

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



*Excelencia que trasciende*

**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

**Evaluación del contenido de mercurio total en atún enlatado que se comercializa en supermercados de la Ciudad de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por  
Ester Alejandra Bermúdez Cortez  
Para optar al grado académico de Licenciada en Química Farmacéutica

Guatemala, 2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades



*Excelencia que trasciende*

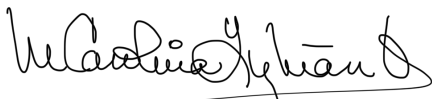
**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

**Evaluación del contenido de mercurio total en atún enlatado que se comercializa en supermercados de la Ciudad de Guatemala**


Trabajo de graduación presentado por  
Ester Alejandra Bermúdez Cortez  
Para optar al grado académico de Licenciada en Química Farmacéutica

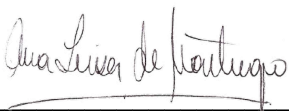
Guatemala, 2025


Vo. Bo. :

(f)   
MSc. Miriam Carolina Guzmán Quilo  
Asesora

Tribunal Examinador:

(f)   
MSc. Miriam Carolina Guzmán Quilo  
Asesora

(f)   
MSc Ana Luisa Mendizábal Solé

(f)   
Dr. Élfego Rolando López García  
Director  
Departamento de Química Farmacéutica

Fecha de aprobación: Guatemala, 03 de diciembre de 2025

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios por haberme otorgado la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida. Sin Su guía y bendición, no habría sido posible llegar hasta aquí.

A mis padres, por ser mi mayor ejemplo y mi apoyo incondicional. Gracias por escucharme, animarme y acompañarme en cada paso del camino. Cada consejo y cada palabra de aliento han sido una guía constante para alcanzar las metas que me he propuesto. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, porque siempre creyeron en mí y me brindaron su amor, comprensión y apoyo en todo momento.

A mis hermanos y a toda mi familia, gracias por estar presentes en cada etapa de mi vida. Agradezco cada enseñanza, cada palabra y todo el cariño que me han brindado. Sin duda, nada de esto habría sido posible sin el apoyo de cada uno de ustedes.

A esa persona especial que me acompañó a lo largo de este proceso, gracias por estar presente en cada etapa, por celebrar conmigo los pequeños logros, por brindarme ánimo en los momentos difíciles y por ser un apoyo constante durante toda la carrera y la elaboración de este trabajo. Tu compañía ha significado más de lo que las palabras pueden expresar.

A mi asesora, M.Sc. Carolina Guzmán, y a mi revisora, M.Sc. Ana Luisa Mendizábal, por su guía, paciencia y dedicación en cada etapa de este proyecto. Gracias por compartir su conocimiento, por su disposición y por orientarme con sabiduría para alcanzar los objetivos planteados. Asimismo, expreso mi agradecimiento al Dr. Élfego López, por su constante apoyo, orientación y acompañamiento a lo largo de los cinco años de carrera.

A la Universidad del Valle de Guatemala, por haber sido el espacio donde crecí académica y personalmente durante estos cinco años de formación. Gracias por brindarme las herramientas, los conocimientos y las experiencias que me permitieron desarrollarme como

profesional y como persona. Agradezco también a cada uno de los catedráticos que, con su vocación, dedicación y compromiso, compartieron su saber y fomentaron en mí el espíritu crítico, la curiosidad científica y el amor por el aprendizaje continuo. Cada clase, proyecto y reto superado fue parte fundamental de este recorrido.

De manera muy especial, extiendo mi agradecimiento al Centro de Información y Asesoría Toxicológica (CIAT) por haberme abierto las puertas de sus instalaciones y facilitarme los recursos necesarios para llevar a cabo la fase experimental de este trabajo. Su apoyo fue esencial para el desarrollo de esta investigación. A todo el personal técnico y profesional que colaboró durante el proceso, mi más sincero agradecimiento por su tiempo, su disposición y su valiosa ayuda

# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE CUADROS .....	x
RESUMEN .....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO CONCEPTUAL .....	3
A. Antecedentes del problema.....	3
B. Justificación .....	7
C. Planteamiento del problema .....	9
D. Alcance .....	9
E. Limitaciones .....	9
III. MARCO TEÓRICO .....	11
A. Atún .....	11
1. Importancia nutricional del atún en la dieta humana.....	13
2. Atún enlatado.....	16
B. Mercurio como contaminante ambiental .....	17
1. Formas químicas del mercurio .....	17
2. Ciclo del mercurio en el ambiente .....	20
3. Bioacumulación y biomagnificación en la cadena alimentaria .....	22
C. Efectos del mercurio en la salud humana .....	23
1. Toxicocinética y toxicodinámica del mercurio y metilmercurio.....	23
2. Signos clínicos y físicos .....	25
3. Tratamiento de intoxicación por mercurio .....	27
D. Bioseguridad en el manejo de mercurio en el laboratorio .....	29
1. Equipos de protección personal (EPP) .....	30
2. Condiciones del laboratorio.....	31
3. Procedimientos seguros de manipulación .....	31
4. Actuación en caso de accidentes o derrame .....	33

E.	Regulación de metales pesados en alimentos .....	33
1.	Límites máximos permisibles de mercurio en atún .....	34
2.	Convenio de Minamata.....	35
F.	Espectroscopía de absorción atómica .....	39
1.	Espectroscopía de absorción atómica con vapor frío .....	41
2.	Digestión asistida por microondas.....	43
IV.	MARCO METODOLÓGICO .....	44
A.	Objetivos.....	44
1.	Objetivo general .....	44
2.	Objetivos específicos .....	44
B.	Hipótesis .....	44
C.	Variables.....	45
D.	Población .....	46
E.	Muestra .....	46
F.	Procedimiento.....	46
1.	Revisión bibliográfica y elaboración del programa.....	46
2.	Registro de las muestras .....	47
3.	Preparación de la muestra.....	47
4.	Preparación del blanco.....	48
5.	Elaboración de la curva de calibración.....	48
6.	Determinación de mercurio mediante absorción atómica de vapor frío (CVAAS) con accesorio VGA.....	49
7.	Manejo y disposición de desechos con mercurio .....	49
G.	Diseño de la investigación.....	51
H.	Análisis estadístico .....	51
V.	MARCO OPERATIVO.....	53
A.	Recolección y tratamiento de datos .....	53
B.	Recursos .....	53
1.	Recursos humanos .....	53
2.	Recursos materiales .....	53
3.	Recursos institucionales .....	54

C. Aspecto económico.....	54
VI. RESULTADOS .....	55
VII. DISCUSIÓN .....	58
VIII. CONCLUSIONES .....	64
IX. RECOMENDACIONES .....	65
X. REFERENCIAS .....	67
XI. ANEXOS.....	82

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Thunnus thymus</i> (NOAA, 2004) .....	11
<b>Figura 2.</b> Área de distribución de <i>Thunnus thymus</i> (Azul: área de distribución de los adultos; verde: zonas de desove) .....	13
<b>Figura 3.</b> Olla Alimenticia de Guatemala (MSPAS, 2012).....	15
<b>Figura 4.</b> Proceso de elaboración de atún en agua (Elaboración propia con base en Chedraui, 2001) .....	16
<b>Figura 5.</b> Ciclo del mercurio (Traducido al español de Yuan-Seng et al., 2024).....	22
<b>Figura 6.</b> Proceso de absorción y emisión de energía de un átomo.....	40
<b>Figura 7.</b> Diagrama de bloque espectrómetro de absorción atómica de un solo haz.....	41
<b>Figura 8.</b> Espectrómetro de Absorción Atómica con Vapor Frío (CV-AAS).....	42
<b>Figura 9.</b> Comparación de la concentración de mercurio en peso húmedo entre muestras de atún enlatado.....	57
<b>Figura 10.</b> Curva de calibración utilizada para lotes 1 - 3 de todas las marcas analizadas (A – E) .....	87
<b>Figura 11.</b> Curva de calibración utilizada para lotes 4 – 5 de todas las marcas analizadas (A – E) .....	87

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Variables de estudio .....	45
<b>Cuadro 2.</b> Digestión de la muestra asistida por microondas .....	48
<b>Cuadro 3.</b> Preparación de soluciones para elaboración de la curva de calibración.....	49
<b>Cuadro 4.</b> Aspectos económicos de la investigación .....	54
<b>Cuadro 5.</b> Concentración de mercurio en atún enlatado en agua .....	55
<b>Cuadro 6.</b> Estadística descriptiva para la concentración de mercurio en atún enlatado en agua (peso húmedo).....	55
<b>Cuadro 7.</b> Estadística descriptiva para la concentración de mercurio en atún enlatado en agua (peso seco).....	55
<b>Cuadro 8.</b> Resultados estadísticos obtenidos de la Prueba de Wilcoxon para una muestra	56
<b>Cuadro 9.</b> Resultados estadísticos obtenidos de la Prueba de Kruskal Wallis.....	56
<b>Cuadro 10.</b> Resultados estadísticos obtenidos de la Prueba de Dunn .....	56
<b>Cuadro 11.</b> Absorbancias obtenidas para la curva de calibración.....	88

## RESUMEN

El mercurio (Hg) es un metal pesado de alta toxicidad que puede bioacumularse y biomagnificarse en la cadena trófica marina, representando un riesgo potencial para la salud humana a través del consumo de pescado contaminado. El presente estudio tuvo como objetivo cuantificar la concentración de mercurio total en muestras de atún enlatado en agua comercializadas en supermercados del municipio de Guatemala, con el fin de evaluar su cumplimiento con el límite máximo de 1 mg/kg establecido por el Reglamento (UE) 2023/915 y el Codex Alimentarius. Se analizaron cinco marcas distintas de atún, empleando digestión ácida asistida por microondas y determinación instrumental mediante espectroscopía de absorción atómica con vapor frío (CVAAS) en un equipo Perkin Elmer PinAAcle 900T con accesorio VGA.

Los resultados mostraron concentraciones medias de mercurio entre  $0.0137 \pm 0.0104$  mg/kg y  $0.1902 \pm 0.0129$  mg/kg en peso húmedo, valores muy por debajo del límite regulatorio. La prueba de Wilcoxon confirmó que todas las muestras presentan concentraciones significativamente menores a 1 mg/kg ( $W = 0$ ,  $p < 0.05$ ). Sin embargo, el análisis de Kruskal–Wallis ( $H = 21.12$ ,  $p = 0.0003$ ) evidenció diferencias significativas entre marcas, corroboradas mediante la prueba de Dunn, lo que sugiere variabilidad atribuible a la especie, origen geográfico y procesamiento del producto.

En conclusión, las cinco marcas evaluadas cumplen con la normativa internacional vigente, indicando que los productos disponibles en el mercado guatemalteco no representan un riesgo inmediato para la salud por su contenido de mercurio. No obstante, la exposición acumulativa derivada del consumo frecuente podría constituir un factor de riesgo en poblaciones vulnerables, por lo que se recomienda mantener una ingesta dentro de los límites establecidos por organismos internacionales como la AESAN, EFSA y EPA.

Aunque el método empleado demostró buena sensibilidad y precisión analítica, es importante reconocer posibles fuentes de error inherentes al proceso experimental. Entre ellas se incluyen el número limitado de muestras, la heterogeneidad entre lotes y la posible

variabilidad en el contenido de las latas. También pueden considerarse como fuentes de incertidumbre la toma y homogeneización de muestras y pérdidas potenciales de analito durante la digestión ácida. Para minimizar estos efectos, se recomienda aumentar el número de réplicas y lotes por marca, realizar controles de recuperación y blancos de método, y ampliar el análisis a otras presentaciones y metales pesados como plomo, cadmio y arsénico. Asimismo, se sugiere fortalecer la regulación nacional sobre contaminantes metálicos mediante la adopción de estándares internacionales y la ratificación del Convenio de Minamata.

# I. INTRODUCCIÓN

El consumo de pescado y productos derivados del mar, como el atún, representa una fuente significativa de proteínas, ácidos grasos esenciales y micronutrientes beneficiosos para la salud humana, por lo que, forman parte fundamental de la dieta de muchas poblaciones alrededor del mundo, no solo por su valor nutricional sino también por su accesibilidad y versatilidad (Ariño et al., 2013). El atún, en particular, es uno de los productos marinos más populares y ampliamente comercializados, ya que representa una fuente importante de proteínas, ácidos grasos, vitaminas y minerales (Allara et al., 2001; Rodríguez et al., 2024). Sin embargo, diversos estudios han evidenciado que los organismos marinos, especialmente aquellos que ocupan niveles altos en la cadena trófica, pueden acumular contaminantes ambientales, entre los que destaca el mercurio (Neff, 2002). Este elemento tóxico, puede ingresar al organismo a través de la dieta y, en concentraciones elevadas puede afectar el sistema nervioso, renal e inmunológico, siendo especialmente riesgoso para grupos vulnerables como niños, mujeres embarazadas y personas con enfermedades crónicas (OMS, 2024).

El mercurio es liberado al ambiente principalmente por diversas actividades humanas, como la producción industrial, la minería y la quema de combustibles fósiles; sin embargo, aunque en menor medida, también se libera al ambiente de manera natural a través de actividad volcánica y erosión de rocas (EPA, 2025). En ambientes acuáticos, puede transformarse en metilmercurio, una forma altamente tóxica que se incorpora fácilmente a la cadena alimentaria marina. Los peces de gran tamaño y larga vida, como el atún, tienden a acumular mayores concentraciones de este elemento debido a su posición en la cadena trófica, lo que los convierte en una fuente potencial de exposición humana al mercurio (Pérez y Pouilly, 2008; Jin et al., 2022). Entre los alimentos, el pescado es considerado una de las principales fuentes de ingesta de mercurio. Por esta razón, en organizaciones como la Food and Drug Administration (FDA) y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) se han establecido límites máximo-permisibles para la concentración de mercurio en productos pesqueros, con el fin de proteger la salud pública (FDA, 2012; EFSA, 2023).

Ante esta preocupación global, en 2013 se adoptó el Convenio de Minamata respecto al mercurio, un tratado internacional jurídicamente vinculante que tiene como finalidad proteger la salud humana y el medio ambiente frente a las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y sus compuestos. En este acuerdo se establecen medidas concretas para el control y monitoreo de fuentes de exposición, incluyendo su uso en productos y procesos industriales, así como su presencia en alimentos. Sin embargo, en Guatemala este convenio aún no ha sido ratificado, lo que refleja un vacío en cuanto al compromiso formal del país para la vigilancia y reducción del riesgo asociado a este metal pesado (Rouanet, 2007; Congreso de la República, 2022).

En muchos países se han elaborado estudios para monitorear los niveles de mercurio en pescados y mariscos, incluyendo atún enlatado, lo cual ha permitido establecer políticas de control y vigilancia sanitaria más efectivas. Sin embargo, en Guatemala, el control respecto a contaminantes en productos procesados de origen marino, como el atún enlatado, aún es limitado y poco documentado. La exposición a mercurio se presenta por el consumo de diversas especies marinas, y aunque algunos estudios han analizado peces locales, no se cuenta con investigaciones publicadas que evalúen específicamente el contenido de mercurio en atunes enlatados comercializados en el país.

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito evaluar el contenido de mercurio total en muestras de atún enlatado disponibles en supermercados de Guatemala. Mediante este estudio se pretende generar información científica que contribuya al monitoreo continuo de componentes tóxicos en los alimentos y de esta manera contribuir a la protección del consumidor. Asimismo, pretende visibilizar la importancia de monitorear contaminantes en alimentos de alto consumo y abrir la puerta a futuras investigaciones enfocadas en la calidad y seguridad de los productos alimenticios comercializados en el país.

## II. MARCO CONCEPTUAL

### A. Antecedentes del problema

El consumo de pescado representa una fuente importante de nutrientes para la población, especialmente por su alto contenido de proteínas, ácidos grasos como el omega - 3 y minerales esenciales (Rodríguez et al., 2024). Sin embargo, también puede ser una vía de exposición a contaminantes ambientales como por ejemplo los metales pesados, destacando entre ellos el mercurio. Este es un metal que puede acumularse en los organismos marinos y representar un riesgo para la salud humana (Panduro et al., 2020). El atún, por su posición en la cadena alimentaria y su popularidad como alimento enlatado, ha sido objeto de diferentes estudios alrededor del mundo que han demostrado la posibilidad de acumulación significativa de mercurio en su tejido (Pérez y Pouilly, 2008; Jin et al., 2022). La exposición a mercurio puede ocurrir a través del consumo de diferentes especies marinas, motivo por el cual varios estudios se han enfocado en analizar peces capturados en cuerpos de agua dentro del territorio guatemalteco. De acuerdo con la revisión bibliográfica efectuada, no se han encontrado investigaciones que evalúen específicamente el contenido de mercurio en latas de atún comercializadas en Guatemala, a pesar de ser un producto consumido por la población.

Una investigación conjunta de las ONG *Bloom* (Francia) y *Foodwatch* (Alemania) efectuada en el 2023, reveló que el 10% de las latas de atún analizadas en cinco países europeos (España, Francia, Italia, Reino Unido y Alemania) superan el límite legal de mercurio establecido por la Unión Europea, que es de 1mg/kg. El estudio llevado a cabo con 148 latas encontró que si se aplicara un umbral más estricto de 0.3mg/kg como el que rige a pescados pequeños, casi el 60% de las muestras excederían este límite. El informe de la ONG destaca la necesidad de reevaluar los límites de mercurio permitidos para proteger mejor la salud pública, especialmente la de mujeres embarazadas o niños en desarrollo, que son más vulnerables a este contaminante. Actualmente, en la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) se recomienda que las embarazadas y los niños menores

de 10 años eviten consumir atún rojo, debido a su mayor contenido de mercurio (*Bloom*, 2023).

Por otro lado, en el año 2019, se desarrolló un estudio que determinó el riesgo que representaba para la salud el contenido de mercurio total en atún enlatado, y las especies de atún *Tunna albacores* y *Auxis thazard* capturados en el golfo de Leyte y el mar de Filipinas. La determinación se efectuó mediante espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente, obteniendo concentraciones medias de mercurio total de 0.024µg/g, 0.002µg/g y 0.07µg/g para *Auxis thazard*, *Tunna albacores* y atún enlatado respectivamente. Además, se calculó la ingesta diaria estimada para distintos grupos etarios y sexos, con el fin de evaluar el riesgo para la salud, se concluyó que los atunes capturados localmente no representaban un riesgo, debido a que las dosis estimadas de mercurio estuvieron por debajo del valor de referencia de 0.1µg/kg de peso corporal/día establecido por la EPA. El consumo de atún enlatado puede superar el límite de exposición segura para mujeres adultas y niños, especialmente si se consume regularmente, lo que podría presentar un riesgo neurológico y sistémico, en especial para poblaciones vulnerables como mujeres embarazadas y niños. Por lo que, en el estudio se recomienda limitar el consumo de atún enlatado y llevar a cabo investigaciones adicionales para evaluar las concentraciones específicas de metilmercurio, que es la forma más tóxica y biodisponible del mercurio (Pacoma y Yap-Dejeto, 2019).

En 2018, Badilla Núñez y Campos Mena desarrollaron una investigación en la Universidad Técnica Nacional de Costa Rica con el objetivo de validar una metodología para la determinación de mercurio en atún en conserva. La técnica seleccionada fue la espectrometría de absorción atómica por generación de hidruros volátiles, siguiendo los lineamientos del método AOAC 971.21 y el procedimiento interno PG14 del INCIENSA. Mediante este estudio se evaluaron parámetros clave como linealidad, límites de detección y cuantificación, repetibilidad, reproducibilidad, incertidumbre, selectividad, robustez y veracidad. Los resultados obtenidos cumplieron con todos los criterios establecidos, respaldando la confiabilidad del método. Se utilizó material de referencia certificado y se participó en una ronda interlaboratorio internacional FAPAS (Food Analysis Performance Assessment Scheme), lo que fortaleció la validez del análisis. Posteriormente, se aplicó la metodología en muestras comerciales de atún, todas dentro del límite permitido de mercurio

(1 mg/kg) en Costa Rica. Este trabajo aportó una herramienta analítica validada para la vigilancia sanitaria de alimentos de consumo masivo. Además, demostró la importancia de contar con métodos estandarizados para proteger la salud pública y garantizar la inocuidad alimentaria (Badilla & Campos, 2018).

En 2011, se efectuó un estudio que buscaba determinar los contenidos de mercurio y arsénico en muestras de atún y sardinas enlatados de seis marcas comerciales producidas en México. El contenido mínimo y máximo de mercurio que se encontraron en el atún enlatado fueron de 0.14 a 4.52 mg/kg con un valor promedio de 1.23 mg/kg. Teniendo como resultado que el 36% de las muestras de atún analizadas sobrepasaron la concentración máxima de 1 mg/kg establecido por la FDA de los Estados Unidos de América. Estos hallazgos evidencian la posible presencia de concentraciones preocupantes de metales pesados en productos de consumo habitual, lo que pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo evaluaciones periódicas en diferentes regiones para garantizar la inocuidad alimentaria (Velasco et al., 2011).

Asimismo, en el año 2011, Sánchez en Colombia, efectuó un estudio en el cual se evaluaron 41 muestras pertenecientes a cinco marcas comerciales de atún enlatado que se comercializaban en la ciudad de Cartagena de Indias, con el fin de evaluar la concentración de mercurio total de cada una de las muestras. En este estudio se encontró que las concentraciones variaron de 0.09ppm a 2.59ppm, siendo la marca D, la que presentó el promedio más alto de 1.35ppm, seguida de la marca A, con 1.14ppm, marca B 0.57ppm y C 0.31ppm. Con estos resultados se determinó que aproximadamente el 34% de las muestras analizadas excedían el límite permitido de mercurio establecido por la legislación colombiana de 1ppm. Por lo, que se concluyó que el consumo de atún enlatado representa un riesgo moderado para la población en general. Las poblaciones vulnerables como niños, mujeres embarazadas y personas con enfermedades preexistentes presentan un mayor riesgo. Por ello, el estudio recomienda que estas personas limiten el consumo de este producto y subraya la importancia de mantener un monitoreo continuo de los niveles de mercurio en estos alimentos, con el fin de proteger la salud de la población. (Sánchez, 2011).

Adicionalmente, en el año 2010, en la ciudad de Santa Ana, El Salvador, se efectuó un estudio analítico cuantitativo para determinar el contenido de mercurio en atún enlatado

comercializado localmente. Esta investigación fue llevada a cabo en la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, empleando espectrofotometría de absorción atómica con vapor frío como técnica analítica. Se analizaron cinco marcas distintas de atún en agua, con un total de quince latas, seleccionadas por su alta demanda entre los consumidores. Los resultados revelaron que todas las muestras estaban muy por debajo del límite máximo permitido de 1.0 ppm, según la normativa salvadoreña NSO 67.32.01:08. El análisis estadístico mediante ANOVA unifactorial confirmó que no existían diferencias significativas en los niveles de mercurio entre marcas, lo que sugiere una homogeneidad en cuanto a la seguridad del producto. A pesar de algunas pérdidas de muestra durante el análisis, el estudio demostró que el atún enlatado evaluado no representa un riesgo para la salud pública en relación con el mercurio. Se recomendó ampliar la investigación a otras presentaciones de atún y a otros metales pesados, para fortalecer la vigilancia sanitaria. Este antecedente es clave para comprender la importancia del control de metales pesados en productos de consumo masivo y la aplicación de normativas técnicas locales en la seguridad alimentaria (Cuellar & Mena, 2010).

#### 1. Estudios en Guatemala

En el año 2023, Gaitán, A llevó a cabo un estudio en el Lago de Amatitlán, Guatemala, con el objetivo de evaluar los niveles de mercurio total en peces de consumo humano, específicamente *Parachromis managuensis* y *Oreochromis niloticus*. La investigación fue desarrollada como respuesta a la preocupación creciente por la contaminación del lago por metales pesados, especialmente mercurio. Se emplearon técnicas de espectroscopía de absorción atómica con vapor frío para analizar el tejido muscular de 15 ejemplares recolectados en cuatro puntos estratégicos del lago. Los resultados evidencian que, aunque las concentraciones de mercurio estuvieron por debajo de los límites legales internacionales, algunas muestras se acercaron peligrosamente a dichos umbrales. Además, el análisis de salud de los peces reveló un estado fisiológico deteriorado, lo que sugiere una contaminación progresiva del ecosistema. Estos hallazgos plantean riesgos para la salud humana por exposición crónica al mercurio a través del consumo de pescado. El estudio concluyó con recomendaciones urgentes de monitoreo continuo y la ratificación del Convenio de Minamata como parte de una estrategia nacional para mitigar la contaminación (Gaitán, 2023).

En 2007, Escribá, C elaboró un estudio para cuantificar el mercurio total en carne de tiburón procedente de las costas del Atlántico y Pacífico de Guatemala. La investigación utilizó la técnica sensible y precisa de espectrometría de absorción atómica con celda de vapor frío (FIAS), incluyendo un riguroso control de calidad con muestras internacionales de referencia. Las muestras fueron seleccionadas en varios puntos representativos de ambos litorales, permitiendo una comparación regional del contenido de mercurio. Los resultados evidenciaron que las concentraciones de mercurio estaban por debajo del límite máximo permitido de 0.5 mg/kg, establecido en organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés). Además, se evidenció que la costa del Pacífico presentaba aproximadamente el doble de mercurio que la costa del Atlántico. Al comparar con un estudio previo de 1979, se observó una reducción general en los niveles de mercurio, reforzando la validez del monitoreo continuo. El estudio concluyó que la carne de tiburón en Guatemala no representa un riesgo toxicológico para los consumidores bajo los estándares internacionales vigentes. Este antecedente es fundamental para respaldar políticas de vigilancia alimentaria y manejo sostenible de recursos marinos en la región (Escribá, 2007).

