



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología**

Trabajo de Grado

**CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS (Hg,
Pb) EN SEDIMENTOS DE LA CUENCA
MBOCAYATY GUAZÚ, CENTRO OESTE DEL
DEPARTAMENTO CENTRAL DEL PARAGUAY,
AÑO 2025**

MARA DUARTE VALLEJOS

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la aprobación de la
asignatura

**SAN LORENZO – PARAGUAY
DICIEMBRE– 2025**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología**

Trabajo de Grado

**CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS (Hg,
Pb) EN SEDIMENTOS DE LA CUENCA
MBOCAYATY GUAZÚ, CENTRO OESTE DEL
DEPARTAMENTO CENTRAL DEL PARAGUAY,
AÑO 2025**

MARA DUARTE VALLEJOS

Orientadora: PROF. MSc. ROMINA MARIEL CELABE GAONA

Coorientador: PROF. MSc. NÉSTOR DAMIÁN SALINAS FRANCO

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la aprobación de la
asignatura

**SAN LORENZO – PARAGUAY
DICIEMBRE– 2025**

**CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS (Hg, Pb), EN
SEDIMENTOS DE LA CUENCA MBOCAYATY GUAZÚ, CENTRO
OESTE DEL DEPARTAMENTO CENTRAL, – PARAGUAY, 2025.**

Autor: MARA DUARTE VALLEJOS

Orientadora: PROF. MSc. ROMINA MARIEL CELABE GAONA

Coorientador: PROF. MSc. NÉSTOR DAMIÁN SALINAS FRANCO

Trabajo de Grado presentado a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad Nacional de Asunción, como requisito para aprobar la asignatura.

Fecha de aprobación:

MESA EXAMINADORA DE TRABAJO DE GRADO

MIEMBROS:

Prof. MSc. Sonia Mabel Molinas Ruíz Díaz .
Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Higinio Moreno Resquín .
Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

Prof. MSc. Narciso Cubas Villalba .
Universidad Nacional de Asunción, Paraguay

DEDICATORIA

A mis padres, Sara Vallejos Cabriza y Arcenio Rubén Duarte

A mi hermano, Elías Duarte Vallejos

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la fuerza necesaria para poder cumplir este gran objetivo.

A mis padres, Sara Vallejos Cabriza y Arcenio Rubén Duarte por el apoyo y acompañamiento incondicional en todas las etapas de mi vida. A mi hermano, Elías Duarte Vallejos y mi prima Cristel Vallejos por toda su paciencia, ayuda y comprensión.

A mis amigos Fabián, Romina, Diego, Gema, Brisa, Luis, Mauricio, Alex, Maruxa y Monserrat por sus palabras de aliento del día a día y amistad que me dieron fuerzas para seguir luchando.

A mi compañera Luján por acompañarme en el reconocimiento y muestreo en el área de estudio junto con mi amigo Abdón Troche que también hizo posible la fabricación Artesanal de la draga. A todos mis compañeros de la carrera, Celeste, Andrés, Heber, Francisco por ser parte de este proceso. A los licenciados Benjamín Benítez, Diego Robles, Ingrid Godoy, Verónica Orue, Clara Velázquez por sus apoyo. A la presidenta de la AEGP Romina Ovelar y a todos sus miembros por su predisposición y brindarme su ayuda con mis actividades de recaudación de fondos.

A mi tutora la Prof. MSc. Romina Mariel Celabe Gaona por predisposición en cada consulta para ir construyendo los contenidos y apoyo para la postulación de la Beca PUBIABM y mi coorientador Prof. MSc. Néstor Salinas Franco por sus orientaciones pedagógicas. A la Prof. MSc. Sonia Mabel Molinas Ruíz Díaz y Prof. MSc. Higinio Moreno Resquín por sus orientaciones durante el desarrollo del Trabajo de Grado. Al Prof. Dr. Gustavo Rivas por su predisposición, colaboración y orientación durante el desarrollo del trabajo de grado.

A los profesores del departamento de Geología por sus enseñanzas y ayuda para mi formación profesional.

Finalmente, agradezco profundamente al Programa de Becas PUBIABM, cuya colaboración académica y apoyo económico hizo posible la realización de este Trabajo de Grado.

CONCENTRACION DE METALES PESADOS (Hg, Pb) EN SEDIMENTOS DE LA CUENCA MBOCAYATY GUAZÚ, CENTRO OESTE DEL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL PARAGUAY, AÑO 2025

Autor: MARA DUARTE VALLEJOS

Orientadora: PROF. MSc. ROMINA MARIEL CELABE GAONA

Coorientador: PROF. MSc. NÉSTOR DAMIÁN SALINAS FRANCO

Resumen

La Cuenca Mbocayaty Guazú, ubicada en el Centro Oeste del Departamento Central del Paraguay, posee un área de 44,9 km² y abarca parte de los distritos de San Lorenzo, Fernando de la Mora, Villa Elisa, Ñemby y San Antonio. Esta fue investigada para determinar las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb) en sus sedimentos durante 2025. Mediante el muestreo en 11 puntos estratégicos y el análisis, se identificaron concentraciones de Hg entre 0,001-0,072 mg/kg y de Pb entre <1,0-19,20 mg/kg. La evaluación mediante índices de contaminación (Igeo, FC, Cd) reveló una baja contaminación, con focos moderados localizados en áreas de influencia antropogénica. La comparación con normativas internacionales mostró que 5 puntos superan los valores guía de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), aunque se mantienen por debajo de los niveles de efectos biológicos adversos según el Consejo de Ministros del Ambiente de Canadá (CCME). El análisis espacial mediante SIG identificó zonas de alta amenaza ambiental asociadas a fuentes contaminantes. Los resultados indicarían la presencia de una contaminación puntual de los metales estudiados, principalmente en áreas de influencia antrópogenica, lo que representa una potencial amenaza para sedimentos y su interacción con el medio.

Palabras claves: metales pesados, mercurio, plomo, sedimentos, Cuenca Mbocayaty Guazú.

CONCENTRATION OF HEAVY METALS (Hg, Pb) IN SEDIMENTS OF THE MBOCAYATY GUAZÚ BASIN, CENTRAL WEST OF THE CENTRAL DEPARTMENT OF PARAGUAY, YEAR 2025

Author: MARA DUARTE VALLEJOS

Counselor: PROF. MSc. ROMINA MARIEL CELABE GAONA

Co-orienter: PROF. MSc. NESTOR DAMIAN SALINAS FRANCO

Abstract

The Mbocayaty Guazú Basin, located in the Central West of the Central Department of Paraguay, covers an area of 44.9 km² and includes parts of the districts of San Lorenzo, Fernando de la Mora, Villa Elisa, Ñemby, and San Antonio. This study determined the concentrations of mercury (Hg) and lead (Pb) in its sediments during 2025. Through sampling at 11 strategic points and subsequent analysis, concentrations of Hg between 0.001-0.072 mg/kg and Pb between <1.0-19.20 mg/kg were identified. Assessment using contamination indices (Igeo, CF, Cd) revealed low contamination levels, with moderate localized hotspots in areas of anthropogenic influence. Comparison with international regulations showed that some points exceed NOAA guideline values, although they remain below levels for adverse biological effects according to CCME. Spatial analysis using GIS identified high environmental threat zones associated with pollution sources. The results indicate the presence of point contamination by the studied metals, primarily in areas of anthropogenic influence, representing a potential threat to sediments and their interaction with the environment.

Keywords: heavy metals, mercury, lead, sediments, Mbocayaty Guazú Basin.

ÍNDICE

	Páginas
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Preguntas de investigación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general:	4
1.3.2 Objetivos específicos:	4
1.4 Justificación	5
1.5 Hipótesis	5
1.6 Variables	6
1.6.1 Variables independiente	6
1.6.2 Variables dependiente	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Marco conceptual	7
2.1.1 Metales pesados	7
2.1.2 Mercurio (Hg)	8
2.1.2.1 Uso del mercurio	8
2.1.2.2 Toxicidad del mercurio	9
2.1.3 Plomo	9
2.1.3.1 Uso del Plomo	10
2.1.3.2 Toxicidad del plomo	10
2.1.2 Dinámica de los metales en ambientes acuáticos	11
2.1.2.1 Origen natural	11
2.1.2.2 Origen antrópico	11
2.1.2.2.1 Origen industrial	12
2.1.2.2.2 Origen agropecuario	13
2.1.2.2.3 Origen doméstico	13
2.1.3 Sedimentos y metales pesados	13
2.1.4 Acumulación de los metales pesados	13
2.1.5 Origen y composición química de sedimentos	14
2.1.6 Propiedades químicas de la superficie de las partículas	15

2.1.7	Granulometría	15
2.1.7.1	Métodos para la determinación de la granulometría	16
2.1.7.2	Importancia de la granulometría de los sedimentos	16
2.1.8	Índices de metales pesados	17
2.1.8.1	Índice de geoacumulación (Igeo)	17
2.1.8.2	Factor de contaminación	18
2.1.8.3	Grado de contaminación	20
2.2	Marco referencial	20
2.2.1	Antecedentes globales	20
2.2.2	Antecedentes regionales	23
2.3	Marco legal	24
2.3.1	Normas de regulación de metales en sedimentos	24
2.4	Aspecto geológicos	25
2.4.1	Geología local	25
2.4.1.1	Grupo Asunción	25
2.4.1.2	Suite Magmática Ñemby	26
2.4.1.3	Sedimentos Cuaternarios	26
2.5	Clima	27
2.5.1	Departamento Central	27
2.5.1.1	San Lorenzo	29
2.5.1.2	Villa Elisa	29
2.5.1.3	San Antonio	29
2.5.1.4	Ñemby	29
3.	METODOLOGÍA	30
3.1	Diseño metodológico	30
3.2	Nivel de la investigación	30
3.3	Tipo de estudio	30
3.4	Lugar de estudio	31
3.5	Población	31
3.6	Muestra	31
3.7	Métodos y técnicas a utilizar	32
3.7.1	Trabajos de gabinete	32

3.7.2	Lugares de muestreo y técnicas de campo	34
3.7.3	Trabajos de laboratorio	35
3.7.3.1	Análisis de metales en sedimentos	35
3.7.3.2	Análisis granulométricos	36
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1	Resultados	37
4.1.1	Concentraciones de Hg y Pb en sedimentos	37
4.1.1.1	Localización de los puntos de muestreo	37
4.1.1.2	Concentración de metales pesados en sedimentos	38
4.1.2	Distribución espacial de metales	39
4.1.2.1	Mercurio (Hg)	39
4.1.2.2	Plomo (Pb)	40
4.1.3	Granulometría	41
4.1.3.1	Influencia de la granulometría en la acumulación de Hg y Pb en sedimentos	43
4.1.3.1.1	Prueba de normalidad	43
4.1.3.1.2	Estimación mediante bootstrap de medianas	45
4.1.3.1.3	Coeficientes de correlación de <i>Spearman</i>	45
4.1.4	Índices de metales pesados en los sedimentos	46
4.1.4.1	Índice de geoacumulación (Igeo)	46
4.1.4.2	Factor de contaminación	49
4.1.4.3	Grado de contaminación	51
4.1.5	Comparación de los valores obtenidos con normas internacionales	52
4.1.5.1	Comparación de normas de referencia con análisis estadístico inferencial	52
4.1.5.2	Correlación para el Mercurio (Hg)	53
4.1.5.3	Correlación para el Plomo (Pb)	54
4.1.6	Análisis multicriterio para la identificación de la amenaza ambiental mediante el proceso analítico jerárquico (AHP)	55
4.1.6.1	Matriz de Comparación par a par y cálculo de pesos	55
4.1.6.2	Distribución espacial de la amenaza ambiental	56
4.2	Discusión	58

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
5.1	Conclusiones	59
5.2	Recomendaciones	60
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

	Páginas
1. Mapa geológico del área de estudio.	27
2. Datos meteorológicos promedios mensuales del departamento central: temperatura	28
3. Datos meteorológicos promedios mensuales del departamento central: precipitación (barras) y humedad relativa (línea).	28
4. Mapa de ubicación del área de estudio.	31
5. Mapa de ubicación de puntos de muestreo.	37
6. Mapa de distribución espacial del mercurio.	40
7. Mapa de distribución espacial del plomo.	41
8. Valores granulométricos en porcentaje de los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú.	42
9. Mapa de índice de geoacumulación del mercurio.	48
10. Mapa de índice de geoacumulación del plomo.	48
11. Mapa del factor de contaminación de mercurio.	50
12. Mapa del factor de contaminación de plomo.	50
13. Mapa del grado de contaminación.	52
14. Correlación de Hg medido (mg/kg) con las normativas internacionales.	53
15. Correlación de Pb medido (mg/kg) con las normativas internacionales.	54
16. Mapa de Amenaza Ambiental.	57

LISTA DE TABLAS

	Páginas
1. Concentraciones de metales pesados en varios tipos de rocas (mg/kg)	11
2. Principales orígenes antropogénicos de los metales pesados	12
3. Escala de tamaño de sedimentos	15
4. Clasificación del índice de geoacumulación	18
5. Metales en rocas sedimentarias y valores de referencia preindustrial	19
6. Clasificación del factor de contaminación	19
7. Clasificación del grado de contaminación	20
8. Valores de referencia internacionales de concentraciones de metales pesados	37
9. Datos de los puntos muestreados	32
10. Puntos de muestreo de sedimentos de fondo en el área de estudio	38
11. Concentraciones de Hg y Pb en sedimentos de fondo de la Cuenca Mbocayaty Guazú, 2025.	39
12. Composición granulométrica en sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, 2025	42
13. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de metales y granulometría del sedimento.	43
14. Resultados de la prueba de normalidad de <i>Shapiro–Wilk</i> para las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb), y para las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) de los sedimentos	44
15. Estimación <i>bootstrap</i> del intervalo de confianza al 95 % para la mediana de las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb) en los sedimentos	45
16. Coeficientes de correlación de Spearman (ρ)	56
17. Índice de geoacumulación en los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú	47
18. Factor de contaminación de los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú	59
19. Grado de contaminación de los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú	51
20. Registro de ubicaciones de las fuentes antropogénicas	55
21. Matriz de Comparación Par a Par de los Criterios de Identificación	56
22. Pesos normalizados AHP	56

ÍNDICE DE ANEXOS

	Páginas
1. Reconocimiento previo de los lugares de muestreo	70
2. Elaboración y prueba de la draga Van Veen artesanal para la toma de muestras de sedimentos	71
3. Ejecución del trabajo de campo: traslado, recolección de muestras de sedimentos y registro de coordenadas	73
4. Resultados de análisis en sedimentos de fondo	75
5. Código en R estudio utilizado para el análisis estadístico	86

LISTA DE SIGLAS

AHP:	Proceso Analítico Jerárquico
BCa:	<i>Bias-Corrected and Accelerated</i>
CCME:	<i>Canadian Council of Ministers.</i>
CEQG:	<i>Canadian Environmental Quality Guidelines.</i>
FC:	Factor de Contaminación
Cd:	Grado de Contaminación
DEM:	<i>Digital Elevation Model</i>
GPS:	<i>Global Positioning System</i>
IC:	Intervalo de Confianza
Igeo:	Índice de Geoacumulación
IDW:	<i>Inverse Distance Weighting</i> (Distancia Inversa Ponderada)
INCLAM:	Ingeniería del agua y cambio climático
INE:	Instituto Nacional de Estadística
NOAA:	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration.</i>
PEL:	<i>Probable Effect Level.</i>
PUBIABM:	Programa Universitario de Becas para la Investigación, “Andrés Borgognon Montero”
QGIS:	<i>Quantum Geographic Information System.</i>
S.I.G:	Sistema de Información Geográfica
SQuiRTs:	<i>Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment.</i>
USGS:	<i>United States Geological Survey</i>
TEL:	<i>Threshold Effect Levede</i>

LISTAS ABREVIATURAS

α :	Nivel de significancia
$^{\circ}\text{C}$:	Grados Celsius
$\mu\text{g/g}$:	Miligramos por gramo
Bn :	Concentración geoquímica de referencia
Cn :	Concentración del elemento n
H₀ :	Hipótesis nula
H₁ :	Hipótesis alternativa
Hg :	Mercurio
Km² :	Kilómetros cuadrados
m :	Metros
mm :	Milímetros
mg/kg :	Miligramos por kilogramo
μm :	Micrómetros
μm :	Micrómetros
n :	Tamaño de muestra
p :	Valor p (nivel de significancia)
P1 al P11 :	Punto 1 al Punto 11
Pb :	Plomo
ppm :	Partes por millón
R² :	Coeficiente de determinación
rho :	Coeficiente de Correlación de Spearman
W :	Estadístico de <i>Shapiro-Wilk</i>
σ :	Desviación estándar
μ :	Media población

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuáticos son receptores naturales de una amplia gama de sustancias, incluidos sales y elementos traza como los metales pesados. En condiciones naturales, su presencia refleja la composición geológica de las cuencas hidrográficas (Förstner & Wittmann, 1981; Rosas, H. 2001). Adriano (1986) señala que, sin embargo, la actividad humana ha alterado drásticamente este equilibrio, introduciendo concentraciones anómalas de metales tóxicos como el mercurio (Hg) y el plomo (Pb) que representan una amenaza a la salud de las comunidades.

Los metales pesados, si bien presentes de forma natural en trazas, son esenciales para procesos biológicos en bajas concentraciones (por ejemplo, hierro en la hemoglobina). No obstante, su acumulación por actividades antropogénicas (como emisiones industriales, vertidos urbanos o residuos peligrosos) los convierte en contaminantes persistentes (Meybeck & Helmer, 1989). En sistemas acuáticos, estos metales no se degradan; en cambio, los sedimentos capturan metales mediante adsorción en arcillas y materia orgánica, donde persisten décadas. Es un agravante para la situación de los cauces usados como receptores de desechos, estos disminuyen su capacidad autodepuradora (Förstner & Prosi, 1979; Sigg *et al.*, 2001; Rosas, H. 2001). Su análisis es crucial porque permiten detectar la contaminación crónica; a diferencia de los parámetros físico-químicos del agua, los sedimentos actúan como indicadores integrados de la calidad ambiental a largo plazo (Baudo & Muntau, 1990; Chen *et al.*, 2007).

Como menciona Reyes *et al.*, (2016) también, son indicadores de riesgos ecosistémicos: el Hg, por ejemplo, se transforma en metilmercurio (neurotóxico y bioacumulable), mientras el Pb causa toxicidad renal y neurológica en organismos vivos.

En Paraguay, estudios previos en el arroyo San Lorenzo reportaron niveles de Hg de hasta 0,092 mg/kg y de Pb de hasta 16 mg/kg, superando los valores de referencia de agencias internacionales (Salinas Franco, 2019; Salinas Franco *et al.*, 2021). Asimismo, en la Bahía de Asunción se han detectado concentraciones de plomo superiores a los límites establecidos por el Consejo de Ministros del Ambiente de Canadá (CCME, 2001) y la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica NOAA (1999), lo que confirma que los sedimentos actúan como reservorios críticos de contaminación en ambientes urbanizados (Kurita, 2022).

Por ende, esta investigación propone determinar la concentración y distribución de Hg y Pb en estos sedimentos, identificando sus riesgos ambientales en un contexto donde la normativa nacional aún no existe.

1.1 Planteamiento del problema

La Cuenca Mbocayaty Guazú abarca un área de 44,9 km² y comprende parte de los distritos de San Lorenzo, Fernando de la Mora, Villa Elisa, Ñemby y San Antonio ubicados en el centro-oeste del Departamento Central del Paraguay. Dicha cuenca forma parte del sistema hidrográfico que desemboca en el río Paraguay, a la altura del Puerto de San Antonio. Su territorio es altamente urbanizado, y presenta dos cauces hídricos que confluyen en el Arroyo Guazú (Monte Domecq & Báez, 2007). Actualmente, la cuenca no cuenta con servicios de alcantarillado sanitario provistos por la ESSAP (Ingeniería del agua y cambio climático - INCLAM, 2017). Sus principales cursos recogen las aguas de vertimiento de pequeños talleres artesanales, servicios generales para el transporte, talleres de mecánica, pintura y chapería (INCLAM, 2017). Esta situación genera una alta probabilidad de que los cuerpos receptores (en especial los sedimentos) están siendo afectados por contaminantes persistentes, como los metales pesados y generando amenazas ambientales para la comunidad local. Ante este escenario, surge la necesidad de analizar la concentración y distribución de metales pesados (Hg, Pb) en los sedimentos de la cuenca.

1.2 Preguntas de investigación

Pregunta general:

¿En qué medida las concentraciones de Hg y Pb presentes en los sedimentos de fondo de la Cuenca Mbocayaty Guazú representan una potencial amenaza de contaminación ambiental en el sector Centro Oeste del Departamento Central del Paraguay, en el año 2025?

