



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



**MONITOREO DE MERCURIO Y METILMERCURIO EN LA POBLACIÓN
ALEDAÑA A LA CIÉNAGA DE BETANCÍ, MONTERÍA - CÓRDOBA**



LUIS FELIPE TERAN ARBOLEDA

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
PROGRAMA DE QUÍMICA
MONTERÍA, COLOMBIA**

2023



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS**



**MONITOREO DE MERCURIO Y METILMERCURIO EN LA POBLACIÓN
ALEDAÑA A LA CIÉNAGA DE BETANCÍ, MONTERÍA - CÓRDOBA**

LUIS FELIPE TERAN ARBOLEDA

**PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO COMO PARTE DE LOS REQUISITOS
PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE QUÍMICO**

Director:

M.Sc. IVÁN DAVID URANGO CÁRDENAS

Codirectora:

M.Sc. SAUDITH MARÍA BURGOS NÚÑEZ

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
MONTERÍA, COLOMBIA**

2023



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS**



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

TRABAJO DE GRADO – Restricciones de uso

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL – PROHIBICIÓN DE REPRODUCCIÓN

Todo el material contenido en este documento está protegido por la Constitución Política de Colombia, y las leyes sobre propiedad intelectual concerniente a Derechos de Autor existentes en Colombia.

El uso de imágenes (figuras, mapas, fotografías, entre otras), tablas y demás elementos contenidos en este documento, que sea objeto de protección de la propiedad intelectual será únicamente para uso educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde lo obtuvo mencionando al autor o a los autores. Cualquier uso distinto como lucro o beneficio, reproducción, edición o modificación, entre otros aspectos, incurrirá en violación a la ley y estará sujeto a las sanciones que se establezcan con el fin de proteger los derechos del titular de la propiedad intelectual.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS**



La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



NOTA DE ACEPTACIÓN:

El trabajo de grado titulado "MONITOREO DE MERCURIO Y METILMERCURIO EN LA POBLACIÓN ALEDAÑA A LA CIÉNAGA DE BETANCÍ, MONTERÍA, CÓRDOBA" realizado por LUIS FELIPE TERAN ARBOLEDA, cumple con los requisitos exigidos por la facultad de Ciencias Básicas para optar por el título de Químico y ha sido aprobado.

MSc. Iván David Urango Cárdenas
DIRECTOR

MSc. Saudith María Burgos Núñez
CODIRECTOR (A)

MSc. Roberth de Jesús Patemina Uribe
JURADO

MSc. Basilio Díaz Pongutá
JURADO



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS.	19
Objetivo general.....	19
Objetivos específicos	19
MARCO TEÓRICO.....	20
Metales pesados	20
Disponibilidad de metales pesados en el medio ambiente.....	20
Metales pesados en peces de agua dulce y su impacto en la salud humana.	21
Exposición y toxicidad en humanos por metales pesados.	22
Mercurio.....	23
Ciclo biogeoquímico del mercurio.....	24
Persistencia y circulación del mercurio a nivel mundial.	26
Efectos adversos de la exposición al mercurio.	27
Farmacocinética del mercurio.....	28
Mercurio metálico	28
Calomelano (Hg_2^{2+})	28
Mercurio mercúrico (Hg^{2+}).....	29
Mercurio orgánico.....	29
Mercurio y metilmercurio en cabello.....	29
Normatividad del mercurio en seres humanos establecida por la OMS	30
Situación de Colombia con respecto al mercurio.	31



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



METODOLOGÍA.....	37
Descripción de la investigación.....	37
Reactivos, materiales y equipos.....	37
Reactivos.....	37
Materiales.....	37
Materiales de referencia y estándares	38
Equipos	38
Área de estudio	38
Toma de muestras	39
Preparación de muestras	40
Análisis de las concentraciones de Mercurio Total (HgT) y Metilmercurio (MeHg)	42
Control de calidad.....	43
Valoraciones de los participantes.....	43
Tratamiento estadístico de los resultados.	44
RESULTADOS.....	45
Recopilación datos de monitoreo.....	45
Resultados y análisis estadístico muestreo 2021	45
Resultados y análisis estadístico muestreo 2022	47
Resultados y análisis estadístico muestreo 2023	48
Resultados y análisis estadístico monitoreo años 2021-2023	49
Análisis estadístico comparativo ANOVA-Tukey de HgT y MeHg entre muestreos	50
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	71



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

<i>ABREVIATURA</i>	<i>TÉRMINO</i>
EPA	Agencia de Protección Ambiental
DMA	Analizador Directo de Mercurio
mg	Miligramo
Kg	Kilogramo
HgT	Mercurio Total
MeHg	Metilmercurio
OMS	Organización Mundial de la Salud
SD	Desviación Estándar
μL	Microlitro



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Formato de encuesta de obtención de datos.....	71
Anexo 2. Materiales de referencia de mercurio en cabello humano.....	75
Anexo 3. Estandares de mercurio 1000 mg/L en HNO ₃ 0,5 M.....	76
Anexo 4. Resultados de mercurio y metilmercurio de los diferentes muestreos.....	77
Anexo 5. Curva de calibrado para análisis.	79
Anexo 6. Graficas de cajas y bigotes para prueba de Tukey.	81
Anexo 7. Formato de consentimiento informado	82
Anexo 8. Ejemplo de control de calidad analítico HgT Y MeHg (blancos, estándar, duplicados, adicionados y material de referencia)	85



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la penetración del mercurio en la cadena alimenticia marina con los niveles que acumulan los distintos tipos de peces y las recomendaciones de la EPA sobre sus cantidades de consumo aconsejables.	25
Figura 2. Ciclo biogeoquímico del mercurio	26
Fuente: (Lea Sánchez, 2015)	26
Figura 3. Sitio de muestreo, Ensenada de Hamaca, Ciénaga de Betancí, Montería, Córdoba. ...	39
Figura 4: Ejemplo toma de muestra de cabello.	40
Figura 5. Proceso de lavado y homogenización de la muestra de cabello. (A) cabello antes de lavar, (B) lavado con acetona, (C) Cabello homogenizado.	41
Figura 6. Analizador Directo de Mercurio (DMA 80).....	42
Figura 7. Proceso de pesado de muestra para análisis de HgT.....	43
Figura 8. Resumen de resultados 1 ^{er} muestreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.....	46
Figura 9. Resumen de resultados 2 ^{do} muestreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.....	47
Figura 10. Resumen de resultados 3 ^{er} muestreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.....	48
Figura 11. Resumen de resultados monitoreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.....	50



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de la media para las concentraciones de HgT (mg.kg^{-1}) y MeHg (mg.kg^{-1}), las relaciones MeHg/HgT y la media de la frecuencia de consumo de peces (días por semana) obtenidas en los diferentes muestreos realizados a la población aledaña a la ciénaga de Betancí (Ensenada de La Hamaca).	45
Tabla 2. Media de concentración de HgT (mg.kg^{-1}) y MeHg (mg.kg^{-1}), relación HgT/MeHg y frecuencia de consumo de peces (días por semana) para el monitoreo en general.	50
Tabla 3. Análisis comparativo ANOVA de una variable con respecto a las medias de HgT y MeHg entre muestreos.	50
Tabla 4. Análisis comparativo prueba de Tukey con respecto a las medias de HgT y MeHg entre muestreos.	51
Tabla 5. Resumen de las concentraciones de HgT y MeHg (mg.kg^{-1}) obtenidas en varios estudios de diferentes regiones de Colombia. ^a Media \pm DE; ^b Mediana (rango).....	55



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Dedicatoria

A Dios primeramente por ser mi fiel compañero de vida y ayudarme en su propósito a cumplir este sueño; su gracia me sostiene cada día.

A mis padres Omilson Teran y Doris Arboleda por su amor, trabajo y sacrificio para verme cumplir este sueño, no hay palabras para expresar mi agradecimiento, cuanto me han enseñado y cuanto de ustedes vive y vivirá siempre en mí.

A mis hermanos Onilson Teran Arboleda y Angélica Teran Arboleda por ser uno de mis mayores motivos para seguir adelante.

A mis abuelas Luz Mila Arboleda y Marlenis Ramos por permitirme experimentar el amor más puro de esta vida y darme fortaleza para seguir adelante.

A toda mi familia por la confianza y las palabras de apoyo que fueron sustento en los momentos difíciles.

A mis hermanos de vida (Clara, Daniel G, Daniel O, Lilo, Melissa, Majo) que la U me regalo e hicieron de este camino una aventura hermosa e inolvidable, ruego a Dios que nuestro vinculo sea eterno, lojamo mis tqm.

A la profe Saudith Burgos por su apoyo y dirección en toda la carrera, ha sido para mí una madre y referente en mi camino a ser profesional.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios y a mi familia por estar siempre a mi lado, dándome la fuerza y el apoyo para cada día luchar por ver cumplido uno de mis mayores sueños en la vida, ser profesional.

A mis directores de tesis MSc. Iván David Urango Cárdenas y MSc. Saudith María Burgos Núñez por la oportunidad, la confianza depositaba en mí y todo el apoyo que me brindaron en este maravilloso proceso.

A todos mis compañeros del laboratorio de toxicología, especialmente a los químicos Yuris Benavides Tirado y Luis Díaz, por su acompañamiento y enseñanza.

A todos los profesores que han hecho parte de mi vida académica, gracias por compartir sus conocimientos y enseñarme a ser cada día mejor persona y profesional, especialmente a Jorge Meza, Luis Carlos Cogollo, Gustavo Serpa (quien me hizo empezar a amar la química), Iván Doria y Estefany Zúñiga por su acompañamiento, motivación y cariño, Adriana Caballero, Francisco Méndez, Luz Esther Cogollo, Juan Camilo Gamarra, Roberth Paternina, Diana Ossa, Jennifer Lafont.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera estuvieron en todo mi proceso, gracias por ayudarme a convertirme en el ser humano que soy hoy y del cual me siento orgulloso y afortunado de ser.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



RESUMEN

El mercurio es un elemento natural de la corteza terrestre actualmente considerado por la Organización mundial de la salud como uno de los diez productos o grupos de productos que representan problemas para la salud pública. El grado de toxicidad y sus efectos sobre la salud dependen de la forma del mercurio: elemental o metálico, inorgánico, al que en ciertos trabajos se puede estar expuesto y orgánica como el metilmercurio, que ingresa en el cuerpo humano por causas alimenticias y el tiempo de exposición. En este estudio se monitoreó las concentraciones de mercurio total (HgT) y metilmercurio (MeHg) de una muestra (n=14) de la población aledaña a la ciénaga de Betancí, Montería, Córdoba, durante tres años (2021-2023). Para el análisis se tomaron muestras de cabello de la región occipital del cuero cabelludo, se lavó con acetona y se homogenizó. Se implementó el método EPA 7473, Mercurio en sólidos y soluciones por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica. Para HgT se pesaron en celdas de níquel de 20 a 40 mg de cada muestra y se llevó al DMA-80. Para MeHg se realizó una extracción con tolueno en L-Cisteína 1% para posterior análisis por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados presentan que para los muestreos realizados el porcentaje de la población de estudio por encima del límite permisible por la OMS y la media de concentración para HgT en los años 2021, 2022 y 2023 fue del 100%, $4,1 \pm 1,97 \text{ mg.kg}^{-1}$, 86%, $3,1 \pm 1,73 \text{ mg.kg}^{-1}$ y 93%, $2,8 \pm 1,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ respectivamente. La media del monitoreo fue de $3,3 \pm 0,56 \text{ mg.kg}^{-1}$. La media de cada muestreo y del monitoreo superaron el valor límite permisible por la OMS. Las relaciones MeHg/HgT estuvieron entre 87% y 91%, evidenciando la contaminación vía alimentaria.

Palabras claves: Mercurio, Metilmercurio, Monitoreo, Ciénaga.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



ABSTRACT

Mercury is a natural element of the Earth's crust currently considered by the World Health Organization as one of the ten products or groups of products that represent problems for public health. The degree of toxicity and its effects on health depend on the form of mercury: elemental (or metallic), inorganic (to which one may be exposed in certain jobs) and organic (such as methylmercury, which enters the human body for reasons foods) and exposure time. In this study, the concentrations of total mercury (HgT) and methylmercury (MeHg) of a sample (n=14) of the population surrounding the Betancí swamp, Montería, Córdoba, were monitored for three years (2021-2023). For analysis, hair samples were taken from the occipital region of the scalp, washed with acetone and homogenized. The EPA 7473 method (Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation and atomic absorption spectrophotometry) was implemented. For HgT, 20 to 40 mg of each sample were weighed in nickel cells and taken to the DMA-80. For MeHg, an extraction was carried out with toluene in 1% L-Cysteine for subsequent analysis by thermal decomposition, amalgamation and atomic absorption spectrophotometry. The results show that for the sampling carried out, the percentage of the study population above the permissible limit by the WHO and the average concentration for HgT in the years 2021, 2022 and 2023 was 100%, 4.1 ± 1.97 mg.Kg⁻¹, 86%, 3.1 ± 1.73 mg.Kg⁻¹ and 93%, 2.8 ± 1.5 mg.Kg⁻¹ respectively. The monitoring mean was 3.3 ± 0.56 mg.Kg⁻¹. The average of each sampling and monitoring exceeded the limit value permissible by the WHO. The MeHg/HgT ratios were between 87% and 91%, evidencing contamination via food.

Key words: Mercury, Methylmercury, Monitoring, swamp.



INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados como Hg, As, Ni, Cd, entre otros, es actualmente una problemática mundial, debido principalmente a las actividades realizadas por el hombre en medio de procesos industriales y no industriales con el fin de obtener recursos (Reyes et al., 2016). Actualmente este tipo de contaminación está teniendo un gran impacto en el ambiente, lo cual, se evidencia con el gran número de estudios que se pueden encontrar a la hora de investigar esta problemática, arrojando índices elevados de contaminantes con impacto directo en los ecosistemas y la población humana.(Romero Ledezma, 2009)

El mercurio es un elemento que actualmente es considerado por la Organización Mundial De La Salud (OMS) como uno de los diez productos o grupos de productos químicos que representan especiales problemas para la salud pública (OPS/OMS, 2023). Se puede encontrar al mercurio en el ambiente de diferentes formas, tales como son: elemental o metálico e inorgánico, al que en ciertos trabajos se puede estar expuesto; también de forma orgánica, tal como el metilmercurio, el cual ingresa en el cuerpo humano por causas alimenticias. Cada una de estas formas en las que podemos encontrar el mercurio tienen diferencias en su grado de toxicidad y en sus efectos sobre la salud de los seres humanos (Gracia H et al., 2010a).

La exposición al mercurio incluso en pequeñas cantidades puede provocar graves problemas de salud; puede ser tóxico para los sistemas nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos, además, es de alto peligro para el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida. La principal exposición al mercurio se genera por la alimentación, debido al consumo de pescado y marisco contaminados con metilmercurio, compuesto que se encuentra presente en estos alimentos (US EPA, 2016).

En Colombia, actualmente se evidencian grandes problemáticas de contaminación por mercurio, principalmente en lugares con actividad minera. Zonas como la Mojana (Negrete et al., 2018), Río Atrato (Malagon-Rojas & Sonia, 2018), Choco (Palacios-Torres et al., 2018), entre otros (Suárez-Criado et al., 2023), muestran altos índices de contaminación.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



En Córdoba, ha sido ampliamente estudiado la ciénaga de Ayapel debido al gran impacto de contaminación que ha provocado la actividad minera, en la cual se han encontrado concentraciones de mercurio en la población por encima de los límites permisibles por la OMS (Gracia H et al., 2010a). En Montería, un estudio realizado por el grupo de aguas, química ambiental y aplicada en la ciénaga Betancí a varias especies de peces mostraron altos niveles de mercurio, lo cual, es un posible indicador de contaminación en la población (Flórez et al., 2021).

Teniendo en cuenta el biomarcador de contaminación por Hg en los peces de la ciénaga (Flórez et al., 2021) y el consumo activo de peces por la población de estudio, esta investigación buscó monitorear las concentraciones de mercurio y metilmercurio durante un periodo de tres años en una muestra de la población aledaña a la ciénaga del Betancí, Montería- Córdoba, además de evaluar variables de edad y dieta de la población con respecto a los valores de concentración encontrados.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



OBJETIVOS.

Objetivo general.

Realizar un monitoreo de las concentraciones de mercurio (Hg) y metilmercurio (MeHg) en cabello y determinar el impacto bajo diferentes variables en una muestra de la población aledaña a la ciénaga del Betancí Montería – Córdoba.

Objetivos específicos

- Evaluar anualmente, durante un periodo de tres años las concentraciones de mercurio y metilmercurio en una muestra de la población aledaña a la ciénaga del Betancí.
- Estudiar la relación y variabilidad de las concentraciones de Hg y MeHg con respecto a las variables de edad y dieta de la población.
- Analizar los cambios en las concentraciones de mercurio y metilmercurio durante el monitoreo mediante análisis estadístico.