## **B. Justificación**

El atún enlatado representa una fuente importante de proteína animal en la dieta de muchas personas, principalmente por su valor nutricional considerando que es un alimento rico en proteínas y ácidos grasos como el Omega-3 (Rodríguez et al., 2024). A este producto también le aporta gran valor su amplia disponibilidad en supermercados, su facilidad de conservación y versatilidad de preparación. Por esta razón, suele consumirse de manera habitual en muchos hogares, ya que, representa una alternativa accesible para el consumo de pescado (CONAPESCA, 2016; USDA, 2020).

El atún es considerado un pez grande, cuyas longitudes oscilan entre 1 a 3 metros, dependiendo de la especie (Aguilar et al., 2012). Este se caracteriza por ocupar un nivel trófico alto como depredador, debido a que se alimenta de una variedad de peces y otros organismos, lo que lo convierte en un bioacumulador natural de contaminantes ambientales, que se ve mayormente afectado por los procesos de biomagnificación (NOAA, 2025; Pérez

y Pouilly, 2008; Jin et al., 2022). Es decir, que el atún tiene una mayor probabilidad de acumular mercurio y otros contaminantes ambientales (Pérez y Pouilly, 2008).

El mercurio es un metal pesado que, al ingresar al medio acuático puede transformarse en metilmercurio, su forma orgánica tóxica. Este compuesto tiene una alta afinidad por los tejidos biológicos y se bioacumula fácilmente en los peces (Panduro et al., 2020). Esto es de gran importancia, debido a que el metilmercurio representa un riesgo significativo para la salud humana, ya que, puede atravesar la barrera hematoencefálica y placentaria. Afectando el sistema nervioso central especialmente durante el desarrollo fetal y la infancia. La exposición prolongada a este contaminante se ha asociado a efectos neurológicos, teratogénicos, siendo particularmente preocupante en poblaciones vulnerables como mujeres embarazadas, niños y personas con condiciones de salud preexistentes (OMS, 2024; EPA, 2024). Cabe mencionar que, según la OMS, el mercurio se encuentra entre una de las diez sustancias más preocupantes para la salud pública (OMS, 2024).

Ante esta preocupación, diversos organismos internacionales, como la Unión Europea a través del Reglamento (UE) 2023/915, han establecido límites permitidos de mercurio en alimentos, incluidos los derivados de la pesca, con el objetivo de proteger a la población de una exposición crónica a este contaminante (EFSA, 2023). El Convenio de Minamata que es un tratado global que tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio, sus emisiones y liberaciones. A pesar de que dicho convenio entró en vigor en 2017, en Guatemala aún no ha sido ratificada, lo que limita la adopción de compromisos formales para un mayor control de las exposiciones y la protección de la población. Por ello, resulta fundamental reforzar las medidas de control y vigilancia desde la perspectiva de la salud (Congreso de la República de Guatemala, 2022).

Un estudio en Colombia evaluó 40 muestras pertenecientes a cuatro marcas comerciales diferentes evidenció que el 34% de las muestras excedieron el límite máximo de mercurio establecido por la legislación colombiana (1mg/kg) (Sánchez, 2011). En Guatemala no se cuenta con estudios que analicen el contenido de mercurio en atún enlatado que se comercializa localmente. Esto dificulta la evaluación del cumplimiento de estos límites, los riesgos toxicológicos, y limita el desarrollo de estrategias regulatorias adecuadas (Gaitán, 2023; Rouanet, 2007; Congreso de la República, 2022).

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito cuantificar los niveles de mercurio presentes en atún enlatado en agua de diferentes marcas, disponibles en los supermercados de Guatemala. A través de este análisis, se podrá determinar si las concentraciones encontradas cumplen con los límites establecidos, y da lugar a un monitoreo de metales pesados en alimentos de alto consumo, como lo es el atún. Lo anterior resulta especialmente relevante si se considera que, en distintos contextos, dichos límites no siempre se cumplen de manera adecuada, lo que incrementa la importancia de evaluar si su incumplimiento pudiera representar un riesgo para la salud de la población.

### **C. Planteamiento del problema**

¿Cómo varía la concentración de mercurio en el atún enlatado en agua de distintas marcas comercializadas en supermercados de la ciudad de Guatemala, en relación con los límites establecidos por el Reglamento (UE) 2023/915 de la Unión Europea y el Codex Alimentarius?

### **D. Alcance**

Mediante este estudio, se evaluó el contenido de mercurio presente en cinco diferentes marcas de atún enlatado en agua que se comercializan en supermercados del municipio de Guatemala. Asimismo, se determinó si se cumple con los límites aceptados por la Unión Europea y el Codex Alimentarius, y se analizó si existe diferencia significativa en cuanto a la concentración de mercurio respecto a la marca comercial. De esta manera se obtuvieron datos confiables que permitieron determinar si la variable marca y lugar de origen son factores que deben considerarse para prevenir la exposición a metales pesados, como lo es el mercurio.

### **E. Limitaciones**

Los resultados obtenidos son aplicables únicamente para presentaciones de atún enlatado en agua con ingredientes exclusivamente atún, agua y sal, que se comercializan a través de supermercados ubicados en el municipio de Guatemala, por lo que no incluyen otras presentaciones disponibles en el mercado nacional, como atún en aceite, con vegetales, en sabores diversos; lo que reduce la posibilidad de generalizar los hallazgos a todo el consumo de atún enlatado en el país. Cabe señalar que factores financieros condicionan el diseño

metodológico, particularmente en lo referente al muestreo probabilístico y al tamaño de la muestra. En este sentido, el estudio se centra en el análisis de 5 marcas de atún enlatado en agua, de un total aproximado de 15 disponibles en el mercado local. Si bien esta circunstancia restringe la representatividad del análisis a nivel nacional, los resultados obtenidos proporcionan una base valiosa para la identificación preliminar de tendencias en la concentración de mercurio y constituyen un punto de partida para futuras investigaciones con un alcance más amplio. Finalmente, se identificó que algunas marcas comercializadas como atún en agua incluyen en su lista de ingredientes un caldo vegetal, estas no serán tomadas en cuenta.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Atún

El género *Thannus* pertenece a la familia *Scombridae*, del orden *Perciformes*. Este género agrupa a los atunes verdaderos, que se dividen principalmente en ocho especies, entre las que se puede mencionar *T. alalunga* (albacora o atún blanco), *T. albacares* (atún de aleta amarilla), *T. atlanticus* (atún negro), *T. maccoyii* (atún de aleta azul del sur), *T. obesus* (patudo o bigeye tuna), *T. orientalis* (atún de aleta azul del pacífico), *T. thynnus* (atún rojo del Atlántico) y *T. tonggol* (atún de cola larga) (Ueda, 2018).

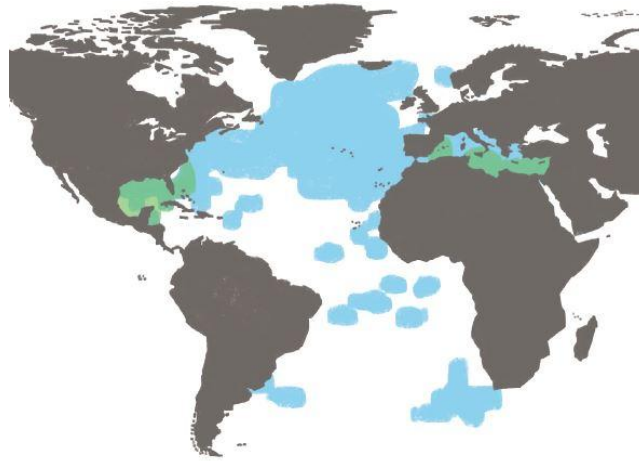
El género *Thannus*, se caracteriza por presentar un cuerpo hemodinámico cubierto de escamas, dos aletas dorsales bien separadas y un sistema muscular altamente desarrollado. Su cuerpo posee dos colores: dorso azul y vientre plateado. Esta coloración, les permite camuflarse para evitar ser detectados. Su parte superior oscura y su parte inferior clara, le permiten mezclarse tanto en las profundidades oscuras del mar como en la superficie brillante, lo que dificulta que los depredadores lo vean desde arriba o desde abajo (FAO, 2020). Asimismo, estos se caracterizan por poseer un cuerpo fusiforme, que se encuentra adaptado para natación a alta velocidad; pueden alcanzar los 70km/h e incluso son capaces de nadar a más de 110km/h en recorridos cortos (NOAA, 2023).



**Figura 1.** *Thunnus thynnus* (NOAA, 2004)

El tamaño del atún varía según la especie, siendo *T. albacares* la especie más pequeña llegando a medir entre 1.5 – 2.4 metros de longitud, hasta *T. thynnus*, la especie más grande que llega a medir hasta 4.6m de longitud (MAPA, 2019; Pickerell, 2024). Por otro lado, el atún tiene una sangre parcialmente endotérmica, lo que les permite mantener temperaturas corporales más elevadas que la del agua que los rodea, favoreciendo la eficiencia muscular en aguas frías; esto se debe a la *rete mirabile*, una red vascular compleja que retiene calor metabólico. Esto es de gran importancia en peces como el atún, ya que, ayuda a depredadores, como este, a capturar presas y evita que sean capturados (Carey y Gibson, 1983; UHM, 2019). Además, esta adaptación les permite no solo habitar aguas frías de hasta 10 °C, sino también efectuar migraciones transoceánicas. Se puede mencionar que los atunes cuentan con un sistema circulatorio especializado para una alta oxigenación y resistencia al esfuerzo (Pickrell, 2024).

Suelen estar presentes en océanos templados, tropicales y subtropicales de todo el mundo (Figura 2). Ocupan zonas del agua intermedia, aunque algunas especies como el *T. albacares* pueden habitar incluso profundidades de hasta 500 metros. Al ser animales oceánicos pelágicos, son peces migratorios con desplazamientos diarios de 14 – 50 km, con ciclos migratorios de hasta 60 días (ETN, 2020; Pacheco, 2013). El atún suele migrar a lo largo de miles de kilómetros para reproducción y alimentación, su migración se ve principalmente influenciada por las corrientes oceánicas, temperatura y biodisponibilidad de presas. Se clasifican como depredadores oportunistas que se alimentan de peces pequeños, cefalópodos y crustáceos. Y su rol en la cadena trófica los coloca como depredadores de nivel medio – alto en ambientes pelágicos, influyendo en el equilibrio ecológico marino (Allain, 2005).



**Figura 2.** Área de distribución de *Thunnus thynnus* (azul: área de distribución de los adultos; verde: zonas de desove)  
(ETN, 2020)

Estos peces son de gran importancia ecológica, debido a que son indicadores del ecosistema marino, ya que su abundancia y condición corporal refleja la disponibilidad de presas y la calidad ambiental (FAO, 2020).

### **1. Importancia nutricional del atún en la dieta humana**

El atún ocupa un lugar importante en la dieta humana por su excepcional valor nutricional, su versatilidad culinaria y sus beneficios para la salud. El atún es una fuente excelente de proteínas completas, ya que, se caracteriza por contener todos los aminoácidos esenciales, que son de alto valor para el crecimiento, la reparación muscular y el mantenimiento del sistema inmunológico (Ariño et al., 2013; Allara et al., 2001; Aguilera et al., 2021). Cada 100g de atún fresco contienen aproximadamente de 23 a 25 gramos de proteínas, lo que contribuye significativamente a las necesidades diarias de este macronutriente, incluso llega a superar el aporte de muchos tipos de carne y lácteos (Karunarathna y Attygalle, 2010).

Este se considera un alimento rico en ácidos grasos omega – 3, especialmente las especies como el *T. alalunga* y el *T. albacares*, que contienen cantidades significativas de EPA (ácido eicosapentaenoico) y DHA (ácido docosahexaenoico). Estos ácidos son de suma importancia, debido a que ayudan a reducir el colesterol y los triglicéridos, protegen la salud cardiovascular, y, además, favorecen el desarrollo y función tanto cerebral como visual. Debido a la presencia de estos ácidos grasos, el consumo regular de atún se ha asociado a

una menor incidencia de eventos coronarios, incluyendo infarto de miocardio, accidente cerebrovascular y muerte cardíaca súbita (Cifuentes y Rincón, 2022; FEC, 2020).

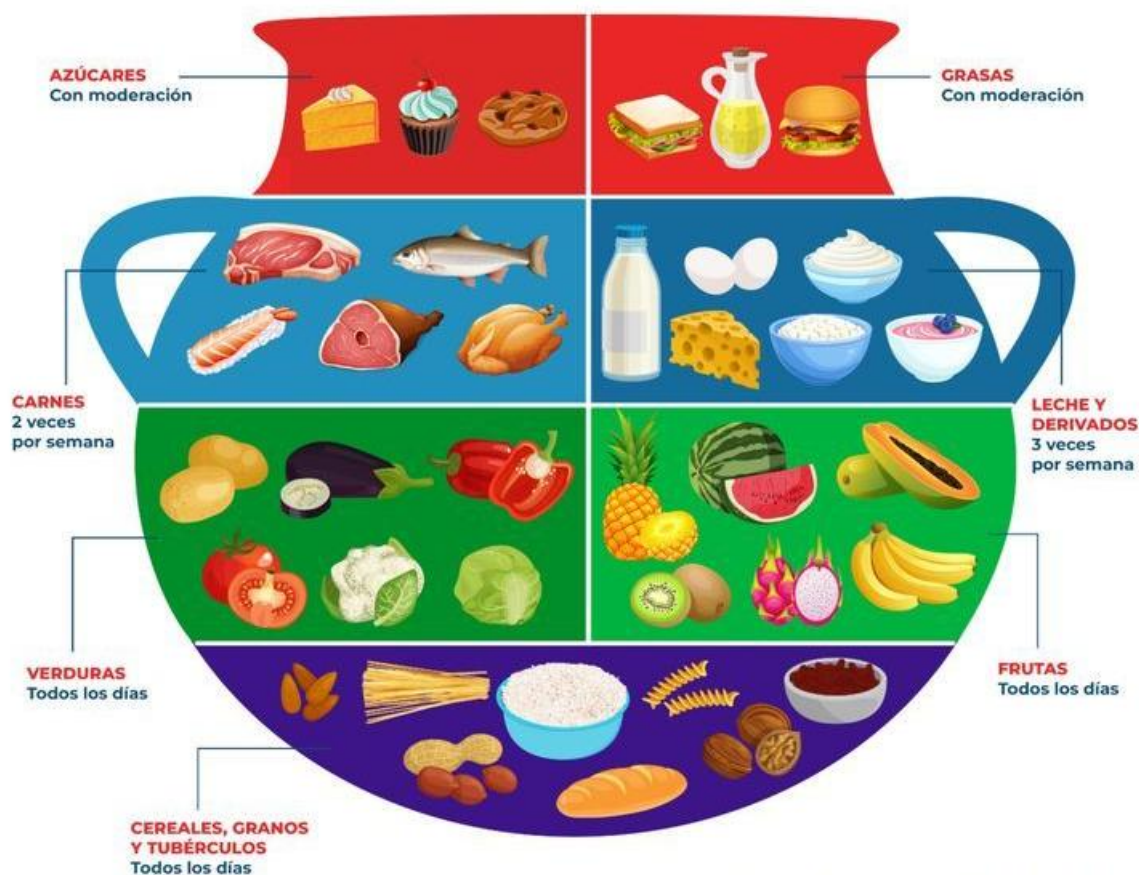
Otro de los aspectos que le brindan gran valor nutricional al atún es su alto contenido de vitaminas liposolubles e hidrosolubles. El atún se destaca por tener un alto contenido de vitamina A y D que son fundamentales para la salud ósea, el sistema inmune, la absorción de calcio y la protección de la piel. Además, es rico en vitaminas del complejo B, especialmente de B3, que es esencial para el metabolismo energético y la salud del sistema nervioso. Y de las vitaminas B6 y B12 que son claves para la formación de glóbulos rojos y la prevención de la anemia megaloblástica. Además, se ha evidenciado que 3 onzas de atún pueden llegar a dar un aporte de 2.6 mcg de vitamina B12, cubriendo más del 100 % de la ingesta diaria recomendada de dicha vitamina (NIH, 2022).

El atún es un alimento rico en minerales esenciales, contiene cantidades significativas de selenio, magnesio, fósforo y hierro. Todos estos minerales cumplen diferentes funciones dentro del organismo, brindando una protección antioxidante que protege al organismo contra el daño celular y fortalece el sistema inmune. Estos también intervienen en la formación de huesos y dientes, la función muscular, la regulación hormonal y la prevención de la anemia. Se ha observado que 100 g de atún rojo pueden aportar el 149 % de la recomendación de selenio, considerándose una fuente importante de estos minerales (Chamorro et al., 2024).

Todos estos aportes son esenciales para la salud del ser humano, lo que vuelve su consumo bastante atractivo para la mayoría de las personas, ya que aporta diferentes beneficios para la salud. Entre ellos podemos mencionar que el consumo regular de atún ayuda a disminuir el riesgo de enfermedades cardíacas, reduce la inflamación y mejora el perfil lipídico. Asimismo, su elevado aporte proteico favorece la formación y el mantenimiento de la masa muscular, siendo especialmente útil en etapas de crecimiento y en personas activas. Por otro lado, la abundancia de vitamina B12 y hierro, contribuye a prevenir la anemia megaloblástica y a mantener una adecuada producción de glóbulos rojos. El consumo de atún también aporta beneficios para el sistema inmunológico, el sistema nervioso y puede llegar a proteger la piel frente a daños ambientales (Chamorro et al., 2024).

Es importante tomar en consideración que a pesar de todos estos beneficios y el gran valor nutricional que aporta el atún, su consumo debe ser moderado, debido a la posible presencia de metales pesados que pueden acumularse en peces grandes como el atún. Las autoridades sanitarias sugieren limitar la ingesta semanal a 2 o 3 porciones de atún que equivalen a aproximadamente 225 a 355 g (FDA, 2024).

### Guías Alimentarias de Guatemala (Olla Familiar)



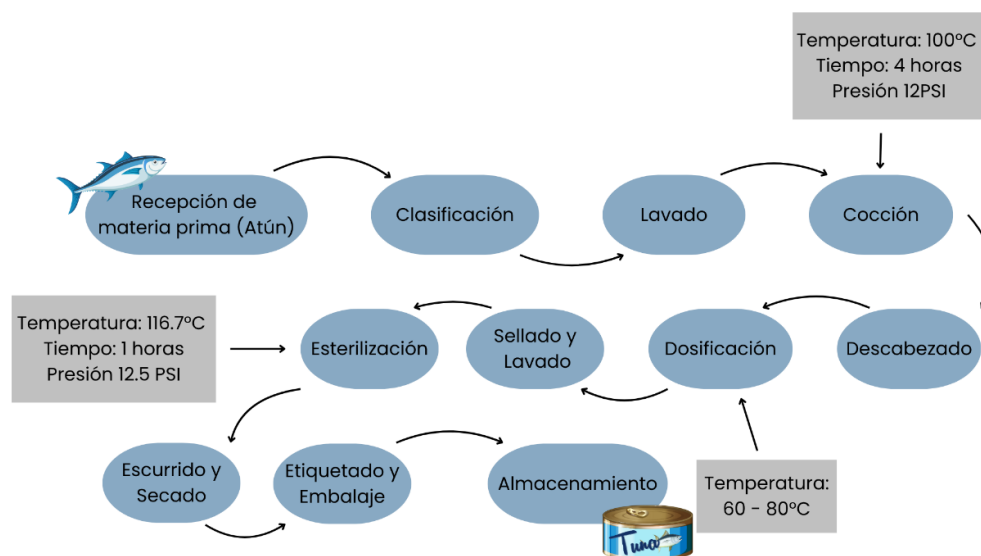
*Figura 3.* Olla alimenticia de Guatemala (MSPAS, 2012)

En el contexto guatemalteco, el atún representa una fuente estratégica de proteína animal que puede complementar la dieta tradicional basada principalmente en cereales, legumbres y verduras, tal como lo establece la olla alimentaria de Guatemala. Este modelo nutricional, promovido por el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS), propone una alimentación equilibrada, accesible y culturalmente apropiada, que incluya

fuentes de proteínas de alta calidad como el pescado. El atún enlatado, por su disponibilidad, valor nutritivo y vida útil prolongada, constituye una opción válida para mejorar la calidad nutricional de la población, especialmente en contextos de carnes frescas (MSPAS, 2012).

## 2. Atún enlatado

El atún enlatado es uno de los productos pesqueros más consumidos a nivel mundial debido a su alto valor nutritivo, su larga vida útil y su fácil acceso (Murata et al., 2019). Este producto se elabora principalmente a partir de especies del género *Thannus*, como *T. albacares*, *T. obesus* y *Katsuwonus pelamis*, las cuales son capturadas en diversas regiones del mundo (FAO, 2018). El proceso de enlatado implica diferentes etapas que son clave para poder obtener el producto terminado. Este proceso (Figura 4) inicia con la pesca, luego continúa con el eviscerado, cocción, descabezado, envasado, adición de líquido de cobertura, sellado, esterilización térmica y finalmente el etiquetado. Todos estos pasos permiten la eliminación de vísceras, cabeza, aletas, el desprendimiento de piel, espinas y de tejido oscuro que permiten finalmente envasarlo y sellar herméticamente las latas (Bumble Bee, 2025; Chedraui, 2001). En especial el proceso de esterilización térmica como parte final de este tratamiento garantiza la eliminación de microorganismos patógenos y extiende significativamente el tiempo de conservación de producto, sin necesidad de refrigeración y sin afectar sus aportes nutricionales, ya que se conservan más del 80 % de los ácidos grasos omega – 3 tras la esterilización (Anwar et al., 2019).



**Figura 4.** Proceso de elaboración de atún en agua (Elaboración propia con base en Chedraui, 2001)

El atún enlatado se comercializa en diferentes presentaciones, dependiendo del líquido de cobertura utilizado durante su producción, que además de los aportes nutricionales brindados por el atún como tal, tienen otros aspectos a considerar desde el punto de vista nutricional (FAO, 2018). La variedad en aceite, por ejemplo, tiene un mayor contenido calórico debido a la presencia de lípidos añadidos, mientras que la variedad en agua es más baja en calorías y grasas, lo que puede llegar a ser preferido en dietas hipocalóricas o con control de lípidos. Estas características han posicionado al atún enlatado como una opción práctica y saludable para personas de diferentes edades (USDA, 2017).

## **B. Mercurio como contaminante ambiental**

El mercurio (Hg) es un metal pesado, que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre. Este se caracteriza por ser el único metal que es líquido a temperatura ambiente. Cuenta con un aspecto plateado, inodoro, pesado y ligeramente volátil. Y es de suma importancia a nivel mundial debido a su toxicidad; una exposición al mercurio, incluso en pequeñas cantidades, puede llegar a provocar problemas en la salud, siendo una mayor amenaza para el desarrollo del feto en el útero y en los primeros años de vida (EPA, 2024b).

### **1. Formas químicas del mercurio**

El mercurio es un elemento químico versátil que puede encontrarse en el ambiente en tres formas principales: mercurio elemental, mercurio inorgánico y mercurio orgánico. Cada forma posee propiedades fisicoquímicas, comportamiento ambiental y toxicidades diferentes. Asimismo, cabe mencionar que cada una tiene efectos diferentes tanto en la salud humana como en el ecosistema (EPA, 2024b).

#### **a. Mercurio elemental**

El mercurio elemental, también conocido como mercurio metálico, es la forma más pura del mercurio. Este se caracteriza por ser el único metal que permanece en estado líquido a temperatura ambiente. Es un metal brillante, de color blanco plateado. Además, posee otras características como su volatilidad, y su alta presión de vapor (EPA, 2024b). Su volatilidad es de gran importancia, ya que, esta le permite pasar fácilmente a la atmósfera en forma de vapor. Entre sus propiedades puede mencionarse una alta densidad de  $13.53 \text{ g/cm}^3$ , un punto de fusión de  $-38.83 \text{ }^\circ\text{C}$  y su punto de ebullición de  $356.73 \text{ }^\circ\text{C}$ , ambos inusualmente bajos para

un metal (LennTech, 2019). El mercurio elemental es un buen conductor de la electricidad, aunque no es tan eficiente como otros metales, sin embargo, es un mal conductor del calor. Este es relativamente estable y no se oxida fácilmente en condiciones ambientales normales, sin embargo, al calentarse puede oxidarse a formas inorgánicas cuando se deposita en suelos o cuerpos de agua (Lang y Dietrich, 2013).

El mercurio elemental es poco absorbido por el tracto digestivo, siendo su vía de exposición principal los vapores inhalados. Cuando se calienta, el mercurio elemental libera vapores tóxicos y corrosivos que son más pesados que el aire. Estos vapores pueden ser inhalados y son altamente tóxicos para el sistema nervioso central, asimismo, pueden llegar a causar daños renales y pulmonares. El mercurio es dañino por contacto con la piel o mucosas, siendo muy irritante para los ojos, piel y vías respiratorias. Por lo que, su manipulación requiere de estrictas medidas de seguridad para evitar la exposición a sus vapores o el contacto directo (Park y Zheng, 2012).

El mercurio elemental ha sido ampliamente utilizado en la industria y la ciencia, debido a sus propiedades distintivas. Uno de sus usos principales es en instrumentos de medición como termómetros, barómetros, manómetros e hidrómetros, debido principalmente a su estado líquido a su volumen de expansión que suele ser bastante predecible. Por otro lado, en la industria eléctrica y electrónica se utiliza en interruptores eléctricos, rectificadores y lámparas fluorescentes, gracias a su conductividad eléctrica y su capacidad para formar arcos eléctricos estables. Se utiliza en aleación con otros metales para amalgamas dentales y es empleado para la extracción de oro y plata mediante técnicas de amalgamación (EPA, 2024b; Bjorklund et al., 2017).

#### b. Mercurio inorgánico

Por otro lado, el mercurio inorgánico, es el resultado de la oxidación del mercurio elemental en el medio ambiente o en procesos biológicos e industriales. Se presentan como compuestos que resultan de la combinación del mercurio con elementos distintos al carbono, como el cloro, azufre o el oxígeno, dichos compuestos se denominan sales inorgánicas de mercurio. Se presenta en dos formas principales, el mercurio (I) o mercurioso que es poco estable y suele formar dímeros, y el mercurio (II) o mercúrico que es la forma más estable y altamente reactiva (EPA, 2024b).