Preguntas específicas:

- ¿Cuáles son las concentraciones Hg y Pb en los sedimentos de fondo de la Cuenca Mbocayaty Guazú, en el Centro Oeste del Departamento Central del Paraguay durante el año 2025?
- ¿Cómo se distribuyen espacialmente las concentraciones de Hg y Pb en los sedimentos de la cuenca, y qué patrones de acumulación se identifican en el sistema fluvial?
- ¿Cómo se asocia la composición granulométrica de los sedimentos en la acumulación de Hg y Pb en los distintos sectores de la cuenca?
- ¿Cuál es el grado de contaminación por Hg y Pb en los sedimentos de la cuenca según los índices geoquímicos de evaluación ambiental (Igeo, CF y Cd)?
- ¿En qué medida las concentraciones detectadas se corresponden o exceden los valores guía de calidad de sedimentos establecidos por organismos internacionales de referencia (NOAA, CEQG)?
- ¿Qué nivel de amenaza ambiental potencial representan las concentraciones observadas de Hg y Pb para el sistema sedimentario-fluvial de la Cuenca Mbocayaty Guazú, considerando criterios internacionales?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

Analizar la concentración de los metales pesados (Hg y Pb), en los sedimentos de fondo de la cuenca Mbocayaty Guazú, conforme a las normativas internacionales (NOAA, CEQG) e índices de contaminación (Igeo, CF y Cd) y las amenazas ambientales en el Centro Oeste del Departamento Central – Paraguay, en el año 2025.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Determinar la concentración de metales pesados (Hg, Pb) y en sedimentos de fondo de la Cuenca Mbocayaty Guazú, en el Centro Oeste del Departamento Central – Paraguay, en el año 2025.
- Realizar mapas distribución espacial de metales pesados (Hg, Pb) en sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, en el Centro Oeste del Departamento Central – Paraguay, en el año 2025.
- Interpretar la influencia de la granulometría de los sedimentos de fondo en la acumulación de Hg y Pb en la Cuenca Mbocayaty Guazú, en el Centro Oeste del Departamento Central – Paraguay, en el año 2025.
- Calcular el grado de contaminación en sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, en el Centro Oeste del Departamento Central – Paraguay, en el año 2025.
- Contrastar datos obtenidos de los análisis con las normativas internacionales (NOAA, CEQG) en sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, en el Centro Oeste del Departamento Central – Paraguay, en el año 2025.
- Identificar las potenciales amenazas ambientales derivadas de la presencia de metales pesados en sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, en el Centro Oeste del Departamento Central – Paraguay, en el año 2025.

1.4 Justificación

El crecimiento urbano desordenado, la ausencia de saneamiento adecuado y actividades antropogénicas afecta directamente a la cuenca Mbocayaty Guazú (INCLAM, 2017). Este estudio adquiere relevancia fundamental al abordar un vacío crítico en las investigaciones en el Paraguay donde hay una escasa atención a los sedimentos fluviales como reservorios y vectores de contaminación crónica por metales pesados.

La problemática específica de la acumulación de metales pesados (Hg, Pb) en sus sedimentos ha sido sistemáticamente subestimada y poco documentada. Además, en Paraguay, no existe legislación nacional que regule las concentraciones de metales pesados en sedimentos (Salinas Franco, 2019). La mayoría de los estudios existentes suelen centrarse en parámetros físico-químicos del agua, omitiendo la interacción dinámica entre el agua y los sedimentos, donde ciertos metales son resistentes al intercambio con el agua, manteniéndose estables por largos períodos de tiempo (Cornejo *et al.*, 2023)

La investigación no solo generará datos para analizar el estado actual de la cuenca, sino que también servirá como base para futuras investigaciones. En un contexto donde la contaminación de sedimentos sigue siendo subestimada, este trabajo representará un avance científico y práctico, destacando la necesidad que consideren tanto el agua como su interacción con los sedimentos para garantizar la sostenibilidad de nuestros recursos hídricos.

1.5 Hipótesis

Las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb) en los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, en zonas con influencia antropogénica como las descargas de efluentes industriales y falta de saneamiento, superan los valores guía establecidos por normativas internacionales (NOAA, CEQG)

1.6 Variables

1.6.1 Variables independiente

- Presencia de metales pesados (Hg y Pb) en sedimentos de fondo.
- Ubicación de los puntos de muestreo.
- Distribuciones granulométricas de los sedimentos.
- Índices de contaminación (Igeo, CF y Cd)
- Normativas internacionales (*NOAA*, *CEQG*).
- Factores de amenaza ambiental (proximidad a fuentes, tipos de industria)

1.6.2 Variables dependiente

- Concentración de Hg, Pb en sedimentos de fondo (mg/kg).
- Distribución espacial de los metales pesados (Hg y Pb) en los sedimentos.
- Acumulación de los metales pesados (Hg y Pb) en sedimentos
- Nivel de contaminación determinado mediante índices (Igeo, CF y Cd).
- Cumplimiento con valores de referencia (*NOAA*, *CEQG*).
- Amenaza Ambiental.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Metales pesados

Los metales pesados son aquellos elementos químicos que se definen en base a sus propiedades físicas en el estado sólido como son: alta reflectividad, alta conductividad eléctrica, alta conductividad térmica, propiedades mecánicas como fuerza y ductilidad. A este grupo de metales pertenecen aquellos cuya densidad en forma elemental es igual o superior a 5 g/cm³ o que poseen un número atómico mayor a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos). Son elementos que tienen pesos atómicos entre 63, 546 y 299, 590 con una gravedad mayor a 4,0. La presencia de estos elementos en la corteza terrestre no supera el 0,1%. Los metales pesados se han agrupado en Oligoelementos o Micronutrientes; también denominados en ocasiones elementos traza, los cuales son necesarios en pequeñas cantidades para el organismo, ya que intervienen en algunas funciones bioquímicas, estos incluyen Arsénico (As), Boro (B), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Selenio (Se) y Zinc (Zn). El otro grupo incluye elementos cuya función biológica es desconocida y son altamente tóxicos, aunque algunos de estos pueden estar presentes en los seres vivos, a estos pertenecen el Bario (Ba), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Antimonio (Sb), Bismuto (Bi). (Macías, P., 2015; Tirado, L *et al.*, 2015).

Existen en la naturaleza en diferentes concentraciones y si se encuentran en cantidades mínimas suelen ser indispensables y beneficiosos para los seres vivos siempre que éstas no superen el 0,01% de la masa total del organismo (Jiménez, 2012). Ejemplos de estos metales son el hierro, cobre, manganeso, molibdeno, cobalto, vanadio, estroncio y zinc, siendo el hierro esencial para la formación de la hemoglobina de la sangre. Cabe indicar que lo que hace que un metal sea o no tóxico, no son precisamente sus características esenciales, sino las elevadas concentraciones en que suelen encontrarse o las especies químicas que pueden formar en un determinado medio, en determinadas condiciones. Los metales pesados más conocidos son el mercurio, plomo, cadmio, cromo, níquel y arsénico, aunque a veces se incluyen

en la lista a metales menos pesados como el aluminio y berilio. (Venegas, J., 2016). Además, estos elementos no pueden degradarse ni destruirse, por lo que se tratan de contaminantes estables y persistentes del medio ambiente, y como consecuencia tienden a acumularse en suelos y sedimentos (Márquez *et al.*, 2012).

2.1.2 Mercurio (Hg)

El mercurio es un elemento de gran utilidad, dado que es el único metal que se encuentra en estado líquido a temperaturas normales y posee una gran conductividad eléctrica. La corteza terrestre contiene aproximadamente 50 mg/g de Hg, encontrándose principalmente como sulfuro de mercurio. El Hg se halla en todo tipo de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas). El contenido de mercurio en muchas rocas ígneas generalmente es menor a 200 mg/g con una concentración media inferior a 100 mg/g. Muchas rocas sedimentarias tienen contenidos de Hg por debajo de 200 mg/g, excepto para los esquistos, los cuales poseen valores de Hg mucho más elevados. Los esquistos con altos porcentajes de materia orgánica se encuentran más enriquecidos en mercurio (Malm *et al.*, 1990).

Jumbo, D., (2015) menciona que el mercurio habitualmente se encuentra en el medio natural en muy bajas concentraciones y la presencia de cantidades significativas es indicativo de contaminación.

Además, dada su volatilidad puede encontrarse en la atmósfera, en el medio acuoso y en los sedimentos. El ión Hg^{2+} tiene una elevada tendencia a absorberse sobre partículas sólidas. Por consiguiente, la cantidad de Hg^{2+} presente en el material en suspensión (arcillas) puede llegar a ser 25 veces mayor a la cantidad de Hg^{2+} presente en solución. (Hall y Pelchat, 1997).

2.1.2.1 Uso del mercurio

El mercurio se usa en una gran variedad de procesos industriales y en diferentes productos como pinturas, fungicidas y aparatos eléctricos. La segunda aplicación más importante del mercurio es la de los aparatos eléctricos, como lámparas

de vapor de mercurio, tubos e interruptores electrónicos y baterías de mercurio. El mercurio entra al ambiente en forma elemental como pérdida de los procesos industriales y de equipos convertidos en chatarra, así como en la forma de compuestos de mercurio debido a las actividades industriales y agrícolas (Martínez *et al.*, 2018).

Según Cornejo *et al.*, (2023) los residuos hospitalarios que contienen Hg en instrumentos médicos como termómetros o algunos fármacos, y se ha comprobado el inadecuado manipuleo, almacenamiento, tratamiento de residuos y desconocimiento de normas de seguridad siendo una fuente de contaminación.

2.1.2.2 Toxicidad del mercurio

El mercurio elemental es poco soluble y por lo tanto poco tóxico al ingerirse, pero puede emitir vapores tóxicos a cualquier temperatura y ocasionar intoxicaciones agudas y crónicas por su inhalación. La toxicidad que exhibe el mercurio depende drásticamente de la fase química en la que se encuentre. El metilmercurio es una de las formas con elevada toxicidad y es muy fácilmente incorporado en la cadena alimenticia y bioacumulado en seres vivos. Afecta principalmente al sistema nervioso y puede producir graves daños en el cerebro en estado fetal. Es activamente perjudicial para el sistema cardiovascular y puede ser cancerígeno (Reyes *et al.*, 2016).

2.1.3 Plomo

El Pb es un elemento frecuente en la litosfera y, su contenido en la corteza terrestre es aproximadamente de unos 15 mg/g. En general, puede encontrarse en forma de sulfuro de plomo PbS (galena), carbonato de plomo PbCO₃ (cerusita) y sulfato de plomo PbSO₄ (anglesita). Los minerales de silicatos, feldespatos y magnetitas son notables sumideros de plomo en los sedimentos. El Pb es un metal muy poco móvil y tiende a absorberse en las zonas no saturadas de los ríos en el material arcilloso y en la materia orgánica. Con el aumento del pH puede precipitar como Pb(OH)₂. El principal factor limitante de la presencia de plomo en las aguas, es la formación de hidróxido y carbonato insoluble. En el intervalo de pH entre 5 y 7, el Pb tiende a absorberse sobre las partículas arcillosas. El Pb puede presentarse bajo

diferentes formas químicas: Pb (0) metal, Pb (I), Pb (II) y Pb (IV). Todas estas especies, con la probable excepción del Pb (I), tienen importancias en el ambiente (Achour *et al.*, 2022).

Aunque el plomo puede encontrarse en forma natural en el ambiente, su presencia generalmente es producto de actividades antrópicas, como la combustión de combustibles fósiles en los vehículos y motores industriales. Gran parte de los compuestos de plomo que se emiten por los tubos de escape del automóvil se dispersan en la atmósfera como sustancias gaseosas o como pequeñísimas porciones de sólidos denominados macropartículas. El plomo atmosférico tiende a depositarse en las plantas y el suelo o lo pueden inhalar las personas o absorber el agua (Facetti, J., 2002; Venegas, J., 2016).

2.1.3.1 Uso del Plomo

Este metal es utilizado por diversos sectores industriales y de servicios tales como industria de acumuladores, en imprentas, plomería, pinturas anticorrosivas, vidrios plomados, vitrales, pintura con plomo, protección contra radiaciones ionizantes gamma y rayos x y equipo médico (Resonancia Magnética Nuclear), soldaduras, cerámicas, lentes de alta precisión y fibras ópticas. También se usa en una gran variedad de productos incluyendo baterías de almacenamiento y compuestos químicos antidetonantes para la gasolina. (Rosas, H. 2001; Ubillos, J. 2003).

2.1.3.2 Toxicidad del plomo

Según Reyes *et al.*, (2016) el plomo, metal pesado, constituye un elemento tóxico que se acumula en el cuerpo conforme se inhala del aire o se ingiere con los alimentos y el agua. Las principales vías de exposición son: i) inhalación de partículas de plomo generadas por combustión de algunos materiales. ii) La ingestión de polvo, en agua o alimentos contaminados. Tiende a distribuirse en diferentes órganos, tejidos, huesos y dientes, donde se va acumulando con el paso del tiempo. La intoxicación por plomo varía de acuerdo a la edad de la persona y su nivel de exposición puede llegar a causar alteraciones neurológicas, nefrotoxicidad, anemia y cáncer de riñón. (Wasi *et al.*, 2011)

2.1.4 Dinámica de los metales en ambientes acuáticos

Menciona Jumbo, D., (2015) que en los sistemas acuáticos continentales (ríos, lagos, embalses, etc) los metales pesados son introducidos como resultado de la acción de procesos naturales y antropogénicos. Por ello, se puede distinguir dos tipos de origen: natural y antrópico.

2.1.4.1 Origen natural

El contenido de elementos metálicos de sedimentos libres de interferencias humanas, depende principalmente de la composición de la roca madre originaria y de los procesos erosivos sufridos por los minerales que conforman la misma. La acción de los factores ambientales sobre las rocas y los sedimentos derivados de ellas determinan las diferentes concentraciones basales de metales pesados en los sistemas fluviales (aguas y sedimentos). La composición físico-química, tamaño de partículas, distribución y mineralogía de los sedimentos afectan la concentración de los metales pesados de origen natural. (Jumbo, D., 2015).

En la tabla 1 se muestran las diferencias de concentraciones entre los distintos tipos de rocas y sobre todo entre las arcillas.

Tabla 1. Concentraciones de metales pesados en varios tipos de rocas (mg/kg)

Elementos	Rocas Graníticas	Esquistos	Arcillas	Areniscas
Cadmio	0.13	0.30	0.42	0.02
Cobre	30.00	45.00	250.00	15.00
Cromo	22.00	90.00	90.00	35.00
Mercurio	0.08	0.40	0.02	0.03
Níquel	15.00	68.00	225.00	2.00
Plomo	15.00	20.00	80.00	7.00
Zinc	60.00	95.00	165.00	16.00

Fuente: Modificado de Adriano, 1986

2.1.4.2 Origen antrópico

La liberación de los metales pesados puede tener un origen antrópico cuando existe la intervención humana en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados, como

por ejemplo en la actividad doméstica, agraria, química, industrial, etc. (Jumbo, D., 2015).

El uso de los metales pesados ha ido aumentando paralelamente al desarrollo industrial y tecnológico. Actualmente es difícil encontrar una actividad industrial o un producto manufacturado en los que no intervenga algún metal pesado (Rosas, H., 2001).

La contaminación por metales pesados en sistemas acuáticos deriva principalmente de actividades humanas, clasificadas en cuatro categorías principales citadas a continuación:

2.1.4.2.1 Origen industrial

Las aguas residuales de industrias que utilizan los cauces fluviales como vertederos son la principal fuente antropogénica de metales pesados. Muchos vertidos no reciben tratamiento o éste es inadecuado. La alta industrialización y urbanización aumentan el riesgo, especialmente en sedimentos anaerobios ricos en sulfuros que favorecen la retención metálica (Tam & Yao, 1998). Los procesos industriales específicos y los metales asociados como muestra en la tabla 2 incluyen:

Tabla 2. Principales orígenes antropogénicos de los metales pesados

Actividad Antropogénica	Hg	Pb
Baterías eléctricas		*
Eléctrica y electrónica		*
Farmacéuticas	*	
Fertilizantes	*	*
Fotografía		*
Fundiciones		*
Galvanizados, electro chapados		*
Minería	*	*
Municiones y explosivos		*
Papeleras y similares		*
Pesticidas	*	*
Pigmentos, tintes, tintas, pinturas		*
Químicas, petroquímica	*	*
Vitrocerámica		*

Fuente: Modificado de Förstner & Wittmann, 1981

2.1.4.2.2 Origen agropecuario

Proviene de la lixiviación de terrenos agrícolas donde se han acumulado metales por el uso de pesticidas. Los pesticidas arsenicales (arseniato de plomo, arseniato de calcio) y mercuriales (cloruro mercuríco, acetato fenil mercuríco) son fuentes específicas de As y Hg. (Rosas, H., 2001).

2.1.4.2.3 Origen doméstico

Las aguas residuales urbanas transportan metales pesados procedentes de excreciones humanas, restos de alimentos, aguas de lavado, etc. (Förstner & Wittmann, 1981; Adriano, 1986). Las emisiones gaseosas (especialmente de gasolina con plomo tetraetilo) y el desgaste de neumáticos (Zn) depositan Pb, Cd, Cu, Ni y Zn en calles y carreteras. Estos metales son arrastrados por escorrentía superficial (lluvia, riego urbano) directamente a los ríos sin depuración previa (Adriano, 1986; Facetti *et al.*, 1998).

2.1.5 Sedimentos y metales pesados

Los sistemas fluviales son lugares en los que en los sedimentos se van depositando los metales pesados arrastrados por la corriente, mismos que pueden ser el resultado de la erosión de las rocas, la precipitación de sustancias disueltas en el agua y que se depositan cuando disminuye la energía del fluido que lo transporta, como es el agua o el viento (Molina & Rodríguez, 2010).

La actividad humana (antropogénica) genera grandes cantidades de desechos tóxicos que son liberados al ambiente, ingresando a los diferentes compartimentos de los ecosistemas, ya sea aire, agua, sedimentos, suelo o biota, dependiendo su destino; de las propiedades fisicoquímicas, movilidad y persistencia de los compuestos que la integran. Estos sedimentos son una fuente principal de contaminación por metales (Cornejo *et al.*, 2023).

2.1.6 Acumulación de los metales pesados

Como indica Márquez *et al.*, (2012) una vez liberados al ambiente, los metales pesados son transportados hacia los ríos debido a la escorrentía superficial

integrándose en el ciclo biogeoquímico fluvial, quedando retenidos en los sedimentos suspendidos y en los sedimentos de fondo. Estos elementos se acumulan principalmente en los sedimentos superficiales de los ríos, aunque pueden encontrarse concentraciones relativamente elevadas a una profundidad de 15 cm.

En general, debido a su baja solubilidad, la mayor parte de los metales pesados pasa de la fase soluble a la fase particulada, acumulándose en los sólidos suspendidos que transportan los ríos. Durante los períodos de bajo caudal, el material suspendido es sedimentado en el fondo de los ríos, principalmente en las llamadas zonas de deposición. Por consiguiente, la determinación de metales pesados en sedimentos fluviales es una herramienta eficiente para evaluar la calidad ambiental de una cuenca hidrográfica (Herrera *et al.*, 2012).

2.1.7 Origen y composición química de sedimentos

La naturaleza química primaria de un sedimento está determinada por los procesos de meteorización que lo han originado y de fraccionamiento mecánico (lavado) por efecto del transporte y la deposición. La composición original puede cambiar después de la deposición por procesos de diagénesis, litificación y metamorfismo. De acuerdo al transporte, los sedimentos pueden ser de material disuelto, suspendido y depositado, lo cual dependerá del tamaño de partícula y la turbulencia de la corriente). Los contaminantes y nutrientes están absorbidos sobre las partículas a la forma de material orgánico, carbonatos y sulfuros, incluida en la matriz mineral de minerales específicos tales como apatita o fosfato de calcio, silicatos y otros no alterables. Se ha encontrado que la concentración promedio de elementos como Si, Al, Fe, K, Ga, Hg, Ta, Ti y U no varía, contrario al Ca, Cs, Cu, Li, Mo, Ni, Pb, Sr y Zn, lo que se atribuye a la intensidad del proceso de intemperización. Por otra parte, al comparar la razón entre los elementos detectados en la fase disuelta (en solución acuosa) y fase particulada (adsorbidos en partículas sólidas como sedimentos), más del 90% de P, Ni, Si, Co, Mn, Cr, Pb, V y Cs fue transportado por las partículas (Cornejo *et al.*, 2023).

2.1.8 Propiedades químicas de la superficie de las partículas

Como indica Cornejo *et al.*, (2023) los procesos de adsorción son influenciados por las características físicas y químicas de la solución natural. La composición de los sedimentos es altamente heterogénea e incluye tanto minerales como materia orgánica. Los metales ingresan a través de procesos de precipitación, intercambio iónico, coprecipitación y adsorción. Los metales pesados en los sedimentos están asociados a las “arcillas” partículas de tamaño entre 2-0,45 μm , con carga negativa que intercambian cationes y dada su gran área superficie/volumen, son altamente reactivas, es decir, favorecen las interacciones de metales con el sedimento. Ciertas formas de metales son resistentes al intercambio con el agua, manteniéndose estables por largos períodos de tiempo (destacan los de matriz arcillosa), los sedimentos se comportan como aceptores finales de contaminantes.

2.1.9 Granulometría

Los sedimentos de los arroyos son bastantes heterogéneos y cambiantes, complicando su caracterización, es por eso que la granulometría del cauce hídrico es relevante en la dinámica fluvial y estudios de contaminantes, de tal manera que el tamaño del sedimento es determinante para contener o no contaminantes. (Arocena *et al.*, 1991, como se cita en Salinas N, 2019).

Tabla 3. Escala de tamaño de sedimentos

Tamaño (Mm)	Wentworth Size Class	Categoría
4096	Bloques	Grava
256		
64	Grava	
4		
2		
1	Arena muy gruesa	Arena
0,5	Arena gruesa	
0,25	Arena media	
0,125	Arena fina	
0,0625	Arena muy fina	
0,031	Limo grueso	Limo
0,0156	Limo medio	
0,0078	Limo fino	
0,0039	Arcilla	Lodo
0,00006		

Fuente: Modificado de Wentworth, 1922.