MARCO TEÓRICO

Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de metales y metaloides naturales que poseen un número atómico mayor a 20 y su densidad elemental es superior a 5 g/cm^3 a los cuales se les asocia con contaminación y toxicidad potencial (Briffa et al., 2020). Los metales pesados pueden o no ser esenciales según su papel dentro de los sistemas biológicos, los esenciales tienen gran importancia en los organismos vivos, entre ellos las interacciones son complejas, debido a que, dependiendo el grupo de organismo la lista de metales esenciales puede variar. Otro factor importante es la concentración, la deficiencia o exceso puede producir enfermedades o condiciones anormales (Franco et al., 2016). Algunos metales esenciales son Fe, Co, Ni, Cu, Zn y Mo que constituyen micronutrientes u oligoelementos para las plantas, además, de ser fundamentales en el crecimiento, la resistencia al estrés, biosíntesis y la función de biomoléculas como carbohidratos, ácidos nucleicos, clorofila, productos químicos de crecimiento y metabolitos secundarios. Por otra parte, están los no esenciales dentro de los procesos biológicos y tóxicos como Cd, Pb y Hg. (Ali et al., 2019)

Los metales pesados están considerados entre los contaminantes más estudiados, lo que se atribuye a que cualquiera de estos dependiendo de la dosis y la exposición puede convertirse en un toxico potencialmente peligroso. Dentro de las clasificaciones ambientales el Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg y As constituyen los metales pesados más tóxicos (Ferrer, 2003).

Disponibilidad de metales pesados en el medio ambiente

La disponibilidad de metales pesados en el medio ambiente se puede dar por medios naturales, geogénicos, lito génicos como antropogénicos. Dentro de las fuentes naturales o geológicas se puede encontrar la erosión de rocas con contenido de metales y las erupciones volcánicas. Todo el desarrollo industrial globalizado y los procesos de urbanización han generado un incremento acelerado de la participación de las actividades antropogénicas en esta problemática de



contaminación con actividades como la minería, los procesos industriales y las prácticas agrícolas. (Ali et al., 2019)

Para los ecosistemas acuáticos y terrestres los metales trazas constituyen una amenaza importante. Tras la liberación debido a fuentes naturales y antropogénicas estos metales entran al ambiente contaminando fuentes de agua, sedimentos y suelos. Dada la persistencia de estos contaminantes, son acumulados por la biota y filtrados a las fuentes de aguas subterráneas, lo cual, representa un riesgo potencial para la salud humana, siendo de gran importancia el monitoreo de las concentraciones y la distribución de estos contaminantes en el ambiente. En la biota estos metales se acumulan en los organismos vivos y se transfieren entre los niveles tróficos en las cadenas alimenticias. La acumulación de estos está determinada por el índice de acumulación y eliminación del cuerpo (Rodríguez-Eugenio, 2018).

Desde la perspectiva ambiental, ecológica y de salud humana, la bioacumulación de metales pesados posee gran importancia respecto a que, la contaminación de las cadenas alimenticias acuáticas y terrestres con metales pesados de alta toxicidad representa un riesgo para la salud de los organismos consumidores, incluyendo los seres humanos (Vergara Estupiñan, 2019).

Metales pesados en peces de agua dulce y su impacto en la salud humana.

Dentro de los ecosistemas acuáticos los organismos se exponen de manera simultánea a diferentes metales, generando interacciones aditivas, sinérgicas o antagónicas. La biota acuática está expuesta a través del agua, los sedimentos y los alimentos, lo cual, deja expuestos a los peces a los metales pesados tóxicos generados por fuentes naturales y antropogénicas. Los peces poseen bajos niveles de colesterol, altos niveles de ácidos grasos insaturados y son una importante fuente de proteínas, por lo que se recomienda su consumo en una dieta equilibrada. La contaminación por metales pesados en peces tiene relevantes consecuencias ambientales, ecológicas, sociales y constituye una problemática mundial de gran importancia. Por lo tanto, es importante la evaluación de las concentraciones en los diferentes tejidos de los peces como proceso de gestión del consumo humano y los sistemas acuáticos, debido a que, la contaminación



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



por metales pesados en peces constituye un riesgo a la salud humana, generando preocupación en cuanto a su consumo y el efecto en los grupos más sensibles de población humana como niños, mujeres y población con otras enfermedades asociadas (Ortega Herrera & Peña Coronado, 2020).

Exposición y toxicidad en humanos por metales pesados.

Los seres humanos están expuestos a metales pesados por diferentes rutas tales como la ingestión, inhalación y absorción dérmica. Generalmente es desconocido para las personas la exposición a metales pesados, aun mas en los países en desarrollo. La exposición puede ser ocupacional, cuando se da en los lugares de trabajo y ambiental, cuando se da en el medio ambiente. La ingesta de agua y alimentos contaminados constituye una fuente importante de exposición en los humanos debido a que poseen una dieta omnívora que los deja expuestos a gran variedad de alimentos que pueden aportar contaminación (Jiménez Oyola, 2021).

Dentro de las cadenas alimenticias humanas la bioacumulación y biomagnificación de metales pesados tóxicos es una gran problemática. La contaminación por metales pesados en cuerpos de agua dulce como ríos, lagos y arroyos provoca la bioacumulación en peces de agua dulce y en la tierra la bioacumulación de estos elementos en cultivos agrícolas representando una amenaza para la salud de los seres humanos que se proveen de ellos. En el siglo XX se pudo evidenciar el gran riesgo al que se está expuesto con la enfermedad de Minamata (DM) causada por el consumo de pescado contaminado con Hg y la enfermedad de itai-itai en Japón provocada por arroz contaminado con Cd. La biomagnificación, aunque es un tema controvertido en la ecotoxicología se ha demostrado en estudios su presencia en algunas cadenas alimenticias, lo cual, implica un mayor riesgo para los organismos en niveles tróficos más altos, como lo es el ser humano (Vergara Estupiñan, 2019).

Específicamente en cuanto a toxicidad se ha demostrado que los metales pesados son cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos. Son generadores de especies oxigénicas reactivas (ROS) induciendo estrés oxidativo, el cual, provoca el desarrollo de diversas enfermedades y condiciones anormales en los organismos. Además, actúan como venenos metabólicos con una



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



toxicidad atribuida principalmente a la reacción con sistemas enzimáticos de sulfhidrilo (^{-}SH) y su posterior inhibición. (Ali et al., 2019)

Metales pesados como Cd, Pb, Hg y As agotan los principales antioxidantes de las células, en específico los antioxidantes y las enzimas que tienen el grupo tiol (^{-}SH). Estos pueden contribuir al aumento de las especies reactivas de oxígeno (ROS) tales como el radical hidroxilo (HO^{\cdot}), el radical superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) devastando las defensas antioxidantes inherentes de las células. Los metales pesados, incluidos Cd, Pb y Hg, son nefrotóxicos, especialmente en la corteza renal. La forma química de los metales pesados es importante en la toxicidad. La toxicidad del mercurio depende en gran medida de la especie de Hg. Estudios realizados como el implementado a personas de la ciudad de Lahore encontraron concentraciones relativamente más altas de metales pesados tóxicos (Cr, Cd y Pb) y relativamente más bajas del elemento antioxidante Se en pacientes con cáncer y diabetes en comparación con sujetos normales (Cadavid-Muñoz et al., 2020).

Mercurio.

El mercurio es un elemento de símbolo (Hg), número atómico 80, densidad $13,5336 \text{ g/cm}^3$. A temperatura ambiente es un metal líquido plateado clasificado como el 66° metal más abundante. Se encuentra en el mineral cinabrio a base de sulfuro de mercurio, aunque de manera natural es difícil de hallar (Beal et al., 2015).

El mercurio posee gran variedad de usos, se le puede encontrar en barómetros, termómetros, fabricación de cloro, recuperación de oro, amalgamas dentales, bombillas fluorescentes compactas, cloruro de mercurio (I) utilizado en fotoquímica y electrodos de calomelanos, cloruro de mercurio (II) utilizado en insecticidas y veneno para ratas, sulfuro de mercurio utilizado como pigmentos en pinturas, catalizador, rectificadores e interruptores eléctricos. (Briffa et al., 2020)

Desde el inicio de la era industrial se han presenciado un aumento considerable de los niveles de mercurio en el medio ambiente. El mercurio puede ser encontrado actualmente en diversos



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



medios y alimentos (especialmente el pescado) en cualquier lugar del mundo a niveles que afectan adversamente a la vida silvestre y los seres humanos. Uno de los factores que ha contribuido a la generalización de los casos de exposición son las actividades antropogénicas. Las prácticas del pasado han dejado un legado de mercurio en vertederos, los desechos de la minería y los emplazamientos, suelos y sedimentos industriales contaminados. En este proceso de contaminación inclusive las regiones donde se registran emisiones mínimas de mercurio, como el Ártico, se han visto adversamente afectadas debido al transporte transcontinental y mundial del mercurio (PNUMA, 2019).

Ciclo biogeoquímico del mercurio

El ciclo del mercurio inicia con la emisión en la corteza terrestre, seguido pasa al aire, el agua y el suelo, donde por diversos procesos entra a los organismos vivos y posteriormente se dispone a ser consumido por el hombre a través de la cadena alimenticia. El MeHg es la forma más común de Hg encontrada en los organismos, esta se da por la biotransformación del Hg por microorganismos en los océanos, ríos y lagos, llegando así a bioacumularse y biomagnificarse en las diferentes especies acuáticas en estos ecosistemas (ver figura 1). Las especies carnívoras grandes y los peces de más edad son los que generalmente se encuentran con concentraciones de Hg más altas (Carranza-Lopez et al., 2019).

El mercurio puede dispersarse en los diferentes compartimentos de la capa terrestre. Esto puede darse por diferentes procesos entre los cuales están los agentes biológicos externos como los efectos climáticos y medioambientales, así como el flujo entre los diferentes compartimentos (ver figura 2) (Lea Sánchez, 2015).



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

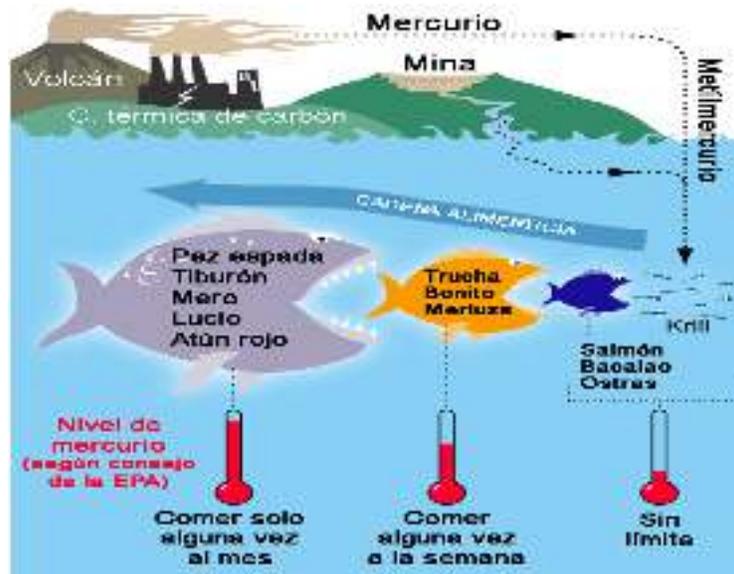


Figura 1. Diagrama de la penetración del mercurio en la cadena alimenticia marina con los niveles que acumulan los distintos tipos de peces y las recomendaciones de la EPA sobre sus cantidades de consumo aconsejables.

Fuente:(Trekking, 2009)

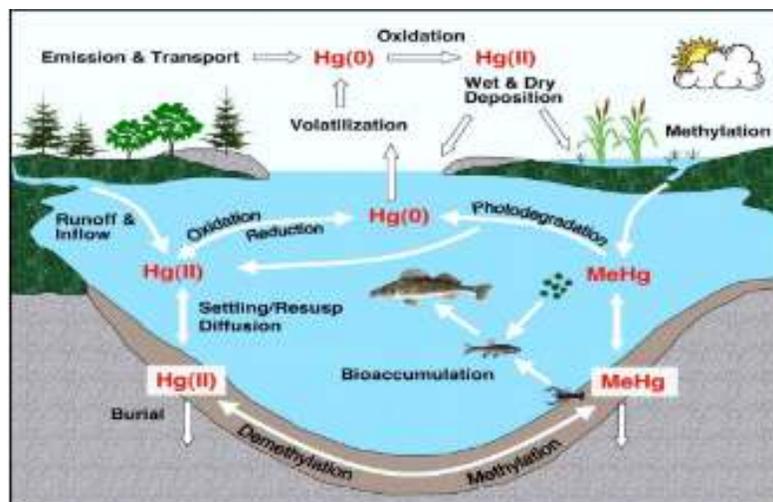




Figura 2. Ciclo biogeoquímico del mercurio

Fuente: (Lea Sánchez, 2015)

Persistencia y circulación del mercurio a nivel mundial.

Cuando se hace referencia al mercurio, la fuente más importante de contaminación son las emisiones al aire, además de esto se producen emisiones de mercurio también por diversas fuentes que van directamente a la tierra y el agua. Una vez que se libera, este metal tiende a permanecer en el medio ambiente, donde circula de diferentes formas entre el aire, agua, suelos, sedimentos y biota. Las emisiones actuales se añaden al fondo de mercurio existente en el mundo que se sigue movilizándose, depositándose en la tierra y el agua y volviendo a moverse (OPS/OMS, 2023).

La forma en que se libera el mercurio tiende a variar según los tipos de fuentes y otros factores. Las emisiones al aire en su mayoría se dan en forma de mercurio elemental gaseoso, el cual, es transportado a nivel mundial a regiones alejadas de las fuentes de emisión. El resto de las emisiones se producen en forma de mercurio gaseoso, inorgánico, iónico (como el cloruro de mercurio) o consolidado en partículas emitidas. Estas formas de emisión poseen un período de vida más corto en la atmósfera y se pueden llegar a depositarse en tierras o masas de agua a distancias aproximadas de 100 a 1000 kilómetros desde su fuente. El mercurio elemental que se encuentra en la atmósfera puede transformarse en mercurio iónico, que genera una importante vía para el depósito de las emisiones de mercurio elemental (OPS/OMS, 2023.)

Una vez que el mercurio es depositado, este puede cambiar de forma (principalmente por metabolismo microbiano) y llegar a convertirse en metilmercurio, el cual, tiene la capacidad de acumularse en organismos (bioacumulación) y concentrarse en las cadenas alimentarias (biomagnificación), proceso que se da especialmente en la cadena alimentaria acuática (peces y mamíferos marinos). El metilmercurio es, por lo tanto, la forma que genera mayor preocupación. Casi todo el mercurio que se encuentra en los peces es metilmercurio (Miranda-Mejía et al., s. f.)



Efectos adversos de la exposición al mercurio.

El mercurio posee una variedad de efectos adversos, importantes y documentados, en cuanto a la salud humana y el medio ambiente de todo el mundo. El mercurio y sus compuestos son sumamente tóxicos, principalmente para el sistema nervioso en desarrollo. El nivel de toxicidad en seres humanos y otros organismos tiende a variar según la forma química, la vía de exposición, la cantidad y la vulnerabilidad de la persona expuesta. Hay diferentes formas en las que los seres humanos pueden estar expuestos al mercurio, incluido, entre otras cosas, el consumo de pescado, los usos ocupacionales y domésticos, las amalgamas dentales y las vacunas que contienen mercurio (OPS/OMS, 2023.)

El metilmercurio tiene efectos adversos para los seres humanos y la vida silvestre. Este compuesto atraviesa rápidamente la barrera placentaria y la barrera hematoencefálica, y es un neurotóxico que puede afectar muy negativamente el desarrollo del cerebro. Los estudios han demostrado que la presencia de metilmercurio en las dietas de mujeres embarazadas puede surtir efectos adversos sutiles pero persistentes en el desarrollo del niño, que se observan desde el comienzo de la edad escolar. Algunos estudios indican, además, que los pequeños aumentos en la exposición al metilmercurio pueden afectar negativamente al sistema cardiovascular. Un número importantísimo de personas y animales silvestres están actualmente expuestos a niveles que plantean riesgos de este tipo y posiblemente otros efectos adversos (OMS 2018)

Algunos grupos reaccionan de manera particular a la exposición al mercurio, en particular los fetos, los recién nacidos y los niños pequeños, debido a que el sistema nervioso en desarrollo es muy delicado. Es por eso, que los padres, las mujeres embarazadas y las que pudieran estarlo deben tener plena conciencia de los posibles daños que causa el metilmercurio. El consumo moderado de pescado con niveles de mercurio bajos probablemente no presenta un nivel peligroso de exposición. Las poblaciones indígenas, sin embargo, así como otros grupos que consumen grandes cantidades de pescado o mamíferos marinos contaminados, y los trabajadores que están expuestos al mercurio, como los que trabajan en actividades mineras de oro y plata en



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



pequeña escala, pueden estar expuestos a niveles altos de mercurio y, por lo tanto, corren riesgo. Aparte de su importancia para muchas culturas indígenas, el pescado constituye un componente muy valioso de la dieta humana en muchas partes del mundo, ya que proporciona nutrientes que, por regla general, no se encuentran en otras fuentes alimenticias. El mercurio constituye una importante amenaza para esta fuente de alimentos. De igual modo, el pescado contaminado puede crear graves problemas económicos para las comunidades y regiones que dependen de la pesca para su supervivencia (PNUMA, 2019).