Entre las sales principales de mercurio se puede mencionar al sulfuro de mercurio (HgS) que es un mineral también conocido como cinabrio o bermellón, que es un sólido cristalino negro o rojo que se utiliza principalmente como pigmento en pinturas, caucho y plásticos (FisherScientific, 2022). Otra de las sales es el cloruro de mercurio (I) (Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) también conocido como cloruro mercurioso o calomelanos, es un sólido denso blanco o amarillento que es un componente importante de los electrodos de referencia en electroquímica (INSST, 2019; Ataman Chemicals, 2016). Por otro lado, el cloruro de mercurio (II) (HgCl<sub>2</sub>) es un compuesto químico blanco, cristalino y muy tóxico, que es ampliamente utilizado en procesos industriales y como reactivo químico. Este se caracteriza por formar complejos tetraédricos y anteriormente se utilizaba para tratar la sífilis, pero ha sido reemplazado por medicamentos más seguros y efectivos, como la penicilina (INSST, 2014b; Wong, 2016). Finalmente, se puede mencionar al óxido de mercurio (HgO) que es un sólido rojo o amarillo que se descompone a temperaturas elevadas para liberar oxígeno; este compuesto se emplea como pigmentos, baterías alcalinas y reactivos químicos, anteriormente solía utilizarse como antiséptico (INSST, 2014; NJ Health, 2017).

### c. Mercurio orgánico

El mercurio también puede unirse a grupos orgánicos, lo que resulta en la formación de compuestos como el metilmercurio (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>), etilmercurio (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>Hg<sup>+</sup>), dimetilmercurio ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>Hg), entre otros. Siendo el metilmercurio la forma más común y preocupante del mercurio orgánico en el ambiente (Bjorklund et al., 2017). Este se forma principalmente por la acción de bacterias anaerobias en ambientes acuáticos que convierten el mercurio inorgánico en metilmercurio a través de procesos de metilación. El metilmercurio se caracteriza por ser altamente lipofílico por lo que, es capaz de atravesar con facilidad membranas celulares, incluyendo la barrera hematoencefálica y la placenta, afectando gravemente el desarrollo cerebral fetal y en niños pequeños (ATSDR, 2006).

El metilmercurio es de gran relevancia, debido a que se encuentra en la cadena alimentaria acuática. Este compuesto es capaz de acumularse en organismos acuáticos y se biomagnifica a lo largo de la cadena alimentaria, alcanzando concentraciones elevadas en peces depredadores que son más grandes como lo son el atún, el pez espada, el tiburón, entre otros (Beckers y Rinklebe, 2017).

La exposición humana al mercurio orgánico ocurre principalmente a través del consumo de pescado y mariscos contaminados con metilmercurio. Este compuesto se absorbe fácilmente por la vía digestiva y se distribuye preferentemente en el sistema nervioso central, hígado y riñones (Posin et al., 2023). Es por ello, que organismos internacionales regulan estrictamente los niveles máximos permitidos de mercurio en productos pesqueros, con el fin de proteger a la población, especialmente a mujeres embarazadas y niños (FDA, 2025).

## **2. Ciclo del mercurio en el ambiente**

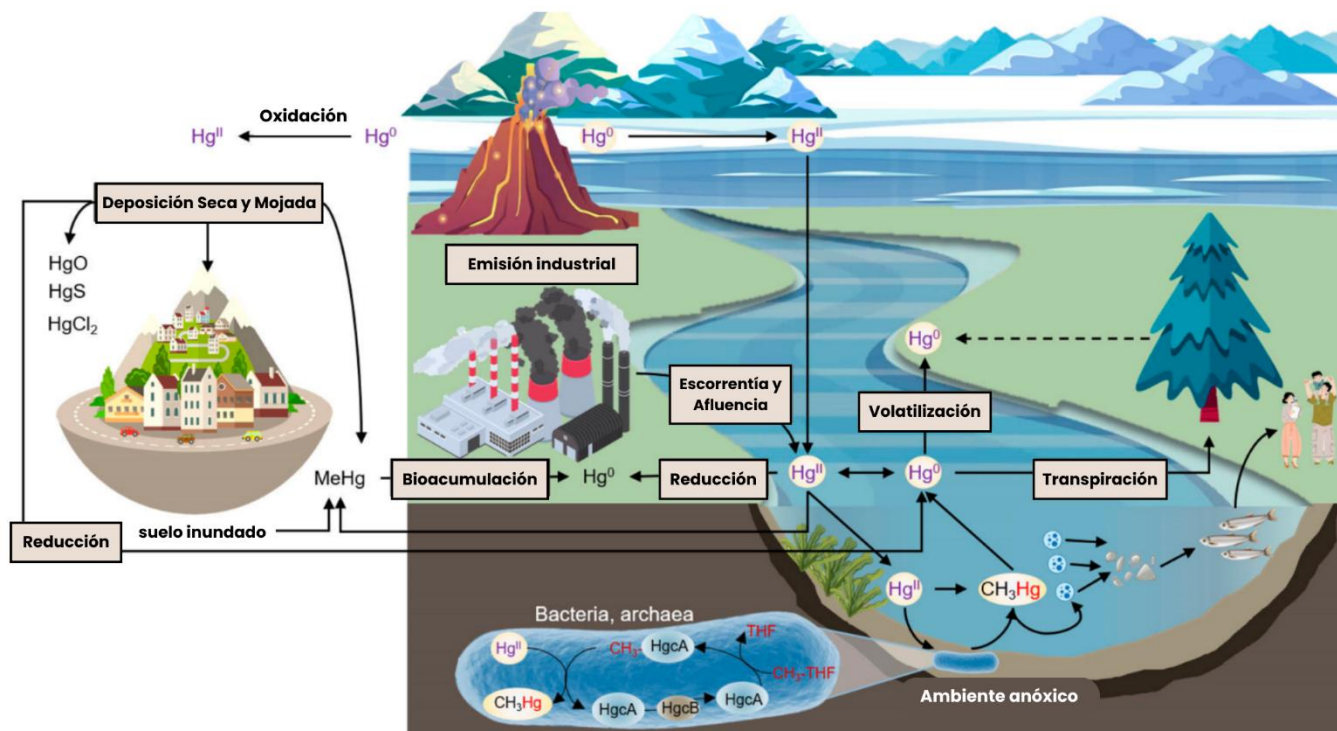
El ciclo del mercurio en el ambiente es un proceso complejo y dinámico que describe cómo este metal traza se mueve entre la atmósfera, los suelos, aguas e incluso los organismos vivos (Figura 5). A diferencia de otros metales pesados, el mercurio posee características únicas como la volatilidad, persistencia y capacidad de transformación química, lo que le permite estar presente en múltiples formas y compartimientos ambientales. Estas propiedades hacen que el mercurio tenga un ciclo global, con implicaciones tanto locales como transfronterizas en términos de contaminación y riesgos para la salud pública (Yuan-Seng et al., 2024; WHOI, 2025).

El mercurio entra al medio ambiente a través de fuentes naturales como erupciones volcánicas e incendios forestales, y principalmente a través de fuentes antropogénicas, como producción de cemento, minería, quema de residuos, fundición de metales, uso de fungicidas, etc (Jeong et al., 2024). El programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente reportó que las fuentes antropogénicas son responsables de liberar más de 2,000 toneladas de mercurio al año (Zhang et al., 2016). Solo en Estados Unidos, se ha registrado una liberación de 160 toneladas de mercurio al año a partir de la quema de carbón con alto contenido de azufre y otros combustibles fósiles. Sin embargo, aunque en menor medida, las erupciones volcánicas son una fuente natural de mercurio en la atmósfera. De todas estas emisiones, la lluvia es la principal encargada de transportar gran parte del mercurio atmosférico a la tierra y a los océanos. Y es debido a la actividad tanto de las placas tectónicas como de la actividad volcánica que, a lo largo de millones de años, el mercurio ha pasado de estar en las profundidades a estar presente en la superficie (WHOI. 2025).

El mercurio presente en la atmósfera puede permanecer como tal durante varios meses por su forma volátil. O bien ser oxidado por la luz solar, que lo convierte de mercurio

elemental ( $\text{Hg}^0$ ) en mercurio ionizado ( $\text{Hg}^{2+}$ ), que posteriormente cae a la tierra a través de la lluvia. Alrededor del 80 % del mercurio que entra en contacto con el océano se convierte de nuevo en  $\text{Hg}^0$  y se evapora de nuevo a la atmósfera. Cabe mencionar, que parte del mercurio depositado, también puede ser absorbido por las plantas a través de la transpiración. Este mercurio es posteriormente liberado nuevamente a la atmósfera como  $\text{Hg}^0$  por medio de la volatilización desde dicha vegetación (WHOI, 2025; Yuan-Seng et al., 2024).

Mientras que el porcentaje de mercurio que permanece en el océano puede entrar en contacto con bacterias específicas que pueden transformarlo en metilmercurio y de esta manera el mercurio orgánico entra en la cadena alimentaria a medida que los animales consumen la materia orgánica y los depredadores cazan a sus presas (WHOI, 2025; Beckers y Rinklebe, 2017). La metilación se da en zonas con ambientes anóxicos, como los sedimentos, donde se encuentran diferentes bacterias y arqueas. El mercurio ionizado en el agua del mar y los sedimentos no puede ingresar a las células bacterianas. Sin embargo, en ambientes con poco o ningún oxígeno disponible, algunas bacterias utilizan sulfato para la respiración, expulsando sulfuro como producto de desecho. El sulfuro liberado es capaz de combinarse con el mercurio ionizado en el agua para formar sulfuro mercúrico ( $\text{HgS}$ ), que puede difundirse en las células bacterianas. Dentro de las células bacterianas mediante el gen *hgcAB*, un grupo metilo ( $\text{CH}_3$ ) reemplaza al sulfuro para producir metilmercurio que se difunde en el agua de mar y es absorbido por el fitoplancton, donde finalmente entra en la cadena trófica y llega al ser humano a través del consumo de alimentos contaminados, especialmente de animales acuáticos (Sexauer et al., 2020; WHOI, 2025; Janssen et al., 2016).



**Figura 5.** Ciclo del mercurio  
(Traducido al español de Yuan-Seng et al., 2024)

### 3. Bioacumulación y biomagnificación en la cadena alimentaria

El metilmercurio, representa un serio peligro ambiental y sanitario debido a su capacidad para acumularse en organismos vivos y magnificarse a lo largo de la cadena trófica acuática (Beckers y Rinklebe, 2017). Estos procesos conocidos como bioacumulación y biomagnificación explican cómo pequeñas concentraciones de mercurio en el ambiente pueden terminar en niveles peligrosamente altos en especies de consumo humano, como es el caso del atún (Lehnerr, 2014).

La bioacumulación es el proceso por el cual los organismos vivos acumulan sustancias químicas, como por ejemplo metales pesados o cualquier otro contaminante orgánico, en concentraciones superiores a las que se presentan en su entorno o incluso en sus alimentos (Lehnerr, 2014; Harding et al., 2018). Este fenómeno ocurre debido a que la sustancia es absorbida a una tasa más rápida de lo que se está metabolizando o excretando, o bien porque el organismo carece de mecanismos eficientes para eliminarla. Entre las principales vías de entrada al organismo se puede mencionar la respiración, la ingestión de alimentos y el contacto directo con el medio ambiente (Chojnacka y Mikulewicz, 2014).

En el caso del mercurio, el metilmercurio presente en el agua o sedimentos es absorbido principalmente a través de las branquias y por ingestión de partículas contaminadas. Este compuesto se caracteriza por tener una alta afinidad a los grupos sulfhidrilo (-SH) de las proteínas, por lo que se une fuertemente a tejidos como los músculos y las vísceras (Jeong et al., 2024). Al no ser metabolizado ni excretado fácilmente, el mercurio se acumula de forma progresiva en el organismo, incluso en concentraciones bajas en el ambiente. La bioacumulación ocurre desde las primeras etapas de la cadena alimentaria, comenzando por organismos como el fitoplancton, que contiene 10,000 veces más metilmercurio que el agua de mar que lo rodea (WHOI, 2025).

La biomagnificación es el aumento progresivo de la concentración de una sustancia química a medida que se asciende en los niveles tróficos. Es decir, que los depredadores de niveles superiores acumulan concentraciones considerablemente más elevadas de la sustancia, que los organismos que se encuentran en niveles inferiores (Lehnherr, 2014). Este fenómeno ocurre porque los organismos depredadores consumen varias presas contaminadas, acumulando en sus tejidos el metilmercurio presente en ellas. Al no poder eliminar el mercurio de manera eficiente, este se acumula en mayor proporción en cada eslabón (Lavoie et al., 2013).

En el caso del mercurio que es absorbido por productores primarios, principalmente por el fitoplancton. Este es consumido por el zooplancton, que a su vez es consumido por peces pequeños. Estos peces pequeños son consumidos por peces más grandes y mamíferos marinos. Los peces más grandes y depredadores superiores consumen múltiples presas contaminadas, acumulando concentraciones aún mayores de mercurio. Debido a que, en cada nivel trófico, la concentración se multiplica, llega a niveles peligrosos en los depredadores tope, como en el caso de los tiburones, atunes y aves rapaces (Lavoie et al., 2013).

## **C. Efectos del mercurio en la salud humana**

### **1. Toxicocinética y toxicodinámica del mercurio y metilmercurio**

La toxicocinética del mercurio aborda los procesos mediante los cuales este entra al organismo, se distribuye en los tejidos, se metaboliza y finalmente se elimina del cuerpo humano. Dado que el mercurio posee tres formas principales siendo elemental, inorgánico y

orgánico; cada una de ellas presenta diferentes comportamientos biológicos y diferentes toxicidades (ATSDR, 2022). En cuanto a la forma elemental, la absorción se basa principalmente en la inhalación de vapores mientras que, en la forma inorgánica y orgánica, como por ejemplo el metilmercurio, es principalmente mediante el tracto digestivo (OPS, 2012). Una vez este elemento es absorbido es posible que se dé una unión a proteínas plasmáticas y se distribuya ampliamente, llegando a acumularse principalmente en los riñones y el cerebro (UNAM, 2016).

Es importante mencionar que la forma orgánica, especialmente el metilmercurio, es fácilmente transportado a través de la barrera hematoencefálica y la placenta, representando así un alto riesgo para el sistema nervioso y para el desarrollo fetal (WHO, 2021). Estudios han demostrado que la eliminación del mercurio en el cuerpo humano se da a lugar en un proceso lento llegando a atribuir de este modo a una posible agravación de los efectos tóxicos del mismo dada la alta concentración en el cuerpo. Este riesgo incrementa sustancialmente para personas que se encuentren en condiciones de alta exposición por fuentes ambientales, laborales o por ingesta crónica de productos con alta concentración del mismo elemento (UCR, 2023).

En cuanto a la toxicodinámica, el mercurio es dañino principalmente al unirse a grupos sulfhidrilos de enzimas y proteínas celulares llegando a afectar la función de estos (ATSDR, 2022). Dichas uniones provocan un estrés oxidativo, disfunción mitocondrial y daño celular afectando los tejidos del cuerpo, especialmente al sistema nervioso y los riñones (UNAM, 2016). En el mercurio elemental, los efectos están relacionados con la forma de absorción por inhalación de este. Por esto mismo, podemos mencionar como una posible causa la neumonitis química aguda y los efectos neurológicos debidos a la exposición prolongada (OPS, 2012).

El metilmercurio altera la neurotransmisión y el desarrollo neuronal, por lo cual es extremadamente peligroso en el proceso de formación y desarrollo fetal e infantil. Investigaciones elaboradas por la Universidad Nacional de México (UNAM) se destaca cómo el mercurio puede llegar a inducir efectos neuroconductuales, como el deterioro de la memoria o temblores aun teniendo una baja exposición al mercurio. Además, se pueden

presentar respuestas autoinmunes de amplia gama en los casos de alta exposición observados en efectos clínicos asociados a la toxicidad del mercurio (UNAM, 2016).

El comportamiento del mercurio en el organismo varía completamente dependiendo de la forma a la que se está exponiendo el individuo. Por ejemplo, si la exposición es en su forma elemental se sabe que hasta el 80 % de la absorción de esta llega a ser pulmonar mientras que por la vía digestiva es muy baja (ATSDR, 2022). Por otro lado, si la exposición es en su forma orgánica o inorgánica, como puede ser el metilmercurio se sabe que la mayoría de dicha absorción es llevada a cabo por la vía digestiva y luego llegando al torrente sanguíneo y finalmente alcanzando y distribuyéndose en tejidos lipofílicos como el cerebro o en tejidos de los riñones (OPS, 2012). Este compuesto puede llegar a tener un tiempo de vida en el cuerpo humano de aproximadamente 60 días, reforzando así la acumulación de este en el organismo (ATSDR, 2022). La Universidad Autónoma del Estado de México documentó en el año 2023 cómo los profesionales del sector salud que fueron expuestos a vapores o soluciones de mercurio presentaban altas concentraciones de este en su organismo y adicional se destacó alteraciones cromosómicas como efecto biológico medible (UAEMex, 2023). Así mismo, en el ámbito laboral como lo puede ser la minería, la quema de carbón o el uso de amalgamas dentales aumentan la exposición ambiental a este metal (UNAM, 2016).

## **2. Signos clínicos y físicos**

La exposición al mercurio puede provocar una amplia gama de signos clínicos y físicos, que dependen de la forma química del mercurio, la vía de exposición y la duración de esta (ATSDR, 2022). Entre los síntomas más comunes de la intoxicación crónica por mercurio elemental podemos mencionar el temblor no intencional de las manos (WHO, 2021). Además, se ha documentado que la exposición prolongada puede provocar trastornos neuroconductuales como irritabilidad, pérdida de memoria y cambios de humor. En ambientes laborales, tal como en clínicas odontológicas, los profesionales pueden manifestar fatiga, cefaleas y alteraciones cognitivas sutiles tras la exposición crónica a vapores de mercurio (UAEMex, 2023; UNAM, 2016).

El compuesto de metilmercurio, por su alta afinidad por el tejido nervioso, produce ataxia, parestesias y deterioro en la coordinación motora (OPS, 2012). En casos severos, puede presentarse pérdida de la visión periférica, debilidad muscular y alteraciones en el

lenguaje y la audición (ATSDR, 2022). La exposición intrauterina a metilmercurio de infantes presenta retraso en el desarrollo psicomotor y déficits en el lenguaje. Estos signos reflejan la alta neurotoxicidad del mercurio y justifican su clasificación como una sustancia extremadamente peligrosa para la salud humana (WHO, 2021).

En el sistema renal, el mercurio inorgánico puede causar daño tubular agudo, evidenciado por proteinuria, cilindros granulares y disminución del filtrado glomerular. Este daño es consecuencia de la acumulación de  $Hg^{2+}$  en los túbulos proximales, donde interfiere con funciones enzimáticas esenciales (OPS, 2012; ATSDR, 2022). En cuanto al sistema inmune, se ha observado que la exposición crónica a mercurio puede inducir fenómenos autoinmunes, como glomerulonefritis o síndrome similar al lupus (Charkiewicz et al., 2025). El mercurio también puede desencadenar síntomas dermatológicos como eritemas, descamación y prurito, especialmente en casos de exposición dérmica o contacto con productos contaminados (UCR, 2023). Algunos pacientes desarrollan alteraciones hematológicas, incluyendo anemia hemolítica y leucocitosis, en casos graves de intoxicación sistémica (WHO, 2021). Por otro lado, se puede mencionar que las manifestaciones gastrointestinales como náuseas, dolor abdominal y diarrea se asocian más a la ingesta de sales de mercurio inorgánico (ATSDR, 2022). En niños, el mercurio puede afectar el crecimiento y el rendimiento escolar, al alterar funciones cognitivas y conductuales. Los efectos físicos y sistémicos son variados y muchas veces inespecíficos, por lo que el diagnóstico debe apoyarse en la historia ocupacional y ambiental del paciente (UNAM, 2016).

Desde el punto de vista respiratorio, la inhalación de vapores de mercurio puede ocasionar síntomas agudos como tos, dificultad respiratoria y sensación de opresión torácica. En altas exposiciones de carácter agudo, pueden desarrollarse neumonitis química, edema pulmonar e insuficiencia respiratoria (WHO, 2021; ATSDR, 2022). Algunos reportes describen también palpitaciones y taquicardia como efectos cardiovasculares en pacientes expuestos a altos niveles de mercurio (UNAM, 2016). La exposición crónica puede provocar debilidad muscular generalizada, insomnio y disminución del rendimiento físico (OPS, 2012). A nivel neuromuscular, el mercurio puede inducir espasticidad, reflejos hiperactivos y fasciculaciones (Charkiewicz et al., 2025). Los efectos psiquiátricos como depresión,

ansiedad y paranoia han sido descritos en casos históricos de intoxicación laboral, como en trabajadores de la industria del cloro (WHO, 2021). En contextos comunitarios, como lo documenta la Universidad de Costa Rica (UCR) (2023), las personas expuestas a mercurio en agua potable han manifestado dolores de cabeza persistentes y cambios de comportamiento. Estos hallazgos clínicos refuerzan la necesidad de vigilancia toxicológica en zonas con potencial contaminación por mercurio.

Estudios clínicos y observacionales han mostrado que los efectos del mercurio pueden mantenerse incluso años después de la exposición, debido a su acumulación tisular y su lenta excreción (ATSDR, 2022). En el caso del metilmercurio, se ha observado que los signos clínicos pueden aparecer de forma tardía, especialmente en personas que consumen pescado contaminado de manera frecuente, como lo es el atún o el tiburón (WHO, 2021). Esta forma de exposición se ha documentado en varias regiones latinoamericanas y representa una amenaza para la salud pública debido a la alta disponibilidad y bajo precio de productos como el atún enlatado (OPS, 2012). En zonas rurales, los síntomas de intoxicación por mercurio pueden confundirse con otras enfermedades, retrasando el diagnóstico (UCR, 2023). Finalmente, el Convenio de Minamata promueve el monitoreo clínico y ambiental como herramienta fundamental para reducir los efectos clínicos y físicos del mercurio en la población general (ONU, 2019).

### **3. Tratamiento de intoxicación por mercurio**

El tratamiento de la intoxicación por mercurio depende del tipo de compuesto de mercurio involucrado y de la vía de exposición (OMS, 2023). Sin embargo, este se basa en tres principios fundamentales: interrupción de la exposición, medidas de soporte clínico y uso de agentes quelantes para facilitar la eliminación del metal del organismo. Los quelantes más comúnmente utilizados son el dimercaprol (BAL), el ácido dimercaptoduccínico (DMSA - succimer) y el ácido dimercaptopropano-sulfónico (DMPS). En casos de intoxicación aguda por mercurio inorgánico, se recomienda el uso de BAL, administrado por vía intramuscular en una dosis de 3 a 4 mg/kg cada 4 a 6 horas durante las primeras 48 horas (MINSA, 2015). Para exposiciones crónicas o moderadas, el DMSA es el agente preferido, administrado por vía oral a 10 mg/kg cada 8 horas durante cinco días (EsSalud, 2018).

Además del tratamiento farmacológico, se deben tomar medidas para eliminar o reducir la fuente de exposición al mercurio. Esto incluye la remoción del paciente del ambiente contaminado y la gestión ambiental adecuada de fuentes de mercurio como amalgamas dentales, productos cosméticos y residuos industriales. La OMS enfatiza que el tratamiento debe ir acompañado de un monitoreo clínico estrecho, incluyendo pruebas de función renal y niveles de mercurio en orina o sangre (OMS, 2023).

En América Latina, en el Perú se han desarrollado algunas de las guías más completas de intoxicación por mercurio, las cuales pueden ser aplicadas en contextos similares como Guatemala y Costa Rica. Estas guías recomiendan el uso de BAL y DMSA como fármacos de primera línea, con indicaciones precisas según la severidad del cuadro clínico (MINSa, 2015). El tratamiento debe iniciarse lo antes posible para reducir el riesgo de daño neurológico irreversible, especialmente en poblaciones vulnerables como niños y mujeres embarazadas (OMS, 2023). Además, se debe efectuar un seguimiento postratamiento para evaluar la persistencia de síntomas o la recurrencia de la toxicidad (EsSalud, 2018). La Secretaría del Convenio de Minamata ha emitido directrices para que los países miembros establezcan estrategias nacionales de respuesta frente a la exposición al mercurio. Estas estrategias incluyen protocolos de diagnóstico, tratamiento y comunicación de riesgos sanitarios (OMS, 2023; ONU, 2024).

En términos de diagnóstico complementario, se utilizan pruebas de orina de 24 horas y análisis de sangre para determinar los niveles de mercurio y confirmar la necesidad de tratamiento quelante (EsSalud, 2018). Es crucial distinguir entre la exposición a mercurio elemental, inorgánico y orgánico, ya que cada tipo responde de forma distinta a los tratamientos (OMS, 2023). Por ejemplo, el metilmercurio responde mejor al tratamiento con DMSA que al BAL, debido a su distribución tisular y baja afinidad por BAL (Friedheim et al., 1975). En estos casos, el tratamiento debe enfocarse también en la dieta del paciente, eliminando el consumo de peces con alto contenido de mercurio. Los síntomas neurológicos como temblores, neuropatías y trastornos cognitivos pueden persistir incluso después de iniciado el tratamiento, lo cual requiere atención multidisciplinaria. La rehabilitación física y cognitiva puede ser necesaria en pacientes con exposición severa o prolongada (OMS,

2023). Finalmente, se debe educar al paciente acerca de las fuentes comunes de exposición para prevenir reinfecciones o toxicidad acumulativa (ONU, 2024).

A nivel global, el Convenio de Minamata exige a los países miembros implementar políticas públicas que incluyan la detección, monitoreo y tratamiento de los efectos del mercurio en la salud humana (ONU, 2019). Estas medidas se centran especialmente en poblaciones vulnerables, como comunidades indígenas, mineros artesanales y trabajadores industriales. En este marco, se promueve la capacitación de profesionales de la salud en el diagnóstico precoz y tratamiento eficaz de la intoxicación por mercurio. También se fomenta el desarrollo de laboratorios nacionales con capacidad para medir compuestos de mercurio en muestras biológicas (ONU, 2019; OMS, 2023).

