Lamy, M., & Vazquez, M. (2019). *De una Economía Lineal a una Circular, en el siglo XXI*. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Fernández Villalobos, A., Herrera Murillo, J., & Sibaja Brenes, J. P. (2017, Julio-Diciembre). Perfil nacional de uso de mercurio en Costa Rica a la luz de la entrada en vigencia del Convenio de Minamata. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sc)*, 51(2), 145-168. doi:http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.8
- Gaioli, M., Amoedo, D., & González, D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Pediatría práctica*, 3(110), 259-264. Retrieved Marzo 18, 2021, from <https://www.sap.org.ar/docs/publicaciones/archivosarg/2012/v110n3a18.pdf>
- García, M. (2021). Entrevista a sector privado, comunicación personal.

- Gilmour, C., Riedel, G., Ederington, M., Bell, J., & Benoit, J. (1998). Methylmercury concentrations and production rates across a trophic gradient in the northern everglades. *Biogeochemistry*, *40*, 327-450.
- Gómez, M. (2021). Entrevista Dirección de Geología y Minas, comunicación personal.
- Hernandez Alvarado, M., & Pastraña Pama, A. (2017). La Modularidad Como Estrategia De Innovación. *Gestión de la Innovación para la competitividad*.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F: McGraw Hill.
- Hintelmann, H., Harris, R., Heyes, A., Hurley, J., & Kelly, C. (2002). Reactivity and mobility of new and old mercury deposition in a boreal forest ecosystem during the first year of the METAALICUS study. *Environ. Sci. Technol*, *36*, 34-40.
- Hjort, M., Skobelev, D., Almgren, R., Guseva, T., & Koh, T. (2019). Best available techniques and sustainable development goals. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM* (pp. 185-192). Bulgaria, Sofia: Surveying Geology & Mining Ecology Management (SGEM). doi:http://dx.doi.org/10.5593/sgem2019V/4.2/S06.025
- Instituto Nacional de la Economía Social. (2021). *Conoce las cadenas de valor*. (Gobierno de México) Recuperado el 20 de Mayo de 2021, de <https://www.gob.mx/inaes/es/articulos/conoce-las-cadenas-de-valor?idiom=es>
- Inter-Organization Programme For The Sound Management Of Chemicals. (2002). *Global Mercury Assessment*. Geneva: UNEP. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/31253/GMA-Report02.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jawahir, I., & Bradley, R. (2016). Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, *40*, 103-108. doi:doi: 10.1016/j.procir.2016.01.067
- Kothney, E. L. (1973). The Three-Phase Equilibrium of Mercury in Nature. En *Trace Elements in the Environment* (págs. 48–80). doi:doi:10.1021/ba-1973-0123.ch004

- Langford, N. (1999). Toxicity of mercury. *Journal of Human Hypertension*, 13, 651–656.
- Lin, C., & Pehkonen, S. (1999). The chemistry of atmospheric mercury: a review. *Atmos. Environ.*, 33, 67–79.
- Lindsay, W. (1979). Mercury. En *Chemical Equilibria in soils*. USA: Library of Congress Cataloging in Publication Data.
- McGregor, M. (1991). Economics of Natural Resources and the Environment D. W. Pearce and R. K. Turner. Harvester Wheatsheaf, London, 1990. 378 pp. *Agricultural Systems*, 37(1), 100-101. doi:doi.org/10.1016/0308-521X(91)90051-B.
- MINAE. (2018). *Marco Jurídico, Institucional y Político*. (DIGECA) Recuperado el 9 de Abril de 2021, de http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/3_marco_juridico_institucional_y_politico.pdf
- Nairobi. (2 de Febrero de 2021). América Latina y el Caribe lanza la Coalición de Economía Circular. *El Mundo*. Recuperado el 7 de Abril de 2021, de <https://www.elmundo.cr/mundo/america-latina-y-el-caribe-lanza-la-coalicion-de-economia-circular/>
- Ocampo, D. (2013). *Jerarquización de la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Recuperado el 4 de Agosto de 2021, de http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_230_080413_es.pdf
- ONU Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (1992). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Organización de las Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Río de Janeiro. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm>
- Pacyna, E., Pacyna, J., Sundseth, K., Munthe, & Kindbom, K. (2010). Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020. *Atmospheric Environment*, 44, 2487–2499.