Farmacocinética del mercurio.

Mercurio metálico

Se absorbe por inhalación principalmente, seguida de ingestión, posee gran afinidad por el grupo sulfurilo, el cual, se une a los aminoácidos del cuerpo que contienen azufre. Este atraviesa la barrera hematoencefálica y la placenta fácilmente adhiriéndose a los glóbulos rojos. La mayor parte del mercurio se oxida a mercurio mercúrico y otra parte es absorbido por el sistema nervioso central. Este tipo de mercurio es depositado en muchos tejidos del cuerpo, que incluyen la tiroides, el miocardio, los músculos, la mama, el hígado, las glándulas suprarrenales, la piel, los riñones, el páncreas, las glándulas sudoríparas, las glándulas salivales, los pulmones, los enterocitos, la próstata, los testículos y la leche materna. Además, posee afinidad a las superficies de las células T y a los grupos sulfhidrilo que afectan la función de estas y es excretado principalmente como mercurio mercúrico. (Briffa et al., 2020)

Calomelano (Hg_2^{2+})

Este tipo de mercurio posee poca solubilidad en agua y es difícil de absorber intestinalmente, aunque en cierta medida se oxida para ser más absorbible, aunque es de poca duración en el cuerpo se le asocian la enfermedad rosada y la acrodinia. (Briffa et al., 2020)



Mercurio mercúrico (Hg^{2+})

Posee efectos corrosivos en el tracto intestinal y aunque es poco absorbido, esto aumenta su absorbencia. Se puede encontrar en la metalotioneína, los eritrocitos o el glutatión, o suspendido en el plasma unido a los grupos sulfhidrilo, además de acumularse en la placenta, el líquido amniótico y los tejidos fetales. Aunque, no atraviesa la barrera hematoencefálica, puede acumularse en el cerebro a través de transportadores de aminoácidos como la cisteína. En su mayoría este tipo de mercurio puede encontrarse en el túbulo renal enrevesado, unido a la metalotioneína, en el periportal del hígado, y en menor medida en el plexo coroideo, tejidos epiteliales y testículos. Su excreción se da principalmente por medio de la orina, las heces y en menor medida, por el sudor, las lágrimas, la saliva y la leche materna. (Briffa et al., 2020)

Mercurio orgánico

El mercurio orgánico, principalmente metilmercurio, es absorbido eficientemente por inhalación, ingestión y cutáneo. Al estar en el torrente sanguíneo, este se transporta y se adhiere al grupo sulfhidrilo, principalmente de la cisteína. El metilmercurio se concentra en el cerebro, el hígado, los riñones, el feto, la placenta y el cerebro fetal, la médula ósea y los nervios periféricos. Este tipo de mercurio sufre una lenta desmetilación en mercurio inorgánico y es excretado principalmente vía fecal, seguido de la leche materna. (Briffa et al., 2020)

Mercurio y metilmercurio en cabello

En el campo de la toxicología el análisis de cabello es una herramienta importante debido a su composición, fácil almacenamiento y transporte, además de poder ser almacenado por largos periodos de tiempo. Generalmente el 80 % del mercurio en el cabello se encuentra en forma de mercurio orgánico (MeHg), la cual, es la forma más tóxica para los seres humanos, ya que es absorbido por los folículos pilosos como complejos de MeHg-Cisteína (Pino et al., 2018). Además, existe una relación directamente proporcional entre la incorporación de mercurio en cabello y la concentración en sangre, el cual puede significar un retraso de 1 a 2 meses desde la ingesta de MeHg. (Raimann et al., 2014).



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



La concentración de Hg en sangre, a menos que esté complementada con datos adicionales de exposición temporal, no proporciona información clara sobre la magnitud o el momento de las exposiciones que producen la concentración total de Hg observada en una muestra determinada. En contraste, la concentración de Hg en el cabello como un biomarcador de la exposición a MeHg tiene las ventajas de poder integrar la exposición en un tiempo conocido y limitado y recapitular la magnitud y el momento de la exposición. La capacidad para obtener dicha información del cabello se basa en dos suposiciones: que los tallos de cabello en crecimiento incorporan Hg de la sangre circulante en proporción a la concentración de Hg en la sangre, y que los tallos de cabello crecen a una tasa constante que no varía significativamente entre individuos. El primero de estos supuestos es necesario para establecer una relación cuantitativa entre la concentración de Hg del cabello y la ingesta de MeHg, ya que la concentración de Hg en la sangre es un compartimento cinético intermedio. El segundo supuesto es necesario para establecer una relación entre la ubicación a lo largo del cabello y el tiempo de exposición. En contraste con las muestras de sangre de adultos, las muestras de cabello no son invasivas y pueden realizarse sin supervisión médica. La concentración de Hg en el cabello se usa a menudo para estimar la exposición a MeHg (Huillca Alvino, 2018).

Normatividad del mercurio en seres humanos establecida por la OMS

Algunas organizaciones internacionales establecen como límites "admisibles" de Hg en personas que, por su trabajo, no están en contacto con Hg o derivados los inferiores a 10 $\mu\text{g/L}$ y 20 $\mu\text{g/L}$ en sangre y orina (<25 $\mu\text{g/g}$ creatinina en orina de 24 horas), respectivamente. En personas expuestas al Hg (mineros, trabajadores de empresas que fabrican/manipulan cloro, sosa, lámparas fluorescentes, baterías, entre otras.), el Hg sanguíneo al final del último turno de trabajo de la semana puede llegar a 15 $\mu\text{g/L}$ y seguir siendo éste un nivel admisible. La máxima concentración de Hg, en orina de 24 horas, admitida para los trabajadores expuestos a este metal tóxico es de 35 $\mu\text{g/g}$ de creatinina. La concentración máxima permisible de Hg ambiental en los lugares de trabajo es de 25 $\mu\text{g/m}^3$ (0,025 mg/m^3). Se considera aceptable una concentración en



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



el agua de 0,001 mg/L y una ingesta semanal tolerable de 5 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ de Hg total y 3,3 $\mu\text{g}/\text{Kg}$ de metilmercurio. En cabello el límite máximo admisible es de hasta 1 ppm o de 1,0 $\mu\text{g}/\text{g}$ (OMS, 2018)

Situación de Colombia con respecto al mercurio

En Colombia las actividades antropogénicas y en específico la minera han dejado una gran huella de contaminación por mercurio, no solo en estas zonas, sino también, en regiones aledañas a través del ciclo geoquímico de este elemento (Lominchar et al., 2014), evidenciada en gran variedad de estudios a lo largo de las regiones mineras y no mineras de Colombia como se evidencia a continuación.

La minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) ha sido identificada como la fuente antropogénica más importante de Hg a escala mundial y una ruta importante de exposición humana al Hg. En este contexto, se evaluó el Hg (HgT) total en sangre, orina y cabello, y el metilmercurio (MeHg) en muestras de cabello de 238 participantes con exposición ocupacional a Hg en las comunidades de MAPE más relevantes de Colombia. Se relacionaron las concentraciones de mercurio de las diferentes matrices biológicas con variables como la edad, sexo, índice de masa corporal, consumo de pescado, tiempo de exposición y actividades ocupacionales específicas. Se obtuvo que alrededor del 40% de los mineros mostraron concentraciones de Hg en sangre, orina y / o cabello por encima de los umbrales de la OMS. Al implementar un modelo de regresión lineal múltiple se identificó que la quema de amalgama y el consumo de pescado eran predictores significativos de la exposición a Hg en la población estudiada. (Calao-Ramos et al., 2021a)

En 13 municipios ubicados a lo largo de la cuenca del río Atrato se evaluó la distribución de Hg, As, Pb y Cd en 47 especies de peces ($n = 1372$) y el riesgo acumulativo para la salud humana en sus habitantes ($n = 2325$), esta es una de las zonas con mayor biodiversidad a nivel mundial y uno de los sitios con mayor impacto ambiental de la minería de oro en Colombia. Los resultados mostraron que, en función de las concentraciones medias de Hg y As, los peces representan un



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



alto riesgo potencial para la salud humana. Los cálculos de la ingesta diaria estimada (EDI) mostraron que los seres humanos podrían presentar efectos perjudiciales para la salud, mientras que el cociente de peligro objetivo (THQ) por encima de 1 indicó que la población expuesta podría experimentar riesgos para la salud no cancerígenos, en mayor medida por los efectos acumulativos de Hg (80,4%) y As (18,2%).(Salazar-Camacho et al., 2022)

En estanques mineros de oro abandonados (AGMPs) ubicados en áreas mineras al oeste de Colombia se realizó el análisis y evaluación de los riesgos totales de mercurio (HgT) y metilmercurio (MeHg) en diferentes matrices (agua, sedimentos, macrófitos, peces y salud humana), con el fin de identificar su condición ambiental. las diferentes matrices estudiadas mostraron niveles de Hg por encima de los límites permisibles. El MeHg fue la especie química más abundante en peces (MeHg/HgT: 83.2–95.0%), lo cual, indica una mayor biodisponibilidad y su riesgo para la salud humana. Las muestras de peces (15%) mostraron niveles de HgT por encima del límite de la OMS (0,5 $\mu\text{g g}$). La bioacumulación y la biomagnificación de MeHg fueron mayores en los carnívoros, lo que representa una fuente de exposición y una amenaza potencial para la salud humana (Gutiérrez-Mosquera et al., 2021).

En la región biogeográfica del Chocó se evaluó los niveles de Hg total (T-Hg) en cabello humano, pescado, sedimentos y aire; y en base al consumo de pescado se determinó los riesgos para la ingestión de T-Hg, dando como resultados la presencia de contaminación por Hg de manera general en el lugar de estudio y generando preocupación con respecto a las acciones gubernamentales para enfrentar esta problemática (Palacios-Torres et al., 2018).

En un estudio realizado a 39 no expuestos y 73 residentes de la mojana, área expuesta a contaminación por Hg, se evaluó, mediante el ensayo de citoma de micronúcleo de bloqueo de citocinesis (CBMN-Cyt) el daño citogenético en linfocitos periféricos humanos aislados, la formación de micronúcleo con anticuerpo anti-cinetocoro (tinción CREST), los niveles de Hg total en cabello (HgT), el consumo de pescado y la dosis estimada de Hg. Se demostró un aumento significativo en los habitantes de la Mojana en cuanto a las frecuencias de micronúcleos



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



(MNBN), los puentes nucleoplásmicos (NPB) y las células necróticas y apoptóticas. El análisis de cabello arrojó un nivel medio general de T-Hg de $1,12 \pm 0,94 \text{ mg kg}^{-1}$ en los individuos con exposición y $0,15 \pm 0,05$ en los del área de referencia. En base la dosis de referencia de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA) aproximadamente el 40% de la población analizada excedió los niveles de T-Hg. El aumento de las frecuencias de MNBN y el alto consumo de pescado asoció niveles de T-Hg en el cabello. Las frecuencias de células necróticas y apoptóticas se asociaron con un alto contenidos de T-Hg y consumo de pescado. La tinción CREST mostro que al exponerse in vivo a Hg se genera inestabilidad genética mediante pérdida de fragmentos cromosómicos (clastogénicos). También, un elevado consumo de algunos peces, particularmente carnívoros parece aumentar significativamente las frecuencias MNBN (Galeano-Páez et al., 2021).

En una revisión sobre el alcance de la exposición humana al Pb y Hg se encontraron niveles preocupantes de Hg en poblaciones de la Amazonia colombiana, generando preocupación por la investigación de esta problemática y la necesidad de planes legislativos y educativos solidos para enfrentar de manera oportuna y efectiva las actividades antropogénicas que generan exposición (Olivero-Verbel et al., 2021).

La exposición a contaminantes por vía alimenticia es muy común, en un asentamiento de la zona con gran impacto por la actividad minera aurífera en Colombia se evaluó esta contaminación por frutas, tubérculos y pescados, determinando las concentraciones de mercurio (Hg) y arsénico (As) en tejidos comestibles y metilmercurio(MeHg) en el pescado para evaluar los riesgos asociados mediante encuestas 178 residentes divididos en tres grupos: niños (CHD), mujeres en edad fértil (WCBA) y el resto de la población (RP). Los resultados mostraron para diferentes alimentos valores de HQ para As y Hg superiores al nivel de seguridad ($HQ < 1$) en la mayoría de los grupos, con valores más altos de HQ asociado al pescado. Se encontraron cocientes de riesgo objetivo (HI) totales superiores a 1, en casi todos los grupos (excepto en los CHD con consumo de tubérculos), indicando riesgos potenciales no cancerígenos para la salud e indicando



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



la necesidad de aplicación de mecanismos de control y educación ambiental en estas poblaciones (Marrugo-Madrid et al., 2022)

En la región de la Mojana se realizó una evaluación neuropsicológica en niños y adolescentes sobre los efectos del Hg y el As tomando en consideración biomarcadores en cabello y sangre. Se encontró que el 57,1% de los sujetos tenían niveles de Hg y As en el cabello y la sangre por encima del valor de referencia según la USEPA, la OMS y la ATSDR con diferencias significativas estadísticamente ($p < 0,05$) entre los grupos estudiados. Además, se evidenció una correlación negativa significativa en cuanto a los indicadores integrados del componente verbal (CVB) y la función ejecutiva (EF) y se notó una pérdida de puntajes en medidas integradas dentro del CVB y EF en base a la regresión lineal múltiple (De la Ossa et al., 2023).

En una región de Antioquia (Colombia) se realizó la evaluación del riesgo toxicológico para la población a causa de la explotación de minería aluvial a cielo abierto, para esto se estudiaron las concentraciones de Hg y MeHg en alimentos de consumo local, incluidos pescado, cerdo, pollo, ñame, plátano y yuca. Se relacionaron en cuanto a niveles de Hg de la siguiente manera: pescado > cerdo > pollo > yuca > plátano > ñame (con un rango de 207,87 a 0,23 $\mu\text{g/g}$) y para MeHg se identificó en yuca > pescado > plátano > pollo > ñame > cerdo con niveles entre 1,567 y 0,434 $\mu\text{g/g}$. Los factores de exposición de riesgo de la ingesta diaria aceptable (IDA) y la ingesta semanal tolerable provisional (PTWI) mostraron una tendencia relacionada a los niveles de Hg y MeHg en los alimentos exhibieron una tendencia similar a la cantidad de metal en los alimentos evaluados. Este estudio muestra la potencial exposición al Hg y MeHg a través de los alimentos locales en esta población (Muñoz et al., 2023).

En un estudio realizado a las seis regiones mineras de oro más importantes de Colombia, cinco andinas (Nariño, Chocó, Antioquia, Bolívar y Sucre) y una amazónica (Vaupés) para determinar la composición de especies de Hg en cabello en relación con HgT para individuos relacionados y no relacionados con tareas de MAPE, comparar las concentraciones de Hg en el cabello con las pautas para el consumo de pescado y relacionarla con la información bibliográfica de los sitios



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



de extracción de oro de Colombia. Se obtuvo que los valores de concentración más altos para especies de mercurio se encontraron en el departamento amazónico de Vaupés, donde se consumen elevadas cantidades de pescado contaminado. En el resto de los departamentos los valores de MeHg y Hg(II) fueron significativamente inferiores a los obtenidos en Vaupés, pero sin diferencias estadísticas entre ellos. Los hombres presentaron concentraciones de especies de mercurio más altas que las mujeres lo cual se podría relacionarse al mayor consumo de peces con respecto a las mujeres. Las personas con mayor frecuencia de consumo de pescado (5 a 7 veces por semana) tenían valores significativamente más altos. La mediana del nivel de Hg(II) de las personas involucradas en tareas de minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) fue mayor, aunque no significativa ($p > 0,05$) que el resto de las personas estudiadas. Sin embargo, hubo diferencias significativas entre las personas involucradas y no involucradas en las tareas de MAPE cuando se emparejaron los porcentajes de la relación Hg(II)/HgT de estos grupos (Suárez-Criado et al., 2023).