En Tailandia, por ejemplo, se ha promovido la eliminación progresiva del uso de mercurio en productos cosméticos y la creación de protocolos de salud pública frente a intoxicaciones (ONU, 2024). La colaboración internacional es fundamental para compartir protocolos efectivos, garantizar el acceso a medicamentos y monitorear el progreso de los objetivos del Convenio. Así, el tratamiento de la intoxicación por mercurio se convierte no solo en una acción clínica, sino en un compromiso global por la justicia ambiental y la salud pública (OMS, 2023).

#### **D. Bioseguridad en el manejo de mercurio en el laboratorio**

El mercurio es un elemento químico de gran relevancia en distintos campos de investigación y en procesos industriales, pero al mismo tiempo representa un riesgo significativo para la salud humana y el ambiente debido a su toxicidad (OMS, 2024). La exposición puede producirse principalmente por inhalación de vapores, contacto dérmico o ingestión accidental, y aún en concentraciones bajas puede desencadenar efectos adversos que afectan el sistema nervioso, renal y otros órganos. Estos riesgos, ampliamente documentados en la literatura científica, hacen imprescindible la implementación de medidas específicas de bioseguridad en su manipulación (OMS, 2024).

La bioseguridad en el laboratorio busca tanto la protección individual de los investigadores, como también la prevención de la contaminación ambiental y la reducción de accidentes que puedan comprometer la integridad de la investigación. Para ello, organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Administración de

Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) y el Convenio de Minamata sobre el mercurio han establecido lineamientos orientados a un manejo responsable de esta sustancia. Estos principios se complementan con normativas nacionales en materia de salud ocupacional y gestión de residuos, que en conjunto proporcionan un marco de referencia para las buenas prácticas (OMS, 2024; EPA, 2025; OSHA, 2024).

El cumplimiento de protocolos de seguridad, la disponibilidad de equipos de protección personal y la capacitación del personal, constituyen pilares fundamentales para trabajar de forma segura con mercurio en el laboratorio. Además, la aplicación rigurosa de estas medidas garantiza no solo la seguridad de quienes manipulan la sustancia, sino también la protección del entorno inmediato y el cumplimiento de los compromisos ambientales asumidos a nivel global (OSPPERA, 2002; OMS, 2024).

### **1. Equipos de protección personal (EPP)**

El uso riguroso y sistemático de equipos de protección personal (EPP) constituye una línea de defensa esencial para reducir la inhalación y el contacto dérmico con mercurio elemental en el laboratorio, dado que los vapores de Hg<sup>0</sup> se dispersan con facilidad y pueden producir efectos sistémicos severos. (Baughman, 2005). La selección de guantes debe basarse en datos de permeación y compatibilidad química, evitando materiales que permitan la rápida permeación de compuestos mercuriales orgánicos y favoreciendo opciones con resistencia demostrada, como determinados nitrilos de alta barrera (Nelson y Phalen, 2022).

Las prendas exteriores deben ser de material no absorbente y de fácil descontaminación para impedir que el mercurio líquido se disperse por arrastre y contamine superficies o calzado. (Morrison, 2007). La protección ocular adecuada con gafas herméticas o protectores faciales es necesaria para prevenir la exposición por salpicaduras y microgotas durante maniobras de trasvase o limpieza de derrames (Taux et al., 2022).

Cuando exista riesgo de exposición a vapores, es obligatorio el uso de protección respiratoria certificada con cartuchos o cartuchos combinados apropiados para vapor de mercurio, junto con programas de ajuste facial y mantenimiento del equipo (Vouk et al., 1953).

## **2. Condiciones del laboratorio**

El establecimiento de condiciones ambientales controladas en el laboratorio es esencial para minimizar la liberación y acumulación de vapores de mercurio, dado que este elemento posee alta presión de vapor a temperatura ambiente y puede difundirse fácilmente en zonas mal ventiladas (Caravati et al., 2008). Se recomienda que todas las maniobras que puedan liberar vapores se realicen dentro de campanas de extracción (Rafiee et al., 2020).

Las superficies del laboratorio deben ser lisas, no porosas y fáciles de limpiar para evitar que pequeñas gotas de mercurio se escondan en grietas, esquinas o materiales absorbentes (Morrison, 2007). Los muebles, pisos y mesas de trabajo deben ser resistentes a la corrosión y compatibles con los agentes de descontaminación empleados, evitando recubrimientos que puedan reaccionar con mercurio o sus vapores (Taux et al., 2022). Es esencial el monitoreo ambiental periódico de mercurio en puntos críticos del laboratorio, para verificar que los controles instalados mantienen la contaminación bajo un nivel aceptable (Rafiee et al., 2020). Finalmente, en la planificación del laboratorio, debe contemplarse ubicación estratégica de estaciones de lavado, duchas de emergencia, salidas de aire, y rutas de evacuación en función de los riesgos inherentes al manejo de mercurio (Caravati et al., 2008).

La segregación de zonas de trabajo es una medida clave, permitiendo identificar zonas de tránsito, trabajo y almacenamiento. Los depósitos de mercurio u otros reactivos, soluciones o residuos deben estar ubicados en áreas específicas, alejados de zonas de tránsito frecuente (Taux et al., 2022). Es recomendable mantener temperatura moderada, evitando altas temperaturas innecesarias, ya que el aumento de esta favorece la volatilización del mercurio (Baughman, 2005). El laboratorio debe contar con kits de limpieza para derrames y materiales de descontaminación accesibles, ubicados cerca del área de trabajo (Morrison, 2007).

## **3. Procedimientos seguros de manipulación**

La manipulación de mercurio en un entorno de laboratorio requiere la implementación de procedimientos rigurosos que garanticen la seguridad del personal y prevengan la liberación de vapores al ambiente. Una de las primeras consideraciones consiste en limitar al máximo la cantidad de mercurio utilizada, priorizando el empleo de volúmenes

reducidos que disminuyan el riesgo de exposición accidental. Toda la manipulación de este tipo de elementos se debe realizar en sistemas cerrados, especialmente haciendo uso de campanas de extracción que aseguren la ventilación adecuada y eviten la acumulación de vapores tóxicos en el área de trabajo (OMS, 2024; OSHA, 2024).

Como una buena práctica, antes de iniciar con cualquier actividad con mercurio, es indispensable realizar una evaluación de riesgo y contar con una preparación del área, la cual implica disponer de equipos de protección personal adecuados como guantes de materiales como nitrilo o neopreno debido a que materiales como el látex o PVC pueden ser permeables al mercurio. Además, se deben utilizar gafas de seguridad con protección lateral para evitar salpicaduras, mascarillas con filtros específicos para vapores metálicos, y ropa de laboratorio cerradas que cubra completamente la piel. De igual forma se recomienda contar con *kits* para el manejo de derrames, los cuales incluyen absorbentes, polvo de azufre y recipientes herméticos para la recolección segura de residuos (EPA, 2025; NIOSH, 2022).

Debe estar estrictamente prohibido comer, beber o fumar en zonas donde se manipula mercurio, ya que estas actividades aumentan el riesgo de ingestión accidental. Durante la manipulación, se debe evitar el contacto prolongado con el mercurio. Es importante utilizar herramientas adecuadas como pinzas, embudos y recipientes cerrados para minimizar el riesgo de salpicaduras. Todos los envases que contengan mercurio deben estar debidamente identificados con advertencia de toxicidad, la concentración y fecha de elaboración (NIOSH, 2022; Harvard, 2019).

El almacenamiento del mercurio debe hacerse en recipientes herméticos, preferiblemente de vidrio o acero inoxidable, ubicados en armarios ventilados y alejados de fuentes de calor o luz solar directa. El transporte debe realizarse en embalajes certificados según normas internacionales como las de la ONU o el sistema ADR y siempre acompañado de una ficha de seguridad y adicional a este un plan de contingencia. Finalmente, es esencial contar con un protocolo de primeros auxilios. En caso de inhalación, la persona debe ser trasladada a un área con aire fresco y recibir atención médica inmediata. Si hay contacto con la piel debe lavar con agua y jabón sin frotar. En caso de ingestión no se debe inducir el vómito, lo correcto es acudir al hospital de inmediato (EPA, 2025; Harvard, 2019).

Todos estos procedimientos deben ser parte de una política institucional clara, acompañada de capacitación continua para todo el personal involucrado. La seguridad en la manipulación del mercurio no solo protege la salud humana, sino también el medio ambiente, evitando la contaminación tanto de suelos como de cuerpos de agua (EPA, 2025; OMS, 2024; Minamata Convention, 2013).

#### **4. Actuación en caso de accidentes o derrame**

En el caso de algún accidente o derrame involucrando mercurio, debe ordenarse de inmediato la evacuación del área afectada y permitir que el lugar se ventile durante el mayor tiempo posible antes de iniciar cualquier limpieza (Baughman, 2005). Se debe evitar utilizar aspiradoras, barridos mecánicos o cualquier maniobra que promueven la dispersión de vapores o microgotas de mercurio al ambiente (Morrison, 2007). Para derrames pequeños, es más beneficioso y segura la recolección manual con herramientas como goteros o espátulas, preferiblemente bajo una zona controlada que permita la correcta ventilación (Johnson-Arbor et al., 2021). Es aconsejable usar polvo de azufre, zinc o kits absorbentes especializados para derrames de mercurio residual y reducir su movilidad (Baughman, 2005).

Si el derrame es considerable o involucra superficies porosas o estructuras complicadas, debe contactarse al equipo especializado en descontaminación profesional y a la autoridad competente en gestión de residuos peligrosos. O bien siguiendo el procedimiento ilustrado en el diagrama de manejo de derrames de mercurio presentado en el **Anexo 4**. En caso de exposición personal (inhalatoria, dermal u ocular), el afectado debe alejarse al aire fresco, eliminar el EPP contaminado de forma controlada y buscar atención médica inmediata, informando la sustancia implicada (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2023).

#### **E. Regulación de metales pesados en alimentos**

La presencia de metales pesados en los alimentos es una preocupación creciente en la seguridad alimentaria, debido a su potencial toxicidad. Entre los metales más frecuentemente detectados se encuentran el arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg), los cuales pueden ingresar a la cadena alimentaria mediante mecanismos naturales o actividades antropogénicas como la minería, la quema de combustibles fósiles, el uso de pesticidas o bien debido a la contaminación industrial (FDA, 2025).

Estos elementos al acumularse en los alimentos pueden llegar a alcanzar niveles tóxicos, especialmente en aquellos alimentos que se encuentran en la cima de la cadena alimentaria, que al ser consumidos pueden generar efectos adversos severos en la salud humana. La toxicidad de los metales pesados varía dependiendo de diferentes factores como su forma química, dosis, frecuencia de exposición y características individuales de cada persona (CSA, 2023; Ratnapradipa, 2024).

El mercurio es uno de los metales pesados con mayor preocupación para la salud del ser humano, debido a esto en organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y el Codex Alimentarius (FAO/OMS) se han establecido límites permisibles (LPM) para los metales pesados en los diferentes alimentos (EFSA, 2023; FAO, 2024). Estos valores comúnmente se determinan con base en evaluaciones toxicológicas como la Ingesta Semanal Tolerable (IST) o la Ingesta Diaria Permitida (IDP) y buscan principalmente proteger a los grupos vulnerables de la población como los son niños, mujeres embarazadas y lactantes, quienes suelen presentar una mayor susceptibilidad a los efectos tóxicos de los metales pesados, como el mercurio (OMS, 2024).

Por lo que se considera que la regulación de metales pesados en alimentos constituye una herramienta crucial para proteger la salud pública, ya que permite garantizar la inocuidad alimentaria y a su vez prevenir los efectos tóxicos a largo plazo (FAO, 2024).

### **1. Límites máximos permisibles de mercurio en atún**

La toxicidad del mercurio afecta principalmente al sistema nervioso, sin embargo, cabe recalcar que la toxicidad depende de la forma química en la que se presente dicho contaminante (Posin et al., 2023). Por lo que en la Organización Mundial de la Salud (OMS) se ha establecido una ingesta diaria permitida de  $4\mu\text{g}/\text{kg}$  peso corporal de mercurio, de los cuales no más de  $1.6\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal deberían estar en forma de metilmercurio, este dato se encuentra principalmente enfocado en la ingesta de pescado u otros mariscos, debido a que es en este tipo de alimentos donde se encuentra el metilmercurio como contaminante (OMS, 2011; OMS/FAO, 2024). Según una revisión efectuada en la OMS de análisis entre 1997 y 2009, la proporción de mercurio total aportada por el metilmercurio osciló entre el 30% - 100%, dependiendo de la especie, tamaño, edad y dieta. Además, en este estudio se

determinó que en aproximadamente el 80% de los datos el metilmercurio representaba más del 80% del mercurio total (OMS, 2011).

Con base a la ingesta diaria permitida anteriormente expuesta, diferentes instituciones internacionales han establecido límites permisibles de este contaminante en diferentes alimentos entre los que se encuentra el atún. Entre ellas se puede mencionar a la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), la cual establece en el reglamento (UE) 2023/915 un máximo de 1.0mg/kg de metilmercurio para especies depredadoras como el atún y un máximo de 0.5mg/kg de metilmercurio en especies más pequeñas (EFSA, 2023). Dicho reglamento busca proteger especialmente a mujeres embarazadas, lactantes y niños pequeños, obligando a los estados miembros a tomar medidas cuando se superan estos límites en productos importados o nacionales (EFSA, 2023).

El Codex Alimentarius: CXS 193-1995 elaborado por la Organización de las Naciones Unidas por la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cual establece en su edición del 2024, un nivel máximo de metilmercurio en atún de 1.2mg/kg en todo el producto ya sea fresco o congelado (OMS/FAO, 2024). Asimismo, se puede mencionar a la FDA que ha establecido un nivel máximo de metilmercurio de 1ppm o 1mg/kg en peces depredadores como el atún (eCFR, 2025; FDA, 2024).

En Guatemala la regulación de metales pesados presentes en alimentos como el atún se encuentra a cargo del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), el cual se rige por datos científicos proporcionados por órganos internacionales resaltando la FAO y la OMS. Por lo que, en Guatemala se ha establecido como límite máximo permisible 1mg/kg de mercurio en peces depredadores como el atún. Esto de acuerdo a lo establecido en el Codex Alimentarius CXS 193-1995 en la edición del 2024 (MAGA, 2024).

## **2. Convenio de Minamata**

El Convenio de Minamata referente al mercurio es un tratado que recibe su nombre a raíz de la tragedia ocurrida en la bahía de Minamata, Japón, donde a mediados del siglo XX se registró una grave contaminación por metilmercurio. Este fue desarrollado y se adoptó oficialmente en el 2013, tras más de una década de negociaciones. Pero no fue hasta el 16 de agosto de 2017 cuando entró en vigor después de que 50 países ratificaran dicho convenio.

Siendo considerado el primer tratado ambiental global del siglo XXI con carácter jurídicamente vinculante (ONU, 2019). No obstante, en Guatemala aún no ha sido ratificado, por lo que las disposiciones de este instrumento internacional no tienen aplicación obligatoria en el país (Congreso de la República de Guatemala, 2022).

Según el Artículo 1 del Convenio su finalidad principal es “Proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio”. Debido a que este convenio surge como respuesta a la creciente preocupación mundial de los efectos adversos del mercurio en la salud humana y los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres. Particularmente al desastre de Minamata Japón en los años 50, donde miles de personas sufrieron envenenamiento por metilmercurio. Antes de este acuerdo no existía un instrumento legal global vinculante que regulara el ciclo completo de mercurio (ONU, 2019).

Este tratado es bastante completo, teniendo un gran alcance que abarca temas como el control de suministro y comercio de mercurio, donde se prohíbe la apertura de nuevas minas de mercurio y regula el comercio internacional de mercurio, permitiendo exportaciones solo con consentimiento previo y para usos permitidos (ONU, 2019). Asimismo, se regulan los productos con mercurio añadido, donde se establece la eliminación progresiva de productos como termómetros, esfigmomanómetros, lámparas fluorescentes, cosméticos con mercurio, amalgamas metálicas y baterías/pilas con alto contenido de mercurio. Abarca los procesos industriales donde prohíbe o restringe procesos de producción que utilicen mercurio, como, por ejemplo, la producción de acetaldehído con cloruro de mercurio como catalizador (ONU, 2019).

Este convenio también regula la extracción de oro artesanal y en pequeña escala, debido a que es considerada la mayor fuente de emisiones de mercurio a nivel mundial. Por lo que, se exige a los países afectados que elaboren planes de acción nacional para poder eliminar gradualmente el uso de mercurio en estas actividades. Relacionado a la industria, el tratado en los Art. 8 y 9, habla acerca de las emisiones a la atmósfera y liberaciones al suelo y agua. Donde establece el control obligatorio de emisiones industriales de fuentes como plantas de energía a carbón, cementeras, fundiciones, entre otras; fomentando la aplicación de mejoras técnicas disponibles (MTD) y mejores prácticas ambientales (MPA) (ONU, 2019).

Este convenio incluye el manejo de desechos y sitios de contaminación, con el fin de garantizar el almacenamiento seguro y racional de mercurio y de los residuos. Asimismo, promueve la identificación, evaluación y rehabilitación de sitios contaminados, y, cuenta con un mecanismo financiero que incluye el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) el cual actúa como una de las fuentes principales de financiamiento para ayudar a los países en desarrollo y con economías en transición para cumplir con lo descrito en el convenio (ONU, 2019).

Este es un convenio de importancia internacional, ya que, al tratarse de un tratado jurídicamente vinculante, sus disposiciones son obligatorias para los Estados que lo ratifican. Además, promueve la transparencia y cooperación internacional, así como la transferencia de tecnologías y buenas prácticas para la reducción de contaminantes. Y es gracias a este tratado, que se refuerza el establecimiento de límites máximos permisibles de mercurio en alimentos (ONU, 2019).

a. Enfermedad de Minamata

La enfermedad de Minamata es una de las tragedias medioambientales y de salud pública más graves registradas en el siglo XX, dejando a cientos de fallecidos y miles de personas con daños cerebrales graves. Fue el resultado de una intoxicación masiva, que afectó a la población de la ciudad costera de Minamata, Japón. Dicha intoxicación se presentó a causa del consumo de pescados y mariscos contaminados con metilmercurio, un compuesto tóxico liberado como desecho industrial en la producción de acetaldehído por la empresa Chisso entre 1932 y 1968. Esta enfermedad se originó a mediados de la década de 1950, cuando residentes de Minamata comenzaron a presentar síntomas neurológicos desconocidos como temblores, pérdida de coordinación, alteraciones del habla y la visión, y en algunos casos, incluso se presentaron convulsiones (Harada, 1995; ONU, 2019).

Es por esto, que la Enfermedad de Minamata es considerada una neuropatía tóxica causada por la exposición a metilmercurio. La enfermedad fue descubierta específicamente en el año 1956, cuando una niña presentó síntomas neurológicos severos como dificultad para hablar, caminar y convulsiones, lo que motivó la alerta del Hospital de la Planta de Chisso al Centro de Salud de Minamata. Aunque se reconoció oficialmente ese año, investigaciones posteriores identificaron que se presentaron casos desde 1953, lo cual

indicaba una exposición continua sin intervención efectiva. La empresa responsable de la contaminación vertía efluentes directamente a la bahía sin tratamiento, lo que causó la contaminación de peces y mariscos, alimento principal de la población local. Y apesar de que investigaciones en 1956 confirmaron que la enfermedad se trataba de una intoxicación por metilmercurio, esto fue ignorado tanto por la empresa como por las autoridades durante años. Cabe mencionar que, durante los diferentes estudios elaborados a lo largo de este caso, se llegó a identificar niveles de mercurio de hasta 706ppm en el cabello humano y más de 2,000 ppm en sedimentos del fondo de la bahía (Harada, 1995).

En general, esta es una enfermedad que se caracteriza por presentar síntomas en adultos como trastornos sensoriales, ataxia, dificultad en el habla, contracción del campo visual, temblores, pérdida de audición y sensibilidad; y en casos agudos podrían incluso provocar coma o muerte. Sin embargo, el metilmercurio además de atravesar la barrera hematoencefálica puede atravesar la placenta, por lo que las exposiciones a este compuesto en mujeres embarazadas pueden llevar a la enfermedad fetal de Minamata. Esta se caracteriza por presentar síntomas como microcefalia, parálisis, retraso mental y motor severo, reflejos primitivos y persistentes, problemas de visión y audición, hipersalivación y deformidades (Harada, 1995).

Debido a lo grave de la enfermedad y las malas prácticas de gestión de desechos por parte de la empresa involucrada. En 1973, la Corte japonesa falló a favor de las víctimas y condenó a pagar indemnizaciones millonarias. Sin embargo, para recibir una indemnización, se requería de certificación médica por parte de las autoridades para ser considerado como “víctima oficial”. Hasta 2013, únicamente 2,977 pacientes fueron oficialmente certificados, a pesar de que se estimó que más de 200,000 personas estuvieron expuesta. A pesar de los años, se han desarrollado estudios a las personas que sobrevivieron a esta tragedia, y se ha determinado que aún cuentan con niveles altos de mercurio en su organismo (IPEN, 2020).

Esta tragedia no solo afectó la salud humana, sino que también destruyó ecosistemas. Siendo uno de los eventos más alarmantes la muerte de animales como los gatos, aves y peces que morían presentando síntomas bastante similares a la de los ciudadanos intoxicados. Este caso es de gran relevancia a nivel mundial, especialmente para Japón, ya que marcó un antes y un después en la política ambiental japonesa (Takeuchi, 1977), donde, se reforzó el marco

legal con más de 14 leyes ambientales en 1970. Además, esta enfermedad dejó un legado internacional, debido a que inspiró la Convención de Minamata sobre el mercurio en 2013, un tratado internacional que busca controlar y reducir la exposición mundial a este metal pesado (Harada, 1995; ONU, 2019).

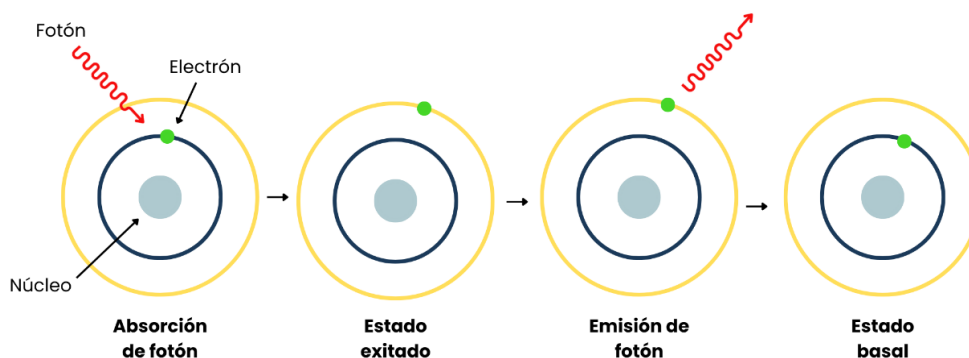
## **F. Espectroscopía de absorción atómica**

La espectroscopía atómica es una técnica analítica que se basa en la interacción que se presenta entre la radiación electromagnética y los átomos. Existen tres métodos principales de espectroscopía atómica, diferenciados según cómo se mide la interacción entre los átomos y la radiación, siendo estos: la espectroscopía de absorción atómica (AAS, por sus siglas en inglés), espectroscopía de emisión atómica (AES), y espectroscopía de fluorescencia atómica (AFS) (Skoog et al., 2015; Agilent, 2016). Esta es una técnica utilizada para la determinación tanto cuantitativa como cualitativa de más de 70 elementos y se caracteriza por su alta sensibilidad, que le permite detectar concentraciones de partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb), y en algunas ocasiones puede incluso llegar a detectar concentraciones más pequeñas (Skoog et al., 2015).

Su fundamento se basa en el principio de que cada elemento químico tiene un espectro atómico único, es decir, un conjunto específico de longitudes de onda que puede absorber o emitir. Este fenómeno se da debido a la composición de los átomos, ya que estos están formados por un núcleo que se encuentra rodeado por diferentes electrones en una estructura orbital. Cada elemento posee en su estructura un número específico de electrones asociados a su núcleo, lo que permite tener características únicas de absorción y emisión de la luz (Agilent, 2016).

Normalmente, los electrones se encuentran de forma ordenada y predecible siendo este su estado energético más bajo, también conocido como estado basal. Al aplicar energía externa moderada a los átomos, sus electrones absorben esta energía y entran momentáneamente a un estado energético mayor, también conocido como estado excitado. Dicho estado excitado corresponde al paso de un electrón de la subcapa no llena a una subcapa desocupada de mayor energía. Luego de unos nanosegundos, estos electrones excitados se relajan y vuelven a su estado basal emitiendo esta misma energía como fotones

de radiación visible o ultravioleta (Figura 6). A esta transición de electrones ya sea desde o hacia el estado basal se le conoce como transición de resonancia (Skoog et al., 2015).