Una manera para clasificar los diámetros de los sedimento es a través de la escala granulométrica, determinados por el tamaño de los granos o partículas como muestra la tabla 3, en grava (>2 mm), arena (2 mm a $64\text{ }\mu\text{m}$), limo ($64\text{ }\mu\text{m}$ a $4\text{ }\mu\text{m}$) y arcilla ($<4\text{ }\mu\text{m}$). Estos generalmente se separan en clastos grandes denominados granos (grava, arena) y clastos finos denominados partículas (limo y arcilla) (Wentworth, 1922).

2.1.9.1 Métodos para la determinación de la granulometría

Se emplean para determinar el tamaño de partícula de una población de sedimentos, siendo su distribución de tamaños la representación numérica o gráfica.

El método granulométrico que se efectúe en los sedimentos dependerá del tamaño de la muestra original. Las partículas del tamaño de arena se pueden estudiar con tamices y para los granos menores, que corresponden a los limos y arcillas, se emplean técnicas relacionadas con el método de la pipeta. (Pérez, A. & Márquez, A. 2017)

2.1.9.2 Importancia de la granulometría de los sedimentos

La concentración de metales pesados en los sedimentos no sólo depende de fuentes antropogénicas y litogénicas, sino también de las características texturales, contenido de la materia orgánica y composición mineralógica (Venegas, J., 2016). Los metales trazas de origen antropogénico, se encuentran principalmente asociados a estas partículas (Venegas, J., 2016).

Para poder comparar las concentraciones de metales pesados de distintas muestras, es preciso aplicar métodos de corrección que minimicen los efectos asociados a la granulometría de los sedimentos (Rosas, H., 2001). Entre las fracciones que se pueden separar para realizar los análisis la mayoría de autores (Förstner y Wittmann, 1981) recomiendan analizar la porción $< 63\text{ }\mu\text{m}$ por las siguientes razones:

Como resalta Rosas, H., (2001) existe una elevada relación entre los contenidos de elementos determinados en esta fracción y los que se encuentran en suspensión. Es importante destacar, que la suspensión es la forma de transporte más importante de las partículas que están presentes en los sedimentos. La técnica de tamizado empleada para separar esta fracción, no altera las concentraciones de metales de la muestra además, es rápida y sencilla. Son numerosos los estudios de metales pesados en sedimentos realizados en la fracción $< 63 \mu\text{m}$, lo que permite una mejor comparación de los resultados obtenidos.

2.1.10 Índices de metales pesados

Para calcular o identificar el estado de los contaminantes metálicos en un espacio, se tienen en cuenta los índices de contaminación, entre ellos se relacionan los siguientes:

2.1.10.1 Índice de geoacumulación (Igeo)

El índice de Geoacumulación (IGEO) tiene el objetivo de establecer la medida en que los metales se extienden en sedimentos o suelos, relacionando las concentraciones actuales con las de referencia. Los niveles se extienden de prácticamente sin contaminación, hasta extremadamente contaminado. (Müller, G. 1969)

Se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right]$$

Donde:

- **Igeo**: Índice de Geoacumulación.
- **C_n**: Concentración del elemento n en el sedimento, en mg/kg.
- **B_n**: Concentración geoquímica del metal (encontrado en la corteza terrestre) o valor referencia preindustrial del elemento en mg/kg. Los valores se encuentran en la tabla 5

▪ **1.5:** Esta constante nos permite analizar las fluctuaciones naturales en el contenido de una sustancia dada en el ambiente y las influencias antropogénicas muy pequeñas.

Müller (1981) ha distinguido seis clases del Índice de Geoacumulación (I_{geo}) que se indican en la siguiente tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del índice de geoacumulación

Rango de Contaminación	Índice de Geoacumulación	Referencia De Color
$I_{geo} \leq 0$	Prácticamente sin contaminar	
$0 < I_{geo} \leq 1$	No contaminado a moderadamente contaminado	
$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente contaminado	
$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderada a fuertemente contaminado	
$3 < I_{geo} \leq 4$	Muy contaminado	
$4 < I_{geo} \leq 5$	Muy contaminado a extremadamente contaminado	
$I_{geo} > 5$	Extremadamente contaminado	

Fuente: Adaptado de Müller, 1981.

2.1.10.2 Factor de contaminación

El Factor de Contaminación como su nombre lo indica, busca encontrar los niveles de contaminación de un metal pesado, este índice relaciona los niveles de un elemento con los niveles de referencia del mismo, su escala va desde factor de contaminación bajo hasta factor de contaminación muy alto. (Franco, 2017)

Según Hakanson (1979), para describir la contaminación de sustancias tóxicas en un lago o una cuenca, podemos definir un Factor de Contaminación (Cf), en consecuencia tenemos:

$$Cf = \frac{Cn}{Bn}$$

Donde:

- **Cf:** Factor de Contaminación.
- **C_n:** Concentración del elemento n en el sedimento, en mg/kg.
- **B_n:** Concentración geoquímica del metal (encontrado en la corteza terrestre) o valor referencia preindustrial del elemento en mg/kg. Los valores se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5. Metales en rocas sedimentarias y valores de referencia preindustrial

Elemento	Concentración geoquímica del metal (encontrado en la corteza terrestre) (mg.kg-1)	Valor Referencial Preindustrial (mg.kg-1)
Hg	0.03	0.25
Pb	7 – 20	70

Fuente: Modificado Hakanson, 1979.

El Factor de Contaminación (Cf) explica la contaminación de elementos individuales. Si $C_n \geq B_n$ podemos definir la sustancia como un contaminante enriquecido. Si $C_n < B_n$ entonces el elemento no debe caracterizarse como contaminante. La siguiente terminología puede usarse en este enfoque de índice de riesgo para obtener una forma uniforme de describir el Factor de Contaminación como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del factor de contaminación

Rango de Contaminación	Factor de Contaminación	Referencia de Color
$C_f < 1$	Bajo	
$1 \leq C_f < 3$	Moderado	
$3 \leq C_f < 6$	Alto	
$C_f \geq 6$	Muy alto	

Fuente: Modificado de Hakanson, 1979.

2.1.10.3 Grado de contaminación

También se debe definir el Grado de Contaminación (C_d), es decir, la suma de todos

Factores de Contaminación (C_f) para un lago determinado:

$$C_d = \sum_{n=1}^7 C_f = \sum_{n=1}^7 \frac{C_n}{B_n}$$

Con este enfoque, se tiene un Factor de Contaminación (C_f), que representa la contaminación de elementos individuales de acuerdo con el nivel de concentración, y un valor de C_d , que constituye el total de la contaminación de sedimentos dentro de una cuenca o lago.

Se puede utilizar la siguiente terminología como muestra en la tabla 7 para describir el Grado de Contaminación (C_d):

Tabla 7. Clasificación del grado de contaminación

Rango de Contaminación	Factor de Contaminación	Referencia de Color
$C_f < 8$	Bajo	
$8 \leq C_f < 16$	Moderado	
$16 \leq C_f < 32$	Alto	
$C_f \geq 32$	Muy alto	

Fuente: Modificado de Hakanson, 1979.

2.2 Marco referencial

2.2.1 Antecedentes globales

A nivel global, numerosos estudios han documentado el impacto de las actividades agrícolas, industriales y urbanas en la calidad de las aguas y sedimentos fluviales. Por ejemplo, investigaciones en ríos de Europa y América han reportado concentraciones elevadas de metales pesados como Pb, Cu, Cd y Hg, superando en varios casos los niveles de fondo natural y los criterios de calidad internacionales (Galán & Romero, 2008; CCME, 2001).

Está bien documentado que las actividades industriales, especialmente aquellas no reguladas, son una fuente crítica de metales pesados en las Cuencas hidrográficas. Un claro ejemplo es la investigación de Rosas, H. (2001) en el Río Anoia (España), una cuenca que abastece de agua a Barcelona y recibe efluentes de un importante polo de industrias textiles y de curtido de pieles. Este estudio, metodológicamente robusto, analizó nueve metales pesados en la fracción fina de sedimentos ($<63\ \mu\text{m}$) y encontró enriquecimientos antropogénicos extremos, con incrementos de hasta 34 veces en Cr y 31 veces en Hg en el punto posterior a los vertidos industriales, superando los límites regulatorios. El análisis de componentes principales y de correlación permitió identificar claramente el origen industrial de la contaminación y su fuerte asociación con la materia orgánica.

Asimismo, El-Amier et al. (2016) realizaron una evaluación y mapeo de la distribución espacial de metales pesados en los sedimentos del lago Burullus (Egipto). Utilizando índices de contaminación como el Grado de Contaminación (Cd), factor de contaminación (CF) e índice de geoacumulación (Igeo), identificaron que el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) eran los principales contaminantes, con enriquecimientos significativos atribuidos a fuentes antropogénicas como descargas agrícolas e industriales. Este estudio demuestra la utilidad de los sistemas de información geográfica (SIG) y los índices de contaminación para la gestión ambiental de los cursos de agua y sedimentos.

Estos casos son análogos a la situación es el estudio de Venegas (2016) en el río Babahoyo (Ecuador), que evaluó la presencia de metales pesados en aguas y sedimentos. Este trabajo identificó que, aunque la mayoría de los parámetros físico-químicos en agua se mantenían dentro de los límites permisibles, el cadmio (Cd) superó los niveles permitidos en varios puntos. Además, en sedimentos, el cobre (Cu) excedía sistemáticamente los criterios nacionales e internacionales, con concentraciones superiores a 28 ppm en todos los puntos muestreados. Donde la actividad agrícola intensiva y las descargas domésticas e industriales han contribuido a la acumulación de metales en los sedimentos.

Un antecedente de gran relevancia para esta investigación, es el trabajo de Jumbo, D., (2015) titulado: "Metales pesados en sedimentos riverinos de cuencas hidrográficas impactadas por minería en la Región Sur del Ecuador". Esta tesis evaluó el enriquecimiento de metales pesados (Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Co, Ni, Pb y Hg) en los sedimentos de las cuencas de los ríos Puyango y Zamora, fuertemente impactadas por los distritos mineros de Portovelo-Zaruma y Chinapintza. Los resultados fueron contundentes: se identificaron puntos de alta contaminación, especialmente en los sectores localizados aguas abajo de las plantas de beneficio minero. En la cuenca del Puyango, el sector AMA 3 registró los FEN más altos, con valores de hasta 182 mg/kg para el Cu, 173 mg/kg para el Pb, 117 mg/kg para el Zn y 120 mg/kg para el Hg, indicando un enriquecimiento "muy severo" según criterios internacionales. De manera similar, en la cuenca del Zamora, los efluentes mineros del sector Chinapintza (CHI) mostraron FEN extremadamente elevados, como 1041 para el Pb y 707 para el Hg.

Por su parte, el estudio de Herrera et al. (2012) en el Río Pirro (Costa Rica) evidencia un escenario de contaminación mixta, con concentraciones elevadas de metales como Hg (194–307 mg/kg), Ni, Cr, Pb, Cu y Zn en sedimentos superficiales. Aunque la zona presenta suelos volcánicos ricos en metales, el estudio atribuye parte de la contaminación a fuentes antropogénicas como aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola y residuos sólidos. Un hallazgo relevante fue la predominancia de la fracción arenosa en los sedimentos, lo que contrasta con la tendencia general de acumulación de metales en fracciones finas, y subraya la importancia de considerar la textura y la composición litológica local en los estudios de sedimentos.

Finalmente, en un contexto latinoamericano similar, la investigación de Macías, P. (2015) en la zona estuarina del Río Tuxpan (Veracruz, México) constituye un referente metodológico y temático directo. Este estudio determinó las concentraciones de Pb, Cr y Cd en agua y sedimentos, relacionándolas con parámetros fisicoquímicos. Reportó concentraciones en sedimentos que superaron los límites

máximos permisibles (Pb: hasta 40.70 mg/kg; Cr: hasta 15.20 mg/kg; Cd: hasta 14.00 mg/kg), asociándose a las actividades industriales y portuarias de la zona.

2.2.2 Antecedentes regionales

Los primeros análisis de metales en sedimentos en la Bahía de Asunción, realizados por Facetti *et al.* (1998), revelaron concentraciones elevadas de metales pesados, particularmente Plomo (Pb) y Mercurio (Hg), asociadas a descargas urbanas e industriales. Se identificaron valores de Pb de hasta 95.3 mg/kg y Hg de 0.284 mg/kg en sedimentos cerca del barrio Ricardo Brugada, superando los niveles naturales reportados para ríos no contaminados. Estos indican que el plomo proviene de combustibles vehiculares y efluentes industriales no tratados.

Un estudio posterior, evidenció un incremento temporal en las concentraciones de Cromo (Cr), Cobre (Cu) y Plomo (Pb), vinculado al crecimiento urbano y la falta de regulación en el tratamiento de residuos (Facetti, J., 2002). Por ejemplo, el Pb alcanzó 110 mg/kg, superando el límite de 35 mg/kg establecido por la norma canadiense (*TEL*). Estos trabajos subrayan la necesidad de monitorear metales tóxicos en zonas con alta actividad antropogénica.

Britez Ruiz Díaz (2019) determinó Cromo (Cr) y Plomo (Pb) en sedimentos del Arroyo Yukyry-mí (Itauguá), hallando Plomo (Pb) hasta 123.6 mg/kg en Guayaibity, superando los estándares de la *NOAA-SQuiRTs* (17 mg/kg) y la guía canadiense *PEL* (91.3 mg/kg). Estos efectos están relacionados con el incremento poblacional e industrial alrededor del arroyo.

Velázquez Olivetti (2020) realizó un estudio integral en la Laguna Cateura (Asunción), evaluando parámetros fisicoquímicos en agua y sedimentos. Reportó concentraciones de Cr en sedimentos de hasta 40.45 mg/kg y Pb de 60.50 mg/kg, excediendo los límites de la norma *NOAA-SQuiRTs* (Cr: 7-13 mg/kg; Pb: 4 mg/kg) y las guías canadienses *CCME-SQGPA (PEL)*: Cr 90 mg/kg; Pb 91.3 mg/kg). Además, identificó niveles críticos de fósforo (1.00 mg/L) y mercurio (0.00393 mg/L) en agua,

vinculando la contaminación a vertidos del Relleno Sanitario Cateura y actividades informales circundantes. Su trabajo destacó la importancia de analizar sedimentos como indicadores de degradación ambiental y la percepción crítica de la población local sobre los impactos en su calidad de vida.

Salinas *et al.*, (2021) analizaron sedimentos en tres tramos del Arroyo San Lorenzo, detectando Hg (0.092 mg/kg) y Pb (16 mg/kg) en la zona de La Pradera, valores que sobrepasaron los niveles de referencia de la NOAA-SQuiRTs (Hg: 0.004 mg/kg; Pb: 4 mg/kg). El estudio asoció estas concentraciones a diversas actividades antrópicas (viviendas, comercios, industrias, entre otras), resaltando la correlación entre parámetros fisicoquímicos (pH, materia orgánica) y la acumulación de metales en sedimentos finos.

2.3 Marco legal

2.3.1 Normas de regulación de metales en sedimentos

En nuestro país no existe una legislación que regule la concentración de metales pesados en sedimentos. Se consideran como Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG, por sus siglas en inglés, *Canadian Environmental Quality Guidelines*), que establecen parámetros de metales pesados en sedimentos de cuerpos de agua continentales, ésta no incluyen metales como Cr Total, Ni, Ag, estableciendo dos criterios la Guía Provisional de Calidad del Sedimento en primer lugar se encuentra el Nivel de Efecto Umbral (TEL, por sus siglas en inglés *Threshold EffectLevel*) que es el valor más bajo, que representa la concentración por debajo de la cual no se espera que ocurran efectos biológicos adversos, y por otro lado se encuentra el Nivel de Efecto Probable (PEL, siglas en inglés, *Probable EffectLevel*), que define la concentración o el nivel sobre la cual aparecen con frecuencia efectos biológicos adversos. Calculando PEL y TEL de acuerdo a una fórmula estándar, se definen consistentemente en tres rangos de concentraciones químicas: 1) El rango mínimo de efectos dentro del cual los efectos adversos raramente ocurren (es decir, menos del 25% de los efectos adversos ocurren por debajo del TEL), 2) el posible rango de efectos dentro del cual el efecto ocasionalmente ocurre, (es decir, el rango entre TEL

y el *PEL*), y 3) el rango de efectos probables dentro del cual ocurren frecuentemente los efectos biológicos adversos (es decir, más del 50% de los efectos adversos ocurren por encima del *PEL*) y por último está la norma de metales en sedimentos de fondo (*background levels*) establecidos en la tabla de referencia (*Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment*) emitida por la Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés, *National Oceanic and Atmospheric Administration*), ambos valores de referencias para Hg y Pb están representados en la tabla 8 (CCME, 2001; NOAA, 1999).

Tabla 8. Valores de referencia internacionales de concentraciones de metales pesados en sedimentos

Elemento	CCME-SQGPA mg/kg		NOAA mg/kg
	ISQG	PEL	
Mercurio	0,17	0,486	0,004-0,051
Plomo	35	91,3	4

Fuente: Modificado de CCME, 2001; NOAA, 1999

2.4 Aspecto geológicos

2.4.1 Geología local

2.4.1.1 Grupo Asunción

La configuración estructural iniciada con la formación del Rift de Asunción en el Cretácico Superior, con dirección preferencial NW-SE, continuado con intrusiones y efusiones ígneas de la Suite Sapucái y posterior relleno sedimentario continental de los bloques circundantes (de edades Ordovícico- Silúrico, principalmente), es el principal responsable de la geomorfología actual en la zona Centro-Este del país (Proyecto PAR 83/005, 1986).

González & Bartel, (1998), mencionan que el relleno de la fosa se caracteriza por constituirse de un material de muy variada textura, debido a la rápida subsidencia de la estructura, al reducido espacio creado para la depositación de los sedimentos y a la corta distancia de transporte, todos estos factores han sido condicionados por una paleomorfología abrupta.

Los rellenos sedimentarios corresponden a la Formación Patiño constituida principalmente por conglomerados (Cerro Patiño) a fanglomerados (Cerro Perõ) polimícticos en su parte basal y gradualmente pasa a areniscas medias mal seleccionadas a bien seleccionadas (Cerro Yaguaron & Itapytapunta) en estratos superiores que en su conjunto denominados Grupo Asunción (Gómez, D., 1991).

2.4.1.2 Suite Magmática Ñemby

La Suite Magmática Ñemby está constituida rocas ígneas de tipo nefelinita que se presenta como *plug* volcánico, con diámetros raramente superiores al km con estructuras columnares asociadas a la provincia Alcalina de Asunción (Bitschene, 1987; Bitschene & Báez Presser, 1989; Comin-Chiaramonti et al, 1991). Dataciones realizadas en rocas de los Cerros de Ñemby y Lambaré, dieron edades en un rango comprendido entre los 60 a 38 Ma. (Velázquez, et al. 1992).

2.4.1.3 Sedimentos Cuaternarios

La gran sedimentación cuaternaria se relaciona con el río Paraguay, siendo en el área de la ciudad de Asunción que sus depósitos se denominan Formación San Antonio. Estos depósitos incluyen sedimentos finos aluviales. (Fulfaro, 1996).

Estos sedimentos corresponden a la planicie de inundación del Río Paraguay, los innumerables arroyos que bañan la zona y las cuencas de los lagos Ypacaraí e Ypoa, y se caracterizan por ser el producto de la alteración y redepositación de las rocas circundantes y como material de colmatación de las redes de drenajes actuales, los primeros son principalmente arcillosos y con alto contenido en materia orgánica y lo segundo son más bien arenosos, por arrastre de los materiales productos de la erosión de las áreas elevadas (Proyecto PAR 83/005, 1986; González & Bartel, 1998).

Según Palmieri & Velazquez (1982) el Cuaternario está formado por sedimentos aluviales de tonalidades grisáceas a blanquecinas de grano muy fino. Asimismo, los grandes depósitos arcillosos, arenosos y gravas constituyen sedimentos modernos del Cuaternario.

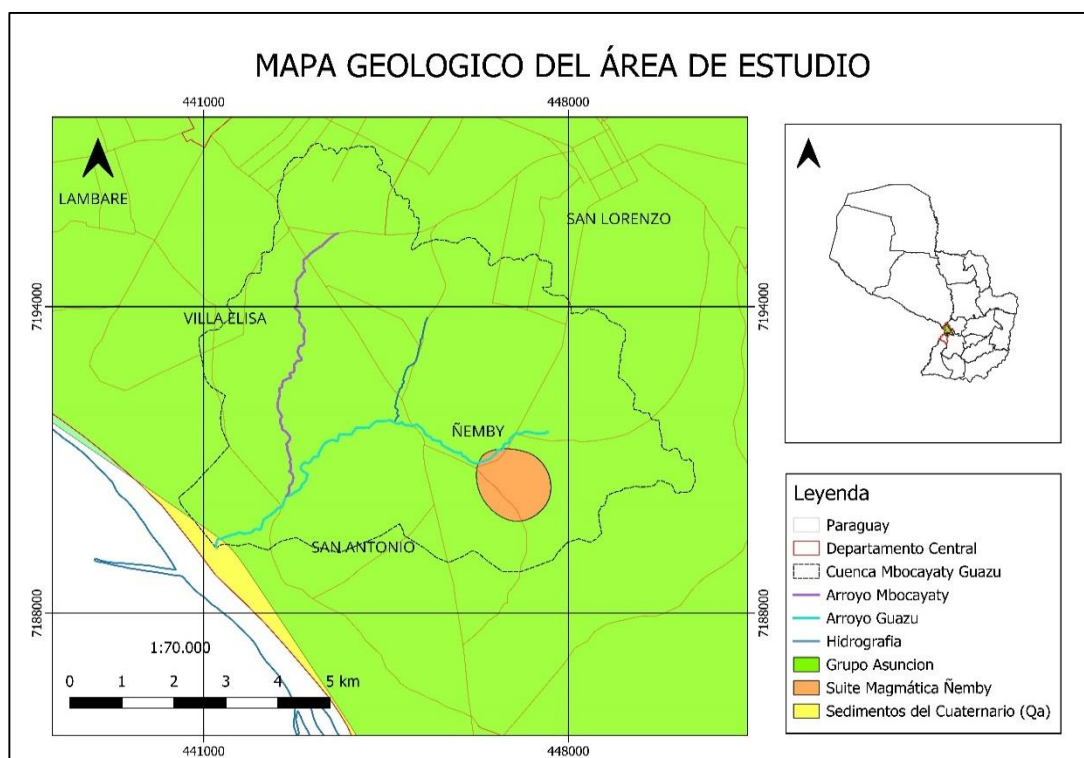


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio.

