



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN COMO REQUISITO PREVIO  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DE METALES PESADOS (As, Pb) EN SEDIMENTOS  
DE ZONAS DE PESCA ARTESANAL EN PUERTO HONDO,  
GUAYAQUIL**

**AUTORA**

**ALMACHI LINDAO AYLEN GIULIANNA**

**TUTORA**

**ING. PACHECO CONDO YESENIA GABRIELA, MSC.**

**GUAYAQUIL, ECUADOR  
2026**



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL**

**APROBACIÓN DEL TUTOR**

El suscrito, docente de la Universidad Agraria del Ecuador, en mi calidad de Tutor, certifico que el presente trabajo de titulación: ANÁLISIS DE METALES PESADOS (As, Pb) EN SEDIMENTOS DE ZONAS DE PESCA ARTESANAL EN PUERTO HONDO, GUAYAQUIL, realizado por la estudiante ALMACHI LINDAO AYLEN GIULIANNA con cédula de identidad N°0927625095 de la carrera INGENIERÍA AMBIENTAL, Unidad Académica Guayaquil, ha sido orientado y revisado durante su ejecución; y cumple con los requisitos técnicos y legales exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador; por lo tanto, se aprueba la presentación del mismo.

Atentamente,

---

Ing. Pacheco Condo Yesenia Gabriela, MSc.

Guayaquil, 21 de mayo del 2026



**UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL**

**APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

Los abajo firmantes, docentes designados por el H. Consejo Directivo como miembros del Tribunal de Sustentación, aprobamos la defensa del trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE METALES PESADOS (As, Pb) EN SEDIMENTOS DE ZONAS DE PESCA ARTESANAL EN PUERTO HONDO, GUAYAQUIL”, realizado por la estudiante ALMACHI LINDAO AYLEN GIULIANNA, el mismo que cumple con los requisitos exigidos por la Universidad Agraria del Ecuador.

Atentamente,

---

Oce. Leila Zambrano Zavala, MSc.  
**PRESIDENTE**

---

Blgo. Raúl Arizaga Gamboa, MSc.  
**EXAMINADOR PRINCIPAL**

---

Ing. Juan Guevara Vinza, MSc.  
**EXAMINADOR PRINCIPAL**

---

Ing. Yesenia Pacheco Condo, MSc.  
**EXAMINADOR SUPLENTE**

Guayaquil, 21 de mayo del 2026

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo, ante todo, a mi Dios Todopoderoso, gobernante del universo, por concederme fuerza, sabiduría y perseverancia a lo largo de esta trayectoria académica.

A mis padres, por su apoyo incondicional, consejos y motivación constante, que han sido cruciales para lograr esta meta.

A mi hermana, por su paciencia, compañía y su invaluable ayuda para comprender los temas de estadística.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres y a mi hermana, por su apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

A mi abuelo, por la elaboración de la pala utilizada en la recolección de sedimentos

A Angel, por su ayuda en la recolección de muestras y el transporte de equipo pesado durante el trabajo de campo.

A la Bióloga Ana Maridueña y al Ingeniero Rubén Castro, por la información técnica, los antecedentes metodológicos y la orientación que brindaron para el muestreo y análisis de metales pesados.

## **Autorización de Autoría Intelectual**

Yo ALMACHI LINDAO AYLEN GIULIANNA, en calidad de autor(a) del proyecto realizado, sobre “ANÁLISIS DE METALES PESADOS (As, Pb) EN SEDIMENTOS DE ZONAS DE PESCA ARTESANAL EN PUERTO HONDO, GUAYAQUIL.” para optar el título de INGENIERA AMBIENTAL, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contienen esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor(a) me correspondan, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8; 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Guayaquil, 2 de junio del 2026