El estudio realizado con el fin de evaluar las concentraciones de mercurio total (HgT) en cabello de habitantes del municipio de Ayapel (Córdoba) en el cual se tomaron 112 muestras de cabello de la región occipital inferior a pobladores ribereños de la ciénaga de Ayapel mayores de 14 años para ser analizadas por espectrometría de absorción atómica por vapor frío después de digestión ácida. Además de la aplicación de encuestas sobre síntomas clínicos relacionados con intoxicación por mercurio, previa aceptación del consentimiento informado, mostró una media de mercurio total en cabello de $2,18 \pm 1,77 \mu\text{g/g}$ con valores entre 0,11 y $12,76 \mu\text{g/g}$. la población estudiada de Ayapel presentó concentraciones de mercurio superiores a las permitidas internacionalmente por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y síntomas acordes con tales niveles, lo que se relaciona al alto consumo de pescado contaminado con mercurio (Gracia H et al., 2010a).

Teniendo en cuenta que el consumo de pescado es la principal fuente de exposición al mercurio en los humanos, siendo tóxico y alterando el sistema nervioso central, el estudio titulado



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



“relación de consumo de pescado y niveles de mercurio en pobladores aledaños al río San Jorge, Colombia” buscó estudiar la relación entre las concentraciones de mercurio total (HgT) en cabello y la frecuencia de consumo diario y semanal de pescado en cuatro poblaciones de la cuenca del río San Jorge encontrando concentraciones de Hg en cabello de 2,46 y en peces de 0,34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Este estudio demuestra que las concentraciones elevadas de mercurio en cabello están relacionadas con un aumento en la frecuencia en el consumo de pescado (Gracia et al., 2016).



METODOLOGÍA

Descripción de la investigación.

Esta investigación corresponde a un estudio exploratorio no probabilístico en el que se buscó generar hipótesis que impulsen el desarrollo de futuras investigaciones, por lo tanto, los niveles de rigurosidad en los procesos, aunque están basados en metodologías a gran escala no se adaptan completamente a estas.

Reactivos, materiales y equipos

Reactivos

- Hidróxido de sodio (NaOH) al 98% certificado pureza
- Cisteína grado reactivo marca MERCK
- Cloruro de Sodio (NaCl) marca MERCK
- Agua destilada tipo II
- Sulfato de cobre (CuSO_4) marca MERCK
- Bromuro de potasio (KBr) marca MERCK
- Ácido clorhídrico (HCl) suprapuro
- Tolueno HPLC marca MERCK
- Sulfato de sodio (Na_2SO_4)
- Acetato de sodio
- Acido Sulfúrico (H_2SO_4)

Materiales

- Balones volumétricos
- Transferpipetas
- Puntas para transfer
- Tubos falco 15 mL



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



- Celdas de cuarzo y níquel
- Gradillas
- Espátula

Materiales de referencia y estándares

- Materiales de referencia certificado de cabello (Human Hair IEAE-086 y MIND-01)
- Soluciones estándares certificadas de mercurio 1000 mg/L en HNO₃ 0,5 M

Equipos

- Analizador directo de mercurio DMA-80 Milestone
- Balanzas analíticas (Vibra HT y AS 220 R2 PLUS)
- Centrifuga (HETTICH ROTOFIX 32^a)
- Baño ultrasonido (Fisher Scientific FS60)

Área de estudio

El monitoreo fue realizado a una muestra de la población aledaña a la ciénaga del Betancí, en la vereda Ensenada de la Hamaca a 8,40392° o 8° 24' 14" norte, -75,86741° o 75° 52' 3" oeste, en Montería, Córdoba, Colombia (Ver figura 3). Esta ciénaga corresponde a una importante fuente hídrica en el departamento de Córdoba y el primer humedal en Montería en ser declarado área protegida. Cerca de ella se encuentran alrededor de 8 veredas, de las cuales, la pesca corresponde a su principal actividad económica, además de la agricultura y ganadería.



Figura 3. Sitio de muestreo, Ensenada de Hamaca, Ciénaga de Betanci, Montería, Córdoba.

Fuente: <https://mapcarta.com/es/N703309589/Mapa>

Toma de muestras

El monitoreo a la población estudiada se realizó mediante muestreos puntuales *in situ* durante tres años consecutivos (2021-2023), en el mes de mayo para los años 2021 y 2023, y enero para el año 2022. Se tomó una muestra de cabello a una muestra de la población de estudio (N=14) bajo dirección y acompañamiento de personal autorizado por la universidad de Córdoba y se llevaron de manera segura y efectiva al laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la universidad de Córdoba donde fueron entregadas para realizar el proceso de radicación e ingreso para análisis. Las muestras de cabello fueron obtenidas de la zona occipital de la cabeza con al menos 20 hilos de cabello cortando con tijeras a la raíz del cabello (ver figura 4) y se reservaron en sobres de papel para su posterior transporte. Se implementaron consentimientos informados a las personas estudiadas donde se les informó de manera clara y entendible el proceso realizado.

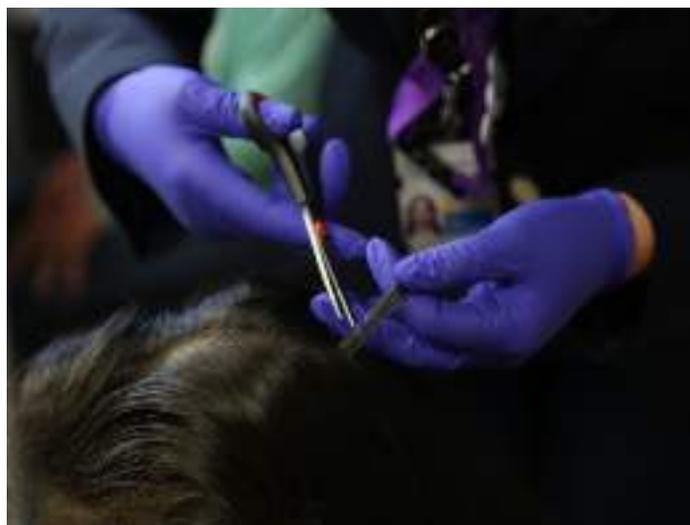


Figura 4: Ejemplo toma de muestra de cabello.

Fuente: <https://images.app.goo.gl/coEbXf1BPRwba6UB9>

Preparación de muestras

Antes de la realización de los análisis correspondientes a la investigación se realizó un lavado con acetona a cada muestra con el propósito de eliminar residuos de grasas y materia orgánica, se dejó secar a temperatura ambiente, luego se homogenizó haciendo uso de tijeras, esto con el fin de obtener una composición significativa de toda la muestra (ver figura 5)(Malagon-Rojas & Sonia, 2018).



(A)



(B)



(C)

Figura 5. Proceso de lavado y homogenización de la muestra de cabello. (A) cabello antes de lavar, (B) lavado con acetona, (C) Cabello homogenizado.

Fuente: propia, elaborada 2023



Análisis de las concentraciones de Mercurio Total (HgT) y Metilmercurio (MeHg)

A cada muestra de cabello, se le cuantificó la concentración de Mercurio total (HgT) y Metilmercurio (MeHg). Los análisis se llevaron a cabo en base al método EPA 7473 (Mercurio en sólidos y soluciones por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica), con un Analizador Directo de Mercurio, DMA 80 Milestone (ver figura 6), haciendo uso de metodologías propias validadas en el laboratorio de toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba. Para el desarrollo del procedimiento de HgT se pesaron en celdas de níquel de 20 a 40 mg de cada muestra (ver figura 7) y se llevaron al DMA-80. Para MeHg se realizó una extracción con tolueno en L-Cisteína 1%, se tomaron 100 μ L de la fase de cisteína y se llevaron a analizar en el DMA-80 haciendo uso de celdas de cuarzo.



Figura 6. Analizador Directo de Mercurio (DMA 80).

Fuente: Propia, elaborada 2023.



Figura 7. Proceso de pesado de muestra para análisis de HgT.
Fuente: Propia, elaborada 2023

Control de calidad

Con el fin de certificar la confiabilidad de los resultados obtenidos durante la investigación se implementó para el control de calidad analítico, curva de calibrado, límite de detección, límite de cuantificación, además, se realizó la medición blancos, estándar, duplicados y material de referencia en base a los procedimientos establecidos por el laboratorio (ver anexo 6).

Valoraciones de los participantes

Se estudió la relación entre los valores de concentraciones obtenidos en los análisis con respecto a las variables de edad y dieta, mediante cuestionarios sencillos con el fin de determinar el



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



impacto en la población en base a la muestra estudiada. Los datos obtenidos corresponden a la ingesta de peces por días de la semana y la edad en cada año de muestreo. La información obtenida corresponde a una muy completa y buena base para posteriores investigaciones (ver anexo 1).

Tratamiento estadístico de los resultados.

Se realizó el análisis estadístico de los resultados mediante Excel y Minitab para cada uno de los muestreos y el monitoreo en general según fue necesario, se estudió la relación con las diferentes variables establecidas mediante uso de coeficiente de correlación de Pearson, se realizó una comparación de las concentraciones de HgT con respecto a los límites establecidos por la Organización mundial de la salud (OMS) para Hg en cabello humano y un ANOVA Tukey para la comparación con respecto a la media de los datos de HgT y MeHg obtenidos para los tres años monitoreados, además de utilizar los programa para la ilustración de los resultados mediante tablas y gráficos, como base para el análisis.



RESULTADOS

Recopilación datos de monitoreo

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el monitoreo de las concentraciones de mercurio (HgT) y metilmercurio (MeHg) realizado en una muestra (N=14) de la población aledaña a la ciénaga de Betancí, Montería, Córdoba, con el fin de determinar el estado y la variabilidad de contaminación de la población y las posibles alertas en cuanto a problemáticas de salud pública. En la Tabla 1, se pueden observar los promedios de concentración obtenido para HgT y MeHg, la relación MeHg/HgT y la media del consumo de peces por semana en cada muestreo realizado.

Tabla 1. Resumen de la media para las concentraciones de HgT (mg.kg^{-1}) y MeHg (mg.kg^{-1}), las relaciones MeHg/HgT y la media de la frecuencia de consumo de peces (días por semana) obtenidas en los diferentes muestreos realizados a la población aledaña a la ciénaga de Betancí (Ensenada de La Hamaca).

Resultados Monitoreo HgT y MeHg por año			
	Muestreo 2021	Muestreo 2022	Muestreo 2023
HgT \pm SD (mg.kg^{-1})	4,1 \pm 1,97	3,1 \pm 1,73	2,8 \pm 1,5
MeHg \pm SD (mg.kg^{-1})	3,7 \pm 1,76	2,7 \pm 1,60	2,5 \pm 1,4
MeHg/HgT (%)	89%	87%	91%
Frecuencia de consumo de peces (Días por semana) (Media \pm SD)	5,21 \pm 0,8	3,21 \pm 1,01	3,90 \pm 1,3

Fuente: Propia, elaborada 2023

Resultados y análisis estadístico muestreo 2021

En la figura 8 se muestran los resultados obtenidos para el primer muestreo, en la que se encuentran las correlaciones de Pearson para las concentraciones de HgT con respecto a las variables de edad y consumo semanal de peces, además de la comparación de estas mismas con



respecto al límite permisible (1 mg.kg^{-1}) establecido por la Organización mundial de la Salud (OMS).

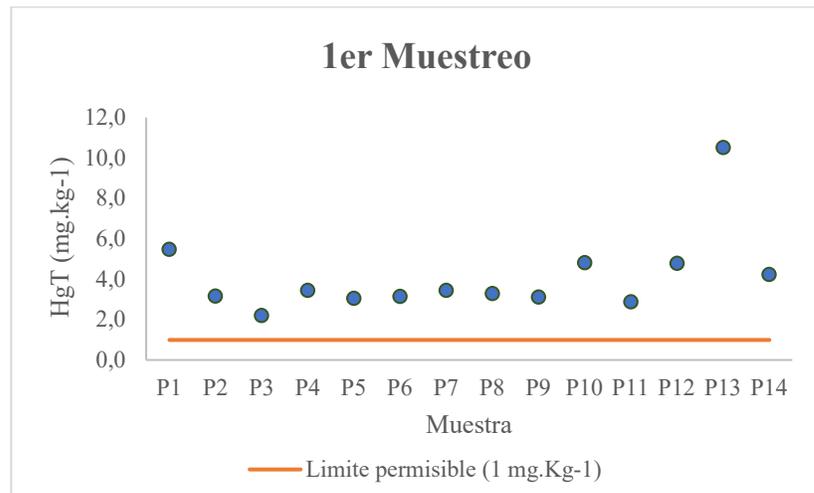
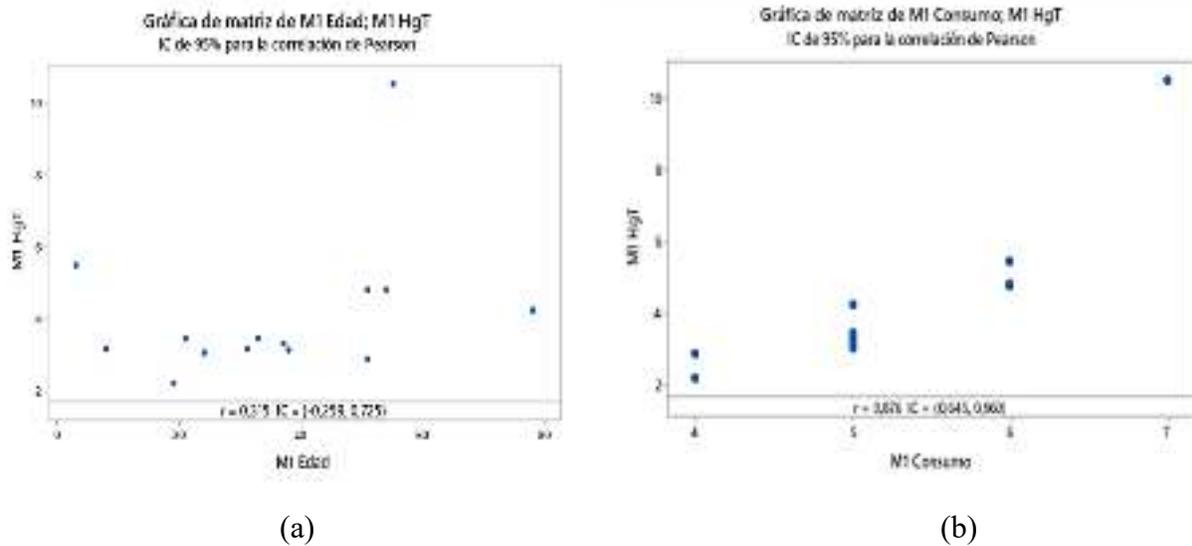


Figura 8. Resumen de resultados 1^{er} muestreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.
Fuente: Propia, elaborada 2023



Resultados y análisis estadístico muestreo 2022

En la figura 9 se observan los resultados obtenidos en el segundo muestreo de acuerdo a los mismos análisis estadísticos realizados para el 1^{er} muestreo.