Fuente: Modificado de TAC, 1983

2.5 Clima

2.5.1 Departamento Central

El Departamento Central presenta un clima subtropical húmedo, caracterizado por un ambiente cálido y templado. Según *Climate-Data.org* (2025) la región recibe una precipitación anual de 1.629 mm como indica la figura 3 y la figura 2 registra una temperatura media anual de 23,0°C. Estos valores presentan coherencia con los patrones climáticos registrados por la Dirección de Meteorología e Hidrología (2018), que reporta para la región del Departamento Central 1.376 mm de precipitación anual y una temperatura media de 24,1°C.

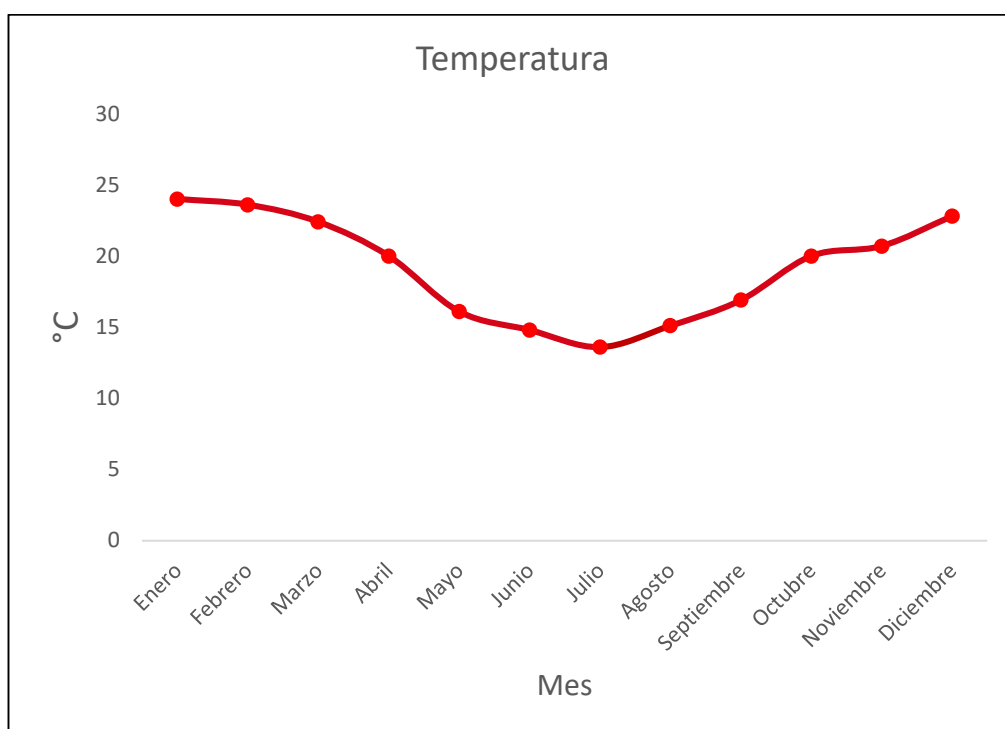


Figura 2. Datos meteorológicos promedios mensuales del departamento central: temperatura

Fuente: Adaptado CLIMATE - DATA.ORG, 2025.

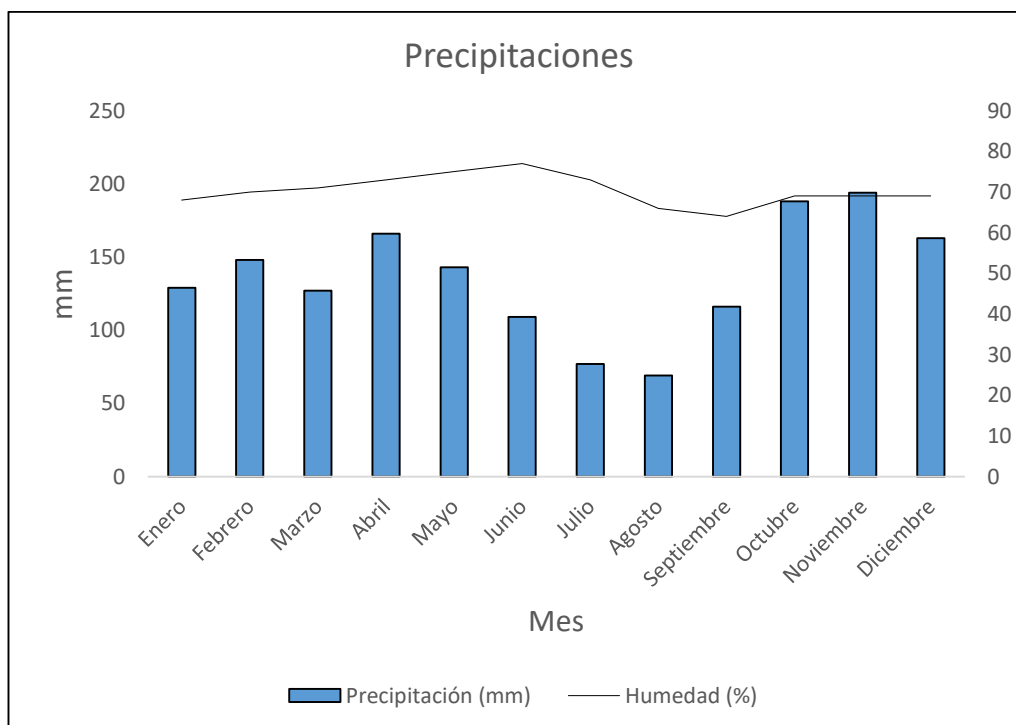


Figura 3. Datos meteorológicos promedios mensuales del departamento central: precipitación (barras) y humedad relativa (línea).

Fuente: Adaptado CLIMATE - DATA.ORG, 2025.

2.5.1.1 San Lorenzo

Según *Climate-Data.org* (2025) la ciudad presenta un clima subtropical húmedo, correspondiente a la clasificación Köppen. La temperatura media anual se mantiene entre 25 y 30 °C, siendo enero el mes más caluroso y julio el más frío. Las lluvias se reparten a lo largo del año, con mayor intensidad en primavera y verano, y un leve descenso en junio y julio. Registros climáticos señalan una temperatura media anual de 22,9 °C y un acumulado de precipitaciones en torno a 1.649 mm.

2.5.1.2 Villa Elisa

Según *Climate-Data.org* (2025) el clima de Villa Elisa se caracteriza por su condición mayormente tropical. Durante el verano las temperaturas pueden superar los 39 °C, con sensaciones térmicas que alcanzan los 48 °C, mientras que en invierno registran valores cercanos a 1 °C. La temperatura media ronda los 23 °C. Las precipitaciones se distribuyen de forma irregular: los meses más lluviosos, especialmente noviembre, superan los 159 mm de lluvia, mientras que agosto suele ser el mes más seco con alrededor de 45 mm.

2.5.1.3 San Antonio

Según *Climate-Data.org* (2025) las temperaturas oscilan entre 28 y 39 °C, mientras que en invierno se observan variaciones más extremas, desde los -6 °C hasta los 10 °C. El régimen de lluvias sigue un patrón semejante al del área metropolitana, con noviembre como el mes de mayores registros, en torno a 160 mm, y agosto como el de menor pluviometría, con aproximadamente 46 mm.

2.5.1.4 Ñemby

Según *Climate-Data.org* (2025) el clima de Ñemby también corresponde al tipo subtropical húmedo. La temperatura media anual oscila entre 25 y 30 °C. Al igual que en otras ciudades del Departamento Central, las lluvias se distribuyen durante casi todo el año, con picos más elevados en primavera y verano. Los promedios indican que noviembre concentra alrededor de 160 mm, en tanto que agosto constituye el mes más seco, con valores cercanos a 46 mm.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño metodológico

La investigación tiene un enfoque mixto. Según Sampieri *et al.* (2014) este enfoque permite integrar procedimientos y técnicas propias de los enfoques cuantitativo y cualitativo. Por un lado, el componente cuantitativo se basa en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de la determinación de concentraciones de metales pesados (Hg y Pb) y parámetros granulométricos en las muestras de sedimentos.

Por otro lado, el enfoque cualitativo se refleja en la identificación e interpretación de posibles amenazas ambientales, la clasificación según los índices de contaminación y la interpretación de patrones espaciales observados en la distribución de los metales dentro de la cuenca. Este abordaje permite comprender la dinámica ambiental desde una perspectiva más completa, considerando no solo los valores numéricos, sino también el contexto geológico y antrópico que influye en el comportamiento de los contaminantes (Sarango *et al.*, 2025).

3.2 Nivel de la investigación

El estudio corresponde a un nivel Transeccional o transversal, dado que los datos se recolectaron en un período específico (2025), sin seguimiento temporal.

3.3 Tipo de estudio

El trabajo se clasifica como correlacional, ya que incorpora un análisis estadístico orientado a identificar asociaciones entre las variables estudiadas. En este caso se buscó asociar las actividades antropogénicas y las concentraciones de Hg y Pb en sedimentos.

3.4 Lugar de estudio

El área de estudio representa los cauces hídricos principales de la Cuenca Hidrográfica de Mbocayaty Guazu que tiene una superficie de 44,9 km², y abarca partes de los distritos de Ñemby, San Lorenzo, San Antonio, Villa Elisa, Fernando de la Mora y Capiatá.

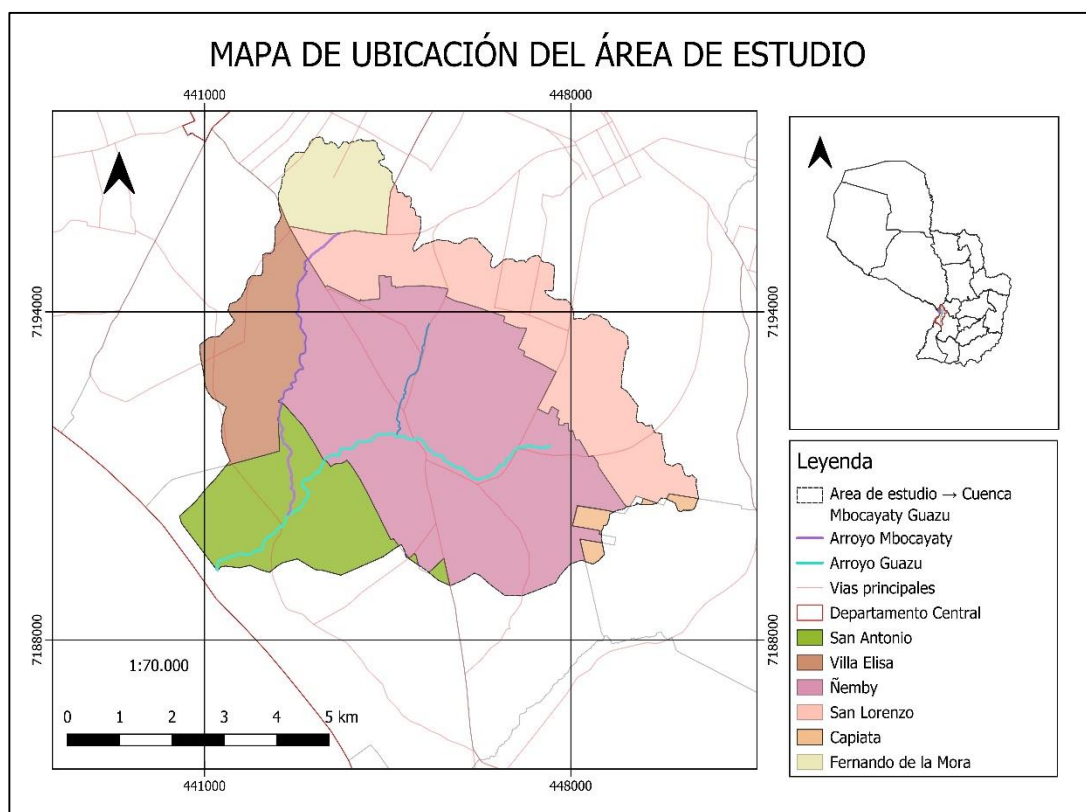


Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INE, 2012.

3.5 Población

La población de estudio está constituida por los sedimentos de los 11 puntos muestreados en los cauces hídricos de la cuenca Mbocayaty Guazú, según indica la tabla 9

3.6 Muestra

Para la muestra se tomaron 11 puntos a lo largo de toda la cuenca Mbocayaty Guazú (tabla 9).

Tabla 9. Datos de los puntos muestreados

Código	Coordenadas UTM 21 J		Cota (metros).	Fecha de Muestreo
	X	Y		
P1	442912.09	7194927.95	113	26/09/2025
P2	444783.67	7192405.59	99	26/09/2025
P3	446962.68	7191497.44	114	27/09/2025
P4	442889.30	7193612.49	89	26/09/2025
P5	446189.26	7190939.56	84	26/09/2025
P6	442569.52	7192564.31	95	27/09/2025
P7	444496.73	7191753.70	74	26/09/2025
P8	442581.99	7191529.05	57	26/09/2025
P9	443289.38	7191283.11	105	27/09/2025
P10	442467.56	7190060.93	125	26/09/2025
P11	441385.00	7189482.00	105	27/09/2025

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Métodos y técnicas a utilizar

3.7.1 Trabajos de gabinete

La cuenca hidrográfica del área de estudio se delimitó mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde se utilizó un Modelo digital de Elevación (*DEM*) extraído de *USGS*. Este archivo ráster fue procesado en el programa *QGIS*, y mediante diversas herramientas disponibles en el *software* fue posible trazar los límites naturales de la cuenca hidrográfica generando así una capa.

Los datos obtenidos del análisis de metales pesados en sedimentos (Hg y Pb) y granulometría de sedimentos fueron organizados y procesados mediante el programa Excel. A partir de ellos, se elaboraron gráficos de distribución y tablas comparativas considerando los puntos de muestreo.

Se realizaron mediante el programa R estudio versión 4.5.2 pruebas de normalidad (*Shapiro-Wilk*) para todas las variables de estudio. Dado el resultado de no normalidad en los datos, se utilizó un análisis no paramétrico, aplicando la estimación de intervalo de confianza IC para la concentración media del metal (Hg y Pb) al 95%, estas se obtuvieron mediante el método *bootstrap BCa* (*Bias-Corrected and Accelerated*), implementado en el paquete *boot* del software R, con 5.000 remuestreos con reemplazo. Este procedimiento permite estimaciones robustas sin asumir una

forma paramétrica específica, corrige el sesgo y la asimetría presentes en las distribuciones originales. Para realizar asociaciones entre variables, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman, adecuado para datos no paramétricos. Este análisis permitió identificar asociaciones entre las concentraciones de metales y la granulometría.

Además, se determinó la distribución espacial e índices de contaminación (Igeo, CF y Cd) de los elementos (Hg y Pb) a partir del modelo de Distancia Inversa Ponderada (*IDW*), en el programa *QGIS* versión 30.40.4. Este método de interpolación asignó mayores pesos a los puntos más cercanos, generando superficies continuas de concentración que permitieron visualizar la distribución espacial de los metales en toda la cuenca.

Posteriormente estos resultados se contrastaron con normativas de regulación de metales pesados internacionales en base a la *NOAA-SQuiRTs* y *CEQG*.

Para identificar las amenazas ambientales, se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) basado en el análisis multicriterio integrado con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Mediante la escala de Saaty (2008) que permite convertir juicios cualitativos en valores numéricos mediante una escala del 1 al 9. La escala establece que:

- El valor 1 indica que ambos criterios son igualmente importantes
- El valor 3 representa importancia moderada de un criterio sobre otro
- El valor 5 significa importancia fuerte
- El valor 7 indica importancia muy fuerte
- El valor 9 refleja importancia extrema

Los valores 2, 4, 6, 8 corresponden a valores intermedios entre estas categorías. La escala es recíproca, un ejemplo si el criterio A es 3 veces más importante

que B, entonces B es $1/3$ respecto a A, realizando de esa manera comparaciones pareadas entre tres criterios clave: concentración de mercurio, concentración de plomo y distancias. Así también como sus pesos promedios.

Se interpolaron las concentraciones de metales mediante IDW y se calculó la proximidad a las 20 posibles fuentes de contaminación. Las tres capas raster (Hg, Pb y Distancia a la fuente de contaminación) fueron normalizadas a una escala de 0 a 1, donde 1 representa la máxima amenaza, estas se combinaron mediante calculadora de raster, generando un mapa de amenaza lineal que fue clasificado en tres categorías: alta, moderada y baja.

3.7.2 Lugares de muestreo y técnicas de campo

Se realizaron muestreos de sedimento de fondo del lecho del Arroyo Guazú y Arroyo Mbocayaty, con 11 puntos georreferenciados distribuidos a lo largo de la Cuenca Mbocayaty Guazu, en dos campañas en los días 26 y 27 del mes de septiembre del 2025, teniendo en cuenta sus tributarios o cauces menores que acarrean sedimentos y priorizando sectores con actividad antropogénica. Según la metodología utilizada por Mora *et al.* (2016), se colectaron las muestras de sedimentos en la zona anterior y posterior de las industrias asociadas a potenciales fuentes de contaminación.

Las muestras de sedimentos se recolectaron con muestreador tipo draga Van Veen, utilizadas para obtener muestras del lecho de fondo de la Cuenca Hídrica Mbocayaty Guazú. El operativo de este instrumento se realizó colocando las mandíbulas abiertas, trabándolas por medio de un gancho, bajándolas lentamente en el agua, y tan pronto como toca el fondo, el gancho se suelta y las mandíbulas se cierran, quedando dentro la muestra. El tipo de muestreo realizado fue simple de frecuencia única y de forma integrada, según la metodología del IDEAM (2009) replicado por Salinas *et al.* (2021). Este método consiste en tomar muestras de sedimentos de manera simultáneamente en diferentes puntos, o lo más cercanas posible y mezclarlas para obtener concentración media representativa. La cantidad de muestra que se pudo recoger dependió de la compactación del sedimento, se realizaron varias extracciones

con una profundidad variable entre los 10 a 15 cm asociada al espesor de los sedimentos del lecho del cauce y se tomaron 2 muestras de 2 a 3 kg aproximadamente por cada punto de muestreo.

Los sedimentos se colocaron en una bolsa de plástico con sellado hermético, se procedió al etiquetado (número de punto, numero muestra, hora y fecha), se anotó la ubicación, se tomaron las coordenadas y también la cota. Posteriormente fueron transportados en una conservadora portátil al Laboratorio de Agua de la FACEN-UNA.

3.7.3 Trabajos de laboratorio

3.7.3.1 Análisis de metales en sedimentos

En la determinación del Hg se utilizó el método Espectrométrico de Absorción por vapor frío (SM 3500-Hg B, APHA 1992) ya que el mercurio tiene una presión de vapor baja a temperatura ambiente, es el único metal pesado que se determina por este método, en donde el instrumental utilizado consiste en: espectrómetro, célula de absorción, soporte de la célula, bombas de aire, flujometro, tubos de aireación, matraz de reacción, tubo secador y tubos de conexión. Los reactivos utilizados son agua libre de metales, solución de mercurio de reserva, solución patrón de mercurio, Ácido nítrico concentrado, solución de Permanganato de Potasio, solución de Cloruro de Sodio-Sulfato de Hidroxilamina, solución de Cloruro Estañoso y Ácido Sulfúrico concentrado. El procedimiento consiste en eliminar la materia orgánica por oxidación con el permanganato de potasio en medio ácido, esto generó mercurio iónico Hg^{+2} , posteriormente se redujo a mercurio elemental por la acción del borohidruro de sodio en medio ácido, y luego fue llevado por el argón, un gas inerte en una celda sellada en la que el mercurio elemental y los vapores que emiten dan una absorbancia con relación a la cantidad de elemento, luego la cuantificación se realiza en una curva calibrada construida con patrones en una longitud de onda de 253,7 nm.

Para la determinación del Pb en sedimento primeramente se realizó el Tratamiento Preliminar de Muestra y posteriormente por el método Espectrométrico

de Absorción Atómica a llama (SM 3030, SM 3500 Pb B, APHA, 1992), procedimiento consiste en instalar una lámpara de cátodo hueco, estableciendo el dial de longitud de onda, se instala una cabeza del quemador, se conecta el aire y se ajusta su flujo, y se enciende la llama, se hace aspirar la solución ácida con misma concentración de los patrones antes de la disolución con solución de calcio, se ajusta el instrumento a cero, se anota la absorbancia de este patrón, una vez que se realiza esto en el equipo y con la calibración correspondiente está listo para ser utilizado para el análisis, se enjuaga el nebulizador aspirando agua con 1,5 ml de ácido nítrico, se atomiza la muestra. El instrumental utilizado fue el Espectrofotómetro de absorción atómica con llama, con quemador, lámpara de cátodo hueco y equipos para filtración entre otras. Los reactivos utilizados fueron aire purificado, Acetileno, agua libre de metales, solución de calcio, ácido clorhídrico, solución de lantano, peróxido de hidrogeno, ácido nítrico, agua regia y solución patrón de Pb.