**Figura 6.** Proceso de absorción y emisión de energía de un átomo

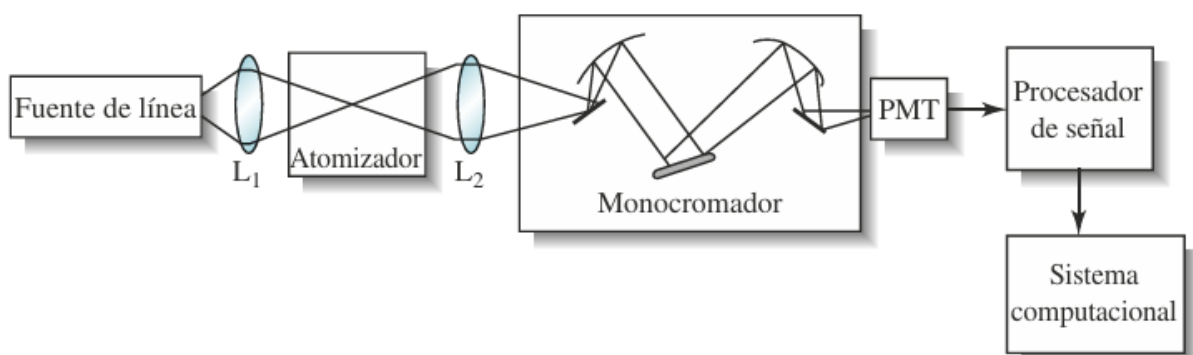
(Elaboración propia con base en PerkinElmer, 1995)

La espectroscopía de especies atómicas puede efectuarse únicamente en medio gaseoso, ya que es en este estado en el que los átomos individuales o iones elementales, como por ejemplo el  $Mg^+$  y  $Fe^+$ , se encuentran separados uno del otro. Es por esto, que el primer paso en este tipo de análisis es la atomización, donde la muestra se convierte a estos átomos o iones elementales en fase gaseosa. En el caso de la espectroscopía de absorción atómica, se utilizan atomizadores como flama o electrotérmico (Skoog et al., 2015).

Hablando específicamente acerca de la AAS, hoy en día es uno de los métodos analíticos más utilizados, debido a que se considera simple, eficiente y de bajo costo. Por lo que, se utiliza ampliamente para análisis biológicos, ambientales, alimentarios, farmacéuticos, entre otros. Esta técnica se utilizó por primera vez en 1955 en Australia y Países Bajos, y no fue hasta 1959, que se introdujo el primer espectrómetro de absorción atómica comercial (Skoog et al., 2015).

Esta técnica, se basa en la medición de la cantidad de luz absorbida por los átomos en estado gaseoso al pasar por ellos un haz de luz de una longitud de onda específica. Por lo que, en un análisis por AAS (Figura 7), la muestra con el analito primero pasa por un atomizador ya sea de flama o electrotérmico que la descompone en átomos libres en estado, posteriormente una lámpara de cátodo hueco emite luz específica para el elemento objetivo. Esta luz es absorbida por los átomos de la muestra, a medida que el rayo producido por la fuente de luz los atraviesa. Luego, el rayo de luz resultante pasa por un monocromador que

se encarga de aislar la longitud de onda deseada para poder disminuir la interferencia de la medición. Una vez se tiene únicamente la longitud de onda deseada, pasa por un tubo fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés) que la convierte en una señal eléctrica que es procesada y dirigida hacia un sistema computacional que recopila y muestra los datos obtenidos (Skoog et al., 2015; Torontech, 2025).



**Figura 7.** Diagrama de bloque espectrómetro *de* absorción atómica de un solo haz (Skoog et al., 2015)

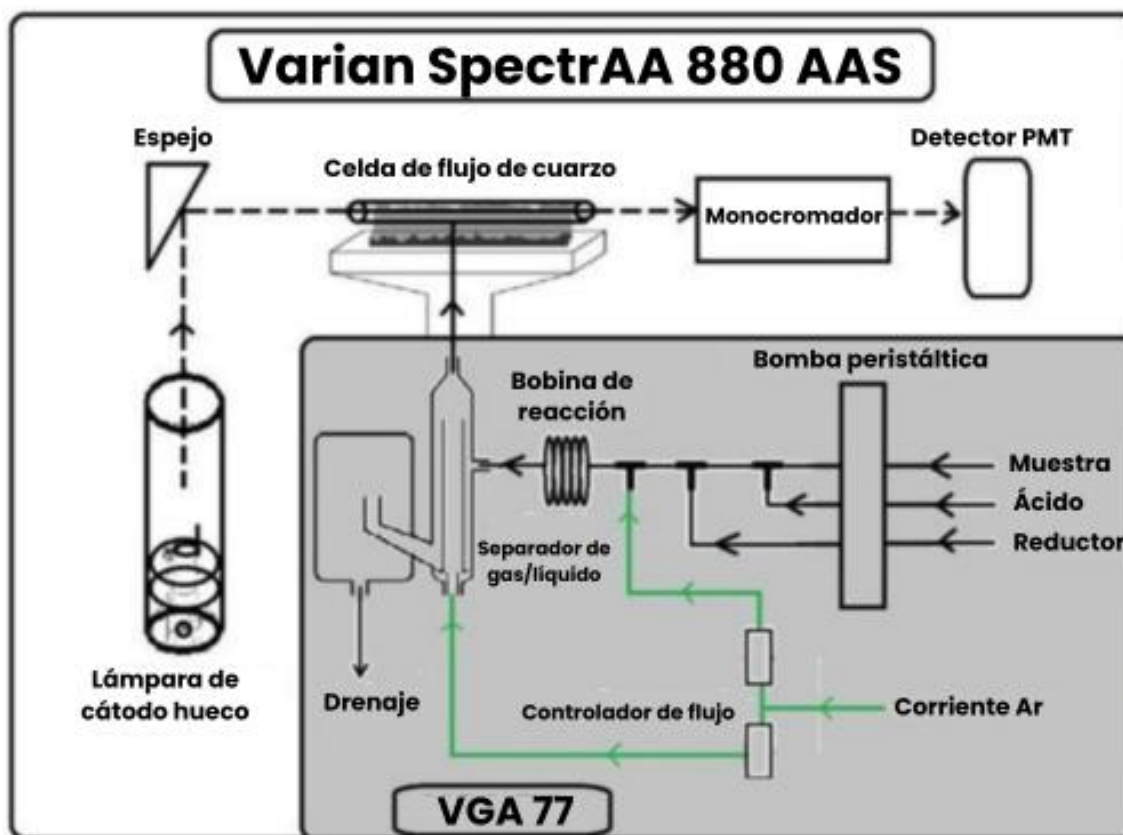
La AAS se basa en el principio de la Ley de Beer-Lambert, que establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración del analito, es decir, que la cantidad de luz absorbida es proporcional a la cantidad de átomos que pasaron de su estado basal a su estado excitado. Esta relación permite cuantificar de manera precisa el analito en la muestra (Skoog et al., 2015).

### **1. Espectroscopía de absorción atómica con vapor frío**

La espectroscopía de absorción atómica con vapor frío (CV-AAS, por sus siglas en inglés), es una técnica especializada para compuestos volátiles. Por lo que, se utiliza principalmente para la determinación de mercurio, debido a que este elemento se caracteriza por ser altamente volátil a temperatura ambiente (Skoog et al., 2015).

La CV-AAS es una variante de la AAS, que utiliza una técnica que en lugar de utilizar técnicas de atomización como la llama y los vaporizadores electrotérmicos, utiliza una técnica de generación de vapor, que le permite llevar el mercurio elemental ( $\text{Hg}^0$ ) a fase gaseosa, sin necesidad de calor intenso. Luego, se mide la absorción de la radiación electromagnética que presentan los átomos de mercurio que se encuentran en fase gaseosa (Skoog et al., 2015).

Es importante considerar que esta técnica requiere de una preparación cuidadosa de la muestra, incluyendo una digestión ácida previa que permita que el mercurio total en la muestra se presente como  $\text{Hg}^{2+}$ . Este mercurio es posteriormente reducido químicamente a  $\text{Hg}^0$ , mediante un agente reductor que normalmente es cloruro de estaño ( $\text{SnCl}_2$ ) o borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) (Skoog et al., 2015). El mercurio elemental generado es volátil mediante la atomización con vapor frío y es liberado en forma de gas. Este vapor de mercurio es transportado mediante flujo de gas portador hacia una celda de absorción, donde se emplea una lámpara de cátodo hueco específica para Hg, con una longitud de onda típica de 253.7 nm, la concentración de mercurio se determina, en relación con la cantidad de luz absorbida por el vapor de mercurio que es directamente proporcional a su concentración en la muestra. Este método se caracteriza por ser altamente sensible, permitiendo hacer mediciones de hasta 0.02 ppb o incluso menos, lo que lo hace superior a la de (FAAS) y (GFAAS) (Skoog et al., 2015; Mohhamed, 2018).



**Figura 8.** Espectrómetro de absorción atómica con vapor frío (CV-AAS)  
(Traducido al español de Mohhamed, 2018)

## **2. Digestión asistida por microondas**

La digestión asistida por microondas es un método de preparación de muestras que se caracteriza por utilizar radiación electromagnética para calentar rápidamente las muestras en presencia de ácidos, dentro de recipientes sellados y resistentes a alta presión. Este proceso se encarga de acelerar la descomposición de matrices complejas, como lo son suelos, tejidos biológicos, alimentos entre otro, para poder convertirlos en soluciones homogéneas aptas para el análisis elemental (EPA, 2015; Skoog et al., 2015).

Esta es una técnica moderna y eficiente que es ampliamente utilizada para la preparación de muestras en una forma adecuada para su posterior análisis en técnicas como la espectroscopía de absorción atómica o ICP-MS. La digestión asistida por microondas utiliza radiación electromagnética de alta frecuencia, siendo esta normalmente de 2.45 GHz. Como se mencionó anteriormente, esta técnica utiliza recipientes cerrados a alta presión, lo que mejora significativamente la digestión ácida tradicional al permitir alcanzar temperaturas y presiones más altas, minimizando pérdidas por volatilización que es crucial en elementos como el mercurio. Siendo también más seguro para el analista, al evitar la liberación de vapores tóxicos al medio ambiente, durante la digestión (Skoog et al., 2015; Müller et al., 2014).

Para la implementación de esta técnica la muestra se coloca en un recipiente cerrado junto con uno o varios ácidos digestivos como el ácido nítrico, clorhídrico o peróxido de hidrógeno, dependiendo de la muestra a descomponer. Luego se introduce a un sistema de digestión por microondas, donde las microondas generadas interactúan con los dipolos de las moléculas, generando calor por fricción molecular. En este proceso, se alcanzan temperaturas elevadas y presión controlada, que acelera la descomposición de la matriz (Müller et al., 2014; EPA, 2015).

## IV. MARCO METODOLÓGICO

### A. Objetivos

#### 1. Objetivo general

- a. Evaluar la presencia de mercurio en atún enlatado comercializado en la ciudad de Guatemala.
- b. Generar información científica que contribuya a la evaluación del riesgo toxicológico derivado de la ingesta de atún enlatado que se comercializa en supermercados.

#### 2. Objetivos específicos

- a. Cuantificar la concentración de mercurio total presente en latas de atún en agua comercializados en supermercados de la ciudad de Guatemala, mediante espectroscopía de absorción atómica con vapor frío.
- b. Establecer si los valores cuantificados de mercurio en atún enlatado en agua se encuentran dentro del límite permitido para atún, según el Reglamento (UE) 2023/915 de la Unión Europea y el Codex Alimentarius.
- c. Comparar las concentraciones de mercurio en atún enlatado en agua entre diferentes marcas comerciales y números de lote, a fin de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas.

### B. Hipótesis

#### Hipótesis 1: Cuantificación de mercurio en atún enlatado

**H<sub>a</sub>:** La concentración de mercurio en atún enlatado en agua comercializado en supermercados en el municipio de Guatemala cumple el límite de 1mg/kg establecido en el Reglamento (UE) 2023/915 de la Unión Europea y el Codex Alimentarius.

**H<sub>0</sub>:** La concentración de mercurio en atún enlatado en agua comercializado en supermercados en el municipio de Guatemala no cumple el límite de 1mg/kg establecido en el Reglamento (UE) 2023/915 de la Unión Europea y el Codex Alimentarius.

## Hipótesis 2: Comparación de concentraciones de mercurio entre diferentes marcas

**H<sub>a</sub>:** Existen diferencias significativas en la concentración de mercurio en atún enlatado en agua entre las diferentes marcas comercializadas en supermercados del municipio de Guatemala.

**H<sub>0</sub>:** No existen diferencias significativas en la concentración de mercurio en atún enlatado en agua entre las diferentes marcas comercializadas en supermercados del municipio de Guatemala.

### C. Variables

*Cuadro 1.* Variables de estudio

Variable	Definición	Naturaleza	Nivel de medición	Codificación
<b>Concentración de mercurio</b>	Nivel de mercurio detectado en las muestras de atún enlatado en agua, determinado mediante espectroscopia de absorción atómica con vapor frío.	Cuantitativa	Continua	mg/kg
<b>Marca comercial del atún enlatado</b>	Marca bajo la cual se comercializa el atún enlatado en agua	Cualitativa	Nominal	Nombre de marca
<b>País de origen/ Lugar de fabricación</b>	Nombre del país en el cual se fabrica la lata de atún en agua de cada una de las marcas	Cualitativa	Nominal	País

## **D. Población**

La población estuvo integrada por las unidades de atún enlatado en agua, de diferentes marcas comerciales, que se encontraban disponibles para la venta en supermercados de la ciudad de Guatemala.

## **E. Muestra**

La muestra estuvo constituida por latas de atún en agua de cinco marcas comerciales, adquiridas en sucursales de cinco supermercados ubicados en la ciudad de Guatemala. Se seleccionaron cinco latas pertenecientes a cinco lotes diferentes para cada una de las marcas consideradas dentro de la investigación. La selección de la muestra se efectuó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia. Las muestras se codificaron con una letra y un número, donde las letras representaron la marca analizada (A – E) y el número correspondió al lote de dicha marca (1 – 5).

## **F. Procedimiento**

### **1. Revisión bibliográfica y elaboración del programa**

Como parte fundamental en la construcción del procedimiento, se llevó a cabo una revisión bibliográfica amplia y sistemática. Para ello se realizaron búsquedas en internet utilizando principalmente revistas científicas y bases de datos académicas especializadas en toxicología, química analítica y seguridad alimentaria. El objetivo de esta revisión fue identificar antecedentes relacionados con la determinación de mercurio en productos marinos y, particularmente, en atún. Durante este proceso se localizaron estudios realizados en Guatemala que abordan la presencia de metales pesados en especies acuáticas. De igual forma, se consultaron investigaciones desarrolladas en distintas partes del mundo.

Se buscaron de trabajos enfocados en la cuantificación de mercurio en atún enlatado, utilizando absorción atómica de vapor frío como herramienta principal para su determinación. Dichos estudios constituyeron una base metodológica sólida para identificar parámetros críticos del análisis. A partir de esta recopilación y análisis, se establecieron las directrices necesarias para la construcción del procedimiento experimental, lo cual derivó en la elaboración del programa de investigación.

## **2. Registro de las muestras**

Para asegurar la correcta trazabilidad y control de cada una de las muestras analizadas durante el proyecto, se utilizó una boleta de registro individual por muestra (Anexo 1). Esta boleta permitió documentar de forma estandarizada la información esencial, incluyendo la marca comercial del atún y número de lote (según codificación interna), país de producción, fecha de caducidad, peso en gramos de la muestra escurrida (previo al secado) y peso en gramos de la muestra posterior al proceso de secado, y la ubicación en la que fue adquirida la muestra. Además, se incluyó un espacio para observaciones relevantes respecto al estado del producto o condiciones particulares del envase. Las boletas se llenaron en el momento de la preparación de la muestra y acompañaron física o digitalmente a cada una durante todo el proceso de análisis, lo que garantizó la identificación precisa, la organización sistemática de los datos, y la posibilidad de verificar o replicar los resultados obtenidos en cada etapa del estudio.

## **3. Preparación de la muestra**

Antes de iniciar con la preparación de la muestra, un día antes de realizar el proceso de digestión, se lavó toda la cristalería que se utilizó con HNO<sub>3</sub> 10 % v/v, se enjuagó con agua ultrapura, se secó y se almacenó protegido del polvo (Nascimento et al., 2012).

Se abre cada una de las latas y posteriormente se retira todo el contenido de agua presente en las mismas. Una vez retirada el agua, se seca en un horno de laboratorio a 70 °C por 24 horas. Una vez terminado este tiempo, se tritura la muestra seca para homogenizarla.

La muestra homogeneizada se sometió a una digestión ácida. Para dicho proceso, se pesó aproximadamente 1g de la muestra homogeneizada en un tubo de digestión en horno microondas. A dicho tubo se añade 5 ml de ácido nítrico 2 N, se sella y coloca dentro del sistema de digestión de microondas. La digestión se ejecuta mediante cinco etapas descritas en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Digestión de la muestra asistida por microondas

<b>Paso</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
<b>1</b>	170	10
<b>2</b>	170	15
<b>3</b>	75	10
<b>4</b>	75	1
<b>5</b>	75	1

Una vez se obtiene una disolución completa, se deja enfriar y se transfiere con cuidado, efectuando lavados, a un balón aforado de 25 ml, donde se lleva al aforo con agua ultrapura . Al alcanzar el aforo, se homogeneiza agitando (Nascimento et al., 2012).

Posterior a esto, se tomó una alícuota de 5ml de esta solución la cual se transfirió a un balón aforado de 10ml, donde se añadieron 5ml de una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HNO<sub>3</sub> 1.5 % v/v, 1 gota de octanol y 2 gotas de permanganato de potasio 5 % v/v. Esta solución fue utilizada para su posterior lectura en el equipo de absorción atómica.

#### **4. Preparación del blanco**

Para el blanco, se lleva a cabo el mismo procedimiento de digestión utilizando 5ml de agua ultrapura, solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HNO<sub>3</sub> 1.5 % v/v, 1 gota de octanol y 2 gotas de Permanganato de potasio 5 % v/v. Una vez fría la solución, se procede a trasvasar y aforar con agua ultrapura a la marca de 25 ml (Nascimento et al., 2012).

#### **5. Elaboración de la curva de calibración**

A partir de una solución *stock* comercial de 1000 mg/L, se prepara una solución madre de 1 mg/L, agregando una alícuota de 250 µl de solución *stock* a un balón aforado de 25 ml, posteriormente se afora a la marca con agua ultrapura.

A partir de la solución madre, se prepararon soluciones patrón en balones aforados de 10ml, donde se agregaron las alícuotas adecuadas (Cuadro 3) de solución madre para obtener concentraciones de 5 ppb, 10 ppb, 20 ppb y 40 ppb. Además, se añadió en cada uno de los balones 5ml de agua ultrapura, 5ml de solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HNO<sub>3</sub> 1.5 % v/v, 1 gota de octanol y 2 gotas de permanganato de potasio 5 % v/v. Una vez agregada la alícuota y los demás reactivos en cada uno de los balones, se aforó con agua ultrapura (»5 ml).

**Cuadro 3.** Preparación de soluciones para elaboración de la curva de calibración

<b>Concentración de mercurio en solución hija (ppb)</b>	<b>Volumen de solución madre de mercurio (<math>\mu</math>L)</b>
5	50
10	100
20	200
40	400

(Nascimento et al., 2012)

## **6. Determinación de mercurio mediante absorción atómica de vapor frío (CVAAS) con accesorio VGA**

La determinación de mercurio total se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica PinAAcle 900T de Perkin Elmer, equipado con un generador de hidruros y vapor frío. Primero, se encendió el gas de arrastre, en este caso argón. Se colocó en cada uno de los tubos capilares de teflón las siguientes soluciones: Solución reductora  $\text{SnCl}_2$  (20 % p/v en  $\text{HCl}$  20 %), Agua ultrapura (Mili-Q), y solución de enjuague  $\text{HNO}_3$  10 %.

Posteriormente, se encendió el accesorio VGA y bomba peristáltica, ajustando el flujo de aspirado de muestra de entre 6 – 8 ml/min y de la solución reductora de 0.8 – 1.2 ml/min. Se dejó correr el sistema durante 10 minutos para limpiar las líneas y estabilizar la señal.

Una vez estabilizada la señal, se preparó la curva de calibración utilizando estándares con concentraciones de 10, 20, 30 y 40 ppb de mercurio. Las lecturas se realizaron a una longitud de onda de 253.65 nm, midiendo la absorbancia de cada estándar del más concentrado al menos concentrado. Posteriormente se analizaron las muestras aspirando una alícuota de la solución digerida y diluida, obteniendo resultados expresados en ppb de mercurio total (Gaitán, 2023; UNEP, 2020).

## **7. Manejo y disposición de desechos con mercurio**

Una vez concluido el análisis, toda la cristalería que haya estado en contacto con mercurio se colocó durante 24 horas en un recipiente de plástico que contenía una solución jabonosa. Previamente, cada pieza se enjuagó primero con agua del grifo y posteriormente con agua desmineralizada.

Tras este paso inicial, la cristalería se sometió a un tratamiento en solución de ácido nítrico concentrado al 50 % (v/v) durante un período mínimo de dos horas. Los residuos generados se depositaron en el contenedor destinado para desechos ácidos y, a continuación, se realizó al menos cuatro enjuagues con agua desmineralizada.

Posteriormente, los recipientes se transfirieron a una solución de ácido clorhídrico concentrado al 10 % y se mantuvieron en ella durante dos horas a temperatura ambiente, para luego repetir nuevamente el enjuague con agua desmineralizada al menos cuatro veces. Los residuos generados en esta etapa se gestionaron adecuadamente en el envase de desechos para ácidos (Gaitán, 2023).

a. Manejo final de desechos con mercurio

En las empresas encargadas del manejo final de residuos que contienen mercurio se implementa un protocolo de gestión ambiental que inicia con la caracterización exhaustiva del residuo, con el fin de determinar el tipo de mercurio contenido en el desecho. Una vez caracterizado, se prioriza la recuperación del mercurio elemental cuando es viable, a través de recuperación térmica en circuito cerrado con captura condensada (UNEP/Convenio de Minamata, 2019). Por otro lado, los residuos que no son recuperables pasaron por un proceso de estabilización / solidificación (S/S) o una conversión química previa, como por ejemplo la sulfidación para formar HgS (Piao & Bishop, 2006). Luego de la conversión química se realiza un encapsulado en una matriz inorgánica o polimérica adecuada, con el objetivo de minimizar la solubilidad y volatilidad del mercurio (Lee et al., 2011; EPA, 1999).

Cabe mencionar que todos los procesos térmicos y de curado se llevaron a cabo en sistemas cerrados con control y tratamiento de emisiones, utilizando equipos como condensadores, trampas y adsorbentes de carbón activado o bien, sistemas de captura de sulfuros. Esto tiene el fin de evitar la liberación de Hg elemental o emisiones de H<sub>2</sub>S (EPA, 1999).

Finalmente, el producto estabilizado se dispone en instalaciones que se encuentran especialmente diseñadas para residuos peligrosos, que contienen rellenos con barras geológicas o geomembranas, o bien cuentan con un diseño especial para un almacenamiento permanente. Todas estas instalaciones debían cumplir con ciertas normativas mediante distintos ensayos como los de lixiviación y pruebas de emisiones y durabilidad. Asimismo,

se lleva a cabo una vigilancia ambiental post-disposición para mantener un monitoreo constante de lixiviados y aire (UNEP, 2021).

## **G. Diseño de la investigación**

El presente estudio fue de tipo mixto, teniendo un enfoque cualitativo y cuantitativo. El enfoque cualitativo, se debe a la recopilación de información y caracterización de la muestra. Mientras que el enfoque cuantitativo de tipo experimental aplicado se centró en la determinación de la concentración de mercurio en muestras de atún enlatado en agua comercializadas en supermercados de la ciudad de Guatemala, empleando como técnica instrumental, la espectroscopía de absorción atómica con vapor frío. Posteriormente se llevó a cabo un análisis comparativo inferencial, con la finalidad de establecer diferencia significativa entre distintas marcas y determinar si los valores de mercurio se encontraban dentro de los límites establecidos por la UE y el Codex Alimentarius. Es importante mencionar que la presente investigación constituyó un análisis preliminar para la determinación de mercurio en latas de atún.

## **H. Análisis estadístico**

Posterior al análisis de mercurio en las diferentes latas de atún, se tabularon los datos en un documento de Microsoft Excel, donde se inició con un análisis descriptivo, para examinar la distribución de las concentraciones de mercurio en las muestras de atún enlatado en agua. Se calcularon medidas como la media, mediana, desviación estándar, así como valores mínimo y máximo para cada marca evaluada, lo que permitió visualizar tendencias generales y variabilidad entre productos.

Para evaluar el cumplimiento de la normativa vigente con relación al límite máximo de mercurio (1 mg/kg) establecido por el Reglamento (UE) 2023/915 y el Codex Alimentarius, se aplicó una prueba no paramétrica (Wilcoxon) para una muestra, apropiada para una muestra pequeña y en ausencia de parámetros poblacionales conocidos.

Además, con el fin de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las distintas marcas de atún enlatado, se utilizó una prueba de Kruskal-Wallis, utilizando un nivel de significancia del 95 % ( $p < 0.05$ ), para determinar una diferencia

significativa entre las muestras analizadas. Posteriormente se aplicó una prueba de Dunn para determinar cuáles eran las muestras que presentaban una variación significativa. Esta prueba permitió identificar si la marca influye en la variación de las concentraciones de mercurio detectadas.

## V. MARCO OPERATIVO

### A. Recolección y tratamiento de datos

Los datos se obtuvieron a través del software del Espectrofotómetro de absorción atómica PinAAcle 900T. Dichos datos se analizaron a través del programa Microsoft Excel con un análisis estadístico inferencial que se basó en pruebas de hipótesis para determinar el cumplimiento del límite de mercurio según la UE y el Codex Alimentarius. Además, se aplicó un prueba de Kruskal-Wallis y posteriormente una prueba de Dunn para identificar si la marca influye en la variación de las concentraciones de mercurio detectadas.