- Pirrone, N., Cinnirella, S., Feng, X., Finkelman, R., Friedli, H., Leaner, J., & Telmer, K. (2010). Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10.
- Poder Ejecutivo. (2006). *Creación de la Secretaría Técnica de Coordinación para la Gestión de Sustancias Químicas*. San José: La Gaceta.
- Poder Ejecutivo. (2021). *Reglamento a la Ley General de Aduanas N° 25270-H*. San José: La Gaceta.
- Poder Ejecutivo de Costa Rica. (2017). *Reglamento técnico RTCR 481:2015 Productos Químicos. Productos Químicos Peligrosos. Etiquetado No. 40457-S*. La Gaceta.
- Poder Ejecutivo, Gobierno de Costa Rica. (3 de Mayo de 2018). *Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible 2018-2030*. (La Gaceta) Recuperado el 7 de Abril de 2021, de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_norma.aspx?para_m1=NRM&nValor1=1&nValor2=86392&nValor3=112071&strTipM=FN
- Prigonine, Ilya, & Stenger. (1990). *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Alianza Editorial.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (Septiembre de 2019). *Convenio De Minamata Sobre El Mercurio: Textos Y Anexos*. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de <http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/COP3-version/Minamata-Convention-booklet-Sep2019-SP.pdf>
- Real Academia Española. (2020). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 20 de Mayo de 2021, de <https://dle.rae.es/>
- Real Academia Española. (2020). *Diccionario panhispánico del español jurídico-Materias primas secundarias*. Recuperado el 8 de Agosto de 2021, de <https://dpej.rae.es/lema/materia-primas-secundarias>
- Recursos y Habilidades Consultoría. (2021). *Adaptabilidad*. (Recursos y Habilidades) Retrieved Mayo 20, 2021, from <https://www.recursosyhabilidades.com/apartados/adaptabilidad.html>

- Rica, P. E. (2017). Ratificación de la República de Costa Rica al Convenio de Minamata sobre el Mercurio. San José: La Gaceta. Recuperado el 29 de Marzo de 2021, de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=83253&nValor3=106820&strTipM=TC
- Rice, K., Walker Jr, E. M., Wu, M., Gillette, C., & Blough, E. R. (2014). Environmental Mercury and Its Toxic Effects. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*(47), 74-83. doi:<http://dx.doi.org/10.3961/jpmph.2014.47.2.74>
- Rizos, V., Tuokko, K., & Behrens, A. (2017). The Circular Economy: A review of definitions, processes and impacts. *CEPS Research Reports*. Retrieved April 5, 2021
- Sagrado, J., Águila, M. I., & Bosch, A. (2018). Expansión cuantitativa del método MoSCoW para la priorización de requisitos. *Departamento de Informática, Universidad of Almería*.
- Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development*, 17, 48-56.
- Selin. (2009). Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review. *The Annual Review of Environment and Resources*, 34, 43–63.
- Selin, H., Egan Keane, S., Shuxiao, W., Selin, N. E., Davis, K., & Bally, D. (2018, Enero 31). Linking science and policy to support the implementation of the Minamata Convention on Mercury. (Springer, Ed.) *Ambio*(47), 198-215. doi:10.1007/s13280-017-1003-x
- Smith, J., Van Ness, H., & Abott, M. (1997). *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. Mexico. DF: McGraw-Hil.
- Soto Montero. (2019). Notification that artisanal and small-scale gold mining and processing is more than insignificant within the Republic of Costa Rica. Costa Rica.
- Sparks, S., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., & Soltanpour. (1996). *Methods of Soil Analysis*. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America Book.

- Strode, S., Jaegle, L., Selin, N, Jacob, D., & Park, R. (2007). Air-sea exchange in the global mercury. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 21.
- UNEP. (2019). *Mercury Inventory Toolkit*. (UNEP) Recuperado el 16 de Agosto de 2021, de <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/mercury/mercury-inventory-toolkit>
- UNEP. (2019). Technical Background Report of the Global Mercury Assessment, 2018. Geneva.
- United Nations Industrial Development Organization Investment and Technology Promotion Office. (2021). *Mercury Waste Recycling Technology: Advancements in Waste Management Technology*. Recuperado el 21 de Mayo de 2021, de http://www.unido.or.jp/en/technology_db/1716/
- Veolia. (2021). *Our Recycling Process Ensures Compliance*. (VEOLIA) Recuperado el 21 de Mayo de 2021, de https://lamprecycling.veoliaes.com/about_us/recycling-process
- Villalobos, F. (2019). Exposición a mercurio de las personas que trabajan en la minería artesanal de oro, Costa Rica, 2015-2016. *Población y Salud en Mesoamérica*.
- Yudovich, Y., & Ketris, M. (2005). Mercury in coal: a review. *International Journal of Coal Geology*, 62, 107-134.

APÉNDICES

APÉNDICE 1: ENTREVISTAS A EXPERTOS

Entrevista 1: Dirección de Geología y Minas

Nombre:

Cargo que desempeña:

¿Cuál es la situación actual de la minería artesanal de oro?