3.7.3.2 Análisis granulométricos

El método consiste en separar las partículas del tamaño de arena, limo y arcilla de una muestra. Esta técnica comienza secando la muestra a la intemperie o en un estufa a 45 C°, luego la muestra es homogeneizada y cuarteada con el fin de obtener de 50 a 200 gramos. El procedimiento consiste en eliminar la materia orgánica por oxidación con el permanganato de potasio, se calienta a 100 C° 1 a 2 horas, luego se deja enfriar y se agrega dioxilamina. Se pesa 50 gramos y se lleva a volumen con probeta de 1000ml con 100ml de agua destilada. Con una varilla de vidrio se lleva a agitar de 10 a 20 minutos y se deja reposar durante 24 horas.

Luego se aplica el método de pipeta, este se basa en la ley de Stokes que establece que las partículas se sedimentan a velocidades diferentes según su tamaño. El procedimiento consiste en tomar alícuotas a profundidades y tiempos específicos, que corresponden a diferentes tamaños de partículas. Las alícuotas se colocan en vasos de precipitado, se secan en un horno a 105 °C, luego se enfrían en un desecador y se pesan para calcular el porcentaje de limo y arcilla, y la fracción de arena se determina por diferencia con la muestra original.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Concentraciones de Hg y Pb en sedimentos

4.1.1.1 Localización de los puntos de muestreo

En la Figura 5 se observa la ubicación de los puntos de muestreo distribuidos en la cuenca hidrográfica Mbocayaty Guazú. Los puntos P1, P4, P6, P8, P10 y se localizan sobre el cauce del Arroyo Mbocayaty, y los puntos P2, P3, P5, P7, P9, P11 sobre el Arroyo Guazú, totalizando 11 puntos de muestreo.

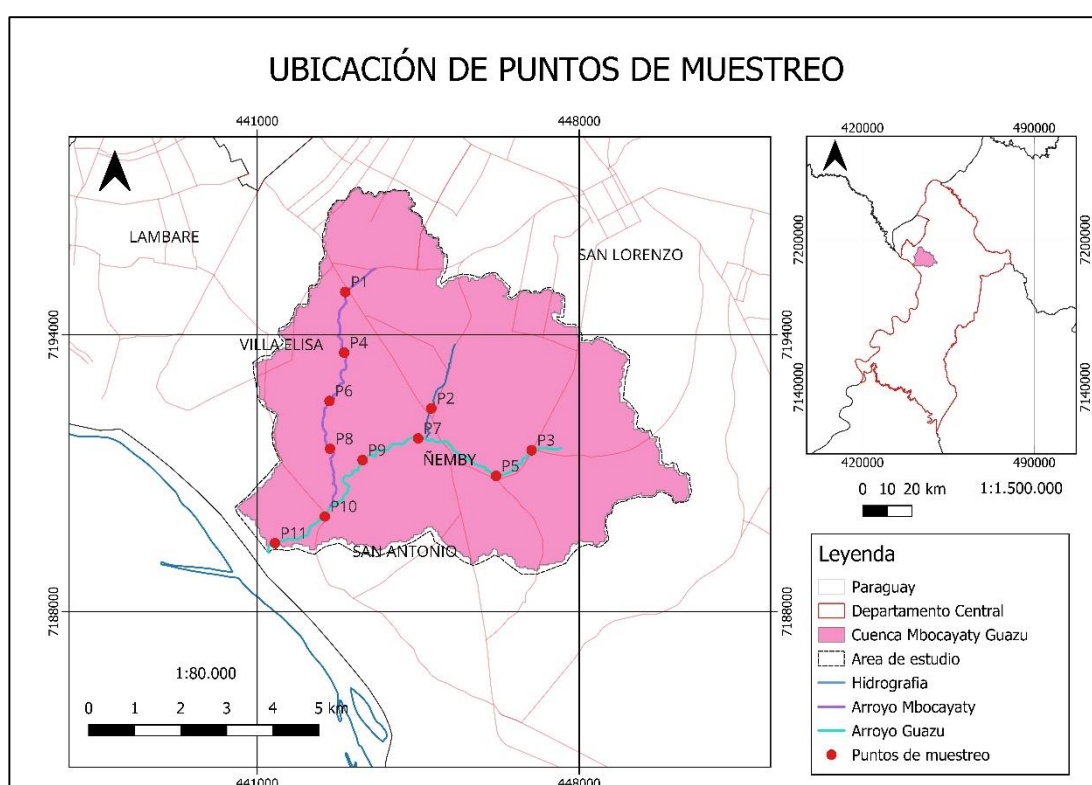


Figura 5. Mapa de ubicación de puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10, se presentan los 11 puntos de muestreo considerados en el estudio con sus respectivas coordenadas UTM X e Y, que permiten su localización geográfica. Los puntos P1, P4 y P6 se ubican en el distrito de Villa Elisa; P2, P3, P5 y P7 en el distrito de Ñemby; y P8, P9, P10, P11 en el distrito de San Antonio.

Tabla 10. Puntos de muestreo de sedimentos de fondo en el área de estudio

Código	Distrito	Departamento	Coordenadas	
			UTM 21 J	
			X	Y
P1	Villa Elisa	Central	442912.09	7194927.95
P2	Ñemby	Central	444783.67	7192405.59
P3	Ñemby	Central	446962.68	7191497.44
P4	Villa Elisa	Central	442889.30	7193612.49
P5	Ñemby	Central	446189.26	7190939.56
P6	Villa Elisa	Central	442569.52	7192564.31
P7	Ñemby	Central	444496.73	7191753.70
P8	San Antonio	Central	442581.99	7191529.05
P9	San Antonio	Central	443289.38	7191283.11
P10	San Antonio	Central	442467.56	7190060.93
P11	San Antonio	Central	441385.00	7189482.00

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.2 Concentración de metales pesados en sedimentos

En la tabla 11 se presentan los valores de concentración de Hg y Pb en mg/kg en los sedimentos de cada punto de muestreo. Se observa una variabilidad en la concentración de ambos metales en los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, como se puede observar en las figuras 6 y 7.

Tabla 11. Concentraciones de Hg y Pb en sedimentos de fondo de la Cuenca Mbocayaty Guazú, 2025.

Código	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)
P1	0,001	19,20
P2	0,001	5,30
P3	0,072	5,00
P4	0,018	6,70
P5	0,006	19,20
P6	0,005	1,0
P7	0,001	4,20
P8	0,001	3,30
P9	0,003	1,0
P10	0,001	1,50
P11	0,034	1,0

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Distribución espacial de metales

4.1.2.1 Mercurio (Hg)

En la figura 6 se pueden visualizar las distribuciones espaciales de Hg. Las mayores concentraciones se localizan en el sector noreste de la cuenca (P3: 0,072 mg/kg) y en el extremo suroeste (P11: 0,034 mg/kg). Los valores disminuyen gradualmente, en el norte (P1, P2, P7) y el suroeste (P8, P10) de la cuenca, registrándose las concentraciones mínimas en los puntos P1, P2, P7, P8 y P10 (0,001 mg/kg).

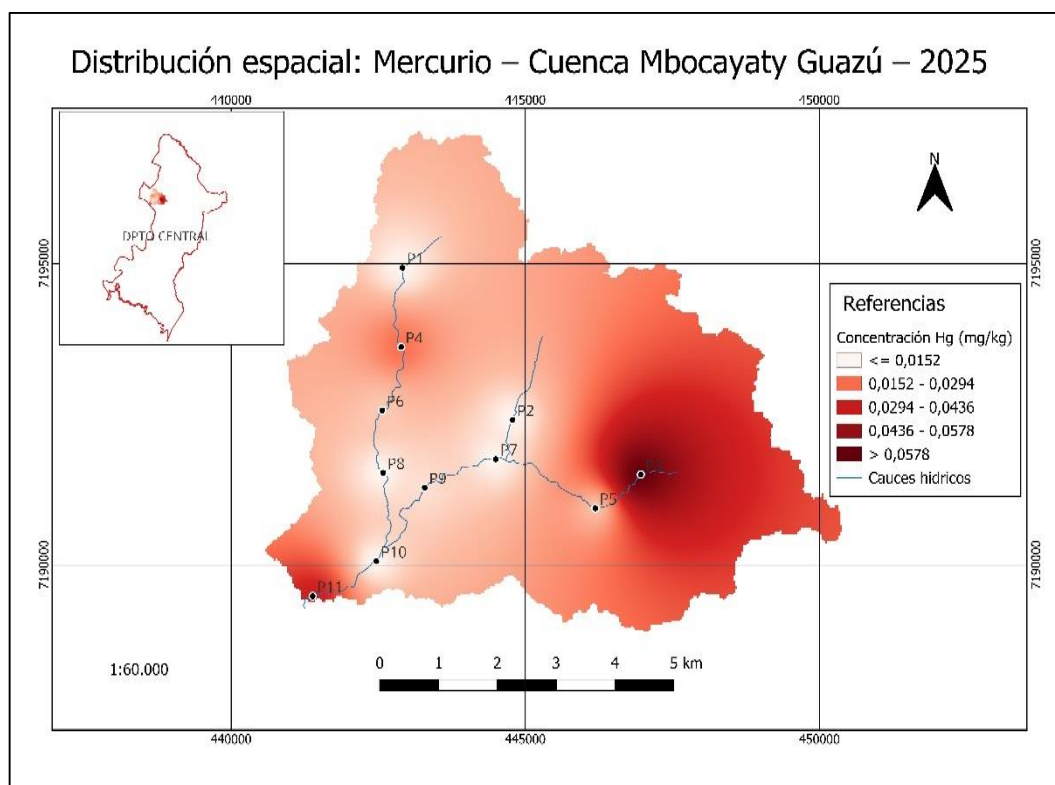


Figura 6. Mapa de distribución espacial del mercurio.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2 Plomo (Pb)

La figura 7 muestra la distribución espacial de los valores de Pb variaron entre <1,0 mg/kg y 19,20 mg/kg. Se observan dos núcleos principales de alta concentración: P1 y P5 (19,20 mg/kg). Las concentraciones disminuyen en dirección sur, hacia los tramos medios y bajos de la cuenca, registrándose los valores mínimos (1,0 mg/kg) en los puntos P6, P9 y P11.

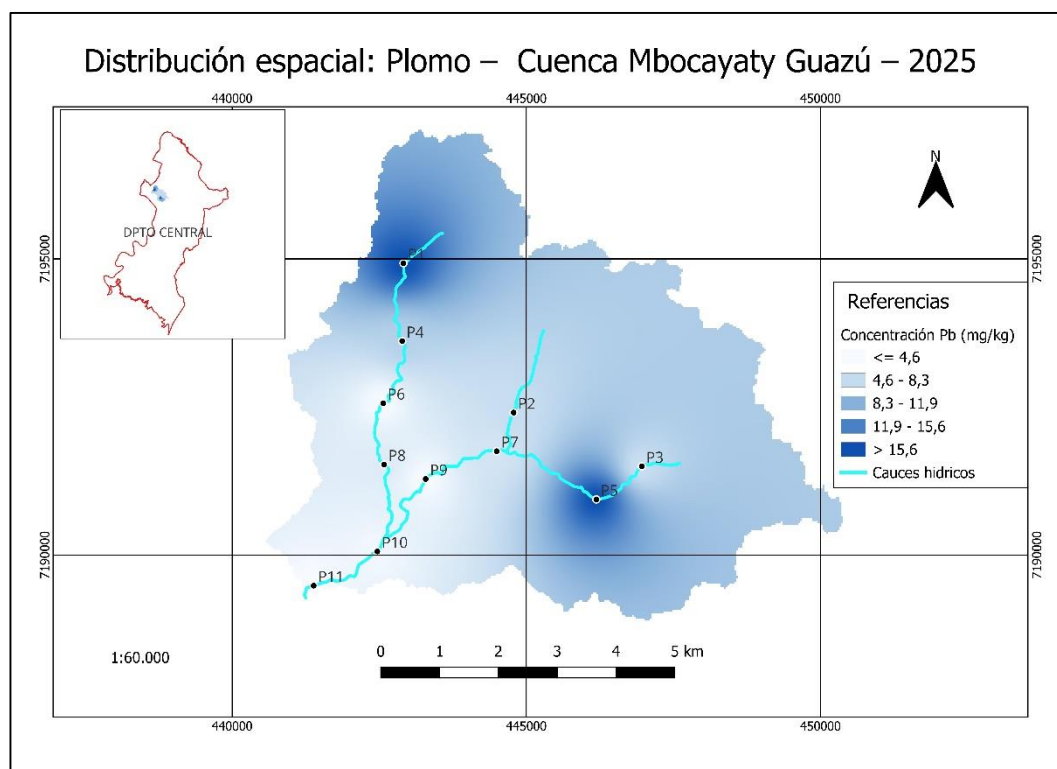


Figura 7. Mapa de distribución espacial del plomo.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Granulometría

En la tabla 12 se presenta la composición granulométrica detallada por punto de muestreo, donde se observa que la fracción arenosa varía entre 94,20% (P1) y 98,76% (P11). El contenido de limo oscila entre 0,20% (P6) y 2,12% (P3), mientras que la arcilla presenta un rango de 1,00% (P9 y P11) a 3,92% (P1).

Tabla 12. Composición granulométrica en sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú, 2025.

Código	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
P1	94,20	1,88	3,92
P2	98,04	0,32	1,64
P3	96,12	2,12	1,76
P4	98,00	0,56	1,44
P5	97,96	0,84	1,20
P6	98,64	0,20	1,16
P7	94,96	1,76	3,28
P8	98,68	0,24	1,08
P9	98,64	0,36	1,00
P10	97,44	0,28	2,28
P11	98,76	0,24	1,00

Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de valores porcentuales de la figura 8 muestra el predominio de la fracción arenosa en todos los puntos de muestreo, con porcentajes superiores al 94%. Los contenidos de limo y arcilla presentan valores bajos en toda la cuenca.

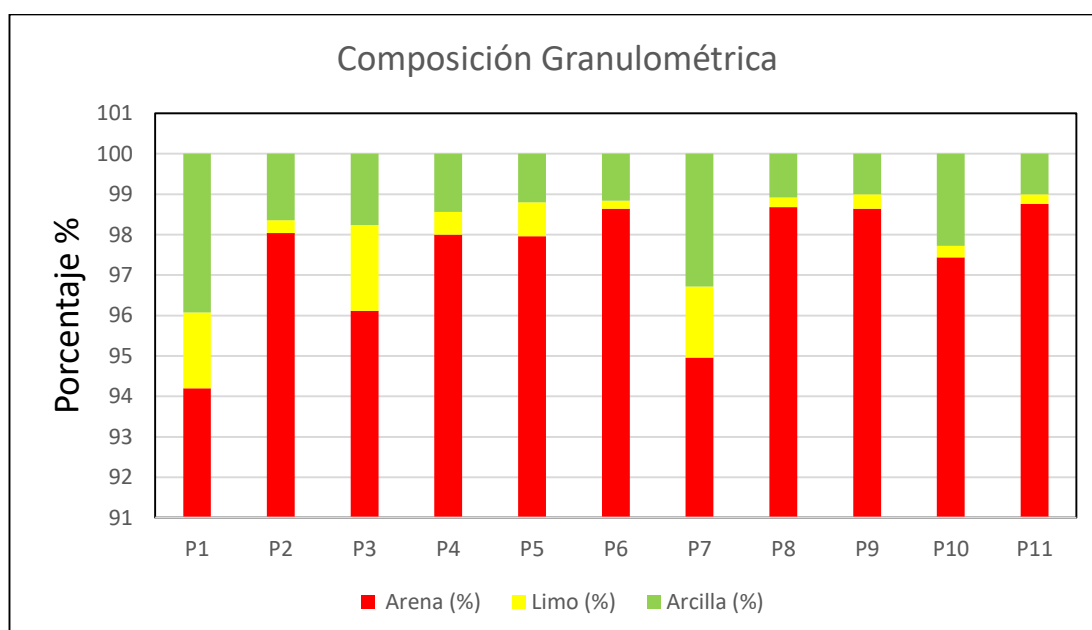


Figura 8. Valores granulométricos en porcentaje de los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.1 Influencia de la granulometría en la acumulación de Hg y Pb en sedimentos

4.1.3.1.1 Prueba de normalidad

Para realizar las pruebas de normalidad se realizaron primeramente análisis estadísticos descriptivos. Los resultados presentados en la tabla 13 muestran una clara dominancia de la fracción arenosa en los sedimentos, con valores comprendidos entre 94,2 % y 98,8 % y una media de 97,4 %. Las fracciones de limo y arcilla presentaron porcentajes considerablemente menores, con medias de 0,8 % y 1,8 %, respectivamente, lo que indica una textura predominantemente arenosa en los puntos de muestreo.

Las concentraciones de mercurio (Hg) variaron entre 0,001 mg/kg y 0,072 mg/kg, con una media de 0,013 mg/kg y una mediana de 0,003 mg/kg. Por su parte, el plomo (Pb) presentó valores entre 1,0 mg/kg y 19,2 mg/kg, con una media de 6,13 mg/kg y una mediana de 4,20 mg/kg.

El rango intercuartílico y el desvío estándar indican una baja dispersión para las variables texturales, lo que sugiere una composición relativamente homogénea del sedimento entre los sitios. En contraste, el Pb evidencia una mayor variabilidad (desvío estándar de 6,75 mg/kg), posiblemente asociada a efectos antrópicos que podrían estar influyendo en la distribución espacial de este metal en el ambiente sedimentario.

Tabla 13. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de metales y granulometría del sedimento.

Descriptivos	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Mínimo	0,001	1,000	94,200	0,200	1,000
Máximo	0,072	19,200	98,760	2,120	3,920
Media	0,013	6,127	97,404	0,800	1,796
Mediana	0,003	4,200	98,000	0,360	1,440
Rango Intercuartil	0,011	4,750	1,860	1,040	0,900
Desvío estándar	0,022	6,753	1,596	0,746	0,982

Fuente: Elaboración propia.

La prueba de normalidad de *Shapiro–Wilk* se aplicó a cada variable con el objetivo de verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad antes de estimar los intervalos de confianza mediante la distribución t de *Student*. La hipótesis nula (H_0H_0) plantea que los datos provienen de una distribución normal, mientras que la hipótesis alternativa (H_1H_1) indica que no lo hacen. Se consideró un nivel de significancia donde los valores de p menores o iguales a 0,05 implican el rechazo de H_0H_0 . El estadístico de contraste W de *Shapiro–Wilk* se considera adecuado para muestras pequeñas ($n = 11$).

Los resultados presentados en la tabla 14 muestran que todas las variables registraron valores de p inferiores a 0,05, lo que indica que ninguna sigue una distribución normal. En particular, las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb) presentaron los menores valores de W (0,63 y 0,72, respectivamente) y los valores de p más bajos (0,0001 y 0,0009), evidenciando una marcada desviación respecto a la normalidad. De manera similar, las fracciones texturales de arena, limo y arcilla también mostraron valores de p inferiores al umbral de significancia, por lo que se rechaza la hipótesis de normalidad en todos los casos.

Tabla 14. Resultados de la prueba de normalidad de *Shapiro–Wilk* para las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb), y para las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) de los sedimentos.

Variable	N	W (estadístico)	p-valor	Decisión ($\alpha = 0,05$)
Hg (mg/kg)	11	0.63208516709337	0.0001	No normal
Pb (mg/kg)	11	0.724478745208077	0.0009	No normal
Arena (%)	11	0.806789276827029	0.0115	No normal
Limo (%)	11	0.76128137279587	0.0029	No normal
Arcilla (%)	11	0.801122205032731	0.0097	No normal

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.1.2 Estimación mediante bootstrap de medianas

Ante la ausencia de distribución normal y la presencia de posibles valores extremos, se optó por emplear la mediana como parámetro central y un enfoque no paramétrico *bootstrap* para la estimación de los intervalos de confianza.

Los resultados presentados en la tabla 15 indican que la mediana de Hg es 0,003 mg/kg (IC95%: 0,001-0,006 mg/kg) y de Pb es 4,20 mg/kg (IC95%: 1,00-5,30 mg/kg). Los intervalos de confianza son estrechos, indicando precisión en las estimaciones a pesar del tamaño muestral limitado.

Tabla 15. Estimación *bootstrap* del intervalo de confianza al 95 % para la mediana de las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb) en los sedimentos.

Estimación	Variable	
	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)
Mediana	0,003	4,20
IC inferior-95%	0,001	1,00
IC superior-95%	0,006	5,30

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.1.3 Coeficientes de correlación de *Spearman*

Para asociar la composición granulométrica de los sedimentos y las concentraciones de mercurio (Hg) y plomo (Pb), se utilizó el coeficiente de correlación de *Spearman* (ρ). Este método no paramétrico resulta apropiado cuando las variables no siguen una distribución normal, como se evidenció en la tabla 16, y permite cuantificar una relación entre variables sin asumir linealidad ni normalidad.

Los resultados de la tabla 16 muestran los coeficientes de correlación de *Spearman* entre las fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla) y las concentraciones de Hg y Pb en los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú. En el caso del mercurio, los coeficientes de correlación no alcanzaron significancia estadística ($p > 0,05$) con ninguna de las fracciones granulométricas analizadas (Arena: $\rho = 0,225$; Limo: $\rho = 0,110$; Arcilla: $\rho = -0,401$). Cabe destacar que los puntos con las concentraciones más elevadas de Hg (P3: 0,072 mg/kg y P11: 0,034

mg/kg) presentaron contenidos de limo y arcilla dentro del rango medio-alto de lo medido en la cuenca, aunque esta observación no se reflejó en una correlación estadísticamente significativa a nivel general.