---

ALMACHI LINDAO AYLEN GIULIANNA

**C.I. 0927625095**

## RESUMEN

Este estudio se realizó en la comunidad de Puerto Hondo, Guayaquil cerca del Estero Salado, un ecosistema estuarino particularmente sensible. El objetivo fue analizar la distribución espacial y la concentración de arsénico (As) y plomo (Pb) en sedimentos superficiales. Se seleccionaron cuatro zonas de muestreo dentro del área de estudio, y se recolectaron doce muestras individuales para caracterizar con mayor precisión las condiciones sedimentarias. El análisis mediante el método de digestión por microondas reveló concentraciones de arsénico que oscilaron entre 1,27 mg/kg y 6,58 mg/kg, y concentraciones de plomo que oscilaron entre 3,72 mg/kg y 14,8 mg/kg. Estos valores se compararon con las directrices internacionales canadienses para la protección de la vida acuática en sedimentos. Si bien estos valores no superaron los límites máximos establecidos, mostraron tendencias que marcaron la acumulación en ciertas áreas del área de estudio. El procesamiento de datos empleó un sistema de información geográfica (SIG) y métodos de interpolación espacial como kriging y ponderación inversa de la distancia (IDW). Esto permitió visualizar el comportamiento espacial de los metales e identificar áreas con concentraciones relativamente altas. Estas observaciones sugieren que la dinámica hidrosedimentaria de los estuarios y las actividades humanas circundantes pueden influir en la acumulación de metales. Con base en estos resultados, se desarrollaron medidas de gestión centradas en la prevención y el control de la contaminación para proteger y fortalecer los ecosistemas de manglares.

**Palabras clave:** *Plomo, Arsénico, interpolación, sedimentos, manglar*

## ABSTRACT

This study was conducted in the community of Puerto Hondo, Guayaquil, near the Estero Salado, a particularly sensitive estuarine ecosystem. The objective was to analyze the spatial distribution and concentration of arsenic (As) and lead (Pb) in surface sediments. Four sampling zones were selected within the study area, and twelve individual samples were collected to more accurately characterize the sedimentary conditions. Analysis using the microwave digestion method revealed arsenic concentrations ranging from 1.27 mg/kg to 6.58 mg/kg, and lead concentrations ranging from 3.72 mg/kg to 14.8 mg/kg. These values were compared with Canadian international guidelines for the protection of aquatic life in sediments. While these values did not exceed the established maximum limits, they showed trends indicating accumulation in certain areas of the study area. Data processing employed a geographic information system (GIS) and spatial interpolation methods such as kriging and inverse distance weighting (IDW). This allowed for the visualization of the spatial behavior of metals and the identification of areas with relatively high concentrations. These observations suggest that the hydrosedimentary dynamics of estuaries and surrounding human activities may influence metal accumulation. Based on these results, management measures focused on pollution prevention and control were developed to protect and strengthen mangrove ecosystems.

**Keywords:** *Lead, Arsenic, interpolation, sediments, mangrove*

## ÍNDICE GENERAL

<b>APROBACIÓN DEL TUTOR .....</b>	<b>ii</b>
<b>APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE GENERAL.....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Ecuaciones.....</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Anexo.....</b>	<b>xvi</b>
<b>1.INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Antecedentes del problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Planteamiento y formulación del problema .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2.2 Formulación del problema .....	4
<b>1.3 Justificación de la investigación .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Delimitación de la investigación .....</b>	<b>7</b>
<b>1.5 Objetivo General.....</b>	<b>8</b>
<b>1.6 Objetivos Específicos .....</b>	<b>8</b>
<b>1.7 Hipótesis .....</b>	<b>9</b>
<b>2.MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Estado del arte.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Bases científicas y teóricas de la temática .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Estuarios. ....	13
2.2.2 Estero salado. ....	14
2.2.3 Sedimentos. ....	16
2.2.4 Metales Pesados. ....	16
2.2.5 Arsénico (As).....	17
2.2.6 Plomo (Pb) .....	17
2.2.7 Toxicidad y Efectos Biológicos: .....	18
2.2.8 Movilidad de metales pesados en el suelo .....	18
2.2.9 Pesca artesanal.....	19
2.2.10 Zonas de Pesca Artesanal .....	19