En la minería de oro, ¿Cómo es normalmente el proceso que sigue el mercurio, desde que es comprado, hasta que es desechado?

¿Reutilizan el mercurio en alguna fase del proceso?

¿Como desechan el mercurio? ¿Utilizan gestores autorizados, lo recuperan?

¿En algún momento se han dado iniciativas con tecnologías para sustituir el mercurio o controlar las emisiones de mercurio? De ser así cual ha sido la experiencia

¿Considera que los mineros artesanales perciben afectaciones por el manejo de mercurio? Ya sea de salud, de seguridad al conseguir el mercurio o demás

¿Los mineros artesanales tienen alguna clase de seguimiento de cumplimiento del Convenio de Minamata? ¿Deben presentar algún reporte a DIGECA, MS u otra institución?

¿Ha habido acercamientos por parte del MS o DIGECA para realizar acciones en pro del manejo del mercurio?

Entrevista 2: Dirección de Gestión de Calidad Ambiental

Nombre:

Cargo que desempeña:

¿El seguimiento del Convenio de Minamata se concentra en DIGECA o existen otras instituciones involucradas?

¿Cuáles son los desafíos que presenta el país al darle seguimiento al Convenio de Minamata?

¿Cuáles han sido los logros de Costa Rica en cuanto a la gestión del mercurio, desde la aplicación del Convenio?

¿Cuáles aspectos se busca mejorar del Convenio de Minamata actualmente?

¿El equipo técnico del Convenio de Minamata ha considerado la inclusión de elementos de economía circular?

¿Cómo afectaría esta inclusión el seguimiento que ya se le da al cumplimiento del Convenio?

¿El equipo técnico del Convenio de Minamata estaría interesado en recibir una propuesta de inclusión de elementos de economía circular?

¿El equipo técnico del Convenio cuenta con alguna ruta para recibir este tipo de propuestas por parte del público?

Entrevista 3: Miembro de empresa privada

Nombre:

Cargo que desempeña:

¿Cuál es la relación actual de Casio con el Convenio de Minamata?

¿Cuál es el proceso que sigue el mercurio en los productos de Casio?

¿En algún momento se han dado iniciativas con tecnologías para sustituir el mercurio o controlar las emisiones de mercurio? De ser así cual ha sido la experiencia

¿Han determinado barreras para la aplicación del Convenio de Minamata?

¿Casio tiene experiencia con la transición hacia la economía circular? Ya sea en materia de mercurio o no

¿El sector privado ha recibido estímulos para la implementación de estrategias de economía circular?

¿Cuál es su opinión acerca de la inclusión de elementos de economía circular en el Convenio?

Entrevista 4: Ministerio de Salud

Nombre:

Cargo que desempeña:

¿Cuál ha sido la experiencia del sector salud al utilizar productos con mercurio añadido?

¿Como desechan los productos que contienen mercurio? ¿Utilizan gestores autorizados?

¿En algún momento se han dado iniciativas con tecnologías para sustituir el mercurio o controlar las emisiones de mercurio? De ser así cual ha sido la experiencia

¿Se han identificado afectaciones en la salud costarricense asociada al uso de mercurio o productos con mercurio?

Desde su experiencia ¿Ha notado alguna oportunidad de mejora que deba ser incluida en el Convenio?

Entrevista 5: Experto en economía circular

Nombre:

Cargo que desempeña:

¿Cuál ha sido su experiencia con la economía circular?

¿Ha podido ver evidenciada alguna transición?

¿Considera que la economía circular debe ser impulsada en las políticas públicas?

De ser así, ¿Considera que se debe incluir este enfoque en la normativa existente, o se debe crear nueva normativa específica?

¿Qué criterios técnicos considera relevantes a la hora de incluir una perspectiva de economía circular en la normativa?

¿Cuál es su opinión acerca de la inclusión de elementos de economía circular en el Convenio de Minamata?

Entrevista 6: GASEL

Nombre:

Cargo que desempeña:

¿Cuál ha sido la metodología utilizada para centralizar los datos relacionados al cumplimiento de los ODS en el TEC?

¿De dónde surge la necesidad de conciliar las actividades institucionales con los ODS?

¿Qué tipo de herramientas encontraron para sistematizar la información y qué herramientas debieron desarrollar?

¿Cuáles son los logros y los desafíos a los que se han enfrentado al darle seguimiento a los ODS mediante esta metodología?

APÉNDICE 2: ENTREVISTA TRANSCRITA

Cargo que desempeña: Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud

¿Cuál ha sido la experiencia del sector salud al utilizar productos con mercurio añadido?