En cambio, para el plomo se observaron correlaciones más marcadas. La correlación negativa con la fracción de arena ($\rho = -0,627$; $p = 0,039$) y las correlaciones positivas con limo ($\rho = 0,687$; $p = 0,020$) y arcilla ($\rho = 0,581$; $p = 0,061$) indican que el Pb tiende a concentrarse preferentemente en los sedimentos más finos, especialmente en aquellos con mayor proporción de limo.

Tabla 16. Coeficientes de correlación de Spearman (rho) entre las fracciones granulométricas y las concentraciones de Hg y Pb.

Variable 1	Variable 2	rho	p-valor
Hg	Arena	0,225	0,507
Hg	Limo	0,110	0,748
Hg	Arcilla	-0,401	0,221
Pb	Arena	-0,627	0,039
Pb	Limo	0,687	0,020
Pb	Arcilla	0,581	0,061

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Índices de metales pesados en los sedimentos

Se calcularon el Factor de Contaminación (FC), el Índice de Geoacumulación (Igeo) y el Grado de Contaminación (Cd) para conocer el estado de contaminación por mercurio (Hg) y plomo (Pb) en los sedimentos de los puntos muestreados.

4.1.4.1 Índice de geoacumulación (Igeo)

Los resultados de los cálculos de los índices de geoacumulación se pueden observar en la tabla 17

Tabla 17. Índice de geoacumulación en los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú

Código	Igeo Hg	Clase Igeo Hg	Referencia de Color	Igeo Pb	Clase Igeo Pb	Referencia de Color
1	<0	Prácticamente sin contaminar		0.871	No contaminado a moderadamente contaminado	
2	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	
3	0.678	Moderadamente contaminado		<0	Prácticamente sin contaminar	
4	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	
5	<0	Prácticamente sin contaminar		0.871	No contaminado a moderadamente contaminado	
6	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	
7	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	
8	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	
9	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	
10	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	
11	<0	Prácticamente sin contaminar		<0	Prácticamente sin contaminar	

Fuente: Elaboración propia.

El Igeo para Hg mostró que la mayoría de los puntos se encuentran “Prácticamente sin contaminar” ($Igeo \leq 0$), con excepción del punto 3, que presentó un valor de 0.678, clasificado como “No contaminado a moderadamente contaminado”, esto se puede observar en la figura 9.

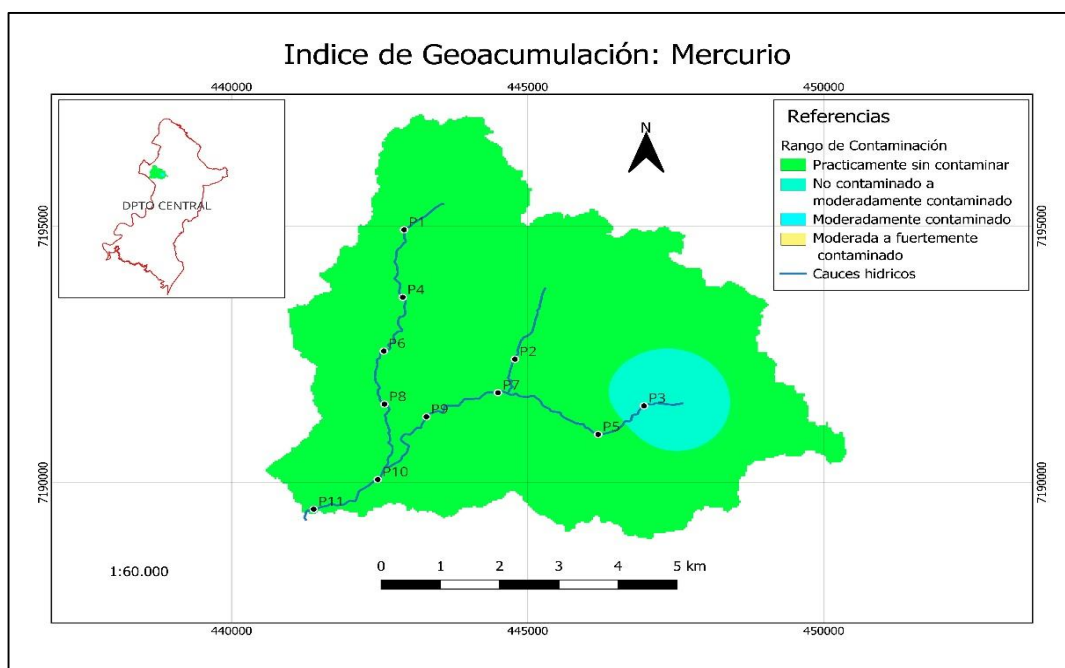


Figura 9. Mapa de índice de geoacumulación del mercurio.
Fuente: Elaboración propia.

Para el Pb, los valores de Igeo variaron entre <0 a 0.871, ubicándose la mayoría en la categoría “Prácticamente sin contaminar”, excepto los puntos 1 y 5, que mostraron valores de 0.871, clasificados como “No contaminado a moderadamente contaminado” indicados en la figura 10.

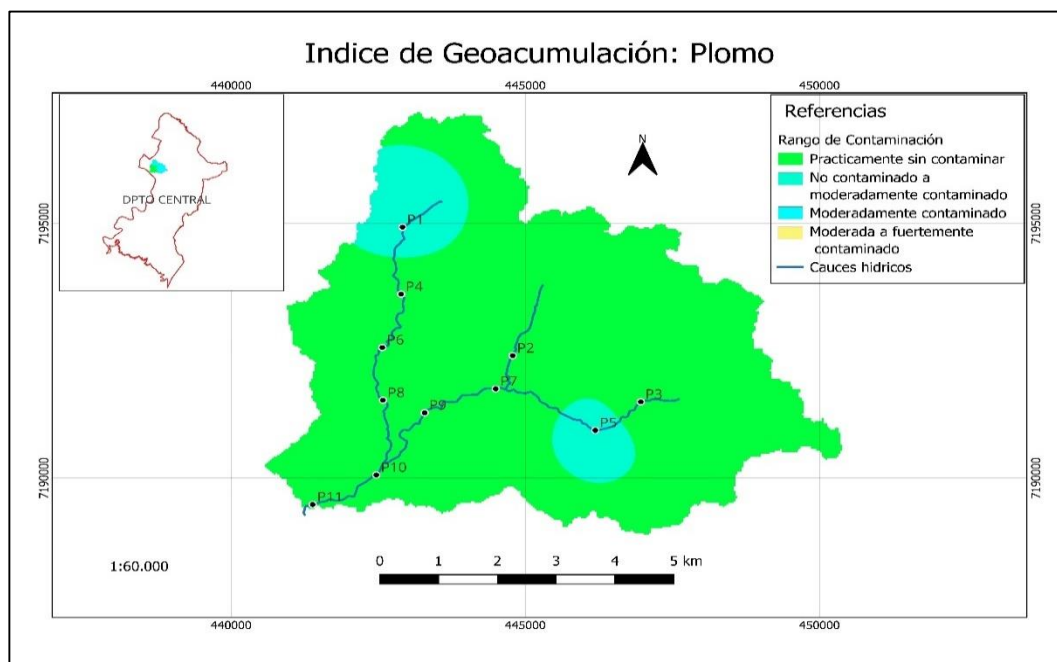


Figura 10. Mapa de índice de geoacumulación del plomo.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.2 Factor de contaminación

Los resultados de los cálculos del factor de contaminación para Hg y Pb se pueden observar en la tabla 18.

Tabla 18. Factor de contaminación de los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú

Código	FC Hg	Clase FC Hg	Referencia de Color	FC Pb	Clase FC Pb	Referencia de Color
1	0.033	Bajo		2.743	Moderado	
2	0.033	Bajo		0.757	Bajo	
3	2.400	Moderado		0.714	Bajo	
4	0.600	Bajo		0.957	Bajo	
5	0.200	Bajo		2.743	Moderado	
6	0.167	Bajo		0.143	Bajo	
7	0.033	Bajo		0.600	Bajo	
8	0.033	Bajo		0.471	Bajo	
9	0.100	Bajo		0.143	Bajo	
10	0.033	Bajo		0.214	Bajo	
11	1.133	Moderado		0.143	Bajo	

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11 se representa el factor de contaminación para Hg mostrando valores que variaron entre 0.033 y 2.400, clasificándose principalmente como Bajo ($FC < 1$), excepto en los puntos (3 y 11), donde se registraron valores de 2.400 y 1.133, respectivamente, clasificados como Moderado.

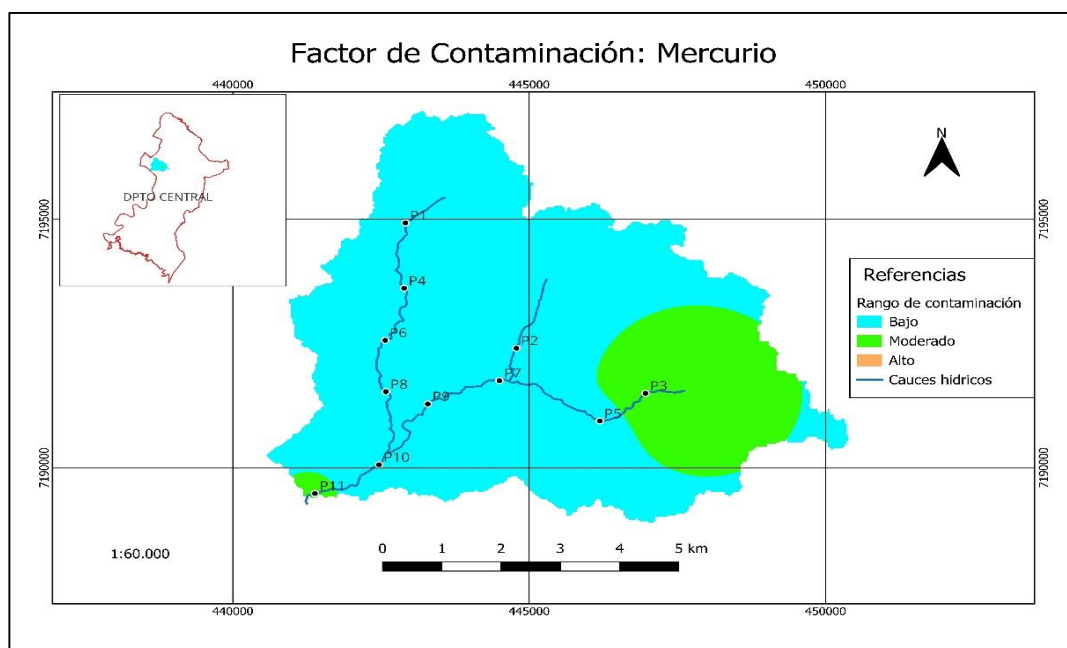


Figura 11. Mapa del factor de contaminación de mercurio.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12 indica que el factor de contaminación para el Pb, el FC osciló entre 0.143 y 2.743, con la mayoría de los puntos en la categoría Bajo, excepto los puntos 1 y 5, que presentaron valores de 2.743, clasificados como “Moderado”.

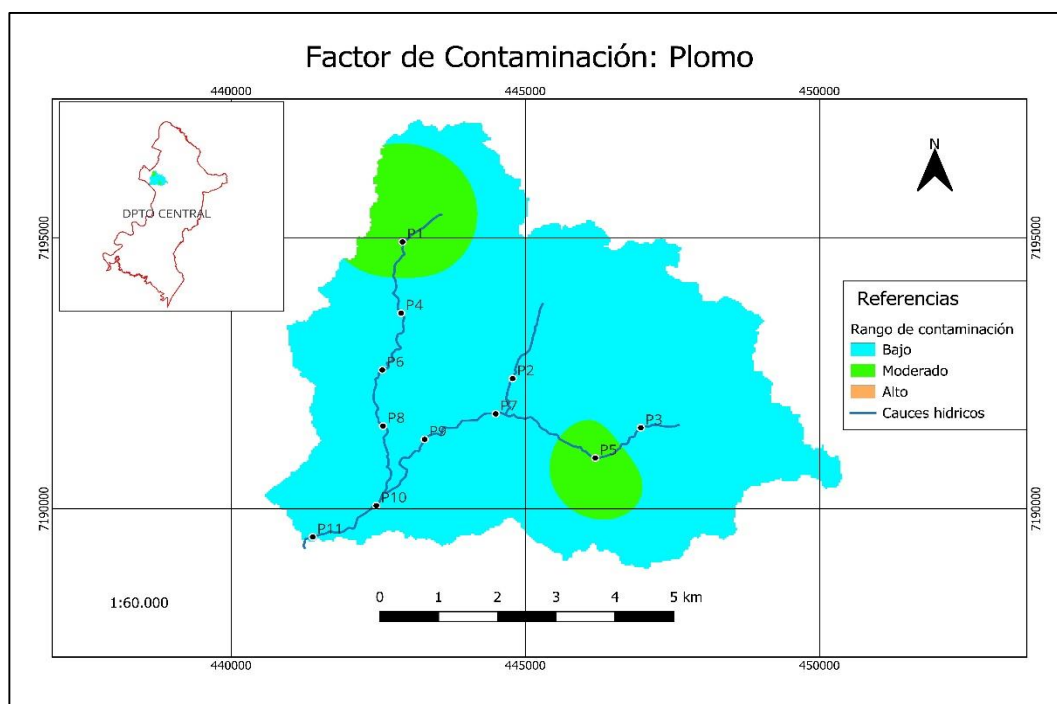


Figura 12. Mapa del factor de contaminación de plomo.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.3 Grado de contaminación

Los resultados de los cálculos del grado de contaminación para Hg y Pb se pueden observar en la tabla 19

Tabla 19. Grado de contaminación de los sedimentos de la Cuenca Mbocayaty Guazú

Punto	Cd	Clase Cd	Referencia de Color
1	2.776	Bajo	
2	0.790	Bajo	
3	3.114	Bajo	
4	1.557	Bajo	
5	2.943	Bajo	
6	0.310	Bajo	
7	0.633	Bajo	
8	0.504	Bajo	
9	0.243	Bajo	
10	0.247	Bajo	
11	1.276	Bajo	

Fuente: Elaboración propia.

El grado de contaminación (Cd), calculado como la suma de los FC de Hg y Pb, presentó valores entre 0.243 y 3.114, clasificándose en todos los casos como “Bajo” ($Cd < 4$), lo que indica una contaminación global baja en los sedimentos analizados como indica la figura 13.

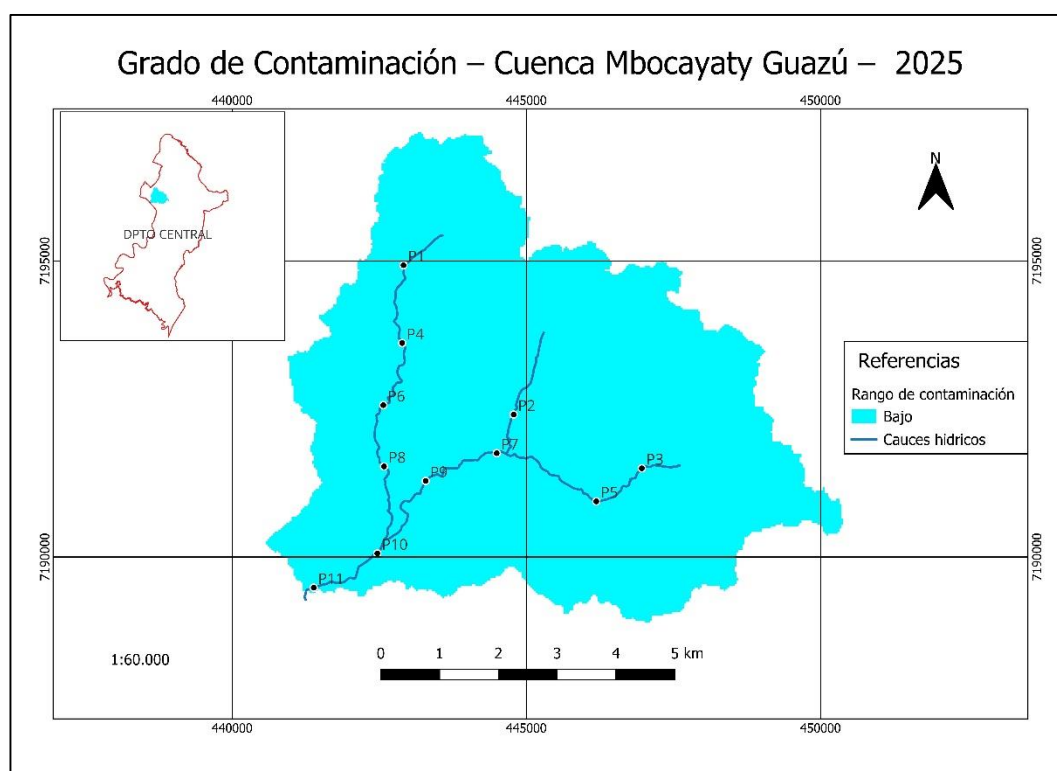


Figura 13. Mapa del grado de contaminación.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Comparación de los valores obtenidos con normas internacionales

Se comparó los valores medidos con las referencias de sedimentos establecidos por los organismos internacionales *NOAA-SQuiRTs* (1999) y (CCME, 2001). Este análisis es de especial relevancia dada la ausencia de una legislación nacional que regule los niveles de metales pesados en sedimentos.

4.1.5.1 Comparación de normas de referencia con análisis estadístico inferencial

Para Hg, el IC95% se encuentra totalmente por debajo de los valores guía de la CCME-SQGPA (ISQG = 0,17 mg/kg; PEL = 0,486 mg/kg) y dentro del rango de referencia NOAA (0,004 – 0,051 mg/kg), aunque la mayor parte del intervalo se ubica por debajo de dicho rango. Esto indica bajas concentraciones relativas de Hg en los sedimentos.

En el caso del Pb, el IC95% [1,00 – 5,30 mg/kg] se sitúa muy por debajo de los valores guía de la CCME-SQGPA (ISQG = 35 mg/kg; PEL = 91,3 mg/kg) y abarca parcialmente el valor de referencia de la NOAA (4 mg/kg). Esto sugiere que las

concentraciones medianas de Pb son compatibles con los valores de referencia internacionales, sin evidenciar enriquecimiento anómalo.

4.1.5.2 Correlación para el Mercurio (Hg)

Las concentraciones de Hg en los sedimentos presentaron un rango de 0,001 mg/kg a 0,072 mg/kg. La Figura 14 contrasta las concentraciones medidas de Hg con los valores de referencia. Se confirma que los puntos P3 y P11 superan el límite superior de la NOAA. Sin embargo, al comparar con los niveles de efecto del CCME (TEL = 0,17 mg/kg y PEL = 0,486 mg/kg), todas las concentraciones medidas se mantienen por debajo del *Threshold Effect Level* (TEL), lo que sugiere un riesgo bajo de efectos biológicos adversos según este marco de referencia.

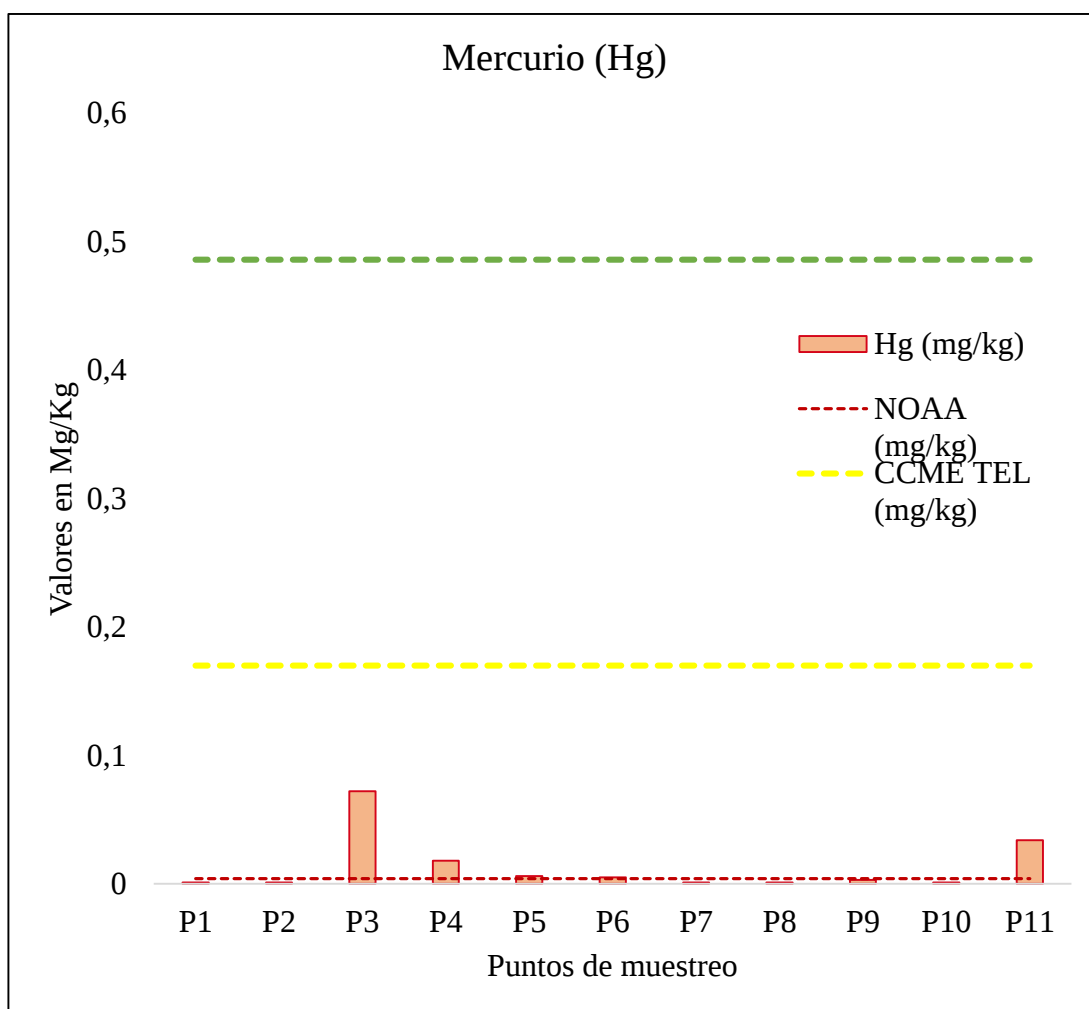


Figura 14. Correlación de Hg medido (mg/kg) con las normativas internacionales.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.5.3 Correlación para el Plomo (Pb)

Las concentraciones de Pb variaron entre <1,0 mg/kg y 19,20 mg/kg. La figura 15 permite una comparación directa con las normativas. Se observa que P1 y P5, con 19,20 mg/kg y el P4 presentó 6,7 mg/kg, estos puntos superan ampliamente el valor guía de la NOAA. Sin embargo, al contrastar con los criterios del CCME (TEL = 35 mg/kg y PEL = 91,3 mg/kg), todas las concentraciones se mantienen por debajo del nivel de efecto umbral, indicando que, según este marco, el riesgo de efectos biológicos adversos es bajo.