2.2.11 Digestión ácida asistida por microondas (EPA 3051A o 3050B) .....	20
2.2.12 Método de interpolación Inverse Distance Weighting (IDW) .....	20
2.2.13 Método de interpolación Kriging .....	21
2.2.14 Índice de la geoarquía .....	21
2.2.15 Prueba de Shapiro-Wilk.....	21
<b>2.3 Marco legal.....</b>	<b>22</b>
2.3.1 Constitución de la República del Ecuador (2008) .....	22
2.3.2 Guía Canadiense de Calidad de Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática (2002). .....	22
2.3.3 CODIGO ORGANICO DEL AMBIENTE (2018).....	22
2.3.4 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019) .....	23
2.3.5 Acuerdo Ministerial No. 097-A (2015). .....	23
2.3.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....	24
<b>3.MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Enfoque de la investigación .....</b>	<b>25</b>
3.1.1 Tipo de investigación.....	25
3.1.2 Diseño de investigación.....	26
<b>3.2 Metodología .....</b>	<b>27</b>
3.2.1 Variables. ....	27
3.2.2 Matriz de operacionalización de variables.....	27
3.2.3 Recolección de datos .....	28
3.2.4 Población y muestra .....	35
3.2.5 Análisis estadístico.....	36
<b>3.3 Cronograma de actividades .....</b>	<b>43</b>
<b>4.RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
<b>4.1 Determinación de las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) en sedimentos superficiales mediante análisis de laboratorio y comparación con valores de referencia internacionales (ISQG/TEL-PEL).....</b>	<b>44</b>
4.1.1 Inspección in-situ al área.....	44
4.1.2 Georreferenciación de los puntos de muestreo.....	45
4.1.3 Caracterización general y resultados del muestreo.....	46

4.1.4 Concentración de plomo.....	47
4.1.5 Concentración de plomo.....	47
4.1.6 Estadísticos descriptivos de las concentraciones de metales pesados.....	48
4.1.7 Índice de Geoacumulación (Igeo).....	49
4.1.8 Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI).....	50
4.1.9 Prueba de Normalidad.....	51
4.1.10 Comparación de concentraciones entre zonas .....	52
<b>4.2 Modelación de la distribución espacial de los metales pesados (As y Pb) mediante interpolación geoespacial (IDW) utilizando el software QGIS. ....</b>	<b>57</b>
4.2.1 Distribución espacial del arsénico (As).....	57
4.2.2 Distribución espacial del plomo (Pb) .....	61
<b>4.3 Elaboración de medidas de gestión orientadas a la prevención y mitigación de impactos ambientales ante la detección de niveles críticos de As y Pb. ....</b>	<b>64</b>
4.3.1 Propósito .....	64
4.3.2 Objetivo .....	65
4.3.3 Alcance.....	65
4.3.4 Justificación.....	65
4.3.5 Verificación y seguimiento.....	66
4.3.6 Análisis e interpretación .....	66
4.3.7 Medidas preventivas y de mitigación.....	66
<b>5.DISCUSIÓN .....</b>	<b>70</b>
<b>6.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>6.1 Conclusiones.....</b>	<b>73</b>
<b>6.2 Recomendaciones.....</b>	<b>74</b>
<b>7.ANEXOS .....</b>	<b>88</b>
<b>8.Apéndice .....</b>	<b>95</b>