El Ministerio ha ido regulando algunos productos como pinturas, se han asignado concentraciones máximas de mercurio. El ministerio de salud también participa en el registro de agroquímicos que contienen mercurio, los cuales se han ido eliminando del mercado. Existen límites máximos permitidos de mercurio para algunos cosméticos. Existe una dirección del Ministerio de Salud que regula el registro de productos. Nosotros nos dedicamos a controlar el mercurio en las emisiones, en agua, en suelo. Un área donde se utiliza mucho el mercurio con impacto ambiental es en la minería en pequeña escala.

¿Se realizan esfuerzos en conjunto con DIGECA para darle seguimiento al Convenio de Minamata?

Correcto, hay una compañera que participa regularmente en una comisión que trata de dar seguimiento al Convenio de Minamata. La ingeniera Paula Solano, trabaja en mi unidad.

¿Como desechan los productos que contienen mercurio? ¿Utilizan gestores autorizados?

Hace muchos años, la Caja Costarricense (del Seguro Social) trató de eliminar un montón de los medidores de presión arterial y algunas amalgamas dentales. Mucho de eso se exportó. Hubo un gestor autorizado que fue contratado y fue quien gestionó la exportación a través del Convenio de Basilea porque eran residuos peligrosos. El Convenio de Basilea también entra en juego además del de Minamata.

Actualmente hay algunos decomisos esporádicos de mercurio en la Zona Norte, hacia Crucitas, Abangares o Cañas, que es para ser utilizado en minería artesanal. Y algo de eso fue exportado en ese primer embalaje, después de eso ya no se hicieron más. Puede que algunos gestores si tengan posibilidad de exportarlo, pero no han solicitado los trámites de

exportación por medio del Convenio de Basilea porque tal vez son cantidades muy bajas, entonces puede que se esté almacenando con el ánimo de exportarlo o comercialarlo en mayor cantidad.

¿En algún momento se han dado iniciativas con tecnologías para sustituir el mercurio o controlar las emisiones de mercurio? De ser así cual ha sido la experiencia

No estoy tan familiarizado con tecnologías alternativas, pero hay muchos aparatos médicos digitales, como los medidores de presión con aire. Tal vez alguna resistencia ha existido para sustituir la amalgama dental, que si se sigue utilizando hoy en día. Sí hay un esfuerzo también a través del Convenio de Minamata de irlo sacando. De hecho hubo un grupo que se reunía hace como uno o dos años para darle seguimiento a eso, lo coordinaba una doctora del Ministerio (de Salud) y alguien de la Caja (Costarricense de Seguro Social).

¿Se han identificado afectaciones en la salud costarricense asociada al uso de mercurio o productos con mercurio?

No se ha logrado porque no se han hecho los estudios. No ha habido plata, interés o voluntad de seguimiento a proyectos a largo plazo para ver si hay alguna afectación. Pues, un estudio epidemiológico tarda bastantes años en que fructifique. Creo que también ha habido alguna resistencia de la misma población a participar en estos estudios. No ha habido interés mutuo ni de las poblaciones ni del sector salud en lograr esa evaluación. Hubo una evaluación hace mucho tiempo, me parece que se hizo un muestreo en sangre, no era nada concluyente, era una muestra pequeña. Pero creo que estamos ayunos de buenos estudios en esa área.

¿Qué desafíos ha enfrentado el Ministerio de Salud al darle seguimiento al Convenio de Minamata?

Creo que es un desafío del grupo que ve el Convenio, para nosotros es bastante evidente que hay tecnologías sustitutas. Sin embargo, los entes que deben financiar o facilitar ese cambio de tecnología están fuera del sector salud, puede ser el sector económico, el sector ambiente, el sector minero mismo, son los que podrían inculcar esas tecnologías. De hecho, se capacitó hace un tiempo al mismo grupo del Convenio de Minamata y a algunos oreros para ver otras tecnologías para separar el oro, pero no sé al final que tanto éxito tuvo eso.

Ahora hay un interés porque hay una legislación que permite hasta el 2022 o 2023 el uso del mercurio, entonces otra vez están interesados. La tecnología más asequible es posiblemente el uso del cianuro que igual tiene sus implicaciones, pero es una opción.

Tal vez otro desafío se relaciona con la gestión de los residuos. Y al estar la minería de forma ilegal y dispersa por muchas comunidades pequeñas no se da la facilidad para la vigilancia para visitar los lugares. El sector en Abangares debe visitar todas las rastras que hay, y están en muchas ocasiones dentro de una casa. El proceso no está industrializado ni legalizado en muchos casos.

Desde su experiencia ¿Ha notado alguna oportunidad de mejora que deba ser incluida en el Convenio?