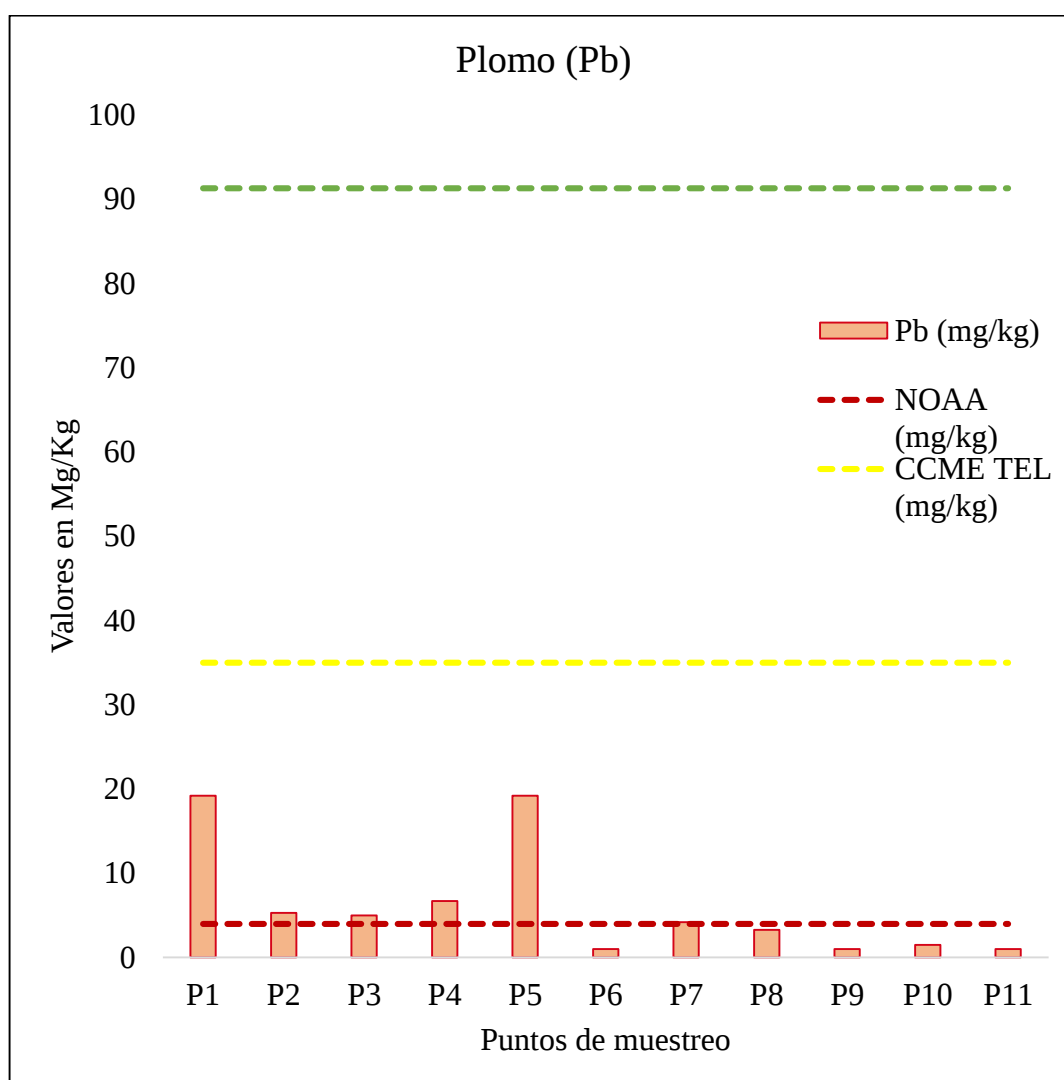


Figura 15. Correlación de Pb medido (mg/kg) con las normativas internacionales.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.6 Análisis multicriterio para la identificación de la amenaza ambiental mediante el proceso analítico jerárquico (AHP) (Objetivo 6)

Se aplicó el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para determinar la importancia de los criterios de identificación que son la concentración de Mercurio (Hg), la concentración de Plomo (Pb) y la proximidad a fuentes antropogénicas.

Para el criterio de proximidad a fuentes, se utilizó el registro de ubicaciones de las fuentes antropogénicas de la Tabla 20, el cual contiene las coordenadas de cada fuente considerada en el análisis.

Tabla 20. Registro de ubicaciones de las fuentes antropogénicas

Fuentes Antropogenicas	Coordenadas	
	UTM 21 J	
	X	Y
Curtiembre	441639	7189431
Estación de Servicio 1	444013	7191370
Estación de Servicio 2	442420	7189953
Estación de Servicio 3	446256	7190832
Estación de servicio	447025	7191532
Metalúrgica 1	446151	7191417
Metalúrgica 2	445323	7191436
Metalúrgica 3	446617	7190957
Metalúrgica 4	441818	7189611
Recicladora 1	443127	7190018
Recicladora 2	443319	7191720
Recicladora 3	442989	7194869
Recicladora 4	446839	7191432
Recicladora 5	447039	7191443
Recicladora 6	445083	7192173
Recicladora 7	442445	7194126
Recicladora 8	442778	7194009
Recicladora 9	442604	7192633
Recicladora 10	441914	7189601

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6.1 Matriz de Comparación par a par y cálculo de pesos

La matriz de comparación se construyó utilizando la escala de Saaty (2008), en la tabla 21 se considera al mercurio como el contaminante de mayor persistencia y toxicidad en el área de estudio.

Tabla 21. Matriz de Comparación Par a Par de los Criterios de Identificación

Criterios	C1: Hg	C2: Pb	C3: Distancia
C1: Hg	1	3	5
C2: Pb	0,3	1	3
C3: Distancia	0,2	0,3	1
Total	1,53	4,3	9

Fuente: Elaboración propia.

Tras el proceso de cálculo AHP, en la tabla 22 se obtuvieron los siguientes pesos finales para cada criterio, los cuales representan parte de la elaboración del mapa integrado de identificación de amenaza ambiental:

Tabla 22. Pesos normalizados AHP

Criterios	C1: Hg	C2: Pb	C3: Distancia	Promedio (Peso)
C1: Hg	0.6522	0.6923	0.5556	0.6334
C2: Pb	0.2174	0.2308	0.3333	0.2605
C3: Distancia	0.1304	0.0769	0.1111	0.1061

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6.2 Distribución espacial de la amenaza ambiental

En la figura 16 el análisis espacial reveló una distribución heterogénea de la amenaza ambiental en la Cuenca Mbocayaty Guazú:

- **Zonas de Amenaza Alta:** Se identificaron predominantemente en el sector noreste de la cuenca. Estas áreas se caracterizan por las elevadas concentraciones de mercurio (como las registradas en el Punto 3) y la proximidad a aglomeraciones de fuentes antropogenicas. Representan aproximadamente el 25% de la superficie total.
- **Zonas de Amenaza Moderada:** Se identificaron como zonas de transición, distribuyéndose en patrones concéntricos alrededor de los focos de alta amenaza y a lo largo de los cauces fluviales. Ocupan alrededor del 45% del área.

- Zonas de Amenaza Baja: Se corresponden con los sectores alejados de las principales fuentes de contaminación industrial y con bajas concentraciones de metales pesados en sedimentos. Representan el 30% restante del área.

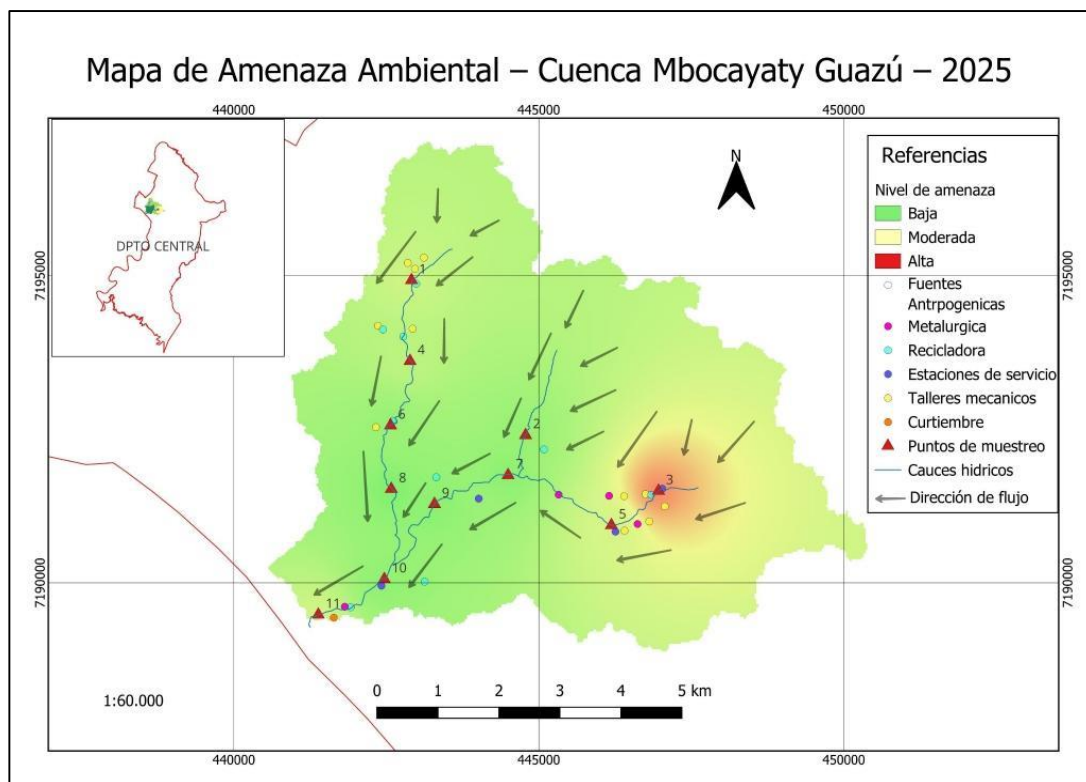


Figura 16. Mapa de Amenaza Ambiental.
Fuente: Elaboración propia.

4.2 Discusión

Los resultados obtenidos en la Cuenca Mbocayaty Guazú evidencian concentraciones variables de mercurio (Hg) y plomo (Pb) en los sedimentos. En los valores máximos se registraron en P3 (0,072 mg/kg) y P11 (0,034 mg/kg) para Hg, y en P1 (19,20 mg/kg) y P5 (19,20 mg/kg). La ubicación de estos puntos de muestreo de máxima concentración coincide directamente con la presencia de fuentes antropogénicas específicas: el punto P11 se asocia a una curtiembre, mientras que el P3 se encuentra bajo la influencia de un centro de reciclaje, una estación de servicio y dos talleres mecánicos. De manera similar, las máximas concentraciones de Pb en P1 están vinculadas a un centro de reciclaje (con baterías, electrodomésticos y chatarra) y tres talleres mecánicos, y P5 a una estación de servicio, tres talleres mecánicos y dos metalúrgicas. Como complemento la influencia granulométrica, en el coeficiente de Spearman reveló asociación positiva significativa entre Pb y fracciones finas (limo: $\rho = 0,687$, $p = 0,020$). Esto confirma que la granulometría es un factor condicionante y solo es determinante para una de las mediciones; la presencia del metal en el medio y la proximidad a la fuente de contaminación son igualmente importantes (Venegas, 2016). En cumplimiento del contraste con normativas internacionales, los puntos (P3, P11 y P4) para Hg, y (P1, P5 y P4) para Pb superan los valores guía de la NOAA (1999). Para el cálculo de índices de contaminación, el Igeo clasificó P3 y P11 (Hg) y P1-P5 (Pb) como "no contaminado a moderadamente contaminado", mientras que el FC mostró valores predominantemente bajos y el $Cd < 4$ en todos los puntos, indicando afectación baja según Hakanson (1979).

La aplicación de la metodología de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) permitió identificar que el 78% de las zonas de "Amenaza Alta" se encuentran dentro de un radio de 500 m de fuentes contaminantes, coincidiendo espacialmente con los puntos de máxima concentración (P3, P1, P5). Este enfoque confirma la utilidad de la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis multicriterio para la gestión ambiental de cuencas urbanas, tal como lo demostró El-Amier et al. (2016).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se determinó que las concentraciones de Hg y Pb en los sedimentos son, en general, bajas según los niveles TEL y PEL del CCME (2001), aunque se identificaron valores elevados en puntos específicos superan los valores guía de la NOAA (1999). Confirmando así mediante la distribución espacial que los puntos de mayor concentración de Hg se localizan en el sector noreste (P3) y baja (P11) de la cuenca, mientras que los de Pb se ubican en P1 y P5.

Se reveló una asociación positiva significativa entre el Pb y las fracciones finas de finas ($\rho = 0,687$; $p = 0,020$), lo que confirma que la textura del sedimento influye en la acumulación de este metal para el Pb.

Se calculó el grado de contaminación mediante índices, clasificando a la cuenca con un nivel general bajo ($Cd < 4$), mientras que los puntos P3 y P11 para Hg, y P1 y P5 para Pb, se categorizaron como "no contaminado a moderadamente contaminado".

Se identificó que las áreas de amenaza alto se correlacionan espacialmente con la presencia de fuentes industriales y urbanas, demostrando una contaminación baja general pero con focos específicos que evidencian la influencia directa de las actividades antrópicas.

Finalmente, se comprobó la hipótesis de investigación, verificándose que las concentraciones superan los valores guía en puntos con zonas de influencia antropogénica, de manera localizada en la cuenca.

5.2 Recomendaciones

Promover el control de efluentes industriales y domésticos, estableciendo sistemas de tratamiento previos al vertido, especialmente en las zonas identificadas como de amenaza alta.

Fomentar la creación de una normativa nacional en Paraguay que regule las concentraciones permisibles de metales pesados en sedimentos, tomando como referencia los criterios de la NOAA (1999) y CCME (2001).

Mejorar el monitoreo donde los muestreos sean en épocas del año con menor precipitación posible, porque la cantidad de agua puede influir en cómo se mueven y acumulan los metales. Complementariamente aumentar el número de puntos de muestreo.

Extender investigaciones a otros metales persistentes y parámetros complementarios como materia orgánica y pH, que modulan la movilidad y biodisponibilidad de los metales, especialmente relevante para el Hg dada su capacidad de bioacumulación.

Realizar charlas o campañas informativas dirigidas a las comunidades locales e industrias, para concienciar sobre los impactos de la contaminación por metales pesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achour, Y., Souissi, R., Tlil, H., Souissi, F., & Motelica-Heino, M. (2022). Mobility of Potentially Toxic Elements (Pb, Zn, Cd, As, Sb) in Agricultural Carbonated Soils Contaminated by Mine Tailings (Northern Tunisia): A New Kinetic Leaching Approach with Organic Acids. *Water*, 14(20), 3337. <https://doi.org/10.3390/w14203337>

Adriano, D. 1986. Trace elements in the terrestrial environment. Springer Verlag. New York. Pág. 533.

APHA. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (18th ed.). Washington, DC: American Public Health Association.

Arocena, R., Chalar, G. & Cardezo, M.J. (1991). Análisis Granulométrico y contenido de materia orgánica de los sedimentos del arroyo Toledo-Carrasco (Uruguay). *Biología Acuática* N°15 “, pag.18

Baudo, R., & Muntau, H. (1990). Sediments: Chemistry and toxicity of in-place pollutants. Lewis Publishers.

Bitschene, P.R. 1987. Mesozoischer und kanozoischer anorogener magmatismus in Ostparaguay.ArbeintenzurGeologie und Petrologie zweieralkaliprovinzen. Diss. Nat. Math. Fak.Univ. Heidelberg. Heidelberg.

Britez Ruiz Díaz, M. L. (2019). Contenido de Cr y Pb en sedimentos del Arroyo Yukyry-mí (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Asunción. FACEN.

Buat-Menard P. y Chesselet R. (1979). “Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter”. *Earth Planet Sci Lett*; 42:398–411. Atlántico Norte tropical.

CCME (2001). Canadian Environmental Quality Guidelines.
<https://www.ccme.ca>

Chen, C. W., Kao, C. M., Chen, C. F., & Dong, C. D. (2007). Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Environmental International*, 22(3), 325–334.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.030>

Climate-Data.org. (2025). Clima y precipitación anual: San Lorenzo, Villa Elisa, San Antonio y Ñemby. Disponible en: <https://es.climate-data.org/americas-del-sur/paraguay-230/>

Comin-chiaromonte, P., Cundari, A., Gomes, C. B., Piccirillo, E. M., Censi, P., Demin, A., & Orué, D. (1992). Potassic dyke swarm in the Sapucaí graben, Eastern Paraguay: petrographical, mineralogical and geochemical outlines. *Lithos*, 28(3-6), 283-301.

Cornejo Olarte, D. A., Paredes Ugarte, W., Quispe Aymachoque, J. P., Llanos Condori, V., & Apaza Cruz, J. L. (2023). Acumulación de metales contaminantes en aguas y sedimentos. Red de Investigación en Educación, Empresa y Sociedad (REDIEES). <https://editorialeidec.com/wp-content/uploads/2023/04/CAPITULO-1-CONVOCATORIA-VOL-13.pdf>

Dionisi, A., Franco, R., González, M. E., Lahner, L., & Meinhold, K. D. (1998). Mapa Geológico de la República del Paraguay: Hoja Caacupé 5470. MOPC, BGR.

Dirección de Meteorología e Hidrología. (2018).
<https://www.meteorologia.gov.py/publicaciones/>

El-Amier, Y. A., Elnaggar, A. A., & El-Alfy, M. A. (2016). Evaluation and mapping spatial distribution of bottom sediment heavy metal contamination in

Burullus Lake, Egypt. Egyptian Journal Of Basic And Applied Sciences, 4(1), 55-66.
<https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2016.09.005>

Facetti, J. F. (2002). Estado ambiental del Paraguay: presente y futuro. Secretaría del Ambiente.

Facetti, J., Dekov, V., & Van Grieken, R. (1998). Heavy metals in sediments from the Paraguay River: a preliminary study. The Science Of The Total Environment, 209(1), 79-86. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(97\)00299-4](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(97)00299-4)

Förstner, U., & Prosi, F. (1979). Heavy Metal Pollution in Freshwater Ecosystems. En Elsevier eBooks (pp. 129-161). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-023442-7.50011-6>

Förstner, U., & Wittmann, G. (1981). Toxic metals. Metal Pollution in the Aquatic Environment, 3-70. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-69385-4_2

Franco Cabrera, M. (2017). Determinación de plaguicidas y metales pesados en sedimentos superficiales del embalse el guájaro como consecuencia de la actividad agrícola en el distrito de riego repelón, Atlántico. Universidad de la Costa. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11323/309>

Fulfaro, V.J., (1996). Geología del Paraguay Oriental. San Pablo, Brasil. <https://www.geologiadelparaguay.com.py/Geolog%C3%ADa-del-Paraguay-Oriental.pdf>

Galán, E., & Romero, A. (2008). Metal enrichment in the sediments of the Guadalquivir River (SW Spain): The role of the industrial activities. Environmental Geology, 53(8), 1747–1758. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0774-7>

Gómez, D. (1991). Consideraciones Morfo-Estructurales de la Antiforma de Asunción. Simposio de Aguas subterráneas., Paraguay.