## Índice de Tabla

<b>Tabla 1.</b> División del Estero Salado .....	14
<b>Tabla 2.</b> Variable Independiente .....	27
<b>Tabla 3.</b> Variables Dependientes .....	27
<b>Tabla 4.</b> Descripción de los recursos materiales y tecnológicos .....	28
<b>Tabla 5.</b> Descripción de los recursos software utilizados.....	28
<b>Tabla 6.</b> Puntos Georreferenciados .....	33
<b>Tabla 7.</b> Resultados de las concentraciones (As/Pb).....	33
<b>Tabla 8.</b> Índice de geoacumulación (Igeo) para los niveles de contaminación en el suelo.....	39
<b>Tabla 9.</b> Comparación de los resultados obtenido en plomo con la Guía Internacional Canadiense.....	43
<b>Tabla 10.</b> Comparación de los resultados obtenido en arsénico con la Guía Internacional Canadiense.....	43
<b>Tabla 11.</b> Puntos de muestreo preliminares y observaciones de campo .....	44
<b>Tabla 12.</b> Resultados de concentraciones de As y Pb en sedimentos superficiales .....	46
<b>Tabla 13.</b> Comparación de los resultados obtenidos en plomo con la Guía Internacional Canadiense.....	47
<b>Tabla 14.</b> Comparación de los resultados obtenidos en arsénico con la Guía Internacional Canadiense.....	47
<b>Tabla 15.</b> Comparación con valores de referencia TEL–PEL (CCME, 2002) .....	48
<b>Tabla 16.</b> Estadísticos descriptivos de las concentraciones de Arsénico (mg/kg)	48
<b>Tabla 17.</b> Estadísticos descriptivos de las concentraciones de Plomo (mg/kg) ...	49
<b>Tabla 18.</b> Valores de fondo utilizados .....	50
<b>Tabla 19.</b> Índice de Geoacumulación (Igeo) .....	50
<b>Tabla 20.</b> Valores sedimentológico-toxicológicos (Sti) para las ocho sustancias incluidas en el enfoque del índice de riesgo.....	51
<b>Tabla 21.</b> Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI) .....	51
<b>Tabla 22.</b> Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para las concentraciones de metales pesados. ....	52
<b>Tabla 23.</b> Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para para las concentraciones de plomo.....	52

<b>Tabla 24.</b> Resultados de la prueba post hoc de Dunn para plomo con ajuste de Bonferroni.....	54
<b>Tabla 25.</b> Resultados del ANOVA para las concentraciones de arsénico.....	55

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Delimitación de la zona de estudio .....	8
<b>Figura 2.</b> Recorrido de pescadores .....	30
<b>Figura 3.</b> Determinación de puntos de muestreo .....	31
<b>Figura 4.</b> Puntos de muestreo georreferenciados.....	45
<b>Figura 5.</b> Concentración de plomo por zona de muestreo .....	53
<b>Figura 6.</b> Concentración de arsénico por zona .....	55
<b>Figura 7.</b> Distribución espacial del arsénico (As).....	58
<b>Figura 8.</b> Geostatistical wizard - IDW en As .....	59
<b>Figura 9.</b> Geostatistical wizard - Kriging en As .....	60
<b>Figura 10.</b> Distribución espacial del plomo (Pb) .....	61
<b>Figura 11.</b> Geostatistical wizard - IDW en Pb .....	62
<b>Figura 12.</b> Geostatistical wizard - Kriging en Pb.....	63

## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 1</b> Fórmula para calcular la media muestral.....	36
<b>Ecuación 2</b> Fórmula para calcular la desviación estándar muestral.....	36
<b>Ecuación 3.</b> Formula de la prueba de Shapiro-Wilk .....	37
<b>Ecuación 4.</b> Índice de la geoacumulación .....	39
<b>Ecuación 5.</b> Riesgo ecológico por metal .....	39
<b>Ecuación 6.</b> Riesgo ecológico potencial total .....	40
<b>Ecuación 7.</b> Fórmula para estimar un valor en $x_0$ mediante IDW con potencia ppp .....	40
<b>Ecuación 8.</b> Fórmula de kriging.....	41
<b>Ecuación 9.</b> Fórmula de la media del error.....	41
<b>Ecuación 10.</b> Fórmula del error de cuadrado medio de la raíz (RMSE) .....	42