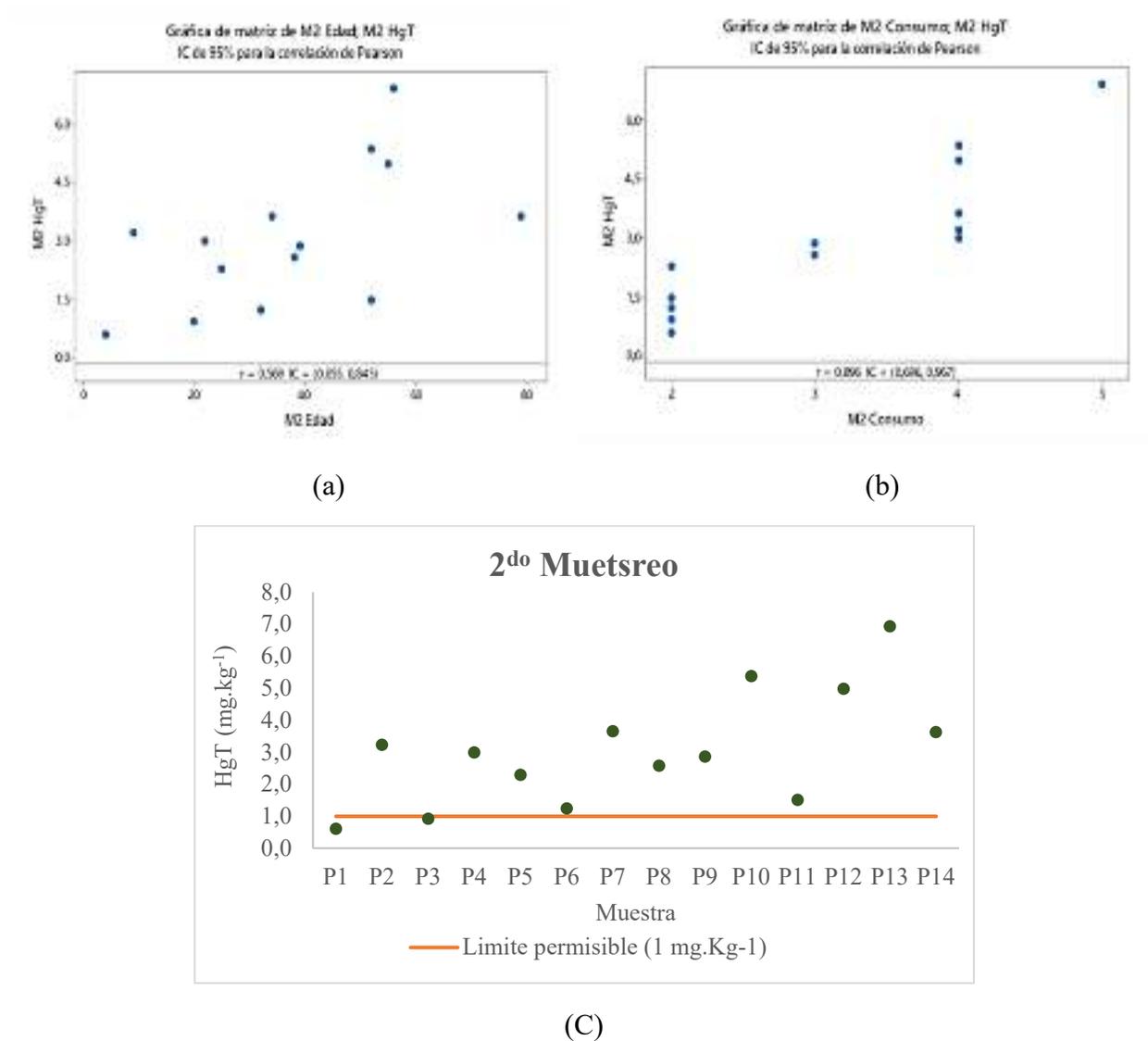


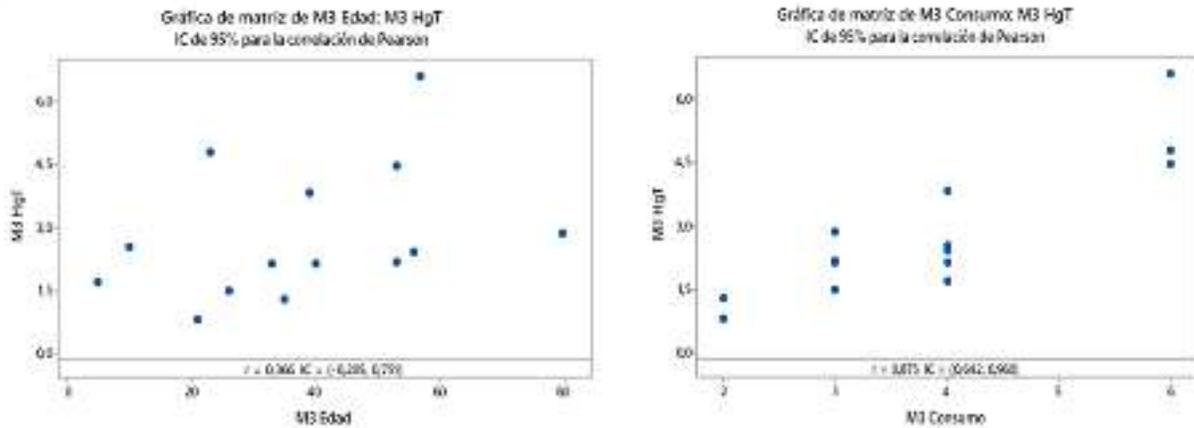
Figura 9. Resumen de resultados 2^{do} muestreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.

Fuente: Propia, elaborada 2023



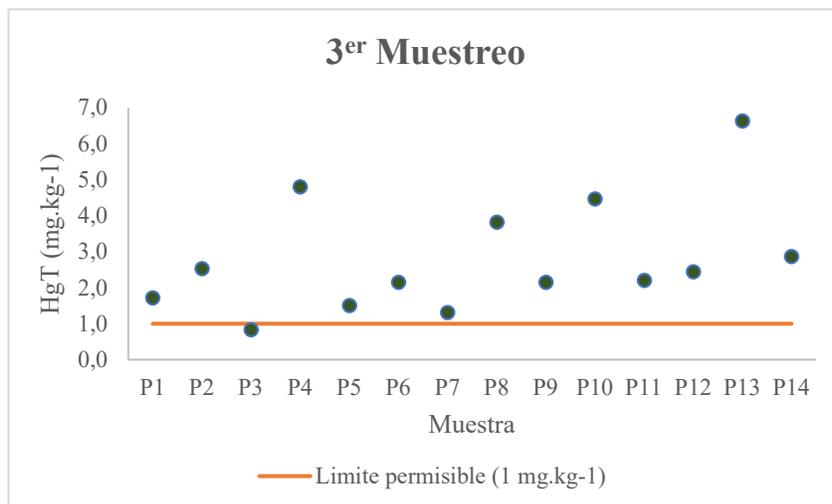
Resultados y análisis estadístico muestreo 2023

De igual forma que se aplicó el análisis estadístico para el primer y segundo muestreo se realizó para el tercero, los datos obtenidos se muestran a continuación en la figura 10.



(a)

(b)



(c)

Figura 10. Resumen de resultados 3^{er} muestreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.

Fuente: Propia, elaborada 2023



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Resultados y análisis estadístico monitoreo años 2021-2023

En base a los resultados obtenidos en los diferentes muestreos se realizó un análisis estadístico de todo el monitoreo donde se determinó el índice de correlación de Pearson para las concentraciones de HgT con respecto a las variables de edad y consumo semanal de peces. Para la variable edad se tuvo en cuenta la variabilidad de las edades en los diferentes años estudiados. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 11.

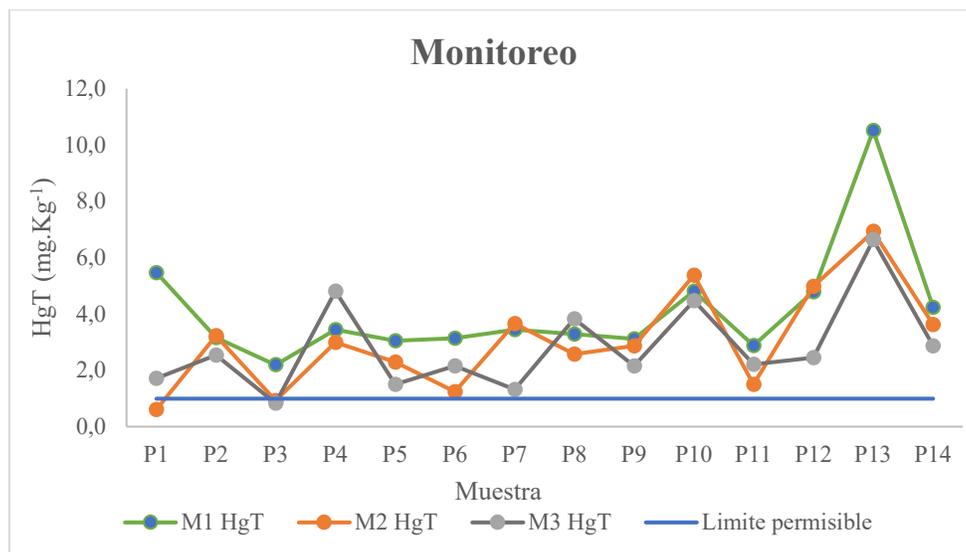
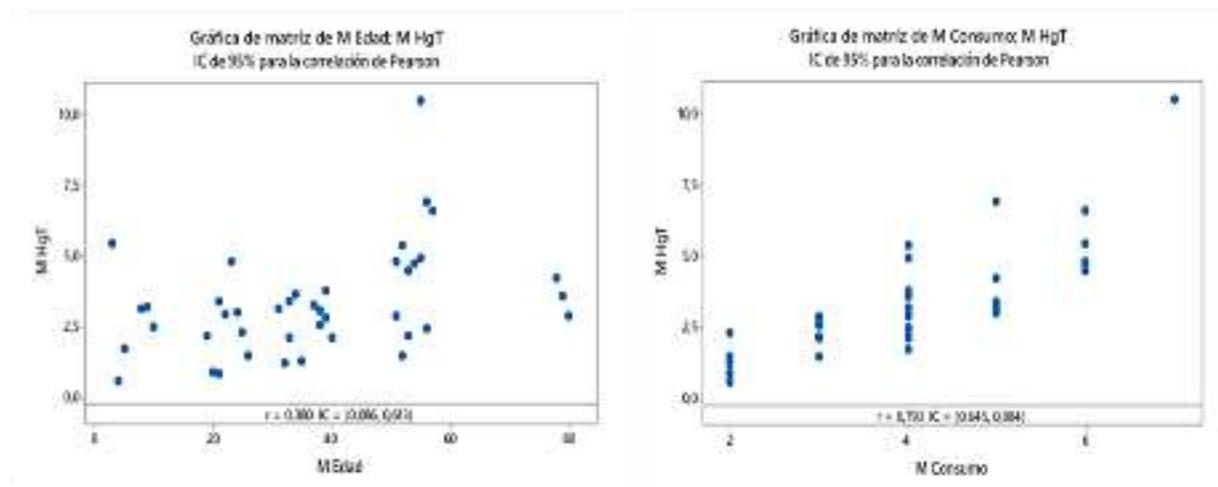




Figura 11. Resumen de resultados monitoreo: (a) correlación HgT: Consumo, (b) correlación HgT: Edad, (c) Comparación de concentraciones de HgT con respecto a los límites permisibles por la OMS.

Fuente: Propia, elaborada 2023

Por otra parte, en la tabla 2, se muestra el valor medio de concentración de HgT y MeHg para todo el monitoreo, además, de la relación MeHg/HgT.

Tabla 2. Media de concentración de HgT ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y MeHg ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), relación HgT/MeHg y frecuencia de consumo de peces (días por semana) para el monitoreo en general.

Resultado General Monitoreo HgT y MeHg	
HgT \pm SD mg/kg^{-1}	3,3 \pm 0,56
MeHg \pm SD mg/kg^{-1}	3,0 \pm 0,49
MeHg/HgT (%)	89%
Frecuencia de consumo de peces (días por semana) Media \pm SD	4,10 \pm 1,03

Fuente: Propia, elaborada 2023

Análisis estadístico comparativo ANOVA-Tukey de HgT y MeHg entre muestreos

Se realizó un análisis estadístico comparativo ANOVA de una variable y prueba de Tukey, en donde se evaluó la variabilidad con respecto a la media de las concentraciones de HgT y MeHg entre los muestreos realizados. Esto se realizó con el fin de determinar si hubo diferencias significativas entre las concentraciones a través del tiempo de monitoreo, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3 y 4.

Tabla 3. Análisis comparativo ANOVA de una variable con respecto a las medias de HgT y MeHg entre muestreos.

ANOVA de una variable - Análisis de Varianza					
Para HgT					
Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustado	Valor F	Valor P
Factor	2	13,17	6,587	1,99	0,151
Error	39	129,31	3,316		
Total	41	142,48			



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Para MeHg					
Fuente	GL	SC Ajustada	MC Ajustado	Valor F	Valor P
Factor	2	10,22	5,111	1,88	0,166
Error	39	105,86	2,714		
Total	41	116,09			

Fuente: Propia, elaborada 2023

Tabla 4. Análisis comparativo prueba de Tukey con respecto a las medias de HgT y MeHg entre muestreos.

Prueba de Tukey para HgT y MeHg				
Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor P ajustado
M2 HgT - M1 HgT	-1,052	0,688	(-2,731; 0,627)	0,289
M3 HgT - M1 HgT	-1,289	0,688	(-2,967; 0,390)	0,16
M3 HgT - M2 HgT	-0,237	0,688	(-1,916; 1,442)	0,937
M2 MeHg - M1 MeHg	-0,974	0,623	(-2,493; 0,545)	0,273
M3 MeHg - M1 MeHg	-1,106	0,623	(-2,625; 0,413)	0,191
M3 MeHg - M2 MeHg	-0,132	0,623	(-1,651; 1,387)	0,976

Fuente: Propia, elaborada 2023.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente trabajo de investigación se observó que al comparar las concentraciones de HgT obtenidas en cada muestreo con respecto a los Límites permisibles por la OMS (1 mg.kg^{-1}), que el 100% (año 2021), 86% (año 2022) y 93% (año 2023) de la población presentó niveles de Hg por encima del límite permisible, donde hubo muestras hasta más de nueve veces el límite permisible (ver anexo 4), lo que indica un gran grado de contaminación en la población. Aunque se evidencia una disminución en el porcentaje de población por encima del límite permisible para el segundo muestreo (ver figura 9C) y a la vez un aumento para el tercer muestreo (ver figura 10C), esta no baja del 86%, lo cual, teniendo en cuenta el número de muestra es una representación alta de contaminación, además, de que las muestras por debajo del límite permisible, se encuentran cercanas a este (Ver figuras 8C, 9C, 10C y anexo 4).

Tomando como referencia las medias de concentración de HgT obtenidas en los años 2021, 2022 y 2023 fueron de $4,1 \pm 1,97 \text{ mg.kg}^{-1}$, $3,1 \pm 1,73 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $2,8 \pm 1,5 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente. Se puede observar que hubo una disminución en las medias a lo largo del tiempo de muestreo, sin embargo, todas las medias de concentraciones superaron los niveles permisibles por la OMS en todos los muestreos (ver tabla 1). La mayor concentración la obtuvo el primer muestro con $4,1 \pm 1,97 \text{ mg.kg}^{-1}$, siendo asociada al elevado nivel hídrico de la ciénaga por época de lluvias lo que contribuyó al aumento de la actividad pesquera de la población y por lo ende al consumo de los mismos, además, en el mes previo al muestreo se celebró las festividades de Semana Santa que corresponde a una gran costumbre en la región en la que el pescado juega un papel importante en muchas de sus preparaciones lo que contribuyó de igual forma a aumentar el consumo.

De igual forma sucedió para el tercer muestreo, donde se presentaron las mismas festividades, con la diferencia de que en esta ocasión el nivel hídrico de la ciénaga fue bajo, debido a que se presenciaba época de sequía, disminuyendo la actividad pesquera y el consumo de peces de la misma zona, recurriendo al consumo de peces de otras regiones. Algunas de las especies que hacen parte de los platos típicos de estas festividades corresponden a peces carnívoros a los que



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



se les ha determinado como poseedores de elevados niveles de bioacumulación y biomagnificación del Hg como son el Moncholo y Bagre (Gracia H et al., 2010a). En base a las diferencias que se presentaron en el tercer muestreo se evidenció una disminución considerable en la media de la población con respecto al primer muestreo (ver tabla 1).

El segundo muestreo fue realizado en época de verano, al igual que el tercero, la ciénaga presentaba bajo nivel hídrico, actividad de pesca y por ende consumo de peces, con la diferencia que para este no se presencié ningún evento que contribuyera al consumo, sin embargo, el valor de la media fue mayor que para el tercero lo cual puede atribuirse a que a pesar de disminuir la exposición por consumo de peces, ya se poseía un grado de contaminación más alto, además, el proceso de bioacumulación y biomagnificación del Hg en los peces y los seres humanos puede ser prolongado y su persistencia y eliminación en el sistema depende de varios factores, llegando a persistir por largos periodos de tiempo sino se toman medidas de desintoxicación.

Los resultados obtenidos para las relaciones MeHg/HgT y las medias de consumo de peces por semana fueron de 89% - $5,21 \pm 0,8$ (Año 2021), 87% - $3,21 \pm 1,01$ (año 2022) y 91% (año 2023), dejando en evidencia que la mayor contribución a la contaminación por mercurio (Hg) en la población es por vía alimentaria y apoyado en estudios como el realizado por Gracia et al., 2016) en el que se evidencia la relación directa entre el consumo de peces contaminados con Hg y la bioacumulación en los seres humanos que los consumen y soportado en el estudio previo realizado por investigadores pertenecientes al laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental del Grupo de grupos de Aguas Química Aplicada y Ambiental de la Universidad de Córdoba a varias especies de peces en la ciénaga donde se encontró que estos poseían niveles altos de Hg, representando un indicador de riesgo potencial de bioacumulación y biomagnificación para quienes los consumen, en este caso, la población de estudio (Flórez et al., 2021).

También, la población no posee otra actividad de exposición directa a este contaminante tales como la minería, que suele ser una de las más comunes, ni algún otro factor que haya sido



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



estudiado en la zona, sino que basa su economía y fuente de alimentación principal en la pesca, la agricultura y la ganadería.