Yo no me considero experto en el Convenio, pero tal vez algo que es necesario mejorar es la transferencia de esa tecnología y de los fondos para adquirir esa tecnología. De donde van a agarrar los pobres mineros ese dinero para poder cambiar y arriesgarse. No hay mucha disposición por invertir por eso, porque no hay la cantidad de recursos suficientes. La ley en este momento dice que los que se consideran legales son los que se han agrupado en cooperativas, entonces los que no están en cooperativas no tienen acceso, pero eso no es por el Convenio eso es más por nuestra legislación.

APÉNDICE 3: MATRÍZ DE CALIFICACIÓN DE INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR

Cuadro A. 3. 1. Matriz de calificación de indicadores de economía circular de la categoría de producción y consumo.

N.º art	Título de artículo	Indicador de cumplimiento con criterios de economía circular	Calificación	Observaciones
3	Fuentes de suministro y comercio	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima	0	En el artículo se prohíbe la nueva extracción primaria de mercurio y se da un periodo de 15 años para detener la extracción primaria de mercurio existente. No asegura que exista autosuficiencia de abastecimiento de mercurio como materia prima. Especifica que el mercurio se debe eliminar mediante operaciones que no conduzcan a la recuperación, el reciclado, la regeneración, la utilización directa u otros usos.
		Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular	0	No se menciona
		Identificación de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	10	El párrafo 5 a) del artículo 3 especifica que cada parte se esforzará por identificar las existencias de mercurio mayores a 50 ton métricas, así como las fuentes de suministro de mercurio mayores a 10 ton métricas/año
		Inventario de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	10	Se especifica la identificación de las existencias de mercurio según las cantidades. El párrafo 5 c) del artículo 8 estipula que se debe establecer que se debe crear un inventario de emisiones, pero solamente para las fuentes pertinentes

4	Productos con mercurio añadido	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima	0	Se prohíbe la fabricación, importación y exportación de productos con mercurio añadido incluidos en la parte I del anexo A después de la fecha de eliminación específicas para cada producto. No se asegura la autosuficiencia de mercurio para los usos permitidos.
		Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular	0	No se menciona
		Identificación de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	0	No se desarrolla el tema de residuos de productos con mercurio añadido
		Inventario de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	10	El párrafo 5 c) del artículo 8 estipula que se debe establecer que se debe crear un inventario de emisiones, pero solamente para las fuentes pertinentes
5	Procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima	0	No se asegura el abastecimiento de mercurio para los procesos de fabricación que sí tienen permitido el uso de mercurio o compuestos de mercurio
		Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular	0	No se menciona
		Identificación de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	10	El párrafo 4 del artículo 5 especifica que la Secretaría mantendrá información acerca de los procesos en los que se utiliza mercurio, la cual estará a disposición del público

		Inventario de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	10	El párrafo 5 c) del artículo 5 estipula que las partes que cuenten con una o más instalaciones de procesos de fabricación que utilicen mercurio se esforzaran por identificar las instalaciones y estimar la cantidad de mercurio o compuestos de mercurio que utilizan anualmente
		Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima	0	La minería en pequeña escala que utiliza amalgama de mercurio está sujeta a reducir y eliminar (cuando sea viable) el uso de mercurio y compuestos de mercurio. Sin embargo, no se asegura el abastecimiento de mercurio para aquellos casos en los que la eliminación no sea viable
		Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular	0	No se menciona
7	Extracción artesanal y en pequeña escala	Identificación de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	5	En el párrafo 3 del artículo 7 se encuentra de manera implícita la identificación de fuentes de mercurio relacionadas a la minería artesanal. Esto debido a que estipula que las partes que determinen que esta actividad es más que insignificante deberá apegarse a una serie de acciones definidas por el Convenio
		Inventario de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	10	El párrafo 5 c) del artículo 8 estipula que se debe establecer que se debe crear un inventario de emisiones, pero solamente para las fuentes pertinentes
10	Almacenamiento provisional ambientalmente racional de mercurio, distinto del mercurio de desecho	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima	5	En el párrafo 2 del artículo 10 se estipula que cada Parte velará por que el almacenamiento provisional del mercurio destinados a usos permitidos se dé de manera ambientalmente racional. Lo anterior vela por la autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima para

los usos permitidos. Sin embargo, está escrito de manera implícita y es el único párrafo en el que se hace referencia a este indicador

Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular	0	No se menciona
Identificación de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	0	No se menciona
Inventario de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	10	El párrafo 5 c) del artículo 8 estipula que se debe establecer que se debe crear un inventario de emisiones, pero solamente para las fuentes pertinentes
Calificación general	40%	

Cuadro A. 3. 2. Matriz de calificación de indicadores de economía circular de la categoría de gestión de residuos.