## Índice de Anexo

<b>Anexo N° 1.</b> Zonas I, II, III del Estero Salado. ....	88
<b>Anexo N° 2.</b> Diagrama de flujo .....	88
<b>Anexo N° 3.</b> Recolección de las muestras en el Punto 1.....	89
<b>Anexo N° 4.</b> Recolección de las muestras en el Punto 2.....	89
<b>Anexo N° 5.</b> Recolección de las muestras en el Punto 3.....	90
<b>Anexo N° 6.</b> Recolección de las muestras en el Punto 4.....	90
<b>Anexo N° 7.</b> Recolección de las muestras en el Punto 5.....	91
<b>Anexo N° 8.</b> Recolección de las muestras en el Punto 6.....	91
<b>Anexo N° 9.</b> Recolección de las muestras en el Punto 7.....	92
<b>Anexo N° 10.</b> Recolección de las muestras en el Punto 8.....	92
<b>Anexo N° 11.</b> Recolección de las muestras en el Punto 9.....	93
<b>Anexo N° 12.</b> Recolección de las muestras en el Punto 10.....	93
<b>Anexo N° 13.</b> Recolección de las muestras en el Punto 11.....	94
<b>Anexo N° 14.</b> Recolección de las muestras en el Punto 12.....	94

## Índice de Apéndice

<b>Apéndice N° 1.</b> Cronograma de actividades .....	95
<b>Apéndice N° 2.</b> Resultados de laboratorio Punto 1 .....	96
<b>Apéndice N° 3.</b> Resultados de laboratorio Punto 2 .....	96
<b>Apéndice N° 4.</b> Resultados de laboratorio Punto 3 .....	97
<b>Apéndice N° 5.</b> Resultados de laboratorio Punto 4 .....	97
<b>Apéndice N° 6.</b> Resultados de laboratorio Punto 5 .....	98
<b>Apéndice N° 7.</b> Resultados de laboratorio Punto 6 .....	98
<b>Apéndice N° 8.</b> Resultados de laboratorio Punto 7 .....	99
<b>Apéndice N° 9.</b> Resultados de laboratorio Punto 8 .....	99
<b>Apéndice N° 10.</b> Resultados de laboratorio Punto 9 .....	100
<b>Apéndice N° 11.</b> Resultados de laboratorio Punto 10 .....	100
<b>Apéndice N° 12.</b> Resultados de laboratorio Punto 11 .....	101
<b>Apéndice N° 13.</b> Resultados de laboratorio Punto 12 .....	101
<b>Apéndice 14.</b> Medidas de gestión ambiental de prevención asociadas a As y Pb .....	102
<b>Apéndice 15.</b> Medidas de gestión ambiental de mitigación asociadas a As y Pb .....	104

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes del problema

“La contaminación por metales pesados en ecosistemas acuáticos es un problema ambiental de gran preocupación debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en organismos marinos” (Aveiga , Cárdenas, Peñarrieta , y Alcántara, 2020). El agua y los sedimentos actúan como receptores de estos contaminantes, que se incorporan a las cadenas tróficas, afectando a la biota y poniendo en riesgo la salud humana (Flores, Del Angel, Frías, y Gómez, 2020).

Los metales traza pueden ingresar a los organismos acuáticos por absorción directa desde el agua o por ingestión de partículas sedimentarias. Su acumulación varía según el tipo de metal y la especie, siendo los peces e invertebrados excelentes bioindicadores debido a su posición en la red trófica (Lemus, Castañeda, y Chun, 2014). “Las descargas industriales, mineras, la acuicultura intensiva y el uso de pesticidas en cuencas hidrográficas se encuentran entre las actividades antropogénicas que generan impactos relacionados con metales pesados al entorno” ( Sánchez, 2016).

Como explica Sarria, Pabón, Benítez, y Gallo (2020), los metales pesados generan efectos adversos en distintos niveles biológicos. En las plantas, ocasionan alteraciones fisiológicas como reducción del crecimiento y clorosis; mientras que en los seres humanos su exposición se asocia con daños neurológicos, renales, hepáticos y pulmonares, e incluso con desenlaces fatales. Asimismo, la presencia de arsénico y plomo en sedimentos de zonas de pesca artesanal depende de factores como la cercanía a fuentes de contaminación, la hidrodinámica del área y la capacidad de los sedimentos para retener estos contaminantes. Estudios recientes han evidenciado que la movilidad y disponibilidad de estos contaminantes en el ambiente dependen de las características fisicoquímicas del sedimento, como el pH, la materia orgánica y la granulometría (Navarrete, Morales, Dominguez, Pontón, y Marín, 2019).