Además, el análisis estadístico de las correlaciones de concentración/consumo para cada muestreo y el monitoreo en general fueron altas, siendo de 0,876, 0,896, 0,875 y 0,793 respectivamente, lo que representa que la disminución o aumento de los niveles de mercurio en la población depende en gran medida de la ingesta de peces y manteniéndose constante a lo largo del tiempo. Este análisis sirve como base fundamental y evidencia en la toma de decisiones para la evaluación y el control del riesgo de salud pública que pueda estar presentando la población, teniendo en cuenta que la contaminación por mercurio es una problemática mundial y su riesgo para la salud han sido evidenciados en muchos lugares del mundo.

Por otra parte, los resultados obtenidos para las correlaciones de Concentración/edad fueron débiles a excepción del encontrado para el tercer muestreo donde se obtuvo un valor fuerte de correlación, siendo de 0,380 para 2021, 0,366 en 2022, 0,569 en 2023 y 0,315 la media de los tres muestreos, lo que indica que el nivel de contaminación por mercurio en la población se encuentra débilmente correlacionado por la edad a excepción del 2023, sin embargo este valor está cercano al límite superior del intervalo de correlación débil (0,30-0,50) por lo que, la media de correlación sigue siendo débil. Esta es una variable que ha sido estudiada anteriormente, en algunos casos puede asociarse relación de contaminación dependiendo de las características de la población: condición física, estado de salud, enfermedades asociadas, exposición laboral, transferencia de carga química de mercurio de madre a hijo, entre otras (Casas et al., 2015). Sin embargo, en este estudio no se da una evidencia certera de relación con respecto a la edad por ninguna de las anteriores.

La prueba de ANOVA de una vía para las variables HgT y MeHg en cabello se muestra en la tabla 3, para ambas variables se encontró que el p valor fue superior a 0.05, lo que indica que no existen diferencias estadísticas significativas para HgT y MeHg en cabello en los periodos 2021, 2022 y 2023. Los resultados de la prueba de Tukey se muestran en la tabla 4, se evidencia que no



hay diferencia entre las varianzas de las concentraciones HgT y MeHg en cabello para los tres muestreos, en todos los casos el p valor fue superior a 0.05, tal como lo sugirió previamente la prueba de ANOVA.

Colombia viene presentando grandes problemáticas ambientales con respecto a metales pesados derivados de los procesos antropogénicos para obtener recursos, dentro del cual se encuentra el Mercurio (Hg) por lo que se ha estudiado ampliamente este contaminante, ejemplo de esto son los estudios presentados en la Tabla 4 donde se muestra el resumen de trabajos previos reportando MeHg y HgT en cabello de individuos de diferentes regiones de Colombia principalmente zonas mineras. Estos estudios sirven como referencia para comparar los resultados obtenidos en esta investigación y ver las diferencias potenciales con respecto a diferentes características de las demás regiones, como son: Zonas mineras, Población minera, población con residencia cerca a fuentes hídricas contaminadas y evaluaciones de contaminación por consumo.

Tabla 5. Resumen de las concentraciones de HgT y MeHg (mg.kg^{-1}) obtenidas en varios estudios de diferentes regiones de Colombia. ^aMedia \pm DE; ^bMediana (rango).

Departamento	HgT \pm SD (n) (Max – Min)	MeHg \pm SD (Max – Min)	Observaciones	Referencia
Chocó	2.48 \pm 3.69 ^a (n = 81)	2.70 \pm 3,64 ^a (n = 81)	Zona Minera	(Salazar-Camacho et al., 2017)
Chocó	Quibdo 6,72 \pm 0,89 ^a (n = 248) Paimadó 0,87 \pm 0,08 ^a (n=112) Cuenca rio Atrato 4,90 \pm 0,63 ^a (n = 360)		Zona Minera	(Palacios-Torres et al., 2018)
Chocó	0,93 \pm 1,08 ^a (n = 20)	0,78 \pm 0,93 ^a (n = 20)	Zona Minera	(Suárez-Criado et al., 2023)
Córdoba	2,18 \pm 1.77 ^a (n = 112)		Zona Minera	(Gracia H et al., 2010)



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Córdoba	$6,95 \pm 5,57^a$ (n = 76)		Población que vive cerca de una represa hidroeléctrica tropical.	(Marrugo-Negrete et al., 2013)
Córdoba	$3,3 \pm 0,56$ (n=14)	$3,0 \pm 0,49$ (n=14)	Consumo de peces	Este estudio
Córdoba	$2,46 \pm 1,7^a$ (n = 175)		Consumo de peces	(Gracia et al., 2016)
Córdoba	$2,57^b$ (n = 20)	$1,30^b$ (n = 20)	Población minera	(Calao-Ramos et al., 2021)
Antioquia	$1,16 \pm 0,71^a$ (n = 6)	$1,00 \pm 0,54^a$ (n = 6)	Zona Minera	(Calao-Ramos et al., 2021)
Antioquia	$4,37^b$ (n = 28)	$1,18^b$ (n = 28)	Población minera	(Suárez-Criado et al., 2023)
Sucre	$0,66 \pm 0,22^a$ (n = 5)	$0,57 \pm 0,16^a$ (n = 5)	Zona Minera	(Suárez-Criado et al., 2023)
Bolívar	$3,07 \pm 0,14^a$ (n = 522)		Población minera	(Carranza-Lopez et al., 2019)
Bolívar	$1,43 \pm 0,07^a$ (n = 194)		Adolescentes	(Manjarres-Suarez & Olivero-Verbel, 2020)
Bolívar	$0,90^b$ (n = 27)	$1,05^b$ (n = 27)	Población minera	(Calao-Ramos et al., 2021)
Bolívar	$1,17 \pm 0,68^a$ (n = 12)	$1,06 \pm 0,65^a$ (n = 12)	Zona Minera	(Suárez-Criado et al., 2023)
Mojana (Sucre, Bolívar, Córdoba, Antioquia)	$2,3^b$ (n = 269)		Mujeres embarazadas y niñas	(Diaz et al., 2020)
Cauca	$0,81^b$ (n = 45)	$0,47^b$ (n = 45)	Poblacion minera	(Calao-Ramos et al., 2021)
Putumayo	$1,36^b$ (n = 32)	$2,01^b$ (n = 32)	Poblacion minera	(Calao-Ramos et al., 2021)
Vaupés	$14,92 \pm 16,88^a$ (n = 31)	$14,02 \pm 15,93^a$ (n = 31)	Zona Minera	(Suárez-Criado et al., 2023)
Amazonas	$17,3 \pm 0,6^a$ (n = 200)		Zona Minera	(Olivero-Verbel et al., 2016)



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Amazonas	23,0 ± 1,2 ^a (n = 110)	Zona Minera	(Valdelamar-Villegas & Olivero-Verbel, 2020)
----------	-----------------------------------	-------------	--

Fuente: (Suárez-Criado et al., 2023)

Con respecto a los estudios realizados en el departamento del Chocó, la cual presenta actividad minera se encontró que la media de este estudio supero los valores medios y medianos de HgT y MeHg encontrados por Salazar-Camacho et al., 2017) y Suárez-Criado et al., 2023) y específicamente el reportado en Paimadó por Palacios-Torres et al., 2018), sin embargo, en los niveles reportados en otras zonas de la misma región por Palacios-Torres et al., 2018) específicamente Quibdó y la cuenca del río Atrato se encuentran por encima de los niveles de este estudio. En Córdoba superó los valores medios de HgT presentados por Gracia H et al., 2010) declarado como zona minera, Gracia et al., 2016) con contaminación por consumo y los valores medianos de HgT Y MeHg presentados por Calao-Ramos et al., 2021) realizado en población minera. Por otra parte, el estudio realizado por Marrugo-Negrete et al., 2013) a población con residencia cerca de una hidroeléctrica tropical tuvo niveles de HgT superiores a este estudio.

Para los valores de HgT y MeHg obtenidos en estudios hechos en la región de Antioquia se encontró que este estudio superó los reportados por Calao-Ramos et al., 2021) en zona minera pero se vio superado por los valores presentados por Suárez-Criado et al., 2023) realizado a población minera. De igual forma superó los valores de HgT y MeHg del estudio realizado en zona minera de Sucre por Suárez-Criado et al., 2023). En Bolívar supero los valores presentados por Carranza-Lopez et al., 2019) y Calao-Ramos et al., 2021) en población minera, (Manjarres-Suarez & Olivero-Verbel, 2020) en adolescentes y Suárez-Criado et al., 2023) en zona minera. De igual forma, superó al estudio realizado en la región de la mojana (Sucre, Bolívar, Córdoba, Antioquia) a mujeres embarazadas y niñas Suárez-Criado et al., 2023). Los estudios realizados por Calao-Ramos et al., 2021) a población minera en Cauca y Putumayo se encontraron con niveles de HgT y MeHg por debajo de los hallados en este estudio. A diferencia de los realizados



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



en Vaupés (Suárez-Criado et al., 2023) y Amazonas (Olivero-Verbel et al., 2016) (Valdelamar-Villegas & Olivero-Verbel, 2020) en zona minera, los cuales, superaron los valores obtenidos en esta investigación.

De acuerdo a lo anterior, es notable que el nivel de contaminación de la población estudiada está a la par y supera a gran parte de los estudios referenciados, los cuales, presentan actividades con exposición directa al Hg o están cerca de sitios con gran potencial de contaminación. Esto confirma el gran potencial de riesgo que posee la población con respecto a las posibles problemáticas de salud pública. Los hallazgos obtenidos en esta investigación corresponden a una muy buena base de datos que puede ser utilizada como referencia para seguir estudiando más a fondo las posibles problemáticas que acarrea la contaminación por mercurio, aun mas cuando Colombia ha sido referenciado como el país con más emisiones de mercurio per cápita en el mundo y el tercero que más contamina con mercurio a nivel global, de acuerdo con la UNEP y Organizaciones internacionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UN Environment Programme – UNEP) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han venido llamando la atención sobre el riesgo que representan para la salud humana las altas emisiones de mercurio procedentes de la actividad humana. (Malagon-Rojas & Sonia, 2018)



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



CONCLUSIONES

- Los niveles de HgT muestran un índice de contaminación alto por Hg en la población, de hasta 9 veces en las muestras y 4 veces para la media de muestreo con respecto al límite permisible por la OMS, donde la mayoría de la población monitoreada sobrepasa el valor de referencia, siendo un indicador de riesgo potencial en cuanto a la problemática de salud pública asociada a la contaminación por Hg.
- La correlación de las concentraciones de HgT con respecto a la frecuencia de consumo de peces y la relación MeHg/HgT fue alta, lo que evidencia que la contaminación por Hg en la población se debe principalmente a su dieta, lo que se debe al alto consumo de peces, debido a que la pesca es una de sus principales actividades económicas y fuente de alimento.
- Los resultados obtenidos para las correlaciones de edad con respecto a las concentraciones de HgT no permitieron establecer una relación fuerte entre estas variables en el monitoreo, sin embargo, no se descarta su posible efecto en el grado de contaminación.
- La ANOVA Tukey permitió determinar que no hubo diferencia significativa entre las variables de concentración de HgT Y MeHg durante los años de muestreo, es decir que, con respecto a la media, los valores en cada muestreo son estadísticamente iguales ($p > 0,05$).
- La comparación realizada con respecto a los niveles de contaminación en otras regiones de Colombia con diferentes características de exposición, muestra que a pesar que la población estudiada no presenta fuentes de exposición directa, posee niveles superiores a estudios realizados en zonas mineras y expuestas por consumo, lo que representa una alerta para las entidades de monitoreo y control ambiental, las cuales, deberían tomar acción con respecto a este hallazgo.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



RECOMENDACIONES

- Realizar estudios epidemiológicos más completos y rigurosos direccionados a una evaluación más amplia del área y la identificación de problemas de salud en la población que puedan estar asociados a los efectos tóxicos del mercurio en humanos, con el fin de determinar el impacto que está teniendo el grado de contaminación de la población con respecto a la salud de la misma.
- Promover la implementación de futuros estudios en zonas geográficas que no estén expuestas directamente a contaminación por mercurio, basados en el hallazgo de la presente investigación y como medio para evaluar y determinar el alcance de este contaminante a nivel nacional.
- Tomar medidas de control y concientización a la población con respecto a las problemáticas de salud pública a nivel nacional y los efectos tóxicos evidenciados a lo largo del mundo con respecto a la contaminación por mercurio.
- Incentivar desde las entidades ambientales a las organizaciones de salud pública a la implementación de análisis de contaminantes ambientales en general dentro de los procesos de evaluación médica a las poblaciones, principalmente a las expuestas a estos contaminantes, dado que, a nivel nacional, aunque se conocen estas problemáticas no se tienen muy en cuenta a la hora de realizar evaluaciones médicas.



BIBLIOGRAFÍA

4. ¿Dónde se encuentra el mercurio? (s. f.). Recuperado 8 de noviembre de 2023, de <https://www.greenfacts.org/es/mercurio/n-3/mercurio-4.htm>
- Beal, S. A., Osterberg, E. C., Zdanowicz, C. M., & Fisher, D. A. (2015). Ice Core Perspective on Mercury Pollution during the Past 600 Years. *Environmental Science & Technology*, 49(13), 7641-7647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01033>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Cadavid-Muñoz, N., Arango-Ruiz, Á., Cadavid-Muñoz, N., & Arango-Ruiz, Á. (2020). El mercurio como contaminante y factor de riesgo para la salud humana. *Revista Lasallista de Investigación*, 17(2), 280-296. <https://doi.org/10.22507/rli.v17n2a21>
- Calao-Ramos, C., Bravo, A. G., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2021a). Occupational human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining communities of Colombia. *Environment International*, 146, 106216. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106216>
- Calao-Ramos, C., Bravo, A. G., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2021b). Occupational human exposure to mercury in artisanal small-scale gold mining communities of Colombia. *Environment International*, 146, 106216. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106216>



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



- Carranza-Lopez, L., Caballero-Gallardo, K., Cervantes-Ceballos, L., Turizo-Tapia, A., & Olivero-Verbel, J. (2019). Multicompartment Mercury Contamination in Major Gold Mining Districts at the Department of Bolivar, Colombia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76(4), 640-649. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00609-w>
- Casas, I. C., Gómez, E., Rodríguez, L. M., Girón, S. L., & Mateus, J. C. (2015). Toward a national plan to control health effects of mercury in Colombia. *Biomédica*, 35, 30-37. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v35i0.2458>
- De la Ossa, C. A., Ramírez-Giraldo, A. F., Arroyo-Alvis, K., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2023). Neuropsychological effects and cognitive deficits associated with exposure to mercury and arsenic in children and adolescents of the Mojana region, Colombia. *Environmental Research*, 216, 114467. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114467>
- Díaz, S. M., Palma, R. M., Muñoz, M. N., Becerra-Arias, C., & Fernández Niño, J. A. (2020). Factors Associated with High Mercury Levels in Women and Girls from The Mojana Region, Colombia, 2013–2015. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061827>
- Evaluación Mundial del Mercurio 2018—Principales Conclusiones | Minamata Convention on Mercury.* (s. f.). Recuperado 7 de septiembre de 2023, de <https://mercuryconvention.org/es/resources/evaluacion-mundial-del-mercurio-2018-principales-conclusiones>



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Evaluacion_Mundial_Mercurio.pdf. (s. f.). Recuperado 7 de septiembre de 2023, de https://saludsindanio.org/sites/default/files/documents-files/1401/Evaluacion_Mundial_Mercurio.pdf

Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 26, 141-153.

Franco, L. F. L., Muñoz, P. T. L., & Garcia, F. G. M. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), Article 2. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)

Galeano-Páez, C., Espitia-Pérez, P., Jimenez-Vidal, L., Pastor-Sierra, K., Salcedo-Arteaga, S., Hoyos-Giraldo, L. S., Gioda, A., Saint’Pierre, T. D., García, S. C., Brango, H., & Espitia-Pérez, L. (2021). Dietary exposure to mercury and its relation to cytogenetic instability in populations from “La Mojana” region, northern Colombia. *Chemosphere*, 265, 129066. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129066>

Global Mercury Assessment 2018. (2019, abril 3). UNEP - UN Environment Programme. <http://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018>

Gracia H, L., Marrugo N, J. L., & Alvis R, E. M. (2010a). Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 28(2), 118-124.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Gracia H, L., Marrugo N, J. L., & Alvis R, E. M. (2010b). Contaminación por mercurio en humanos y peces en el municipio de Ayapel, Córdoba, Colombia, 2009. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 28(2), 118-124.