N.º art	Título de artículo	Indicador de cumplimiento con criterios de economía circular	Calificación	Observaciones
4	Productos con mercurio añadido	Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	0	El párrafo 3 del artículo 4 estipula que las Partes adoptarán medidas en relación con los productos con mercurio añadido. Algunas medidas podrían ser el reciclaje o la cuantificación, sin embargo, dicho párrafo resulta poco claro al no dar un marco para las medidas que deben tomar.
		Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	0	No se menciona
		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	0	No se menciona
5	Procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio	Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	0	El párrafo 5 a) del artículo 5 estipula que cada Parte adoptará medidas para ocuparse de las emisiones y liberaciones de mercurio y compuestos de mercurio. Sin embargo, no incentiva el reciclaje del mercurio
		Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	5	El párrafo 5 c) del artículo 5 describe que se debe realizar una estimación de la cantidad de mercurio o compuestos de mercurio utilizados anualmente. No obstante, no estipula la cuantificación de los desechos

		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	0	No se menciona
		Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	0	No menciona la generación de residuos para la minería artesanal. Solamente estipula en el párrafo 4 a) del artículo 7 que se formularán estrategias para prevenir el desvío del mercurio para su uso en la extracción
7	Extracción de oro artesanal y en pequeña escala	Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	0	No se menciona
		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	0	No se menciona
		Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	0	No se menciona
8	Emisiones	Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	10	El párrafo 5 a) estipula que se debe contar con un objetivo cuantificado para controlar y reducir las emisiones procedentes de las fuentes pertinentes. Además, el párrafo 7 establece que cada Parte debe contar con un inventario de emisiones de las fuentes pertinentes

		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	5	El párrafo 5 c) menciona que se debe presentar el uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para controlar las emisiones ambientales. De esta forma dentro de este concepto se puede considerar contar con un registro de gestores autorizados. Sin embargo, esto se encuentra solamente de manera implícita
		Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	0	No se menciona
9	Liberaciones	Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	10	El párrafo 6 del artículo 9 establece que cada Parte debe contar con un inventario de liberaciones de las fuentes pertinentes
		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	5	El párrafo 5 b) menciona que se debe presentar el uso de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para controlar las liberaciones ambientales. De esta forma dentro de este concepto se puede considerar contar con un registro de gestores autorizados. Sin embargo, esto se encuentra solamente de manera implícita
11	Desechos de mercurio	Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 3 b) de artículo 11 estipula que cada Parte adoptará medidas para que los desechos de mercurio sean recuperados, reciclados, regenerados o reutilizados directamente solo para un uso permitido o para la eliminación ambientalmente racional.
		Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	0	No se menciona

		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	5	El artículo se apega a las disposiciones del Convenio de Basilea con respecto a los movimientos transfronterizos y la eliminación de desechos peligrosos
		Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	0	No se menciona
12	Sitios contaminados	Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	5	El párrafo 3 a) del artículo 12 define que la conferencia de Partes aprobará orientaciones sobre la gestión de sitios contaminados en relación con la identificación y caracterización. Este proceso podría incluir una estimación del mercurio en sitio
		Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	5	El párrafo 3 d) del artículo 12 define que la conferencia de Partes aprobará orientaciones sobre la gestión de sitios contaminados en relación las opciones para gestionar los riesgos que plantean los sitios contaminados.
Calificación general			28,6%	

Cuadro A. 3. 3. Matriz de calificación de indicadores de economía circular de la categoría de materias primas secundarias.

N.º art	Título de artículo	Indicador de cumplimiento con criterios de economía circular	Calificación	Observaciones
3	Fuentes de suministro y comercio	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	0	No se menciona
		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	10	El párrafo 6 a) del artículo 3 explica que no se permite la exportación de mercurio salvo un consentimiento por escrito y que se utilice solamente para un uso permitido por el Convenio o para almacenamiento provisional
4	Productos con mercurio añadido	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	0	No se menciona
		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	5	El párrafo 1 del artículo 4 solamente menciona que se prohíbe la importación y exportación de los productos con mercurio añadido incluidos en la parte I del Anexo A. No proporciona un marco para los productos con mercurio añadido permitidos
5	Procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	0	No se menciona

		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	0	No se menciona
7	Extracción de oro artesanal y en pequeña escala	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	0	No se menciona
		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	0	No se menciona
8	Emisiones	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	0	No se menciona
		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	0	No se menciona
9	Liberaciones	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	0	No se menciona
		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	0	No se menciona

10	Almacenamiento provisional ambientalmente racional de mercurio, distinto del mercurio de desecho	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	0	No se menciona
		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	10	El párrafo 3 del artículo 10 establece que el movimiento transfronterizo se debe dar según los lineamientos del Convenio de Basilea
11	Desechos de mercurio	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	5	El párrafo 3 b) del artículo 11 estipula que cada Parte adoptará las medidas apropiadas para que los desechos de mercurio sean recuperados, reciclados, regenerados o reutilizados directamente
		Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	10	El párrafo 1 del artículo 11 establece que el movimiento transfronterizo se debe dar según los lineamientos del Convenio de Basilea
Calificación general			25,0%	

Cuadro A. 3. 4. Matriz de calificación de indicadores de economía circular de la categoría de competitividad e innovación.