En la cuenca baja del río Coata, en Perú, se ha detectado contaminación por metales pesados como cromo, cadmio y plomo, atribuida a fuentes antrópicas. Un estudio realizado por Quispe, Belizario, y Chui (2019) identificó que las aguas

residuales de la ciudad de Juliaca son la principal fuente de esta contaminación, utilizando espectroscopía de absorción atómica según el método EPA.

En Ecuador, se ha identificado la presencia de metales pesados en diversos ecosistemas marino-costeros, especialmente en estuarios y manglares, debido a su capacidad para retener contaminantes. Esta situación afecta directamente a especies filtradoras como las conchas, fundamentales para la pesca artesanal y el sustento de comunidades costeras (Mero, Arcos , Egas , y Siavichay , 2012).

En el río Carrizal, en la provincia de Manabí, se ha detectado plomo como principal contaminante, con posibles efectos sobre la biota acuática y la salud humana. Aveiga, Banchón, Mendoza, Calderón, y Delgado (2022) analizaron metales pesados (Pb, Cd y Cu) en agua, sedimentos y tejidos de peces recolectados en 21 estaciones mediante espectrofotometría de absorción atómica, se detectaron niveles de Pb de 0,41 mg/L en agua y 0,03 mg/kg en sedimentos, superando el límite permitido.

Puerto Hondo, situado al suroeste de la ciudad de Guayaquil, es un estuario de gran importancia ecológica que forma parte del complejo sistema de manglares del golfo de Guayaquil. Esta zona se caracteriza por su ecosistema rico en biodiversidad, que alberga una vasta extensión de manglares que sirven de refugio y lugar de reproducción para diversas especies de aves y crustáceos, esenciales para la biodiversidad local y nacional (Zuñiga, 2007). La zona es particularmente importante para la pesca artesanal de tilapia, mojarra, lisa y camarón, una actividad socioeconómica vital para las comunidades vecinas, que complementa sus actividades de subsistencia y comerciales (Torres, 2025).

La proximidad de Puerto Hondo a la ciudad de Guayaquil y su interconexión con el estuario del río Guayas, una cuenca hidrográfica que recibe los aportes de diversas actividades antropogénicas (industriales, agrícolas y domésticas), lo hace vulnerable a la acumulación de contaminantes.

Estudios realizados en el golfo de Guayaquil ya han mostrado una tendencia al aumento de las concentraciones de plomo (Pb) en los sedimentos de algunas zonas, especialmente aquellas cercanas a actividades industriales y de cría de camarones. Navarrete Forero et al. (2019) informaron de concentraciones de mercurio hasta mil veces superiores al límite permitido en almejas y cangrejos

recolectados en la provincia de El Oro, una zona caracterizada por una intensa actividad.

La exposición a determinados metales puede dañar los riñones, el cerebro, los intestinos, los pulmones, el hígado y otros órganos del cuerpo humano (Angon, 2024).

Dada la importancia ecológica y socioeconómica de Puerto Hondo, este estudio tiene como objetivo evaluar la presencia y concentración de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos de las zonas de pesca artesanal de mariscos. Al proporcionar datos actualizados sobre la calidad ambiental de estos ecosistemas costeros, el objetivo es contribuir al desarrollo de estrategias para el monitoreo y control de la contaminación resultante de las actividades en la zona, protegiendo la salud de las comunidades locales y la sostenibilidad de los recursos pesqueros.