Gracia, L., Chams, L., Hoyos, W., & Marrugo, J. (2016). *RELACIÓN DE CONSUMO DE PESCADO Y NIVELES DE MERCURIO EN POBLADORES ALEDAÑOS AL RÍO SAN JORGE, COLOMBIA.*
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/ab5eaab7-f3ec-45e9-91c5-e7f396ab54bd>

Gutiérrez-Mosquera, H., Marrugo-Negrete, J., Díez, S., Morales-Mira, G., Montoya-Jaramillo, L. J., & Jonathan, M. P. (2021). Mercury distribution in different environmental matrices in aquatic systems of abandoned gold mines, Western Colombia: Focus on human health. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124080.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124080>

Huillca Alvino, N. (2018). *Bioacumulación de mercurio en cabello y tiempo de exposición laboral en Huaquirca.* <https://repositorio.uap.edu.pe/xmlui/handle/20.500.12990/4475>

Jiménez Oyola, S. T. (2021). *Análisis probabilístico del riesgo en la salud por exposición a metales pesados en áreas mineras contaminadas* [Phd, E.T.S.I de Minas y Energía].
<https://oa.upm.es/68810/>

La razón por la que Colombia es el mayor emisor de mercurio en el mundo, según la Procuraduría | Cambio Colombia. (s. f.). Recuperado 19 de octubre de 2023, de



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



<https://cambiocolombia.com/medio-ambiente/la-razon-por-la-que-colombia-es-el-mayor-emisor-de-mercurio-en-el-mundo>

Lea Sánchez, A. (2015). *Determinacion de especies de mercurio en materiales biologicos mediante analisis por dilucion isotopica con trazadores multiples* [Master thesis].
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/33181>

Lominchar, M. A., Sierra, M. J., Rodríguez, J., & Millán, R. (2014). *Estudio del comportamiento y distribución del mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del río Valdezogues*. <http://documenta.ciemat.es/handle/123456789/125>

Malagon-Rojas, J., & Sonia, D. (2018). *Evaluación del grado de contaminación por mercurio y otras sustancias tóxicas, y su afectación en la salud humana en las poblaciones de la cuenca del río Atrato, como consecuencia de las actividades de minería*.

Manjarres-Suarez, A., & Olivero-Verbel, J. (2020). Hematological parameters and hair mercury levels in adolescents from the Colombian Caribbean. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(12), 14216-14227. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07738-z>

Marrugo-Madrid, S., Pinedo-Hernández, J., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2022). Health risk assessment for human exposure to mercury species and arsenic via consumption of local food in a gold mining area in Colombia. *Environmental Research*, 215, 113950. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113950>

Marrugo-Negrete, J. L., Ruiz-Guzmán, J. A., & Díez, S. (2013). Relationship Between Mercury Levels in Hair and Fish Consumption in a Population Living Near a Hydroelectric



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



- Tropical Dam. *Biological Trace Element Research*, 151(2), 187-194.
<https://doi.org/10.1007/s12011-012-9561-z>
- Mercurio—OPS/OMS* | Organización Panamericana de la Salud. (s. f.). Recuperado 8 de noviembre de 2023, de <https://www.paho.org/es/temas/mercurio>
- Miranda-Mejía, J. R., Martínez-Gómez, S., & Hernández-Miranda, J. F. K. (s. f.). Análisis del tratamiento y nivel de contaminantes por lámparas fluorescentes en El Salvador. *Entorno*, 59, 97-110.
- Muñoz, N. C., González-Álvarez, D., Jaramillo, A. C., Soto-Ospina, A., & Ruiz, Á. A. (2023). Toxicological risk in individuals exposed to methylmercury and total mercury through daily-consumed foodstuffs in one of the mining regions of Bajo Cauca, Antioquia, Colombia. *Emerging Contaminants*, 9(2), 100226.
<https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100226>
- Negrete, J. M., Pinedo-Hernández, J., Paternina-Urbe, R., Quiroz-Aguas, L., & Pacheco-Florez, S. (2018). Distribución espacial y evaluación de la contaminación ambiental por mercurio en la región de la Mojana, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 23(S), Article S.
<https://doi.org/10.21897/rmvz.1481>
- Olivero-Verbel, J., Alvarez-Ortega, N., Alcalá-Orozco, M., & Caballero-Gallardo, K. (2021). Population exposure to lead and mercury in Latin America. *Current Opinion in Toxicology*, 27, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.06.002>



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



- Olivero-Verbel, J., Carranza-Lopez, L., Caballero-Gallardo, K., Ripoll-Arboleda, A., & Muñoz-Sosa, D. (2016). Human exposure and risk assessment associated with mercury pollution in the Caqueta River, Colombian Amazon. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(20), 20761-20771. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7255-3>
- Ortega Herrera, A., & Peña Coronado, A. (2020). *Evaluación del riesgo a la salud humana asociado al consumo de peces contaminados por metales pesados en el embalse del Guájaro, Atlántico-Colombia*. <https://hdl.handle.net/11323/7836>
- Palacios-Torres, Y., Caballero-Gallardo, K., & Olivero-Verbel, J. (2018). Mercury pollution by gold mining in a global biodiversity hotspot, the Choco biogeographic region, Colombia. *Chemosphere*, 193, 421-430. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.160>
- Pino, A., Bocca, B., Forte, G., Majorani, C., Petrucci, F., Senofonte, O., & Alimonti, A. (2018). Determination of mercury in hair of children. *Toxicology Letters*, 298, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.06.1215>
- Raimann, X., Rodríguez O, L., Chávez, P., & Torrejón, C. (2014). Mercurio en pescados y su importancia en la salud. *Revista médica de Chile*, 142(9), 1174-1180. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872014000900012>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz-Lagos, M., & González-Jimenez, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Rodríguez-Eugenio, N. (2018). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*. FAO.

<https://www.fao.org/documents/card/en?details=I9183ES>

Romero Ledezma, K. P. (2009). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS. *Revista Científica Ciencia Médica*, 12(1), 45-46.

Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Madrid, S., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2017). Dietary human exposure to mercury in two artisanal small-scale gold mining communities of northwestern Colombia. *Environment International*, 107, 47-54.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.06.011>

Salazar-Camacho, C., Salas-Moreno, M., Marrugo-Madrid, S., Paternina-Uribe, R., Marrugo-Negrete, J., & Díez, S. (2022). A human health risk assessment of methylmercury, arsenic and metals in a tropical river basin impacted by gold mining in the Colombian Pacific region. *Environmental Research*, 212, 113120.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113120>

Suárez-Criado, L., Rodríguez-González, P., Marrugo-Negrete, J., García Alonso, J. I., & Díez, S. (2023). Determination of methylmercury and inorganic mercury in human hair samples of individuals from Colombian gold mining regions by double spiking isotope dilution and GC-ICP-MS. *Environmental Research*, 231, 115970.

<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115970>

Trekking, B. H., Ground Truth. (2009). *English: This figure shows some common sources of mercury, the conversion to toxic methylmercury and the outline of EPA consumption*



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



recommendations for certain types of fish based on mercury levels. The original caption stated: «Mercury from coal fired power plants and other sources travels through the atmosphere and water. Some is changed to methylmercury, which can enter the food chain to be concentrated at each step on that chain. Large old predators like sharks and pike, or scavengers like halibut, hold the greatest concentrations of mercury. The mercury is particularly problematic during development, so these limits here are designed to protect women who might become pregnant and children 12 or younger.»

Original text : From www.groundtruthtrekking.org: Source URL:
<http://www.groundtruthtrekking.org/Graphics/Large/MercuryFoodChain-01.png> Source
Page: <http://www.groundtruthtrekking.org/Graphics/MercuryFoodChain.html>).
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MercuryFoodChain-01.png>

US EPA, O. (2016, julio 22). *Efectos en la salud por la exposición al mercurio* [Overviews and Factsheets]. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-en-la-salud-por-la-exposicion-al-mercurio>

Valdelamar-Villegas, J., & Olivero-Verbel, J. (2020). High Mercury Levels in the Indigenous Population of the Yaigojé Apaporis National Natural Park, Colombian Amazon. *Biological Trace Element Research*, 194(1), 3-12. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01760-0>



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Vergara Estupiñan, E. J. (2019). *Contaminación ambiental, bioacumulación y biomagnificación por metales pesados en un sector del Rio Alto-Chicamocha.*
<https://repositorio.uptc.edu.co//handle/001/3680>

Flórez S, Díaz L, Terán L, Hernández K, González L, López Y, Burgos S, Mercado L, Alean J, Enamorado G, Paternina R, Marrugo J, (2021): *concentración de mercurio y selenio en peces de la ciénaga betancí montería-colombia. 5th International Congress on Research and Innovation in Food Engineering, Science and Technology - IICTA 2020.*



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



	ENCUESTA EPIDEMIOLOGICA	
	PROYECTO	Universidad de Córdoba comprometida con el desarrollo regional

Todos los días _____ Dos veces por semana _____ Una vez a la semana _____ Una vez al mes _____ raramente _____

¿Usted ha aplicado insecticidas o fumigado recientemente su hogar? Si _____ No _____
¿Que producto comercial fue empleado? _____

4 - HISTORIA CLÍNICA

¿Se enferma usted frecuentemente? Si _____ No _____
¿Cuál? _____

¿Desde hace cuánto tiempo? Menos de una semana _____ Una semana _____ Un mes _____ Más de seis meses _____

¿Al sentirse enfermo acudió a una visita médica? Si _____ No _____ En caso de que la respuesta haya sido (SI) favor de contestar lo siguiente: ¿Cuál fue el diagnóstico? _____

Actualmente tiene alguna enfermedad importante, refiriéndose a enfermedades crónicas o degenerativas o defectos de nacimiento _____

¿Toma algún medicamento o tratamiento en este momento? Si _____ No _____
¿Cuál? _____

¿Desde hace cuánto tiempo? Menos de una semana _____ Una semana _____ Un mes _____ Más de seis meses _____

Tiene usted hijos? Si _____ No _____ ¿Cuántos? _____

En caso de que la respuesta anterior haya sido "SI", favor de contestar lo siguiente: Como ha sido el desarrollo de embarazo de su pareja o el suyo en caso de ser mujer? Normal _____ Con dificultades _____

En caso de haber presentado alguna dificultad ¿Cuál? Favor de especificar _____

Esa usted bajo algún tratamiento? Si _____ No _____
¿Cuál? _____

¿Alguna vez su pareja ha presentado abortos? Si _____ No _____ Número de abortos _____

¿Algún médico le ha dicho la razón de estos abortos? Si _____ No _____

En caso de ser 'SI', favor de especificar _____



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



	ENCUESTA EPIDEMIOLÓGICA	
	PROYECTO	Universidad de Córdoba Acreditación Institucional

5.- HABITOS ALIMENTICIOS

¿Cuál es la frecuencia de ingesta de agua? _____

Realiza algún tipo de tratamiento al agua antes de consumirla? Si _____ No _____ ¿Cuál? _____

¿Cuál es la frecuencia de ingesta de arroz? _____

¿Consumen usted vegetales? Si _____ No _____

De los vegetales que consume ¿se encuentran los vegetales verdes? (patichuea, lechuga, espinacas, calabazas, etc.) Si _____ No _____

Si su respuesta es "SI" favor de contestar lo siguiente:

¿Cada cuánto los consume? (ya sea por separado o en combinación)

- _____ Muy frecuente
_____ Algunas veces
_____ rara vez

¿Consumen usted carne: pollo, pescado? Si _____ No _____

Si su respuesta es "SI" favor de contestar lo siguiente:

¿Cada cuánto los consume? (ya sea por separado o en combinación)

- _____ Muy frecuente
_____ Algunas veces
_____ rara vez

¿Cuál es el alimento que usted cree que consume con mayor frecuencia? _____

Enumere los pescados consumidos:

Nombre del pescado	Tamaño	Frecuencia



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



	ENCUESTA EPIDEMIOLÓGICA		Código de identificación Código de inscripción de curso Código de registro
	PROYECTO		

pequeño=10 cm, mediano=20 cm, grande=30 cm
** (1) 1-2 veces/sem, (2) 3-4 veces/sem, (3) 5-6 veces/sem, (4) 7 veces/sem, (5) cada 15 días, (6) mensual

Puede nombrar el río y lugar donde está el pescado que usted más consume?

No 2

Si 1 Cual? _____

Observaciones _____

FIRMA _____

CEDULA _____

ENCUESTADOR _____

4



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Anexo 2. Materiales de referencia de mercurio en cabello humano.



Material de referencia MIND 01



Material de referencia IAEA-086

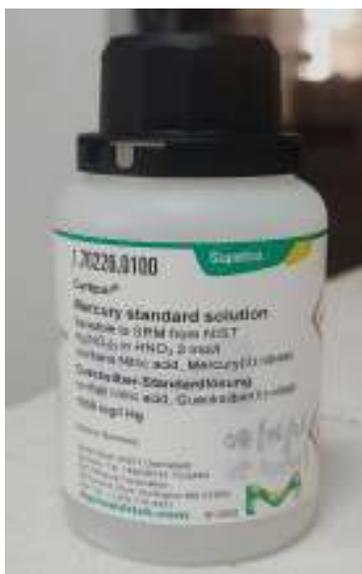
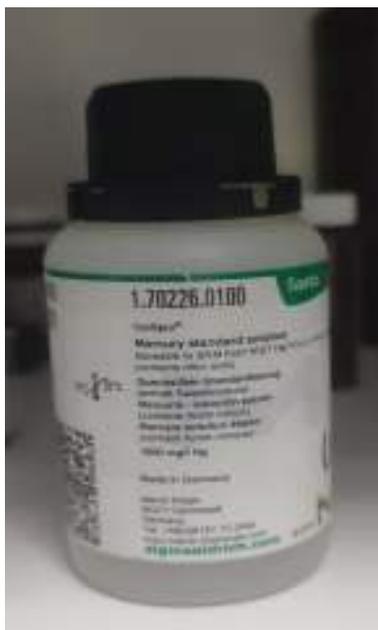


UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Anexo 3. Estandares de mercurio 1000 mg/L en HNO₃ 0,5 M





UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Anexo 4. Resultados de mercurio y metilmercurio de los diferentes muestreos.

Datos 1^{er} Muestreo

<i>Código</i>	<i>HgT mg.Kg⁻¹</i>	<i>MeHg mg/L⁻¹</i>
<i>P1</i>	5,5	4,9
<i>P2</i>	3,2	2,8
<i>P3</i>	2,2	2,0
<i>P4</i>	3,4	3,1
<i>P5</i>	3,0	2,7
<i>P6</i>	3,1	2,8
<i>P7</i>	3,4	3,1
<i>P8</i>	3,3	2,9
<i>P9</i>	3,1	2,8
<i>P10</i>	4,8	4,3
<i>P11</i>	2,9	2,6
<i>P12</i>	4,8	4,3
<i>P13</i>	10,5	9,4
<i>P14</i>	4,2	3,8

Datos 2do Muestreo

<i>Código</i>	<i>HgT mg.Kg⁻¹</i>	<i>MeHg mg/L⁻¹</i>
<i>P1</i>	0,6	0,5
<i>P2</i>	3,2	2,6
<i>P3</i>	0,9	0,8
<i>P4</i>	3,0	2,7
<i>P5</i>	2,3	2,2
<i>P6</i>	1,2	1,1
<i>P7</i>	3,7	3,0
<i>P8</i>	2,6	2,0
<i>P9</i>	2,9	2,5
<i>P10</i>	5,4	4,7
<i>P11</i>	1,5	1,3
<i>P12</i>	5,0	4,4
<i>P13</i>	6,9	6,6
<i>P14</i>	3,6	3,2