N.º art	Título de artículo	Indicador de cumplimiento con criterios de economía circular	Calificación	Observaciones
		Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	5	No se menciona, pero se cubre en el artículo 13
12	Sitios Contaminados	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 4 del artículo 12 indica que se alienta a las Partes a cooperar en la formulación de estrategias en relación con los sitios contaminados
		Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	10	El párrafo 1 del artículo 13 establece que cada parte se compromete a facilitar recursos destinados a la aplicación del Convenio. Dentro de estos se encuentra financiamiento nacional, multilateral, bilateral y participación del sector privado
13	Recursos financieros y mecanismos financieros	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 3 del artículo 13 alienta a las fuentes multilaterales, regional y bilaterales de asistencia técnica y financiera a la creación de capacidad y transferencia de tecnología como apoyo a los países en desarrollo
14	Creación de capacidad asistencia técnica y	Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y	10	El párrafo 3 del artículo 14 articula que las Partes que son países desarrollados promoverán y facilitarán, con el apoyo del sector privado, la transferencia de tecnologías alternativas

	transferencia tecnológica	bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio		
		Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 1 del artículo 14 establece que las Partes cooperarán para la creación de capacidad y la prestación de asistencia técnica en beneficio de las Partes que son países en desarrollo
		Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	5	No se menciona, pero se cubre en el artículo 13
16	Aspectos relacionados con la salud	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 1 a) del artículo promueve la elaboración y ejecución de estrategias de base científica que permitan la protección de poblaciones en situación de riesgo con respecto a la exposición al mercurio. Además, el párrafo 2 b) promueve la cooperación y el intercambio de información con organizaciones intergubernamentales
17	Intercambio de información	Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	5	No se menciona, pero se cubre en el artículo 13

		Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 1 del artículo 17 establece que cada parte facilitará el intercambio de información científica, técnica, económica, jurídica, sobre reducción y eliminación y alternativas viables a productos con mercurio añadido, procesos de fabricación y actividades que emiten o liberan mercurio
		Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	5	No se menciona, pero se cubre en el artículo 13
18	Información, sensibilización y formación del público	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 2 del artículo 18 estipula que cada Parte utilizará los mecanismos como registros de liberaciones y transferencias de contaminante para la recopilación y difusión de la información
		Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	5	No se menciona, pero se cubre en el artículo 13
19	Investigación, desarrollo y vigilancia	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 1 del artículo 19 expone que las Partes se esforzarán por cooperar en el mejoramiento de inventarios de mercurio, modelos de vigilancia geográfica, evaluaciones de los efectos del mercurio, metodologías, información sobre el ciclo ambiental, entre otros

		Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	5	No se menciona, pero se cubre en el artículo 13
22	Evaluación de la eficacia	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	10	El párrafo 3 del artículo 22 afirma que la evaluación deberá fundamentarse en la información científica, ambiental, técnica, financiera y económica disponible
		Calificación general	81,3%	

Cuadro A. 3. 5. Matriz de calificación de indicadores de economía circular de la categoría de principios de economía circular.

N.º art	Título de artículo	Indicador de cumplimiento con criterios de economía circular	Calificación	Observaciones
2	Definiciones	Minimización de residuos de mercurio	0	No se menciona
		Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona
		Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	0	No se menciona
		Uso de energías renovables	0	No se menciona
		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
3	Fuentes de suministro y comercio	Minimización de residuos de mercurio	10	El párrafo 3 del artículo 3 expone que no se permitirá la extracción primaria de mercurio que no se estuviera realizando a la entrada en vigor del Convenio. Asimismo, se da un plazo de 15 años para eliminar la extracción primaria preexistente

	Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona
	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
	Uso de energías renovables	0	No se menciona
	Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
	Minimización de residuos de mercurio	10	El párrafo 1 del artículo 4 prohíbe la fabricación, importación y exportación de los productos incluidos en la parte I del anexo A. Además, el párrafo 2 b) alienta a la minimización de contenido de mercurio
4	Productos con mercurio añadido		
	Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona
	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
	Uso de energías renovables	0	No se menciona