### B. Recursos

#### 1. Recursos humanos

Autora: Ester Alejandra Bermúdez Cortez

Asesora: MSc. Carolina Guzmán Quilo

Revisora: MSc. Ana Luisa Mendizábal

Asesora estadística: Ing. Denise Pemueler

#### 2. Recursos materiales

##### a. Equipo

- Espectrofotómetro de absorción atómica PinAAcle 900T de Perkin Elmer con accesorio de generación de hidruros y vapor frío.
- Microondas Berghof DAP-60k
- Balanza Analítica Ohaus
- Horno de Laboratorio Binder
- Campana de extracción

##### b. Materiales y cristalería de laboratorio

- Espátulas
- Guantes

- Pizetas
- Balones aforados
- Pipetas volumétricas
- Beakers
- Probetas graduadas
- Pipetas graduadas
- Micropipeteador

### 3. Recursos institucionales

- Laboratorio de Química Avanzada, Departamento de Química, Facultad de Ciencias y Humanidades, Universidad del Valle de Guatemala
- Centro de Información y Asesoría Toxicológica (CIAT), Departamento de Toxicología, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala

## C. Aspecto económico

*Cuadro 4.* Aspectos económicos de la investigación

Material	Costo unitario por muestra	Costo total
Análisis de mercurio por espectrómetro de absorción atómica con vapor frío	Q 200.00 *	Q 3,000.00
Internet	—	Q 1,000.00
Uso de computadora, teléfono celular	—	Q 4,000.00
Libretas, lapiceros	—	Q 30.00
Transporte	—	Q 1,500.00
Muestras de latas de atún en agua (marca A, B, C, D y E)	Marca A	Q 22.20
	Marca B	Q 16.30
	Marca C	Q 17.70
	Marca D	Q 15.45
	Marca E	Q 12.95
<b>Total</b>		<b>Q 9,783.80</b>

El financiamiento para la elaboración de este estudio estará a cargo de la autora y las instituciones mencionadas

\*Tarifa para estudiantes en proyectos de investigación (CIAT)

## VI. RESULTADOS

**Cuadro 5.** Concentración de mercurio en atún enlatado en agua

Muestra de atún enlatado	Concentración de Hg en atún seco (mg/kg)	Concentración de mercurio en atún húmedo (mg/kg)
<b>A</b>	$0.5296 \pm 0.0439$	$0.1427 \pm 0.0113$
<b>B</b>	$0.0511 \pm 0.0440$	$0.0137 \pm 0.0104$
<b>C</b>	$0.7443 \pm 0.0525$	$0.1902 \pm 0.0129$
<b>D</b>	$0.0991 \pm 0.0580$	$0.0283 \pm 0.0160$
<b>E</b>	$0.3411 \pm 0.0394$	$0.0936 \pm 0.0093$

En el cuadro se presenta la concentración media de mercurio (Hg), expresada en mg/kg, para cada una de las muestras analizadas. Los resultados se muestran tanto para el atún en su presentación original (húmeda) como después del proceso de secado.

**Cuadro 6.** Estadística descriptiva para la concentración de mercurio en atún enlatado en agua (peso húmedo)

Muestra	Desviación estándar (mg/kg)	Coeficiente de variación	Intervalo de confianza (mg/kg)
<b>A</b>	0.0575	40.0 %	$0.0714 \leq \mu \leq 0.2141$
<b>B</b>	0.0045	33.0 %	$0.0082 \leq \mu \leq 0.0193$
<b>C</b>	0.0509	27.0 %	$0.1269 \leq \mu \leq 0.2534$
<b>D</b>	0.0101	36.0 %	$0.0157 \leq \mu \leq 0.0408$
<b>E</b>	0.0223	24.0 %	$0.0659 \leq \mu \leq 0.1214$

En el cuadro se presenta la estadística descriptiva de la concentración de mercurio (Hg), expresada en mg/kg, correspondiente a cada una de las muestras analizadas. Los resultados se expresan respecto al valor medio de la concentración de Hg en el atún en su presentación húmeda, descrito en el Cuadro 5.

**Cuadro 7.** Estadística descriptiva para la concentración de mercurio en atún enlatado en agua (peso seco)

Muestra	Desviación estándar (mg/kg)	Coeficiente de variación	Intervalo de confianza (mg/kg)
<b>A</b>	0.2424	47.8 %	$0.2286 \leq \mu \leq 0.8306$
<b>B</b>	0.0197	38.5 %	$0.0267 \leq \mu \leq 0.0755$
<b>C</b>	0.2347	31.5 %	$0.4553 \leq \mu \leq 1.0357$
<b>D</b>	0.0370	37.3 %	$0.0532 \leq \mu \leq 0.1451$
<b>E</b>	0.0608	17.8 %	$0.2656 \leq \mu \leq 0.4166$

En el cuadro se presenta la estadística descriptiva de la concentración de mercurio (Hg), expresada en mg/kg, correspondiente a cada una de las muestras analizadas. Los resultados se expresan respecto al valor medio de la concentración de Hg en el atún en su peso seco, descrito en el Cuadro 5.

**Cuadro 8.** Resultados estadísticos obtenidos de la Prueba de Wilcoxon para una muestra

Muestra	W estadístico	W <sub>crit, α=0.05</sub>	Hipótesis	Conclusión
A	0	0	H <sub>0</sub> : mediana ≥ 1 mg/kg H <sub>a</sub> : mediana < 1 mg/kg	Se rechaza hipótesis nula
B	0	0	H <sub>0</sub> : mediana ≥ 1 mg/kg H <sub>a</sub> : mediana < 1 mg/kg	Se rechaza hipótesis nula
C	0	0	H <sub>0</sub> : mediana ≥ 1 mg/kg H <sub>a</sub> : mediana < 1 mg/kg	Se rechaza hipótesis nula
D	0	0	H <sub>0</sub> : mediana ≥ 1 mg/kg H <sub>a</sub> : mediana < 1 mg/kg	Se rechaza hipótesis nula
E	0	0	H <sub>0</sub> : mediana ≥ 1 mg/kg H <sub>a</sub> : mediana < 1 mg/kg	Se rechaza hipótesis nula

En el cuadro se presenta el W estadístico obtenido del análisis individual de los datos de cada una de las muestras evaluadas, dicho valor está siendo comparado con el W crítico para una muestra de 5 datos y un valor de  $\alpha$  de 0.05. Dado que  $W_{est} \leq W_{crit}$ , se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que todas las muestras cumplen con el límite permitido de Hg en atún (1mg/kg).

**Cuadro 9.** Resultados estadísticos obtenidos de la Prueba de Kruskal Wallis

Valor H	Valor - p	$\alpha$	Hipótesis	Conclusión
21.12	0.0002998	0.05	H <sub>0</sub> : Todas las poblaciones son iguales H <sub>a</sub> : No todas las poblaciones son iguales	Se rechaza hipótesis nula

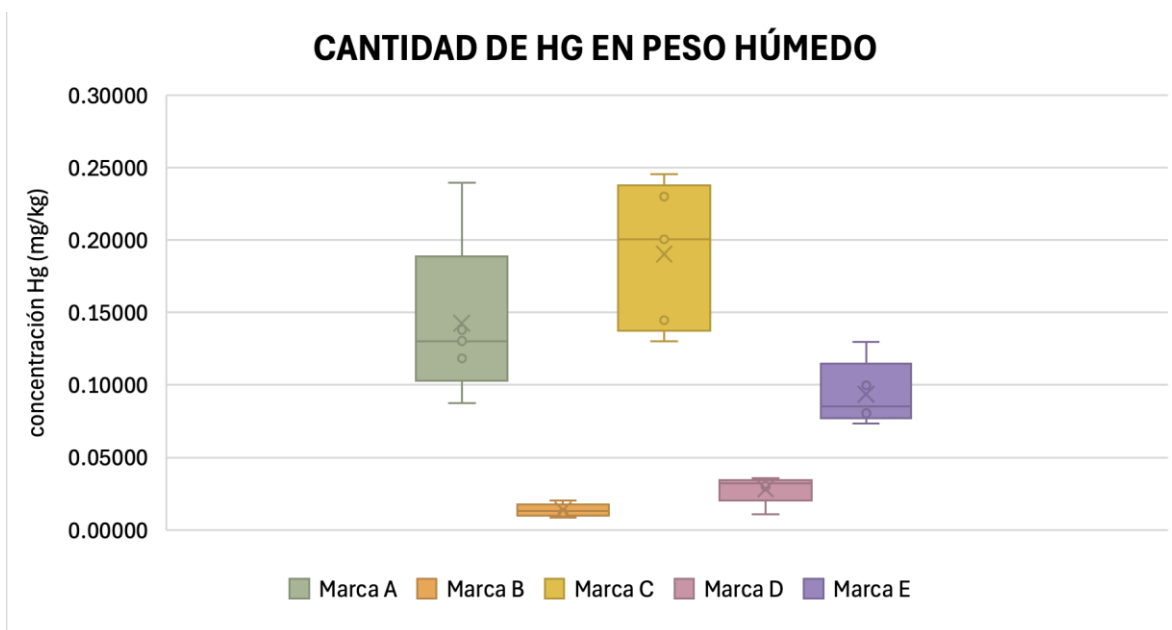
En el cuadro se presenta el H estadístico obtenido del análisis de los datos obtenidos para la concentración de Hg en atún en su peso húmedo, así como el valor - p correspondiente a 24 grados de libertad y un valor  $\alpha$  de 0.05. Dado que  $0.0006769 < 0.05$  se rechaza la hipótesis nula. Por lo que, se puede indicar que existe una diferencia significativa en la concentración de mercurio entre las marcas evaluadas.

**Cuadro 10.** Resultados estadísticos obtenidos de la Prueba de Dunn

Comparación	Q	Q <sub>crítico</sub>	Hipótesis	Conclusión
A y B	3.13658	2.807	H <sub>0</sub> : A = B H <sub>a</sub> : A ≠ B	Se rechaza hipótesis nula
A y C	0.7734	2.807	H <sub>0</sub> : A = C H <sub>a</sub> : A ≠ C	No se rechaza hipótesis nula
A y D	2.40615	2.807	H <sub>0</sub> : A = D H <sub>a</sub> : A ≠ D	No se rechaza hipótesis nula
A y E	1.03121	2.807	H <sub>0</sub> : A = E H <sub>a</sub> : A ≠ E	No se rechaza hipótesis nula
B y C	3.90999	2.807	H <sub>0</sub> : B = C H <sub>a</sub> : B ≠ C	Se rechaza hipótesis nula
B y D	0.73044	2.807	H <sub>0</sub> : B = D H <sub>a</sub> : B ≠ D	No se rechaza hipótesis nula

<b>B y E</b>	2.10537	2.807	H <sub>0</sub> : B = E H <sub>a</sub> : B ≠ E	No se rechaza hipótesis nula
<b>C y D</b>	3.17955	2.807	H <sub>0</sub> : C = D H <sub>a</sub> : C ≠ D	Se rechaza hipótesis nula
<b>C y E</b>	1.80461	2.807	H <sub>0</sub> : C = E H <sub>a</sub> : C ≠ E	No se rechaza hipótesis nula
<b>D y E</b>	1.37494	2.807	H <sub>0</sub> : D = E H <sub>a</sub> : D ≠ E	No se rechaza hipótesis nula

En el cuadro se presenta el Q estadístico obtenido para cada una de las comparaciones realizadas entre las diferentes marcas analizadas. Asimismo, se presenta el Q crítico correspondiente a 5 grupos y un  $\alpha$  0.05. Se rechazó la hipótesis nula en aquellos casos en los que el Q calculado superaba el Q crítico descrito.



**Figura 9.** Comparación de la concentración de mercurio en peso húmedo entre muestras de atún enlatado

## VII. DISCUSIÓN

La presencia de mercurio en los peces constituye un tema de gran relevancia ambiental sanitaria debido a su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica acuática. Los peces de gran tamaño y vida prolongada, como lo es el atún, tienden a presentar concentraciones más elevadas de este metal, principalmente en su forma inorgánica, el metilmercurio, la cual posee una alta toxicidad y biodisponibilidad (Beckers y Rinklebe, 2017; Lehnerr, 2014). La exposición humana al mercurio ocurre a través del consumo de pescado contaminado, y su ingesta excesiva se ha asociado con efectos adversos en el sistema nervioso central, el desarrollo neurológico en niños y alteraciones en los sistemas cardiovascular y renal (ATSDR, 2022; OPS, 2012; WHO, 2021). Por esta razón, la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) (2019), sugiere limitar el consumo de especies con alto contenido de mercurio, especialmente en niños y mujeres embarazadas. Asimismo, establece un límite de 120 gramos de especies con alto contenido de mercurio, como el atún y el tiburón, al mes para niños entre 10 – 14 años. Y un límite de 3 – 4 raciones ( $\approx 125$  g c/u) para la población en general (Anexo 3).

La presente investigación tuvo como objetivo cuantificar el contenido de mercurio en muestras de atún enlatado en agua, con el propósito de determinar si cinco marcas comercializadas en supermercados del departamento de Guatemala, cuyos ingredientes fueran exclusivamente atún, agua y sal, cumplen con los estándares establecidos en normativas internacionales como el Reglamento UE 2023/915 y el Codex Alimentarius. En dichas normativas se establece un límite de 1 mg/kg de mercurio en peces de gran tamaño como el atún, con el fin de proteger la salud del consumidor. En el contexto guatemalteco, aún no se cuenta con normativas específicas que regulen de manera estricta la contaminación con este metal pesado, por lo que, podríamos estar más expuestos a altas concentraciones de mercurio en nuestra dieta.

En la actualidad, el atún enlatado constituye un alimento de consumo habitual en Guatemala, ya que representa una fuente accesible y práctica de proteínas y nutrientes esenciales dentro de una dieta balanceada. No obstante, esta investigación busca responder a

la interrogante de si las marcas de atún enlatado en agua disponibles en el mercado guatemalteco cumplen efectivamente con el límite máximo de 1 mg/kg de mercurio, establecido para prevenir efectos adversos asociados a su consumo excesivo y salvaguardar la salud de los consumidores.

Se recopilaron cinco latas de lotes de producción distintos para cada una de las marcas evaluadas. Cada lata paso por un proceso de secado en horno a 70 grados centígrados por 24 horas, posteriormente fue macerada y envasada con su respectiva boleta de muestra que aseguró trazabilidad durante toda la investigación. Estas muestras fueron digeridas con microondas y analizadas mediante CV–AAS en espectrofotómetro marca Perkin Elmer con accesorio de VGA obteniendo así la cantidad de mercurio en mg/kg de las muestras secas y en su peso húmedo (Cuadro 5).

La Figura 9 muestra la distribución de las concentraciones de mercurio (Hg) en peso húmedo para las cinco marcas de atún enlatado analizadas. De forma general, se observa que todas las muestras presentan valores de concentración muy inferiores al límite máximo permitido de 1 mg/kg establecido por la Regulación (UE) 2023/915 y el Codex Alimentarius, lo cual confirma que los productos evaluados son seguros para el consumo humano en cuanto al contenido de mercurio.

En el Cuadro 5, los valores medios de concentración de Hg en peso húmedo oscilaron entre  $0.0137 \pm 0.0104$  mg/kg (Marca B) y  $0.1902 \pm 0.0129$  mg/kg (Marca C), con una tendencia similar en el peso seco, donde las concentraciones variaron entre  $0.0511 \pm 0.0440$  mg/kg y  $0.7443 \pm 0.0525$ , respectivamente. Esta diferencia entre peso húmedo y seco se debe a la pérdida de agua durante el proceso de secado, lo que concentra proporcionalmente el contenido de metal. Comparadas con el límite máximo permitido de 1 mg Hg/kg establecido para especies de gran tamaño como el atún, se puede afirmar que todas las muestras analizadas cumplen con dicho límite. Así lo confirman los análisis de la prueba de Wilcoxon unilateral de cola derecha para una muestra pequeña de  $n=5$ , en la que para cada marca se rechazó la hipótesis nula de que la mediana  $\geq 1$  mg/kg ( $W = 0$ ,  $W_{crit} = 0$ ,  $\alpha = 0,05$ ) lo que indica que la mediana es significativamente menor al límite de 1 mg/kg en cada caso. Se acepta así, la hipótesis alternativa la cual establece que “la concentración de mercurio en atún enlatado en agua comercializado en supermercados del municipio de Guatemala cumple el

límite de 1 mg/kg”. Esto es de gran importancia ya que estos resultados sugieren que al menos para el conjunto de marcas analizadas, el mercado guatemalteco presenta latas de atún enlatado en agua cuyas concentraciones de mercurio están por debajo del umbral regulatorio.

Sin embargo, a pesar de que todas las marcas cumplen con el límite permitido, no precisamente implica que el riesgo para la salud sea nulo, ya que, esto va de la mano con los diferentes escenarios de consumo, dependiendo de la cantidad de gramos o latas consumidas por individuo. Por ejemplo, la European Food Safety Authority [EFSA] (2012) estableció una ingesta semanal tolerable (TWI) para metilmercurio de 1.3  $\mu\text{g}$  por kg de peso corporal. Mientras que, en Estados Unidos, la Environmental Protection Agency [EPA] estableció una ingesta diaria tolerable de 0.1  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal, que equivalen a un TWI de 0.7  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de peso corporal (Booth y Zeller, 2005). Por lo que, para valorar los resultados desde la perspectiva del riesgo al consumir, es útil poner en contexto los valores observados. La mediana más elevada fue de aproximadamente 0.1902 mg Hg/kg, que es equivalente a 0.1902 ppm en peso húmedo. Las latas de atún claro suelen contener típicamente un aproximado de 0.126 ppm de mercurio, mientras que el atún blanco / albacora pueden llegar a alcanzar los 0.350 ppm o más (Streit, 2025). Esto posiciona los valores de las muestras analizadas dentro de un rango bajo – moderado en comparación con los datos reportados globalmente.

Dado que el TWI para metilmercurio es de 0.7  $\mu\text{g}$  por kg peso corporal (EPA), un individuo de 70 kg podría tolerar aproximadamente 49  $\mu\text{g}$  de metilmercurio por semana. Si consideramos una lata de atún con una concentración de 0.1902 mg Hg/kg, cada 100 g de dicha lata representarían una ingesta promedio de 19  $\mu\text{g}$ , considerando que cada lata de atún comercial cuenta con aproximadamente 100 g, podríamos indicar que 1 lata representaría cerca del 39 % de la TWI semanal para dicho individuo. Si la persona consumiera varias latas a la semana, sin otras fuentes de exposición ya sea por consumo o por contacto directo o indirecto, la acumulación podría convertirse en una fracción relevante del límite seguro. Debe considerarse que el método empleado mide mercurio total. Por tanto, aun cuando las concentraciones individuales sean bajas respecto al umbral, el patrón de consumo frecuente o en poblaciones vulnerables (embarazadas, niños) podría incrementar el riesgo.

Adicionalmente, se ha documentado que los niveles de mercurio en atún han permanecido prácticamente sin variación desde 1971 hasta 2022, lo que sugiere una

persistencia del problema ambiental, y la necesidad de políticas más estrictas para la reducción de emisiones de mercurio y su entrada en el ecosistema marino (ACS, 2024). En este contexto, es positivo el hecho de que las muestras analizadas estén por debajo del límite regulatorio, pero siempre se debe tomar en consideración que la exposición acumulativa puede cambiar la magnitud del riesgo.

Por otro lado, la prueba de Kruskal–Wallis (Cuadro 9) reveló diferencias significativas entre las marcas, debido a que arrojó un valor  $H = 21.12$  con  $p = 0.0002998$  ( $< 0.05$ , lo que permite rechazar la hipótesis nula de igualdad entre poblaciones de marcas y concluir que existen diferencias significativas entre ellas. En complementación a esta, la prueba de Dunn (Cuadro 10) permitió identificar qué pares de muestras representan estas diferencias. En este caso, los contrastes A – B ( $Q = 3,13658$ ), B vs C ( $Q = 3,90999$ ), C vs D ( $Q = 3,17955$ ) fueron los únicos que superaron el valor crítico ( $Q_{\text{crítico}} = 2.807$ ), indicando diferencias significativas entre estas parejas de marcas. Esto se debe a que la marca B presenta una concentración significativa menor respecto a la A y la C; mientras que la marca C se podría indicar que es significativamente mayor de la B y la D.

Esta variabilidad entre marcas puede explicarse por factores inherentes al producto, como la especie de atún utilizada, el origen geográfico del pescado, las prácticas de procesamiento y almacenamiento del producto; o incluso posibles diferencias en el contenido o vida de los individuos de atún. Estudios anteriores han señalado que la concentración de mercurio en peces de gran tamaño se encuentra relacionada con la edad, longitud y biomasa del individuo, así como su posición en la cadena trófica y el metabolismo del metilmercurio (Milatou et al., 2020). En este sentido, es probable que las diferencias observadas entre marcas se presenten debido a la procedencia o especie de atún empleada, ya que, como se mencionó anteriormente las especies de atún blanco / albacora suelen tener una mayor concentración de mercurio que el atún claro. También puede deberse a la carga contaminante del área de pesca, ya que, las marcas empleadas en este estudio son envasadas en diferentes países como El Salvador, Portugal, Costa Rica y Tailandia.

Cabe destacar que, aunque todas las marcas cumplen con el límite, la marca C presenta la mayor concentración en peso húmedo ( $\approx 0.1902$  mg/kg), lo cual es más de diez veces la concentración de la marca B ( $\approx 0.0137$  mg/kg). Este contraste evidencia que la marca

comercial sí influye en la variabilidad del contenido de mercurio y que no todas las latas presentan niveles equivalentes. Por lo que, la exposición a este metal pesado también se ve incluido por la marca que se consume normalmente. Visualmente, la Figura 9 refuerza este hallazgo, la Marca C presenta la mediana más elevada y una dispersión relativamente amplia, seguida de la Marca A. Por el contrario, la Marca B exhibe los valores más bajos y una mayor homogeneidad interna, representando el grupo con menor bioacumulación de Hg. Las marcas D y E se mantienen en un rango intermedio, con valores moderados y consistentes.

La evaluación de la variabilidad de los datos obtenidos en las cinco marcas analizadas mostró coeficientes de variación (CV) que oscilaron entre 17 % y 47,8 % en peso seco, y entre 24 % y 40 % en peso húmedo. Estos valores reflejan un nivel de dispersión moderado a alto, indicando que la homogeneidad entre las réplicas no fue uniforme en todos los casos. En particular, las marcas con CV superiores al 35 % evidencian una mayor variabilidad, lo que puede atribuirse a diferencias entre lotes, heterogeneidad del contenido de las latas, o posibles fluctuaciones inherentes al proceso analítico. No obstante, los intervalos de confianza calculados muestran que las medias se encuentran bien definidas y estadísticamente distintas entre ciertas marcas, lo cual respalda la validez de las comparaciones realizadas. En términos generales, la precisión analítica fue adecuada para los fines del estudio, ya que la dispersión observada no compromete la interpretación global de los resultados ni altera la conclusión de cumplimiento del límite máximo permitido de 1 mg Hg/kg.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran que las cinco marcas de atún enlatado en agua analizadas cumplen con el límite máximo permitido de 1 mg Hg/kg establecido por el Reglamento UE 2023/915 y el Codex Alimentarius, evidenciando que, en el conjunto de muestras estudiadas, los productos disponibles en el mercado guatemalteco no representan un riesgo inmediato para la salud del consumidor en cuanto al contenido de mercurio. Sin embargo, debido a las diferencias significativas entre las marcas indica que el contenido de Hg varía según la procedencia y especie de atún empleada, así como por factores ambientales y tecnológicos asociados a su procesamiento. Por ello, cabe mencionar que la exposición acumulativa derivada del consumo frecuente puede incrementar el riesgo, sobre todo en poblaciones vulnerables como en el caso de embarazadas y niños. Por lo que, es

importante mantener un consumo dentro de las recomendaciones internacionales establecidas por la AESAN, la EFSA y la EPA.

En cuanto a fuentes de error, es importante considerar que el tamaño reducido de la muestra (n=5 por marca) y el tipo de muestreo no probabilístico podrían limitar la representatividad de los resultados frente al resto de marcas disponibles en el país. Asimismo, es importante tomar en consideración que los resultados obtenidos representan únicamente a las presentaciones de atún enlatado en agua, y no al resto de presentaciones con otros ingredientes que se encuentran disponibles en el mercado. Del mismo modo, la variabilidad natural entre los lotes y los posibles sesgos en las etapas de macerado o secado pueden contribuir a aumentar la incertidumbre analítica. Sin embargo, es importante recalcar que el control de calidad instrumental, el uso de digestión por microondas y la técnica de CV-AAS garantizan una adecuada sensibilidad y confiabilidad en las mediciones realizadas.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el número de muestras y marcas, tomando en consideración aquellas marcas de atún en agua que contienen ingredientes adicionales al atún, agua y sal, como punto de comparación. Además, se recomienda evaluar otros metales pesados como cadmio o plomo, a fin de obtener una visión integral sobre la inocuidad del atún enlatado. Todos estos aportes serían de gran relevancia para ser tomados como punto de partida en el fortalecimiento de sistemas de vigilancia alimentaria que busquen proteger de forma más efectiva la salud de los consumidores.

## VIII. CONCLUSIONES

1. Las marcas de atún en agua analizadas en este estudio presentaron concentraciones detectables de mercurio, confirmando la presencia de este metal pesado en el producto. No obstante, los valores determinados se mantuvieron por debajo del límite máximo de 1 mg Hg/kg establecido por el Reglamento (UE) 2023/915 y el Codex Alimentarius, evidenciando que las muestras estudiadas cumplen con los estándares internacionales de inocuidad alimentaria respecto a dicho metal pesado.
2. Se cuantificó la concentración de mercurio total mediante espectroscopía de absorción atómica con vapor frío (CV-AAS) tras digestión asistida por microondas en muestras de atún en agua comercializadas en la ciudad de Guatemala. Obteniendo concentraciones que oscilaron entre 0.0511 mg Hg/kg y 0.7443 mg Hg/kg para las muestras secas y de 0.0137 mg Hg/kg a 0.1902 mg Hg/kg para peso húmedo.
3. Se comparó las concentraciones de mercurio en atún enlatado en agua entre diferentes marcas comerciales, encontrando que todas las marcas analizadas cumplen el límite máximo permitido para especies de gran tamaño como el atún. Este cumplimiento indica que, en las condiciones de muestreo y análisis realizadas, el consumo ocasional o moderado de atún enlatado disponible en supermercados del departamento de Guatemala no representa un riesgo inmediato para la salud humana en términos de exposición al mercurio.
4. La aplicación de pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis y comparaciones post-hoc de Dunn, permitieron detectar diferencias estadísticamente significativas entre algunas marcas comerciales, a pesar de que todos los valores permanecieron dentro del rango normativo de seguridad. Estas diferencias sugieren la influencia de factores ambientales, biológicos y tecnológicos en los productos analizados.