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

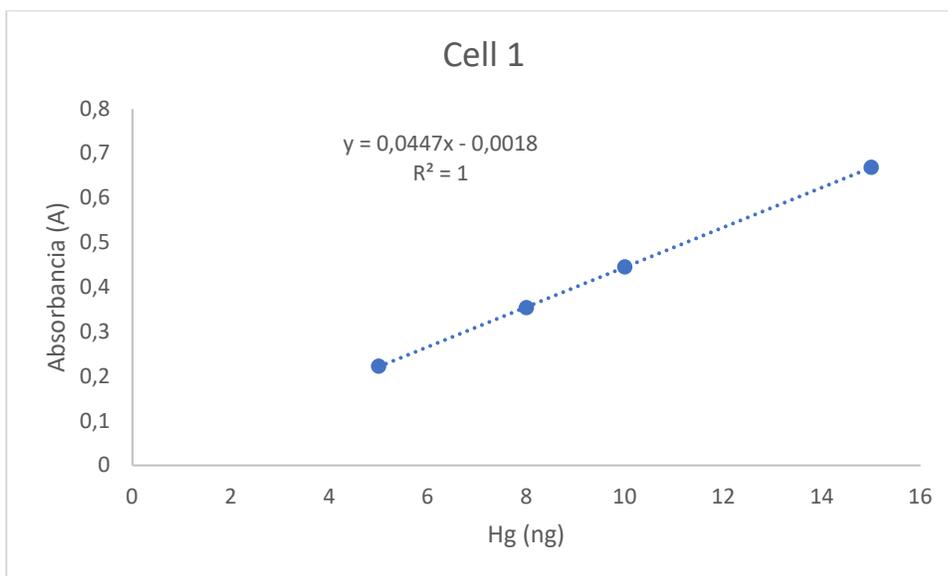
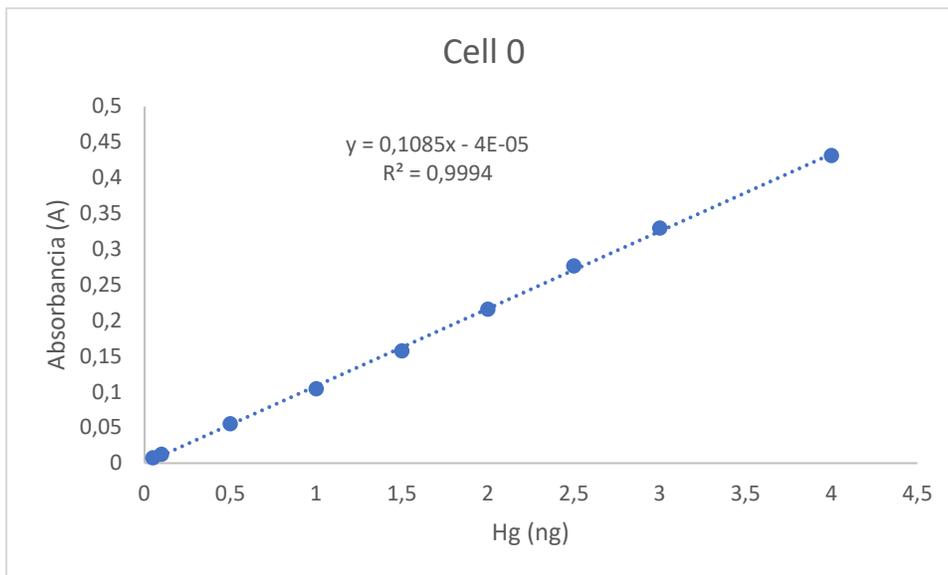


Datos 3^{er} Muestreo

<i>Código</i>	HgT mg.Kg⁻¹	MeHg mg/L⁻¹
<i>P1</i>	1,7	1,4
<i>P2</i>	2,5	2,3
<i>P3</i>	0,8	0,8
<i>P4</i>	4,8	3,3
<i>P5</i>	1,5	1,4
<i>P6</i>	2,2	2,0
<i>P7</i>	1,3	1,2
<i>P8</i>	3,8	3,6
<i>P9</i>	2,2	1,9
<i>P10</i>	4,5	4,3
<i>P11</i>	2,2	2,1
<i>P12</i>	2,4	2,4
<i>P13</i>	6,6	6,3
<i>P14</i>	2,9	2,8



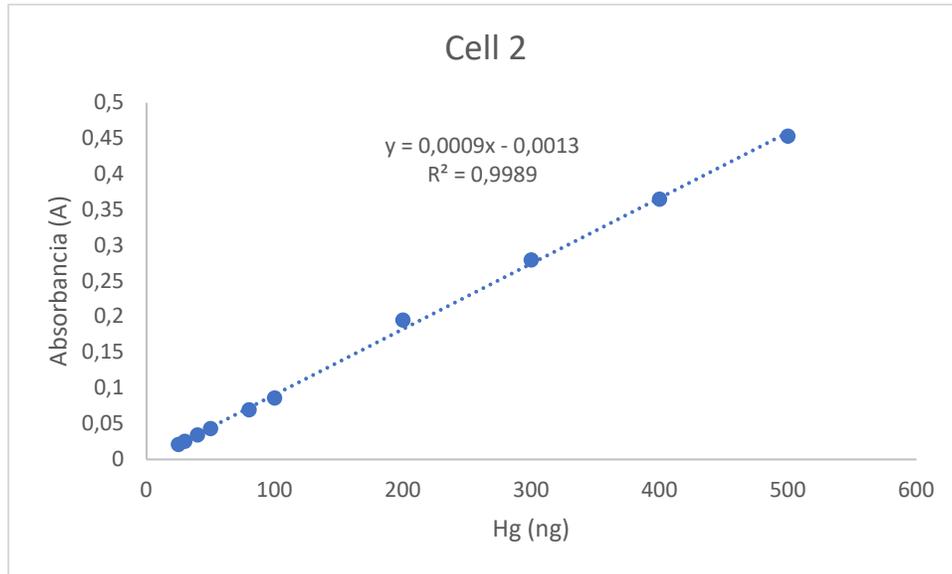
Anexo 5. Curva de calibrado para análisis.





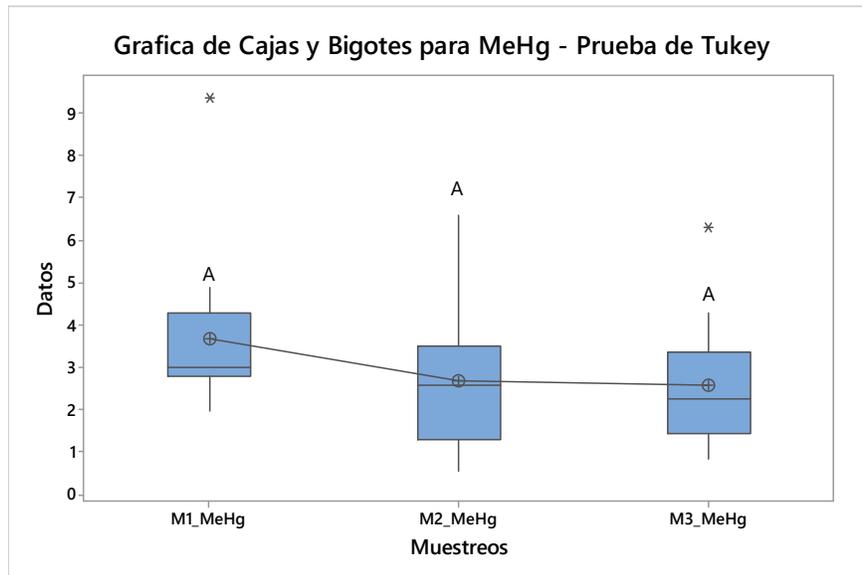
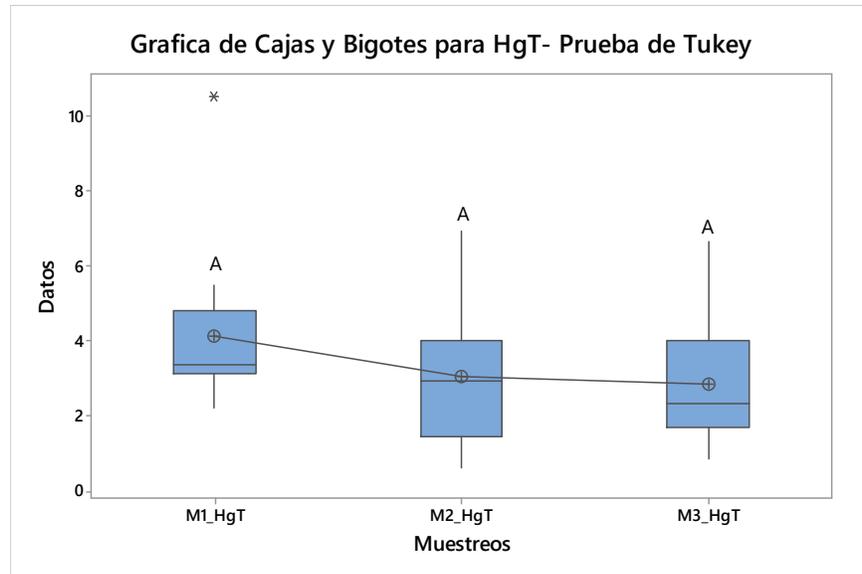
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS





Anexo 6. Graficas de cajas y bigotes para prueba de Tukey.





Anexo 7. Formato de consentimiento informado

	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL	
CONSENTIMIENTO INFORMADO		

Investigación: "Monitoreo de mercurio y metilmercurio en la población aledaña a la ciénaga de Betanci, Montería – Córdoba"

Justificación y objetivo de la investigación

La exposición al mercurio incluso en pequeñas cantidades puede provocar graves problemas de salud, puede ser tóxico para los sistemas nervioso e inmunológico, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos, además, es de alto peligro para el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida. La principal exposición al mercurio se genera por la alimentación, debido al consumo de pescado y marisco contaminados con metilmercurio, compuesto que se encuentra presente en estos alimentos. Teniendo en cuenta el bioacumulador de contaminación por Hg en los peces de la ciénaga y el consumo activo de peces por la población, esta investigación busca monitorear las concentraciones de mercurio y metilmercurio durante un período de tres años en una muestra de la población aledaña a la ciénaga del Betanci, Montería-Córdoba, además de evaluar variables de edad y dieta de la población con respecto a los valores de concentración encontrados.

Esta investigación tiene como objetivos:

Objetivo general

Realizar un monitoreo de las concentraciones de mercurio (Hg) y metilmercurio (MeHg) en cabello y determinar el impacto bajo diferentes variables en una muestra de la población aledaña a la ciénaga del Betanci, Montería – Córdoba.

Objetivos específicos

- Evaluar anualmente, durante un período de tres años las concentraciones de mercurio y metilmercurio en una muestra de la población aledaña a la ciénaga del Betanci.
- Estudiar la relación y variabilidad de las concentraciones de Hg y MeHg con respecto a las variables de edad y dieta de la población.
- Analizar los cambios en las concentraciones de mercurio y metilmercurio durante el monitoreo mediante análisis estadístico.

Procedimientos que se realizan para la toma de muestras en los pacientes

Molestias o riesgos esperados

La toma de muestras de cabello no genera ninguna molestia o dolor al momento del corte, lo cual, no supone ningún peligro para el participante.

Procedimientos alternativos para la toma de muestras

No hay procedimientos alternativos para la toma de muestras con los objetivos planteados en este estudio.

Beneficios que pueden obtenerse del estudio



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

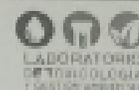
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

CONSENTIMIENTO INFORMADO



LABORATORIO
DE TOXICOLOGÍA
Y GESTIÓN AMBIENTAL

Los participantes podrán beneficiarse del estudio, mediante el conocimiento de sus niveles de HgT y MeHg la cual como una medida del riesgo de efectos adversos en salud por exposición a estas sustancias. Se destaca que este tipo de evaluaciones ofrecen a los participantes información adicional a la obtenida mediante los exámenes rutinarios en salud y puede servir como alerta temprana para tomar medidas preventivas o correctivas al respecto. Otro beneficio del estudio consiste en la transferencia de conocimientos sobre prevención y reducción de riesgo por exposición a estos contaminantes.

Garantía de recibir información sobre el estudio

Se garantiza a todos los participantes del estudio, dar respuesta a cualquier pregunta, recibir aclaración a cualquier duda acerca de los procedimientos, riesgos, beneficios y otros asuntos relacionados con la investigación. Para información relacionada con el estudio puede

comunicarse a esta dirección:

Ivan David Urango Cárdenas – Sandra María Burgos Nuñez – Investigadores principales

smburgos@campus.uco.edu.co - ivanurango@campus.uco.edu.co

Tel. 3226839403-3117197063

Universidad de Córdoba, Cra. 8 A 76 – 103 Montería

Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental

Libertad de retirar su consentimiento en cualquier momento

Toda persona que desea participar del estudio lo hará de manera voluntaria, con pleno conocimiento de la naturaleza de los procedimientos, riesgos y beneficios inherentes anteriormente, a que se comenzará, con la capacidad de libre elección y sin coacción alguna. Todos los participantes tienen el derecho de retirar su consentimiento en cualquier momento y dejar de participar en el estudio sin perjuicios de ninguna índole.

Confidencialidad de la información

Toda la información obtenida de las muestras colectadas de los participantes del estudio será manejada confidencialmente cuidando siempre la privacidad de los participantes. Las muestras colectadas serán utilizadas exclusivamente para los fines de la investigación.

Compromiso de proporcionar información obtenida durante el estudio

Si durante el desarrollo del estudio (análisis de muestras) se obtiene alguna información relevante que comprometa la salud o el bienestar de alguno de los participantes, se le notificará a la mayor brevedad posible, con el propósito de tomar las acciones pertinentes. De otra manera, al final del estudio, los resultados del mismo, se darán a conocer a cada uno de los participantes.

Disponibilidad de tratamiento médico e indemnizaciones

Aunque el presente es un estudio de mínimo riesgo, se garantiza a cada participante del mismo la disponibilidad de tratamiento médico y la indemnización a que legalmente tendría derecho, en caso de algún



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA	
	LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL	LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL
CONSENTIMIENTO INFORMADO		

daño que afecte directamente su salud y que haya sido causado por algún procedimiento contemplado en el estudio.

Mediante la firma del presente documento, manifiesto que se me ha explicado de manera clara y completa la naturaleza, alcances, riesgos y beneficios del estudio descrito anteriormente, y estoy de acuerdo en participar voluntariamente del mismo.

Nombre del participante: _____

Firma: _____

Nº de identificación: _____



Anexo 8. Ejemplo de control de calidad analítico HgT Y MeHg (blancos, estándar, duplicados, adicionados y material de referencia)

Control de Calidad MeHg

Código	Tipo	Peso Muestra (g)	Volúmen de Aforo (mL)	Volúmen de Análisis (mL)	Factor de Dilución	ng HgT	Concentración Muestra	Valor a Reportar	Unidad	Fecha de Ejecución	Evaluación Control de calidad	Parámetro	Promedio de Duplicados
BK PROC	B	1	1	0,1	1	0,00242	0,024	<LD	µg/Kg	19/01/2023	N.A	N.A	N.A
STD 1 ng	QC1	1	1	0,1	1	0,99952	9,995	10	µg/L	19/01/2023	0,050	%E	N.A
STD 10 ng	QC2	1	1	0,1	1	9,77949	97,795	97,790	µg/L	19/01/2023	2,210	%E	N.A
TX-210222-25	S	0,0515	1	0,1	2	18,52573	7194,458	7194,460	µg/Kg	19/01/2023	N.A	N.A	N.A
TX-210222-25	D	0,0523	1	0,1	2	17,81063	6810,948	6810,950	µg/Kg	19/01/2023	5,480	%Er	7002,703
TX-210222-27	S	0,0542	1	0,1	2	6,87514	2536,952	2536,950	µg/Kg	19/01/2023	N.A	N.A	N.A
TX-210222-27	D	0,054	1	0,1	2	7,15206	2648,911	2648,910	µg/Kg	19/01/2023	4,320	%Er	2592,932
TX-210222-29	S	0,0506	1	0,1	2	5,46547	2160,265	2160,260	µg/Kg	19/01/2023	N.A	N.A	N.A
TX-210222-29	D	0,0517	1	0,1	2	5,92036	2290,275	2290,270	µg/Kg	19/01/2023	5,840	%Er	2225,270
IAEA-086	MR	0,1001	2	0,1	2	0,72245	288,691	288,691	µg/Kg	20/01/2023	111,896	%R	N.A

<LD = Menor al límite de detección.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS



Control de calidad HgT

Código	Tipo	Peso (g) Volumen (mL)	ng HgT	Concentracion Muestra	Valor a Reportar	Unidad	Fecha de Ejecución del Análisis	Evaluación Control de Calidad	Parámetro	Promedio de Duplicados
BK PROC	B	1	0	0	<LD	µg/L	28/02/2022	N.A	N.A	N.A
STD 1 ng	QC1	0,100	1,014	10,143	10,14	µg/L	28/02/2022	1,43	%E	N.A
STD 10 ng	QC2	0,100	9,625	96,248	96,25	µg/L	28/02/2022	3,75	%E	N.A
TX-210222-27	S	0,022	71,299	3211,680	3211,68	µg/Kg	28/02/2022	N.A	N.A	N.A
TX-210222-27	D	0,021	67,107	3241,900	3241,9	µg/Kg	28/02/2022	0,94	%Er	3226,790
TX-210222-28	S	0,023	59,177	2550,715	2550,72	µg/Kg	28/02/2022	N.A	N.A	N.A
TX-210222-28	D	0,025	66,088	2601,876	2601,88	µg/Kg	28/02/2022	1,99	%Er	2576,296
TX-210222-29	S	0,023	58,157	2573,315	2573,32	µg/Kg	28/02/2022	N.A	N.A	N.A
TX-210222-29	D	0,022	57,704	2599,267	2599,27	µg/Kg	28/02/2022	1	%Er	2586,291
MRC-hair	MR	0,010	5,817	581,711	581,711	µg/Kg	28/02/2022	101,520	%R	N.A

<LD = Menor al límite de detección.