		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
		Minimización de residuos de mercurio	10	El párrafo 3 del artículo 5 estipula que cada Parte adoptará medidas para restringir el uso de mercurio o compuestos de mercurio en los procesos de la parte II del Anexo B
		Diversificación de sustitutos para el mercurio	10	El párrafo 8 del artículo 5 alienta a las Partes a intercambiar información sobre nuevos avances tecnológicos y alternativas sin mercurio
5	Procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
		Uso de energías renovables	0	No se menciona
		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
		Minimización de residuos de mercurio	10	El párrafo 2 del artículo 7 especifica que cada Parte adoptará medidas para reducir y cuando sea viable eliminar el uso de mercurio
7	Extracción de oro artesanal y en pequeña escala	Diversificación de sustitutos para el mercurio	10	El párrafo 2 del artículo 7 especifica que cada Parte adoptará medidas para reducir y cuando sea viable eliminar el uso de mercurio. Conjuntamente el párrafo 4 c) incentiva la cooperación entre Partes para

la promoción de investigaciones sobre prácticas alternativas sostenibles
que no utilicen mercurio

	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
	Uso de energías renovables	0	No se menciona
	Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
	Minimización de residuos de mercurio	10	El párrafo 1 del artículo 8 trata del control y cuando sea viable la reducción de emisiones de mercurio y compuestos de mercurio
	Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona
8	Emisiones		
	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
	Uso de energías renovables	0	No se menciona

		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
		Minimización de residuos de mercurio	10	El párrafo 1 del artículo 9 trata del control y cuando sea viable la reducción de liberaciones de mercurio y compuestos de mercurio
		Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona
9	Liberaciones	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
		Uso de energías renovables	0	No se menciona
		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
10	Almacenamiento provisional ambientalmente racional de mercurio, distinto del mercurio de desecho	Minimización de residuos de mercurio	0	No se menciona
		Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona

		Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
		Uso de energías renovables	0	No se menciona
		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
		Minimización de residuos de mercurio	0	No se menciona
		Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona
11	Desechos de mercurio	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
		Uso de energías renovables	0	No se menciona
		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
16	Aspectos relacionados con la salud	Minimización de residuos de mercurio	10	El párrafo 1 a) del artículo 16 promueve el establecimiento de metas para la reducción de la exposición al mercurio

		Diversificación de sustitutos para el mercurio	0	No se menciona
		Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
		Uso de energías renovables	0	No se menciona
		Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
		Minimización de residuos de mercurio	0	No se menciona
18	Información, sensibilización y formación al público	Diversificación de sustitutos para el mercurio	10	El párrafo 1 a) estipula que se promoverá el acceso del público a información disponible sobre alternativas al mercurio
		Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	10	Apunta a una fase del ciclo de vida del mercurio
		Uso de energías renovables	0	No se menciona

Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	0	No se menciona
Calificación general	36,4%	

APÉNDICE 4: MATRÍZ DE PRIORIZACIÓN DE INDICADORES DE ECONOMÍA CIRCULAR

Cuadro A. 4. 1. Matriz de priorización de indicadores de economía circular en el Convenio de Minamata.

Categoría	Indicador	Calificación del indicador	Impacto en el Convenio de Minamata	Calificación
Materias primas secundarias	Existencia de un mercado de mercurio o materiales reciclados que contengan mercurio	5	4	4,6
Principios de economía circular	Jerarquización en la gestión integral de los residuos de mercurio	5	4	4,6
Producción y consumo	Autosuficiencia en el abastecimiento de mercurio como materia prima	5	3	4,2
Producción y consumo	Compras públicas de artículos libres de mercurio en apego a criterios de economía circular	5	3	4,2
Gestión de residuos	Reciclaje de mercurio y materiales que contengan mercurio	4	4	4,0
Principios de economía circular	Uso de energías renovables	5	2	3,8
Producción y consumo	Identificación de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	3	4	3,4
Principios de economía circular	Diversificación de sustitutos para el mercurio	4	2	3,2
Gestión de residuos	Cuantificación del flujo de residuos de mercurio o que contienen mercurio	3	3	3,0

Competitividad e innovación	Inversión privada en investigación, desarrollo, creación de empleos y bienes tangibles relacionados con la economía del mercurio	3	3	3,0
Gestión de residuos	Se cuenta con un registro de gestores autorizados para la gestión integral de los residuos de mercurio o que contienen mercurio	4	1	2,8
Principios de economía circular	Minimización de residuos de mercurio	2	4	2,8
Principios de economía circular	Perspectiva de ciclo de vida del mercurio	1	4	2,2
Materias primas secundarias	Existencia de un registro de intercambio de mercurio entre países	3	1	2,2
Producción y consumo	Inventario de residuos asociados con emisiones y liberaciones de mercurio	1	3	1,8
Competitividad e innovación	Registro de propiedad intelectual asociada con el conocimiento y nuevas tecnologías para el uso ambientalmente racional de mercurio y materiales que contengan mercurio	1	1	1,0