González, M; Bartel, W. 1998. Mapa Geológico de la República del Paraguay: Hoja Paraguarí (en línea). Asunción, PY. Disponible en <http://www.geologiadelparaguay.com/ParaguarC3AD.pdf>

Hakanson Lars (1979). "An ecological risk index for aquatic pollution control. A

Hall, G. & P. Pelchat. 1997. Evaluación de un espectrómetro de absorción atómica de muestreo directo de sólidos para la determinación de trazas de mercurio en muestras geológicas. Analista 122. 921 - 924. <https://doi.org/10.1039/A700194K>

Herrera, J; J. Rodríguez, J. Coto, V. Salgado, H. Borbón. 2012. Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro Tecnología en Marcha. 26 (1): 27-36. <http://hdl.handle.net/11056/27904>

INCLAM. (2017). Estudio de recursos hídricos y vulnerabilidad climática del Acuífero Patiño: Diagnóstico de Acuífero Patiño. http://opengeo.pol.una.py/descargas/Repositorio_estudios_AP/PR-T1207-Diagnostico.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Protocolo Muestreo en aguas y sedimentos para metales. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia; 2009. <https://es.scribd.com/document/282383665/IDEAM-Protocolo-Muestreo-en-aguas-y-sedimentos-para-metales>

Instituto Nacional de Estadística (INE). (2012). Cartografía Digital. INE. <https://www.ine.gov.py/microdatos/cartografia-digital-2012.php>

Jiménez, D. (2012). Cuantificación de metales pesados (cadmio, cromo, níquel y plomo) en agua superficial, sedimentos y organismos (*Crassostrea columbiensis*) ostión de Mangle en el puente Portete del estero Salado (Guayaquil). Guayaquil, Guayas, Ecuador. <https://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/1683>

Jumbo, D; (2015). Metales pesados en sedimentos riverinos en cuencas hidrográficas impactadas por minería en la Región Sur del Ecuador. (Tesis). Universidad Nacional de Loja. Ecuador. <http://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/11022>

Kurita, H. G. (2022). Reporte del estado de la Bahía de Asunción en los meses de diciembre 2016 y marzo 2017 respecto de la situación fisicoquímica del sedimento y elutriado. Reportes Científicos de la FACEN, 11(2), 3–13.

Macías, P; (2015). Determinación de metales pesados (Pb, Cd, Cr) en agua y sedimentos de la zona estuaria del río Tuxpan, Veracruz. (Tesis). Universidad Veracruzana.

Malm, O., C. Pfeiffer, C. Souza y R. Reuther. 1990. Contaminación por mercurio debido a la minería de oro en la cuenca del río Madeira, Brasil. *Ambio* 19 (1): 11 – 15. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19911950475>

Márquez, A., O. García, W. Senior, G. Martínez, A. González y I. Fermín. 2012. Metales pesados en sedimentos superficiales del Río Orinoco, Venezuela. *Boletín Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 51 (1): 3-18. <http://ri2.bib.udo.edu.ve:8080/jspui/handle/123456789/4143>

Martínez Tarazona, M. R., & López Antón, M. A. (2018). El mercurio: sus fuentes de emisión, usos e impactos. <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/1489>

Meybeck, M., & Helmer, R. (1989). The quality of rivers: From pristine stage to global pollution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 75(4), 283–309. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90191-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90191-0)

Molina, X., & Rodríguez, X. (2010). Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua. Ministerio de Obras Públicas, centro nacional del medio ambiente, Santiago de Chile. Recuperado el 27 de marzo de 2016. <http://documentos.dga.cl/CQA5191v2.pdf>

Monte Domecq, R., & Báez, J. (2007). Balance hídrico integrado del Acuífero Patiño. Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental SENASA Paraguay. <https://www.geologiadelparaguay.com.py/Balance-Hidrico-Acuifero-Patinho.pdf>

Mora, A. M., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., & Bermeo-Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 385-397. <https://doi.org/10.20937/rica.2016.32.04.02>

Muller, g. (1969). Índice de geoacumulación en sedimentos del río rin. *Geo journal*, 2(3), 108-118. <https://sid.ir/paper/618491/en>

NOAA. (1999). Sediment Quality Guidelines for Puget Sound. <https://response.restoration.noaa.gov>

Pacyna JM y Winchester JW. (1990). “Contamination of the global environment as observed in the Arctic”. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 1990; 82:149 – 57. Artículo.

Palmieri, J.H. & Velázquez, J.C. (1982) *Geología del Paraguay*. Colección Apoyo a Catedra. Serie Ciencias Naturales, Ed. NAPA, Asunción, 65p.

Pérez, A. & Marquéz, A. (2017). Sedimentología. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztalapa. México. Volumen 1, pp. 7-23-24

Pérez, M., Moreira, P., Gallard, H., Allard, T., Benedetti, M. 2011. Dissolved organic matter dynamic in the Amazon basin: Sorption by mineral surfaces. Chemical Geology 286, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.05.0047>

PROYECTO PAR83/005.1986. Mapa Geológico de la República del Paraguay. Escala 1:1.000.000. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Ministerio de Defensa Nacional. Asunción, Paraguay.

Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>

Rosas, H; (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. (Tesis). Universidad Politécnica de Cataluña. España. <http://hdl.handle.net/2117/94296>

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal Of Services Sciences, 1(1), 83. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>

Salinas, N. (2019). Presencia de metales Cr, Hg, Pb, Zn, Mn, Cu y Fe en los sedimentos y el agua del cauce del Arroyo San Lorenzo - Dpto. Central, Paraguay (Tesis), Universidad Nacional de Asunción. FACEN. <http://hdl.handle.net/20.500.14066/3234>

Salinas, N. D., Benítez, J., & López, T. (2021). Metales pesados contenidos en los sedimentos de fondo y en la columna de agua del arroyo San Lorenzo,

Departamento Central, Paraguay. Revista de la Sociedad Científica del Paraguay, 26(1), 100-114. <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.1.100>

Sampieri, R., Collado, C., & Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6ª ed.). McGraw-Hill.

Sarango, A. F. H., Altamirano, G. E. P., Lema, G. L. M., & Játiva, J. C. N. (2025). Metodología de la investigación desde el enfoque cuantitativo, cualitativo y mixto. LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 6(4). <https://doi.org/10.56712/latam.v6i4.4577>

Sedimentological approach”. Water Research Vol. 14, pp. 975 to 1001. Ontario, Canada. https://www.researchgate.net/publication/235936664_An_Ecological_Risk_Index_for_Aquatic_Pollution_Control_-_A_Sedimentological_Approach

Sigg, L., Behra, P., & Stumm, W. (2001). Chimie des eaux naturelles et des interfaces avec l'environnement. Masson. <https://media.electre-ng.com/extraits/extrait-id/2679f1eff200cf9d7ebcf721b2391fa342590b9e1e9f4931e1d0eee732d86f5.pdf>

T.A.C., (1981). Geologic Map of Eastern Paraguay 1:50.000. Mapa interno, Asunción.

Tam, NFY y Yao, M. (1998). Normalización y contaminación por metales pesados en sedimentos de manglares. Science of the Total Environment, 216 (1-2), 33-39. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969798001326>

Tirado, L; González, F; Martínez, L; Wilches, L; Celedón, J. (2015). Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en salud. Vol. 11, N. ° 21

Ubillos, J; (2003). Estudio sobre la presencia del plomo en el medio ambiente de Talara.

Velázquez Olivetti, C. V. A. (2020). Caracterización de la degradación ambiental de la Laguna Cateura, Asunción- Paraguay (Trabajo de grado), Universidad Nacional de Asunción. FACEN. <https://www.geologiadelparaguay.com.py/tesis.htm>

Velazquez, V. F. 1992. Provincia Alcalina Central, Paraguai Centro-oriental. Aspectos tectónicos, petrográficos e geocronológicas. Dissertacao de Mestrado. Universidade de Sao Paulo. Sao Paulo.

Venegas, J; (2016). Evaluación del contenido de metales pesados en las aguas y el sedimento del río Babahoyo, en el tramo comprendido entre las localidades de Babahoyo y Samborondón. (Tesis). Escuela Superior Politécnica del Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/34254>

Wasi, S., Ahmad, M., & Tabrez, S. (2011). Suitability of Immobilized *Pseudomonas fluorescens* SM1 Strain for Remediation of Phenols, Heavy Metals, and Pesticides from Water Article in Water Air and Soil Pollution. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0737-x>

Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology, 30(5), 377-392. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/622910>

ANEXOS

Anexo 1: Reconocimiento previo de los lugares de muestreo



Registro fotográfico del reconocimiento previo de los lugares de muestreo y verificación del acceso a los puntos seleccionados.



Registro fotográfico del reconocimiento litológico previo de los lugares de muestreo y verificación del acceso a los puntos seleccionados.

Anexo 2: Elaboración y prueba de la draga Van Veen artesanal para la toma de muestras de sedimentos.



Corte de una garrafa de gas refrigerante de 13.6 kg para elaboración de la draga Van Veen artesanal para la toma de muestras de sedimentos.



Muestra las soldaduras hechas de la tapa, las bisagras y los brazos de apertura de la draga Van Veen artesanal para la toma de muestras de sedimentos.



Luego de las últimas soldaduras, perforaciones, se procedió a la colocación de cable de acero, cuerda reflectiva, grillete de agarre de 10 mm, mosqueton de acero galvanizado de la draga Van Veen artesanal.



Draga Van Veen artesanal utilizada en el campo.

Anexo 3: Ejecución del trabajo de campo: traslado, recolección de muestras de sedimentos y registro de coordenadas



El operativo de este muestreador tipo draga Van Veen se realizó colocando las cucharas abiertas, trabándolas por medio de un gancho, bajándose lentamente en el agua, y cuando toca el fondo, el gancho se suelta y las cucharas se cierran gracias a los brazos de cierre y el cabo de cierre, quedando dentro la muestra gracias al peso del muestreador y del mecanismo de cierre



Utilización de la draga Van Veen artesanal para la toma de muestras de sedimentos en los puntos de muestreo.



Recolección de sedimentos en bolsas plásticas de cerrado hermético previamente etiquetadas.



Recolección de sedimentos

Anexo 4: Resultados de análisis en sedimentos de fondo



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1257/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 628/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1247

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 1. – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	—
Arena	De la pipeta – NN	94,20	%	—
Limo	De la pipeta – NN	1,88	%	—
Arcilla	De la pipeta – NN	3,92	%	—
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	<0,001	mg/kg	—
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	19,20	mg/kg	—

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203



Estanislao Acosta Morales

Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua
INFORME DE ENSAYO

INF.1258/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 628/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1248

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 2 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	—
Arena	De la pipeta – NN	98,04	%	—
Limo	De la pipeta – NN	0,32	%	—
Arcilla	De la pipeta – NN	1,64	%	—
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	<0,001	mg/kg	—
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	5,30	mg/kg	—

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203



E. Acosta Morales
Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1248/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 626/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1238

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 3 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	—
Arena	De la pipeta – NN	96,12	%	—
Limo	De la pipeta – NN	2,12	%	—
Arcilla	De la pipeta – NN	1,76	%	—
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	0,072	mg/kg	—
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	5,00	mg/kg	—

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, SM = Método Estándar
- Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

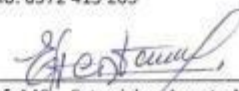
Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203




Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1249/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 626/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1239

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 4 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	--
Arena	De la pipeta – NN	98,00	%	--
Limo	De la pipeta – NN	0,56	%	--
Arcilla	De la pipeta – NN	1,44	%	--
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	0,018	mg/kg	--
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	6,70	mg/kg	--

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, SM = Método Estándar
- Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203



E. Acosta
Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1256/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 628/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1246

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 5 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	—
Arena	De la pipeta – NN	97,96	%	—
Limo	De la pipeta – NN	0,84	%	—
Arcilla	De la pipeta – NN	1,20	%	—
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	0,006	mg/kg	—
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	19,20	mg/kg	—

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, SM = Método Estándar
- Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

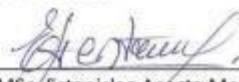
Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203




Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1250/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 626/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1240

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 6 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	--
Arena	De la pipeta – NN	98,64	%	--
Limo	De la pipeta – NN	0,20	%	--
Arcilla	De la pipeta – NN	1,16	%	--
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	0,005	mg/kg	--
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	<1,0	mg/kg	--

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203



Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1253/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 627/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1243

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 7 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	--
Arena	De la pipeta – NN	94,96	%	--
Limo	De la pipeta – NN	1,76	%	--
Arcilla	De la pipeta – NN	3,28	%	--
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	<0,001	mg/kg	--
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	4,20	mg/kg	--

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203




Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1251/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 626/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1241

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 8 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	—
Arena	De la pipeta – NN	98,68	%	—
Limo	De la pipeta – NN	0,24	%	—
Arcilla	De la pipeta – NN	1,08	%	—
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	<0,001	mg/kg	—
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	3,30	mg/kg	—

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203



Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1252/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 627/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1242

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 9 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025	Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025	Fecha del informe: 22/10/2025
--------------------------------	---	-------------------------------

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	--
Arena	De la pipeta – NN	98,64	%	--
Limo	De la pipeta – NN	0,36	%	--
Arcilla	De la pipeta – NN	1,00	%	--
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	0,003	mg/kg	--
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	<1,0	mg/kg	--

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203



Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua

INFORME DE ENSAYO

INF.1254/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 627/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1244

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 10 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	—
Arena	De la pipeta – NN	97,44	%	—
Limo	De la pipeta – NN	0,28	%	—
Arcilla	De la pipeta – NN	2,28	%	—
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	<0,001	mg/kg	—
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	1,50	mg/kg	—

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

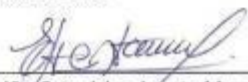
Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203




Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Laboratorio de Calidad de Agua
INFORME DE ENSAYO

INF.1255/2025

Solicitante: MARA DUARTE VALLEJOS	Solicitud de trabajo N°: 627/2025
Dirección: Campus de la UNA – San Lorenzo	Código de ítem: 1245

Descripción de ítem: Datos declarados por el cliente, Sedimento de fondo. Punto 11 – M1.

Fecha de recepción: 30/09/2025 Fecha de ejecución del ensayo: 30/09/2025 Fecha del informe: 22/10/2025

Determinaciones	Métodos	Resultados	Unidad	Referencia No Aplica
Granulometría	De la pipeta – NN	100	%	—
Arena	De la pipeta – NN	98,76	%	—
Limo	De la pipeta – NN	0,24	%	—
Arcilla	De la pipeta – NN	1,00	%	—
Mercurio (Hg) total	SM 3500-Hg B	0,034	mg/kg	—
Plomo (Pb)	SM 3500-Pb B	<1,0	mg/kg	—

Abreviaturas: % = porcentaje gramos por cien gramos, mg/kg = miligramos por kilogramo, < = menor que, SM = Método Estándar - Métodos Normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, edición N° 17 (APHA-AWWA-WPCF). NN = no normalizado.

Ítem: muestra ensayada

Notas:

- Este informe no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio.
- El Laboratorio no se hace responsable de los datos suministrados por el solicitante.
- El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) únicamente a la(s) muestra(s) ensayada(s) y suministrada(s) por el solicitante.
- Nombre del contacto: Mara Duarte

Teléfono: 0972 415 203



Prof. MSc. Estanislao Acosta Morales
Jefe, Laboratorio de Calidad de Agua

Fin del informe
Pág. 1/1

REG 063.07

Anexo 5: Código en R estudio versión 4.5.2 utilizado para el análisis estadístico

ANEXO. Código en R utilizado para obtener todos los resultados estadísticos

```
library(readxl)

datos <- read_excel("C:/Users/User/Downloads/Puntos_muestreo_Mara.xlsx")

library(dplyr)

glimpse(datos)

# -----

# 1. Cargar librerías necesarias

# -----

library(dplyr)

library(tidyr)

library(openxlsx)

# -----

# 2. Calcular estadísticos descriptivos

# -----

tabla_descriptivos <- datos %>%

  select(-`Puntos de muestreo`) %>% # excluir columna no numérica

  summarise(

    across(

      everything(),

      list(

        min = ~min(.x, na.rm = TRUE),

        max = ~max(.x, na.rm = TRUE),

        media = ~mean(.x, na.rm = TRUE),

        mediana = ~median(.x, na.rm = TRUE),

        IQR = ~IQR(.x, na.rm = TRUE),
```

```

    sd = ~sd(.x, na.rm = TRUE)
  ),
  .names = "{.col}_{.fn}"
)
) %>%
pivot_longer(
  everything(),
  names_to = c("Variable", "Estadístico"),
  names_sep = "_",
  values_to = "Valor"
) %>%
pivot_wider(names_from = "Estadístico", values_from = "Valor")

# -----
# 3. Guardar resultados en Excel
# -----
ruta_salida <- "C:/Users/User/Desktop/Mara/tabla_descriptivos.xlsx"
write.xlsx(tabla_descriptivos, ruta_salida, rowNames = FALSE)

# -----
# 4. Verificar en consola
# -----
tabla_descriptivos

# -----
# Normalidad (Shapiro-Wilk) por variable y guardado en Excel
# -----
library(dplyr)

```

```
library(openxlsx)
```

```
# 1) Tomar solo variables numéricas
```

```
datos_num <- datos %>% select(-`Puntos de muestreo`)
```

```
# 2) Ejecutar Shapiro-Wilk y organizar resultados
```

```
sh_lista <- lapply(datos_num, function(x){
```

```
  x <- stats::na.omit(x)
```

```
  pr <- shapiro.test(x)
```

```
  list(
```

```
    n    = length(x),
```

```
    W    = unname(pr$statistic),
```

```
    p_valor = unname(pr$p.value)
```

```
  )
```

```
}}
```

```
# 3) Pasar a data.frame con filas = indicadores, columnas = variables
```

```
tabla_normalidad <- data.frame(
```

```
  Indicador = c("n", "W (estadístico)", "p-valor", "Decisión ( $\alpha = 0,05$ )"),
```

```
  check.names = FALSE
```

```
)
```

```
# extraer n, W, p y decisión para cada variable
```

```
for (var in names(sh_lista)) {
```

```
  n_vals <- sh_lista[[var]]$n
```

```
  W_vals <- sh_lista[[var]]$W
```

```
  p_vals <- sh_lista[[var]]$p_valor
```

```
  decision <- ifelse(p_vals > 0.05, "Normal", "No normal")
```

```

    tabla_normalidad[[var]] <- c(n_vals, W_vals, p_vals, decision)
  }

```

4) Guardar en Excel

```

ruta_xlsx <- "C:/Users/User/Desktop/Mara/tabla_normalidad.xlsx"
write.xlsx(tabla_normalidad, ruta_xlsx, rowNames = FALSE)

```

5) Ver en consola

```

tabla_normalidad

```

```

# -----

```

1. Cargar librería

```

# -----

```

```

library(boot)

```

```

# -----

```

2. Función bootstrap para la mediana

```

# -----

```

```

ic_mediana_boot <- function(x, R = 5000, conf = 0.95) {

```

```

  x <- na.omit(x)

```

```

  # Definir función estadístico (mediana)

```

```

  f <- function(d, i) median(d[i])

```

```

  # Ejecutar bootstrap

```

```

  b <- boot(x, statistic = f, R = R)

```

```

  # Calcular intervalo BCa (más preciso que el normal o percentile)

```

```

  ci <- boot.ci(b, type = "bca", conf = conf)

```

```

  return(data.frame(

```

```

    Mediana = median(x),

```

```

    IC_inf = ci$bca[4],

```

```

    IC_sup = ci$bca[5]
  ))
}

# -----

# 3. Aplicar para Hg y Pb
# -----

ic_hg <- ic_mediana_boot(datos$`Hg (mg/kg)`)
ic_pb <- ic_mediana_boot(datos$`Pb (mg/kg)`)

# Combinar resultados
tabla_ic_boot <- data.frame(
  Variable = c("Hg (mg/kg)", "Pb (mg/kg)"),
  Mediana = c(ic_hg$Mediana, ic_pb$Mediana),
  IC_inf = c(ic_hg$IC_inf, ic_pb$IC_inf),
  IC_sup = c(ic_hg$IC_sup, ic_pb$IC_sup)
)

# -----

# 4. Guardar en Excel
# -----

library(openxlsx)
ruta_salida <- "C:/Users/User/Desktop/Mara/tabla_IC_mediana_bootstrap.xlsx"
write.xlsx(tabla_ic_boot, ruta_salida, rowNames = FALSE)

# -----

# 5. Mostrar en consola
# -----

tabla_ic_boot

```

```

# -----

# 1. Cargar paquetes

# -----

library(dplyr)

library(psych)

library(tidyr)

library(openxlsx)


# -----

# 2. Preparar los datos

# -----

datos_use <- datos %>%

  rename(

    Hg = `Hg (mg/kg)`,
    Pb = `Pb (mg/kg)`,
    Arena = `Arena (%)`,
    Limo = `Limo (%)`,
    Arcilla = `Arcilla (%)`

  ) %>%

  select(Hg, Pb, Arena, Limo, Arcilla)


# -----

# 3. Calcular correlaciones de Spearman

# -----

cor_spearman <- psych::corr.test(datos_use, method = "spearman", adjust = "none")


# Matrices de correlaciones y p-valores

mat_cor <- as.data.frame(cor_spearman$r)

```

```

mat_p <- as.data.frame(cor_spearman$p)

# Pasar a formato largo ambas matrices y combinarlas
mat_cor_long <- mat_cor %>%
  tibble::rownames_to_column("Variable1") %>%
  pivot_longer(-Variable1, names_to = "Variable2", values_to = "rho")

mat_p_long <- mat_p %>%
  tibble::rownames_to_column("Variable1") %>%
  pivot_longer(-Variable1, names_to = "Variable2", values_to = "p_valor")

# Combinar ambas tablas
tabla_cor <- mat_cor_long %>%
  left_join(mat_p_long, by = c("Variable1", "Variable2")) %>%
  filter(Variable1 %in% c("Hg", "Pb") & Variable2 %in% c("Arena", "Limo", "Arcilla")) %>%
  arrange(Variable1)

# -----

# 4. Guardar resultados en Excel
# -----

ruta_salida <- "C:/Users/User/Desktop/Mara/correlacion_spearman_metales.xlsx"
write.xlsx(tabla_cor, ruta_salida, rowNames = FALSE)

# -----

# 5. Mostrar en consola
# -----

tabla_cor

```