## **IX. RECOMENDACIONES**

1. Ampliación del estudio a una mayor variedad de marcas y tipos de presentación, incluyendo aquellas que contienen ingredientes adicionales como aceite o caldo vegetal. Esto permitirá comparar los niveles de mercurio entre productos en agua y caldo vegetal o aceite, y evaluar si la matriz del medio de conservación influye significativamente en la concentración final del metal.
2. Incrementación del número de muestras y lotes por marca, con el fin de mejorar la representatividad estadística de los resultados y reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad natural del producto.
3. Incorporación de un análisis de otros metales pesados como cadmio, plomo y arsénico, para obtener una visión integral del perfil de contaminantes en productos pesqueros y fortalecer la evaluación de riesgo alimentario.
4. Promoción de la ratificación de tratados como el Convenio de Minamata a fin de fortalecer los programas de control y vigilancia sanitaria en Guatemala, promoviendo la creación de una normativa nacional que establezca límites máximos permitidos de contaminantes metálicos en alimentos, tomando como referencia los valores máximos presentes en normativas internacionales.
5. Fortalecimiento de la vigilancia sanitaria y la investigación local sobre contaminantes como los metales pesados en productos pesqueros, así como la promoción de la ratificación de tratados como el Convenio de Minamata, que permita la elaboración de normativas que busquen minimizar la contaminación y exposición a metales pesados peligrosos como el mercurio. Esto derivado de la necesidad de fortalecimiento evidenciada con los hallazgos de este estudio

6. Clasificación de las variedades de atún en dos categorías, la primera integrada exclusivamente por productos que contienen atún, agua y sal, y la segunda conformada por presentaciones que incluyen ingredientes adicionales como aceite o caldo vegetal, con el propósito de verificar analíticamente si la incorporación de dichos ingredientes ejerce algún efecto significativo sobre el contenido de mercurio en las muestras analizadas.

## X. REFERENCIAS

- Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición [AESAN]. (2019). *Recomendaciones de consumo de pescado por presencia de mercurio*. [https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/publicaciones/seguridad\\_alimentaria/RECOMENDACIONES\\_consumo\\_pescado\\_MERCURIO\\_AESAN\\_WEB.PDF](https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/publicaciones/seguridad_alimentaria/RECOMENDACIONES_consumo_pescado_MERCURIO_AESAN_WEB.PDF)
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [ATSDR]. (2022). *Perfil toxicológico del mercurio*. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxicological-profiles/about/index.html>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR]. (2006). *Interaction Profile for Chlorpyrifos, Lead, Mercury, and Methylmercury – Appendix C*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK601874/#:~:text=Metallic%20mercury%20is%20volatile%20and,the%20feces%20through%20biliary%20excretion.>
- Agilent Technologies. (2016). *Fundamentos de Espectroscopía Atómica: Hardware*. [https://www.agilent.com/cs/library/eseminars/public/5991-6593\\_Agilent\\_Atomic\\_Spectroscopy\\_Hardware\\_ES.pdf](https://www.agilent.com/cs/library/eseminars/public/5991-6593_Agilent_Atomic_Spectroscopy_Hardware_ES.pdf)
- Aguilar, A., Alonso, G. y Barrero, M. (2012). IDENTIFICACIÓN DE ESPECIES DE ATÚN (*Thunnus spp*) EN VENEZUELA UTILIZANDO LA TÉCNICA DE PCR. *Revista Científica FCV – LUZ*, col. XXII, no. 4; 368 – 375 <https://www.redalyc.org/pdf/959/95922874010.pdf>
- Aguilera, N. y Zapata, L. (2021). *Análisis Nutricional y de metales pesados en Atún en conserva*. ODECU. <https://www.odecu.cl/wp-content/uploads/2020/02/Estudio-Atun-Informe-Final-2021.pdf>
- Allain, V. (2005). Diet of four tuna species of The Western and Central Pacific Ocean. *SPC Fisheries Newsletter* 114: 30-33.

- Allara, M., Añez, J., Delgado, P., Izquierdo, P., Torres, G. (2001). Contenido de proteínas y perfil de aminoácidos del atún (*Thunnusthynnus*): efecto de tres métodos de cocción *Multiciencias*, vol. 1, núm. 2, 2001, pp. 141-147. ISSN: 1317-2255
- American Chemical Society [ACS]. (2024). *Mercury levels in tuna remain nearly unchanged since 1971, study says.* <https://www.acs.org/pressroom/presspacs/2024/february/mercury-levels-in-tuna-remain-nearly-unchanged-since-1971.html>
- Anwar, S., Hifdha, R., Hasan, H., Rohaya, S. (2019). Optimizing the sterilization process of canned yellowfin tuna trough time and temperatura combination. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 425 012031. DOI: 10.1088/1755-1315/425/1/012031
- Ariño, A., Beltran, A., Herrera, A. y Roncalés, P. (2013). *Pescados y mariscos: Valor nutricional.* Enciclopedia de Nutrición Humana (Tercera Edición). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375083-9.00110-0>
- Ariño, A., Beltrán, J., Herrera, A. y Roncalés, P. (2013). Fish and seafood: Nutritional Value. *Encyclopedia of Human Nutrition* (Third Edition) 254-261. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375083-9.00110-0>
- Atal Chemicals. (2016). *Mercurous chloride.* [https://www.atamanchemicals.com/mercurous-chloride\\_u26041/#:~:text=\(I\)%20compound.,Mercurous%20Chloride%20is%20a%20component%20of%20reference%20electrodes%20in%20electrochemistry,a%20topical%20antiseptic%20and%20disinfectant.](https://www.atamanchemicals.com/mercurous-chloride_u26041/#:~:text=(I)%20compound.,Mercurous%20Chloride%20is%20a%20component%20of%20reference%20electrodes%20in%20electrochemistry,a%20topical%20antiseptic%20and%20disinfectant.)
- Badilla, G., y Campos, K. (2018). *Validación de una metodología para la determinación de mercurio en atún en conserva, en el centro nacional de referencia en bromatología del inciens.* Universidad Técnica Nacional de Atenas. <https://repositorio.utn.ac.cr/server/api/core/bitstreams/9c560b33-7645-44ca-ac08-9aa7e7a231e7/content>
- Baughman, T. (2005). Elemental Mercury Spills. *Environmental Health Perspectives.* 114(2):147–152. doi: [10.1289/ehp.7048](https://doi.org/10.1289/ehp.7048)

- Beckers, F. y Rinklebe, J. (2017). Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47:9, 693-794, DOI: 10.1080/10643389.2017.1326277
- Bitetti, M. (2008). *Depredadores tope y cascadas tróficas en ambientes terrestres*. [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/61422/CONICET\\_Digital\\_Nro.ebb\\_e6666-83e6-4101-b157-e6524ae58194\\_A.pdf](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/61422/CONICET_Digital_Nro.ebb_e6666-83e6-4101-b157-e6524ae58194_A.pdf)
- Bjorklund, G., Dadar, M., Mutter, J y Aaseth, J. (2017). The toxicity of mercury: current research and emerging trends. *Environmental Research*. 159, 545-554 <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.051>
- Bloom. (2023). *Toxic Tuna: Chronicle of a health scandal*. <https://bloomassociation.org/wp-content/uploads/2024/11/rapport-Mercure-EN.pdf>
- Booth, S. y Zeller, D. (2005). Mercury, Food Webs and Marine Mammals: Implications of Diet and Climate Change for Human Health. *Environmental Health Perspectives* 113(5):521–526. doi: [10.1289/ehp.7603](https://doi.org/10.1289/ehp.7603)
- Bumble bee. (2025). *Tuna processing*. <https://www.bumblebee.com/seafood-school/tuna-101/tuna-processing/>
- Caravati, E. M., Erdman, A. R., Christianson, G., Nelson, L. S., Woolf, A. D., Booze, L. L., Cobaugh, D. J., Chyka, P. A., Scharman, E. J., Manoguerra, A. S., Troutman, W. G., & American Association of Poison Control Centers (2008). Elemental mercury exposure: an evidence-based consensus guideline for out-of-hospital management. *Clinical toxicology (Philadelphia, Pa.)*, 46(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/15563650701664731>
- Carey, F. y Gibson, Q. (1983). Heat and oxygen exchange in the rete mirabile of the bluefin tuna, *Thunnus thynnus*. *Comparative Biochemistry and Physiology*. 74:2, 333-342 [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(83\)90612-6](https://doi.org/10.1016/0300-9629(83)90612-6)
- Chamorro, F., Cassani, L., Garcia-Oliveira, P., Barral-Martinez, M., Jorge, A. O. S., Pereira, A. G., Otero, P., Fraga-Corral, M., P P Oliveira, M. B., & Prieto, M. A. (2024). Health

- benefits of bluefin tuna consumption: (*Thunnus thynnus*) as a case study. *Frontiers in nutrition*, 11, 1340121. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1340121>
- Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Garley, M., & Nikliński, J. (2025). Mercury Exposure and Health Effects: What Do We Really Know? *International Journal of Molecular Sciences*, 26(5), 2326. <https://doi.org/10.3390/ijms26052326>
- Chojnacka, K., Mikulewicz, M. (2014). Bioaccumulation. *ScienceDirect*, pp 456-460. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.01039-3>
- Cifuentes, C. y Rincón, M. (2022). Análisis del contenido de ácidos grasos y estimación de índices de calidad nutricional en conservas de atún. *Revista Chilena de nutrición*. 49(5): 588-597 [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-75182022000600588](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182022000600588)
- Code of Federal Regulations [eCFR]. (2025). *Fish and Fishery Products*. <https://www.ecfr.gov/current/title-21/chapter-I/subchapter-B/part-123>
- CONAPESCA. (2016). *El atún, una pesca sustentable*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/el-atun-una-pesca-sustentable#:~:text=Pocos%20alimentos%20ofrecen%20al%20consumidor%20una%20alternativa,y%20fortalecer%20aqu%C3%AD%20un%20mercado%20dom%C3%A9stico%20%E2%80%93consumo>
- Congreso de la República de Guatemala. (2022). *Dictamen NO. 05.2022 Dictamen sobre la iniciativa de Ley 6053 que dispone aprobar el Convenio de Minamata sobre el mercurio*. <https://www.congreso.gob.gt/assets/uploads/comisiones/dictamenes/cb8a7-dictamen-6053-fav-cre.pdf>
- CSA. (2023). *Metales pesados y alimentos*. <https://csaconsultores.com/metales-pesados-y-alimentos/>
- Cuellar, E., y Mena, K. (2010). *Determinación del contenido de mercurio por espectrofotometría de absorción atómica de vapor frío en atún enlatado comercializado en la Ciudad de Santa Ana*. Universidad de El Salvador.

<https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/438be124-e4e5-4629-835f-8eee07b57b97/content>

- EFSA. (2023). *Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión, de 25 de abril de 2023, relativo a los contenidos máximos de determinados contaminantes en los alimentos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.º 1881/2006 (Texto pertinente a efectos del EEE)*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/eng>
- EPA, (2015). *Microwave assisted acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3015a.pdf>
- EPA. (1999). *Solidification/Stabilization Resource Guide*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/solidstab\\_res\\_guide.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/solidstab_res_guide.pdf)
- EPA. (2024). *Efectos en la salud por la exposición al mercurio*. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-en-la-salud-por-la-exposicion-al-mercurio>
- EPA. (2024b). *Basic Information about Mercury*. <https://www.epa.gov/mercury/basic-information-about-mercury>
- EPA. (2025). *Información básica sobre el mercurio*. <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-mercurio#:~:text=Utilizaci%C3%B3n%20de%20ciertas%20tecnolog%C3%ADas%20para,calor%20t%C3%A9rmico%20como%20el%20vapor.>
- EPA. (2025b). *What to do if you have a Mercury Spill*. <https://www.epa.gov/mercury/what-do-if-you-have-mercury-spill>
- EsSalud. (2018). *Recomendaciones sobre fuente de exposición, prevención, diagnóstico y tratamiento de intoxicación por mercurio*. Seguro Social de Salud del Perú. <https://repositorio.essalud.gob.pe/handle/20.500.12959/1843>
- European Food Safety Authority [EFSA]. (2012). *Mercury in food – EFSA updates advice on risk for public health*. <https://www.efsa.europa.eu/en/press/news/121220>
- European Tracking Network [ETN]. (2020). *Atlantic Bluefin Tuna (Thunnus thynnus)*. <https://europeantrackingnetwork.org/en/atlantic-bluefin-tuna>

- FAO. (2018). *Proceso del atún*. <https://ceipa.com.ec/corsea-2/>
- Fischer Scientific. (2022). *Sulfuro de mercurio (II)*. <https://www.fishersci.es/shop/products/mercury-ii-sulfide-thermo-scientific/11366858>
- Food Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2020). *Tuna species*. <https://www.fao.org/fishery/en/topic/16082/en>
- Food and Drug Administration [FDA]. (2012). *Niveles de mercurio en pescados y mariscos comerciales*. <https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/mercury-levels-commercial-fish-and-shellfish-1990-2012>
- Food and Drug Administration [FDA]. (2024). *Technical information on development of FDA/EPA advice about eating fish*. <https://www.fda.gov/food/environmental-contaminants-food/technical-information-development-fdaepa-advice-about-eating-fish-those-who-might-become-or-are>
- Food and Drug Administration [FDA]. (2025). *Environmental Contaminants in Food*. <https://www.fda.gov/food/chemical-contaminants-pesticides/environmental-contaminants-food>
- Food and Drug Administration [FDA]. (2025). *Environmental Contaminants in Food*. <https://www.fda.gov/food/chemical-contaminants-pesticides/environmental-contaminants-food#section-nav>
- Friedheim, E., & Corvi, C. (1975). Meso-dimercaptosuccinic acid, a chelating agent for the treatment of mercury poisoning. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 27(8), 624–626. <https://doi.org/10.1111/J.2042-7158.1975.TB09522.X>
- Fundación Española del Corazón [FEC]. (2020). *Pescados aliados esenciales para la salud cardiovascular*. <https://fundaciondelcorazon.com/blog-impulso-vital/3585-pescados-aliados-esenciales-para-la-salud-cardiovascular.html>
- Gaitán, A. (2023). *Determinación de mercurio total en tejido muscular de *Parachromis managuensis* y *Oreochromis niloticus* provenientes del Lago de Amatitlán por*

- espectroscopía de absorción atómica con vapor frío*. Universidad del Valle de Guatemala. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/5462>
- Harada M. (1995). Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. *Critical reviews in toxicology*, 25(1), 1–24. <https://doi.org/10.3109/10408449509089885>
- Harding, G., Dalziel, J., & Vass, P. (2018). Bioaccumulation of methylmercury within the marine food web of the outer Bay of Fundy, Gulf of Maine. *PloS one*, 13(7): e0197220. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197220>
- Harvard. (2019). *Laboratory safety guideline: Mercury*. [https://www.ehs.harvard.edu/sites/default/files/lab\\_safety\\_guideline\\_mercury.pdf](https://www.ehs.harvard.edu/sites/default/files/lab_safety_guideline_mercury.pdf)
- Industries [Industries\_Channel]. (2024). *Atún en lata: La verdad revelada de su proceso de producción* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=AEhkK7Emago>
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSST]. (2014). *Óxido de mercurio*. [https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_version=2&p\\_card\\_id=0981&p\\_lang=es](https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_version=2&p_card_id=0981&p_lang=es)
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSST]. (2014b). *Cloruro mercúrico*. [https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_lang=es&p\\_card\\_id=0979&p\\_version=2](https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0979&p_version=2)
- Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSST]. (2019). *Cloruro mercurioso*. [https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\\_card\\_id=0984&p\\_version=2&p\\_lang=es](https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0984&p_version=2&p_lang=es)
- IPEN. (2020). *Enfermedad de Minamata*. <https://ipen.org/sites/default/files/documents/Numero%20Once%20Enfermedad%20de%20Minamata.pdf>
- Janssen, S., Schaefer, J., Barkay, T. y Reinfelder, J. (2016). Fractionation of Mercury Stable Isotopes during Microbial Methylmercury Production by Iron- and Sulfate-Reducing Bacteria. *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50, 15, 8077–8083. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00854>

- Jeong, H., Ali, W., Zinck, P., Souissi, S. y Lee, JS. (2024). Toxicity of methylmercury in aquatic organisms and interaction with environmental factors and coexisting pollutant: A review. *Science of The Total Environment*. 943:173-574 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173574>
- Jin, R., Yang, F., Chen, F., Yin, R., Zhi, M., Bin, W., Guo, A., Wei, L. (2022). Assessing trophic interactions among three tuna species in the Solomon Islands based on stomach contents and stable isotopes. *Front. Mar. Sci.* 9:961990 <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.961990>
- Karunarathna, K. y Attygalle, M. (2010). Nutritional evaluation in five species of tuna. *Vidyodaya J. of Sci.* 15:1&2 pp 7-16. DOI: 10.31357/vjs.v15i0.211
- Lang, H., y Dietrich, S. (2013). Metals – Gas – Phase Deposition and Applications. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Vol. 4, pp 211-296 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097774-4.00412-5>
- Lavoie, R., Jardine, T., Chumchal, M., Kidd, K. y Campbell, L. (2013). Biomagnification of Mercury in Aquatic Food Webs: A Worldwide Meta-Analysis. *Environmental Science & Technology*, 47(23), 13385-13394. [dx.doi.org/10.1021/es403103t](https://doi.org/10.1021/es403103t)
- Lee, T., Eom, Y., Lee, C. y Song, K. (2011). Stabilization and Solidification of Elemental Mercury for Safe Disposal and/or Long-Term Storage. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 61(10), 1057-1062. DOI: [10.1080/10473289.2011.608615](https://doi.org/10.1080/10473289.2011.608615)
- Lehnherr, I. (2014). Methylmercury biogeochemistry: a review with special reference to Arcticaquatic ecosystems. *Environmental Reviews*. 22(3): 229–243. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0059>
- LennTech. (2019). *Mercury*. <https://www.lenntech.com/periodic/elements/hg.htm>
- Milatou, N., Dassenakis, M., & Megalofonou, P. (2020). Mercury concentrations in reared Atlantic bluefin tuna and risk assessment for the consumers: To eat or not to eat?. *Food chemistry*, 331, 127267. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127267>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA]. (2024). *Codex Alimentarius Guatemala*. <https://www.maga.gob.gt/sitios/visar/codex-alimentarius-guatemala/>

- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA]. (2019). *Thunnus thynnus: Atún rojo*. [https://www.mapa.gob.es/es/pesca/temas/acuicultura/atun\\_rojo\\_tcm30-628432.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/pesca/temas/acuicultura/atun_rojo_tcm30-628432.pdf)
- Ministerio de Salud del Perú [MINSA]. (2015). *Guía de práctica clínica para el diagnóstico, tratamiento y seguimiento de personas expuestas a metales pesados: mercurio*. R.M. N° 757-2013/MINSA. Biblioteca Virtual en Salud. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/es/pru-7701>
- Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social [MSPAS]. (2012). *Guías Alimentarias para Guatemala: Recomendaciones para una alimentación saludable*. <https://portal.siinsan.gob.gt/wp-content/uploads/cedesan2/libros/Guias-Alimentarias-para-Guatemala.pdf>
- Mohammed, T. (2018). *Non-Destructive Material Characterization Methods: Atomic Absorption Spectrophotometry*. Elsevier. ISBN: 978-0-323-91150-4
- Morrison, J. (2007). Exposure assessment of household mercury spills. *J. Chem. Health Saf.* 2007, 14, 1, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.jchas.2006.08.004>
- Müller, E., Mesko, M. Moraes, D., Korn, M. y Flores, E. (2014). *Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Analysis*. Elsevier. ISBN 978-0-444-59420-4
- Murata, Y., Finkelstein, D. B., Lamborg, C. H., & Finkelstein, M. E. (2019). Tuna Consumption, Mercury Exposure, and Knowledge about Mercury Exposure Risk from Tuna Consumption in University Students. *Environmental toxicology and chemistry*, 38(9), 1988–1994. <https://doi.org/10.1002/etc.4513>
- Nascimento, A., Magalhaes, L., Kikuchim A., Furtado, D., Araujo, M. y Melo, M. (2012). Method validation for the determination of total mercury in fish muscle by cold vapour atomic absorption spectrometry. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 29:4, 617-624, DOI: 10.1080/19440049.2011.642009
- National Institute of Health [NIH]. (2022). *Vitamin B12*. <https://ods.od.nih.gov/factsheets/VitaminB12-HealthProfessional/>

- Neff, J. (2002). *Bioacumulación en organismos marinos: Efecto de los ciontaminantes del agua producidas por pozos petrolíferos*. Elsevier Science. ISBN 978-0-08-043716-3
- Nelson, D. y Phalen, R. (2022). Review of the Performance, Selection, and Use of Gloves for Chemical Protection. *ACS Chem. Health Saf.* 2022, 29, 1, 39–48. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00084>
- NJ Health. (2017). *Mercuric oxide*. <https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/2537.pdf>
- NOAA. (2025). *Redes alimentarias acuática*. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/marine-life/aquatic-food-webs#:~:text=En%20el%20ejemplo%20anterior%2C%20el,en%20las%20redes%20tr%C3%B3ficas%20acu%C3%A1ticas>.
- NOAA. (2023). *Fun facts about Atlantic Thunas*. <https://www.fisheries.noaa.gov/feature-story/fun-facts-about-atlantic-tunas#:~:text=Tunas%20are%20very%20fast%20swimmers,ground%20quickly%20during%20annual%20migrations>.
- OMS/FAO. (2024). *Codex Alimentarius: Normas Internacionales de los alimentos*. [https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/es/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS\\_193s.pdf](https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/es/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193s.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas [ONU] – Minamata Convention on Mercury. (2024). *Guidance on Mercury Releases*. [https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/2025-04/MC\\_Guidance\\_Mercury\\_Releases\\_SP.pdf](https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/2025-04/MC_Guidance_Mercury_Releases_SP.pdf)
- Organización de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [ONU]. (2019). *Convenio de Minamata sobre el Mercurio*. <https://minamataconvention.org/sites/default/files/2021-06/Minamata-Convention-booklet-Sep2019-SP.pdf>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2011). *Evaluation of Certain Contaminants in Food*. ISSN 0512-3054

- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2014). *WHA67.11: Public health impacts of exposure to mercury and mercury compounds: the role of WHO and ministries of public health in the implementation of the Minamata Convention*. <https://www.who.int/publications/i/item/resolution-wha67.11>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2021). *Mercurio y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2023). *Strategic planning for implementation of the health-related articles of the Minamata Convention on Mercury*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516846>
- Organización Mundial de la Salud. [OMS]. (2024). *Mercurio*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2012). *Taller para la eliminación del mercurio en el sector salud – Guatemala, 31 de julio de 2012. Salud sin Daño*. <https://lac.saludsindanio.org/eventos/taller-para-la-eliminacion-del-mercurio-en-el-sector-salud-guatemala-31-de-julio-de-2012>
- OSHA. (2024). *Mercury*. <https://www.osha.gov/etools/hospitals/hospital-wide-hazards/mercury>
- OSPPERA. (2002). *Mercury Spill Response & Clean-up Guidance Document*. <https://ehs.utk.edu/wp-content/uploads/2017/06/Mercury-Waste-Guide.pdf>
- Pachecho, J. (2013). *Aspectos biológicos y pesqueros del atún amarilla Thannus albacares capturado por la flota atunera cerquera ecuatoriana, período 2009-2013*. <https://institutopesca.gob.ec/wp-content/uploads/2017/07/2-Aspectos-biol%C3%B3gicos-y-Pesqueros-del-At%C3%BAn-Aleta-Amarilla-Capturado-por-la-Flota-Atunera-Cerquera-2009-2013.pdf>
- Pacoma, A. y Yap-Dejeto, L. (2019). Health Risk Assessment: Total Mercury in Canned Tuna and in Yellowfin and Frigate Tuna Caught from Leyte Gulf and Philippine Sea. *Science Diliman* 31:2, 82-88. [https://www.researchgate.net/profile/Arvin-Pacoma/publication/340827869\\_Health\\_Risk\\_Assessment\\_Total\\_Mercury\\_in\\_Can](https://www.researchgate.net/profile/Arvin-Pacoma/publication/340827869_Health_Risk_Assessment_Total_Mercury_in_Can)

[ned Tuna and in Yellowfin and Frigate Tuna Caught from Leyte Gulf and Philippine Sea/links/5f00129792851c52d616ebf6/Health-Risk-Assessment-Total-Mercury-in-Canned-Tuna-and-in-Yellowfin-and-Frigate-Tuna-Caught-from-Leyte-Gulf-and-Philippine-Sea.pdf](#)

- Panduro, G., Rengifo, G., Barreto, J., Arbaiza, A., Iannacone, J., Alvariano, L., Crnobrna, B. (2020). Bioacumulación por mercurio en peces y riesgo por ingesta en una comunidad nativa en la amazonia peruana. *Rev. investig. vet. Perú* 31(3):e18177. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v31i3.18177>
- Park, J. D., & Zheng, W. (2012). Human exposure and health effects of inorganic and elemental mercury. *Journal of preventive medicine and public health = Yebang Uihakhoe chi*, 45(6), 344–352. <https://doi.org/10.3961/jpmph.2012.45.6.344>
- Pérez, T. y Pouilly, M. (2008). *Bioacumulación y biomagnificación del mercurio en los peces de la cuenca Iténez*. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers10-04/010047559.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-04/010047559.pdf)
- Piao, H., & Bishop, P. L. (2006). Stabilization of mercury-containing wastes using sulfide. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 139(3), 498–506. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.06.005>
- Pickrell, T. (2024). *Tuna sustainability*. Encyclopedia of Meat Sciences (Third Edition). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85125-1.00099-5>
- Posin, S., Kong, E. y Sharma, S. (2023). *Mercury Toxicity*. StatPerals. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/books/NBK49993>
- Rafiee, A., Delgado-Saborit, J. M., Sly, P. D., Quémerais, B., Hashemi, F., Akbari, S., & Hoseini, M. (2020). Environmental chronic exposure to metals and effects on attention and executive function in the general population. *The Science of the total environment*, 705, 135911. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135911>
- Ratnapradipa D. (2024). Environment and Health: Heavy Metal Toxicity. *FP essentials*, 545, 13–18. PMID: 39412504

- Rodriguez, M., Rosa, A., Almeida, A., Martins, R., Ribeiro, T., Pintado, M. et al., (2024). Omega-3 fatty acids from fish by-products: Innovative extraction and application in food and feed. *Food and Bioproducts Processing* vol. 145; 32 – 41. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.02.007>
- Rouanet, A. (2007). *Determinación y cuantificación de mercurio en tejido muscular de Cichlasoma managuense (Pez Tigre o Guapote) del Lago de Amatitlán por espectrofotometría de absorción atómica con vapor frío*. Universidad del Valle de Guatemala. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/2744>
- Sánchez Londoño, J. (2011). *Evaluación de la concentración de mercurio en diversas marcas de atún enlatado comercializadas en la ciudad de Cartagena de Indias*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9712>
- Sexauer, M., Bank, M., Bishop, K., Bowman, K., Branfireun, B., Chételat, J., Eckley, C., Hammerschmidt, C., Lamborg, C., Lyman, S., Martínez, A., Sommar, J., Tsz-Ki, M. y Zhang, T. (2020). Mercury biogeochemical cycling: A synthesis of recent scientific advances. *Science of the Total Environment* 737, 139619 <https://www.usu.edu/binghamresearch/files/peer-reviewed-pubs/gustinetal-2020-biogeochemcycling.pdf>
- Streit, L. (2025). *Mercury in Tuna: Is this fish safe to eat?*. Healthline. <https://www.healthline.com/nutrition/mercury-in-tuna>
- Takeuchi, T., D'Itri, F., Fischer, P., Annett, C. y Okabe, M. (1977). The outbreak of Minamata disease (methyl mercury poisoning) in cats on Northwestern Ontario Reserves. *Environmental Research* Volume 13, Issue 2, Pages 215-228. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(77\)90098-6](https://doi.org/10.1016/0013-9351(77)90098-6)
- Taux, K., Kraus, T. y Kaifie, A. (2022). Mercury Exposure and Its Health Effects in Workers in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM) Sector—A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19(4), 2081; <https://doi.org/10.3390/ijerph19042081>

- Torontech. (2025). *¿Qué es un espectrofotómetro de absorción atómica? Guía práctica para el análisis elemental*. <https://torontech.com/es/what-is-an-atomic-absorption-spectrophotometer-a-practical-guide-for-elemental-analysis/>
- U.S Department of Agriculture [USDA]. (2017). *Fish, Tuna, light, canned in wáter, drained solids*. <https://fdc.nal.usda.gov/food-details/334194/nutrients>
- Ueda, H. (2018). Migration and Navigation in Fish. *Eyclopedia of Reproduction (2nd Edition)* vol. 6, pp 84-89. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20540-2>
- UNEP. (2021). *Technical guidelines on the environmentally sound management od wastes consisting of, containing or contaminated with mercury or mercury compounds*. [https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/information\\_document/4\\_INF24\\_BaselTechnicalGuidelines.English.pdf](https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/information_document/4_INF24_BaselTechnicalGuidelines.English.pdf)
- UNEP/Minamata Convention. (2019). Guidance on best available techniques and best environmental practices. [https://minamataconvention.org/sites/default/files/2021-06/BAT\\_BEP\\_E\\_interractif.pdf](https://minamataconvention.org/sites/default/files/2021-06/BAT_BEP_E_interractif.pdf)
- Universidad Autónoma del Estado de México [UAEMex]. (2023). Evaluación de daño genético en profesionales de la salud expuestos al mercurio. Repositorio Institucional UAEMex. <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/137774>
- Universidad de Costa Rica [UCR]. (2023). El mercurio en el agua potable afecta la salud. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2023/5/15/el-mercurio-en-el-agua-potable-afecta-la-salud.html>
- Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM]. (2016). El mercurio, un metal muy tóxico que continúa presente en productos de uso cotidiano. Dirección General de Comunicación Social. [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2016\\_204.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2016_204.html)
- University of Hawai at Manoa [UHM]. (2019). *Warm-bodied and Hot-headed Fish*. <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/node/1774>
- Velasco, O., Echavarría, S., Pérez, M., Villanueva, I. (2011). Contenido de mercurio y arsénico en atún y sardinas enlatadas mexicanas. *Revista Internacional de*

<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/25534>

Voux, V., Topolink, Z. y Fugas, M. (1953). Respirators for protection against Mercury Vapours. *Brit. J. industr. Med.* 10(2):69–75. doi: [10.1136/oem.10.2.69](https://doi.org/10.1136/oem.10.2.69)

Wong, S. (2016). *Syphilis and the use of mercury*. The Pharmaceutical Journal. <https://pharmaceutical-journal.com/article/opinion/syphilis-and-the-use-of-mercury>

Woods Hole Oceanographic Institution [WHOI]. (2025). *The mercury Cycle*. [https://www.whoi.edu/multimedia/mercury-cycle/#:~:text=Mercury%20\(Hg\)%20cycles%20through%20the,other%20seafood%20eaten%20by%20humans.](https://www.whoi.edu/multimedia/mercury-cycle/#:~:text=Mercury%20(Hg)%20cycles%20through%20the,other%20seafood%20eaten%20by%20humans.)

Yuan-Seng, W., Osman, A., Hosny, M., Elgarahy, A., Eltaweil, A., Rooney, D., Chen, Z., Rahim, N., Sekar, M., Gopinath, S., Najihah, N., y Yap, P. (2024). The Toxicity of Mercury and Its Chemical Compounds: Molecular Mechanisms and Environmental and Human Health Implications: A Comprehensive Review. *ACS Omega* 9,5, 5100–5126. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07047>

Zhang, L., Wang, S., Wu, Q., Wang, F., Lin, C.-J., Zhang, L., Hui, M., Yang, M., Su, H., and Hao, J. (2016). Mercury transformation and speciation in flue gases from anthropogenic emission sources: a critical review. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 2417–2433, <https://doi.org/10.5194/acp-16-2417-2016>

## XI. ANEXOS

### Anexo 1. Boletas de registro de muestra

 <b>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</b>	<b>REGISTRO DE MUESTRAS: LATAS DE ATÚN EN AGUA</b>
Trabajo de Graduación - Ester Bermúdez (21770)	
Fecha de registro: <input type="text"/> / <input type="text"/> / <input type="text"/>	
Marca: <input type="radio"/> <b>A</b> <input type="radio"/> <b>B</b> <input type="radio"/> <b>C</b> <input type="radio"/> <b>D</b> <input type="radio"/> <b>E</b>	No. de Lote: <input type="radio"/> <b>1</b> <input type="radio"/> <b>2</b> <input type="radio"/> <b>3</b> <input type="radio"/> <b>4</b> <input type="radio"/> <b>5</b> <input type="text"/> Otro:
País de producción: <input type="text"/>	Fecha de vencimiento: <input type="text"/> / <input type="text"/> / <input type="text"/>
Lugar de adquisición: <input type="text"/>	No. Registro Sanitario: <input type="text"/>
Peso escurrido (g): <input type="text"/>	Peso seco / después de secado (g): <input type="text"/>
Observaciones	<input type="text"/>

### Anexo 2. Glosario

- 1. Absorción atómica de vapor frío:** técnica analítica de espectroscopía de absorción atómica utilizada específicamente para la determinación de mercurio en muestras biológicas, ambientales o alimentarias. En este método el mercurio presente en la muestra se reduce químicamente para transformarlo en mercurio elemental en estado gaseoso. Este vapor frío se transporta hacia la celda de absorción del espectrofotómetro, donde se mide la absorción de radiación electromagnética a una longitud de onda característica del mercurio (253,7 nm) (Skoog et al., 2015; Mohhamed, 2018).

2. **Bioacumulación:** proceso por el cual una sustancia química se acumula progresivamente en los tejidos de un organismo vivo a lo largo del tiempo, debido a que la tasa de absorción o ingestión es mayor que la tasa de excreción o degradación (Lehnherr, 2014; Harding et al., 2018).
3. **Biomagnificación:** proceso por el cual la concentración de una sustancia tóxica aumenta progresivamente a medida que se avanza en la cadena trófica. Es decir, que los depredadores de niveles superiores acumulan concentraciones considerablemente más elevadas de la sustancia, que los organismos que se encuentran en niveles inferiores (Lehnherr, 2014).
4. **Cadena trófica:** es la representación lineal de las relaciones alimenticias entre organismos de un ecosistema, donde cada nivel muestra quien se alimenta de quien, transfiriendo energía y materia desde los productores hasta los consumidores y descomponedores (Bitetti, 2008).
5. **Codex alimentarius:** conjunto de normas, directrices y códigos de prácticas internacionales relacionadas con la inocuidad, calidad y comercio de los alimentos. Fue creado en 1963 a través de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), con el fin de proteger la salud de los consumidores, garantizar prácticas equitativas en el comercio de alimentos y promover la coordinación de todas las normas alimentarias a nivel mundial (FAO/OMS, 2024).
6. **Convenio de minamata:** tratado internacional jurídicamente vinculante, adoptado en 2013 bajo el auspicio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), cuyo objetivo es proteger la salud humana y el ambiente frente a las emisiones y liberaciones de mercurio y sus compuestos. Toma su nombre del desastre de contaminación por metilmercurio ocurrido en Minamata, Japón, que evidenció los graves efectos del mercurio sobre la salud pública y los ecosistemas (ONU, 2019).


- 7. Digestión ácida:** procedimiento químico de preparación de muestras en el que se emplean ácidos minerales concentrados, solos o en combinación, para descomponer matrices orgánicas o inorgánicas y liberar los analitos de interés. Es una etapa previa fundamental en análisis instrumental, como espectrometría de absorción atómica o ICP, ya que permite transformar la muestra en una solución homogénea y adecuada para la determinación cuantitativa de metales (EPA, 2015; Skoog et al., 2015).
- 8. Límite máximo permitido (LPM):** valor regulatorio establecido a través de organismos internacionales o nacionales que define la concentración máxima de un contaminante que puede estar presente en un alimento sin representar un riesgo para la salud (FAO/OMS, 2024).
- 9. Mercurio:** metal pesado natural, caracterizado por su estado líquido a temperatura ambiente y su elevada presión de vapor. Su uso histórico en minería, industria y productos farmacéuticos ha disminuido debido a su reconocida toxicidad, ya que incluso en bajas concentraciones puede afectar al sistema nervioso, renal e inmunológico, además de acumularse en la cadena trófica acuática (EPA, 2024b).
- 10. Metilmercurio:** forma orgánica del mercurio resultante de la metilación biológica del mercurio inorgánico en ambientes acuáticos, principalmente por acción de microorganismos. Es la especie más tóxica y bioacumulable del metal, con alta afinidad por proteínas y capacidad de atravesar barreras biológicas como la hematoencefálica y la placentaria, generando efectos neurológicos severos en humanos (Bjorklund et al., 2017; ATSDR, 2006).

## Anexo 3. Recomendación de ingesta de pescado por presencia de mercurio AESAN



# RECOMENDACIONES DE CONSUMO DE PESCADO POR PRESENCIA DE MERCURIO

DE LA AGENCIA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD ALIMENTARIA Y NUTRICIÓN (AESAN)


**Hg**



### POBLACIÓN VULNERABLE

 <p><b>MUJERES EMBARAZADAS, PLANIFICANDO ESTARLO O EN LACTANCIA NIÑOS 0-10 AÑOS</b></p>	<p><b>ESPECIES ALTO CONTENIDO EN MERCURIO</b></p> <p><b>ESPECIES BAJO Y MEDIO CONTENIDO EN MERCURIO</b></p>	<p><b>EVITAR CONSUMO</b></p> <p><b>3 - 4 RACIONES DE PESCADO POR SEMANA</b></p> <p><small>Procurando variar las especies entre pescados blancos y azules.</small></p>
 <p><b>NIÑOS ENTRE 10 -14 AÑOS</b></p>	<p><b>ESPECIES ALTO CONTENIDO EN MERCURIO</b></p> <p><b>ESPECIES BAJO Y MEDIO CONTENIDO EN MERCURIO</b></p>	<p><b>LIMITAR EL CONSUMO</b></p> <p><b>120 gramos al MES</b></p> <p><b>3 - 4 RACIONES DE PESCADO POR SEMANA</b></p> <p><small>Procurando variar las especies entre pescados blancos y azules.</small></p>

### POBLACIÓN GENERAL

 <p><b>TODAS LAS ESPECIES</b></p>	<p><b>3 - 4 RACIONES DE PESCADO POR SEMANA</b></p> <p><small>Procurando variar las especies entre pescados blancos y azules.</small></p>
---	--

### ESPECIES

**ESPECIES CON ALTO CONTENIDO EN MERCURIO:** Pez espada/Emperador, Atún rojo (*Thunnus thynnus*), Tiburón (cazón, marrajo, mielgas, pintarroja y tintorera) y Lucio.

**ESPECIES CON BAJO CONTENIDO EN MERCURIO:** Abadejo, Anchoa/Boquerón Arenque, Bacalao, Bacaladilla, Berberecho, Caballa, Calamar, Camarón, Cangrejo, Cañadilla, Carbonero/Fogonero, Carpa, Chipirón, Chirla/Almeja, Choco/Sepia/Jibia, Cigala, Coquina, Dorada, Espadín, Gamba, Jurel, Langosta, Langostino, Lenguado europeo, Limanda/Lenguadina, Lubina, Mejillón, Merlan, Merluza/Pescadilla, Navaja, Ostión, Palometa, Platija, Pota, Pulpo, Quisquilla, Salmón atlántico/Salmón, Salmón del Pacífico, Sardina, Sardinela, Sardinopa, Solla, y Trucha. **Las demás especies de productos de la pesca no mencionadas específicamente se entenderán con un CONTENIDO MEDIO en mercurio**

**¿Qué es el mercurio?**  
Es un contaminante medioambiental que puede encontrarse en nuestros alimentos debido a su presencia natural en la corteza terrestre y como resultado de la actividad humana. La forma en la que principalmente se encuentra presente en los pescados se denomina metilmercurio.

**¿Por qué hablamos de mercurio y pescado?**  
A partir de su liberación al medioambiente el mercurio está presente en aguas de mares y ríos y puede concentrarse, en proporción variable, en los pescados. **La cantidad de mercurio en los peces está relacionada con su posición dentro de la cadena trófica, por tanto, los peces depredadores, de gran tamaño y más longevos como el pez espada, tiburón, atún rojo o lucio tienen concentraciones más altas.** Este fenómeno se conoce como bioacumulación.

**¿Qué riesgo puede presentar el mercurio sobre la salud?**  
El mercurio puede afectar al sistema nervioso central en desarrollo, por exposición directa tras el consumo de ciertos alimentos o indirectamente al poder atravesar la placenta. También puede estar presente en la leche materna. **Por ello las mujeres embarazadas, o que estén planificando estarlo, así como aquellas en periodo de lactancia, junto con los niños de menor edad constituyen la población más vulnerable al mercurio.**

**¿Es seguro comer pescado?**  
**Sí, comer pescado es seguro y saludable.**


En la legislación alimentaria europea existen límites máximos de mercurio que son de obligado cumplimiento y que, controlados por las autoridades sanitarias, garantizan un consumo seguro de alimentos por la población. **El consumo de pescado conlleva, además, efectos beneficiosos para la salud ya que aporta energía, es una fuente de proteínas de alto valor biológico y contribuye a la ingesta de nutrientes esenciales como el yodo, el selenio, el calcio y las vitaminas A y D.** También tiene un buen perfil lipídico proporcionando ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga omega-3, que es un componente de los patrones dietéticos asociados con la buena salud, y pocos ácidos grasos saturados.

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha asociado el consumo habitual de pescado durante el embarazo con efectos beneficiosos sobre el desarrollo neurológico en niños y con la reducción del riesgo de mortalidad por enfermedad coronaria en adultos.

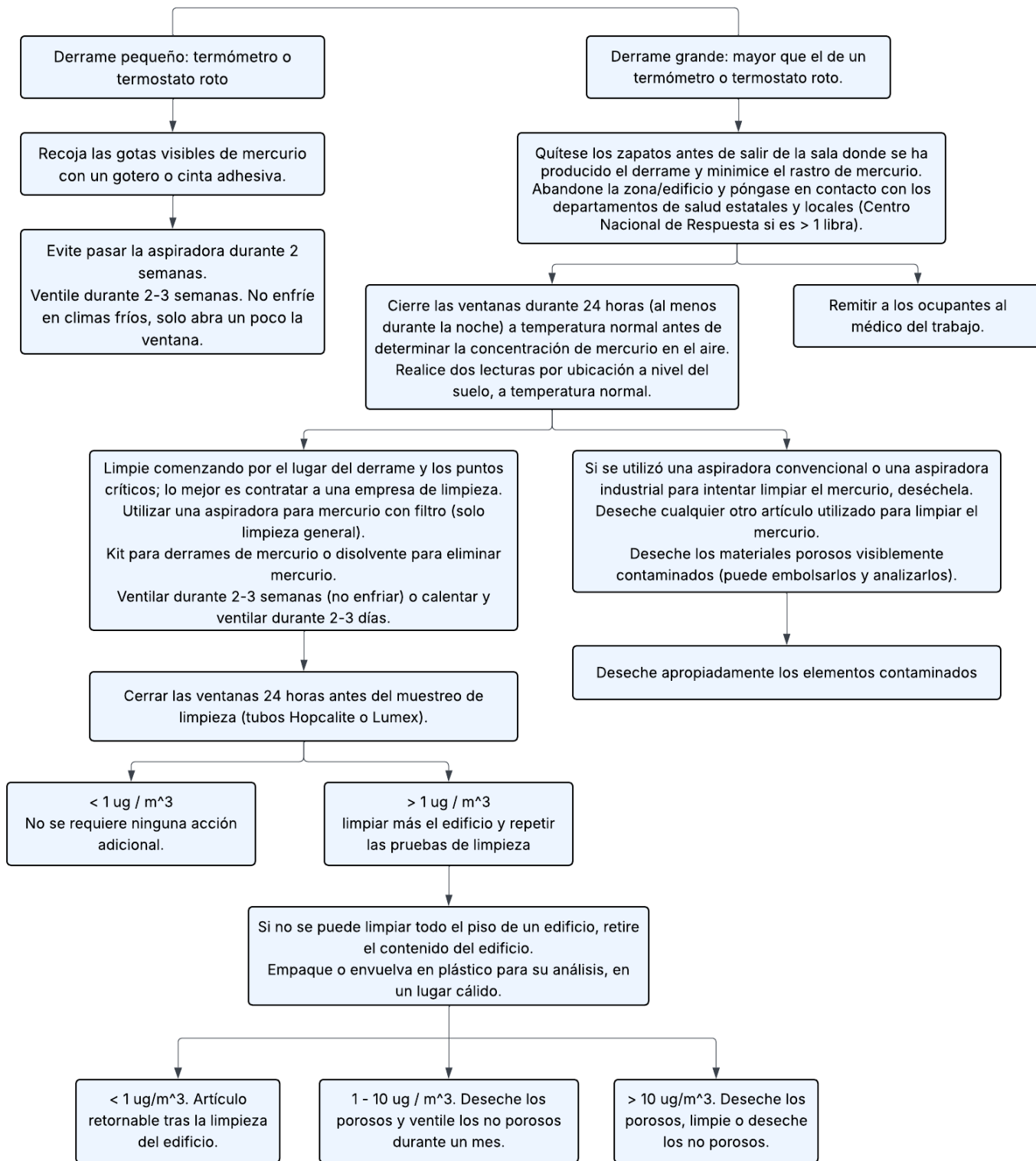
#MercurioAESAN

GOBIERNO DE ESPAÑA  
MINISTERIO DE SANIDAD, CONSUMO Y BENEFICIO SOCIAL

AGENCIA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD ALIMENTARIA Y NUTRICIÓN

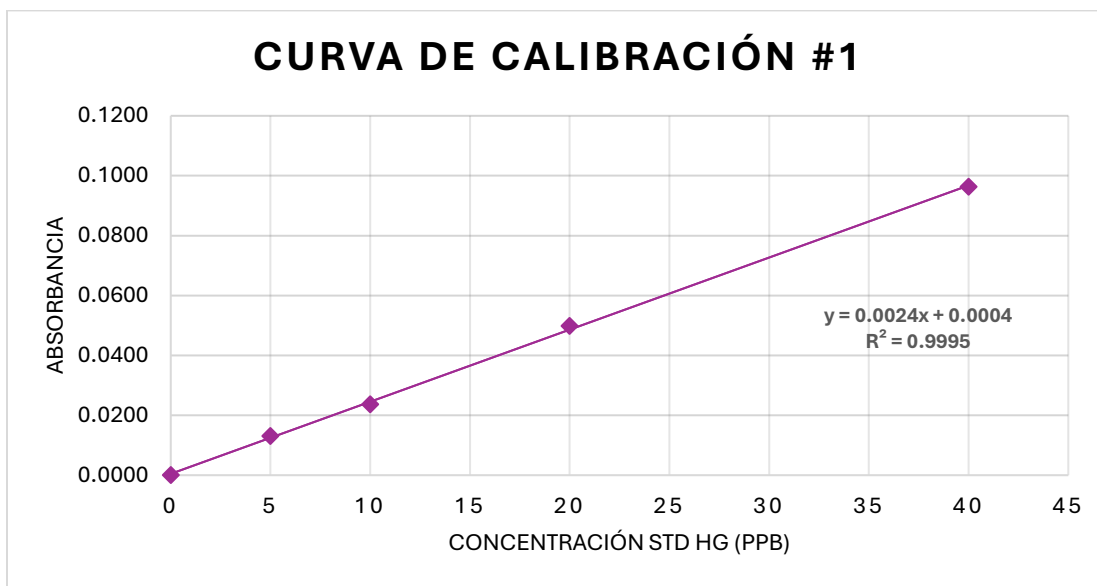


## Anexo 4. Manejo de derrames de mercurio

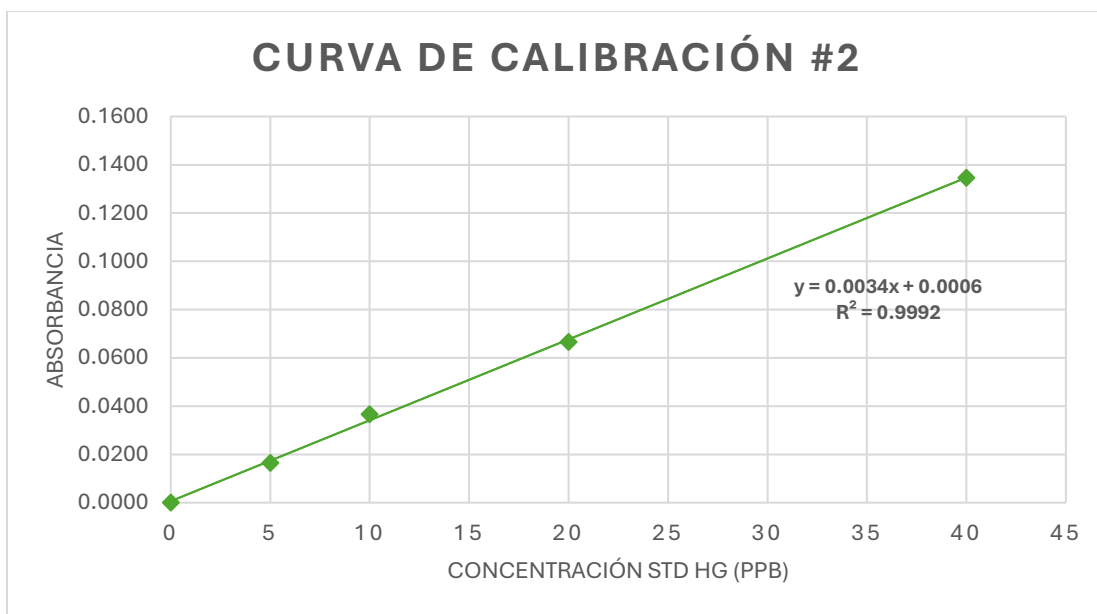


(Traducido al español de Baughman, 2005)

Anexo 5. Curva de calibración



**Figura 10.** Curva de calibración utilizada para lotes 1 - 3 de todas las marcas analizadas (A - E)



**Figura 11.** Curva de calibración utilizada para lotes 4 - 5 de todas las marcas analizadas (A - E)

**Cuadro 11.** Absorbancias obtenidas para la curva de calibración

<b>Solución</b>	<b>Concentración (ppb)</b>	<b>Absorbancia Curva #1 (±0.0001)</b>	<b>Absorbancia Curva #2 (±0.0001)</b>
<b>Blanco</b>	0	0.0000	0.0000
<b>Std 1</b>	5	0.0131	0.0165
<b>Std 2</b>	10	0.0236	0.0367
<b>Std 3</b>	20	0.0498	0.0666
<b>Std 4</b>	40	0.0963	0.1347

**Anexo 6.** Absorbancias obtenidas para cada una de las muestras analizadas

<b>Muestra</b>	<b>Absorbancia (±0.0001)</b>
A1	0.0248
A2	0.0253
A3	0.0451
A4	0.0274
A5	0.0207
B1	0.0031
B2	0.0038
B3	0.0036
B4	0.0031
B5	0.0023
C1	0.0493
C2	0.0404
C3	0.0321
C4	0.0272
C5	0.0562
D1	0.0060
D2	0.0060
D3	0.0065
D4	0.0030
D5	0.0074
E1	0.0167
E2	0.0193
E3	0.0177
E4	0.0168
E5	0.0260