## **1.2 Planteamiento y formulación del problema**

### ***1.2.1 Planteamiento del problema***

La contaminación por metales pesados en ecosistemas estuarinos representa una de las principales amenazas para la salud ambiental y la seguridad alimentaria en regiones costeras. Estos elementos, como el arsénico (As) y el plomo (Pb), se caracterizan por su persistencia, toxicidad y capacidad de bioacumulación a lo largo de la cadena trófica, afectando tanto a la biota como a las poblaciones humanas que dependen de los recursos acuáticos (Sarria Villa et al., 2020). En los sedimentos, los metales pesados pueden permanecer durante largos periodos, actuando como reservorios de contaminación que liberan contaminantes al agua bajo cambios de pH o condiciones redox (Giarikos et al., 2023).

En Ecuador, diversos estudios han evidenciado la presencia de As y Pb en ecosistemas estuarinos como el Estero Salado y el Golfo de Guayaquil, en niveles que en algunos casos superan los valores de referencia de la Guía Canadiense de Calidad de Sedimentos (ISQG/TEL-PEL) (Ormaza-González et al., 2024). Estas zonas, caracterizadas por la convergencia de efluentes urbanos, agrícolas e industriales, muestran una tendencia creciente en la acumulación de contaminantes en los sedimentos.

En el área de Puerto Hondo, los comuneros se dedican principalmente a la pesca artesanal de camarones y peces, actividades que dependen directamente de

la calidad ambiental del estuario. Sin embargo, no existen estudios recientes que caractericen la presencia y distribución espacial de metales pesados en los sedimentos de esta localidad. La cercanía a zonas urbanas e industriales, así como el aporte de escorrentías desde los ríos Guayas y Daule, sugiere la posibilidad de contaminación difusa (Huayamave, 2013).

La falta de información actualizada impide determinar si las concentraciones de As y Pb exceden los niveles de referencia internacional y, por tanto, si representan un riesgo ecológico o sanitario. Ante esta brecha de conocimiento, se plantea la necesidad de analizar la concentración de estos metales en los sedimentos superficiales de Puerto Hondo, a fin de identificar zonas de riesgo ambiental y generar medidas de gestión enfocadas en la prevención o remediación en caso de detectarse niveles críticos de contaminación.

### **1.2.2 Formulación del problema**

¿Cuál es el nivel actual de contaminación por metales pesados en los sedimentos en las zonas de pesca artesanal?

### **1.3 Justificación de la investigación**

La comuna de Puerto Hondo, ubicada en el estuario del Golfo de Guayaquil, basa buena parte de su economía en actividades de pesca artesanal, particularmente en la recolección de concha prieta (*Anadara tuberculosa*), especie bivalva que habita en zonas intermareales de manglar. Según el estudio de Estrella Benavides (1999) , “la captura de concha representa una fuente significativa de sustento alimentario y económico para los habitantes de Puerto Hondo y áreas adyacentes, siendo esta actividad realizada mayormente en forma manual y sin equipos sofisticados”.

No obstante, diversos estudios han evidenciado que esta especie presenta alta capacidad de bioacumulación de metales pesados, entre ellos el plomo (Pb), cuya presencia está relacionada con las descargas domésticas, industriales y agrícolas en sistemas estuarinos. En un análisis reciente, se reportó que “las concentraciones de Cd en *Anadara tuberculosa* recolectadas en el Golfo de Guayaquil oscilan entre 0.50 y 8.20 mg/kg en peso seco, superando los límites máximos permitidos por el Codex Alimentarius” (Cedeño, Pacheco, y Ballesteros, 2014). Asimismo, se ha observado que “el plomo puede encontrarse en niveles de hasta 3.0 mg/kg en tejidos de conchas capturadas en zonas cercanas al Estero

Salado” cual representa un riesgo directo para la salud pública. (Aveiga, Peñarrieta, y Santana, 2024)

Los sedimentos marinos de Puerto Hondo, por estar ubicados en una zona de convergencia de afluentes contaminados, actúan como sumideros naturales de metales traza. Esta acumulación constituye una amenaza ambiental latente, ya que las conchas se alimentan por filtración y están en contacto directo con dichos sedimentos, incrementando su vulnerabilidad a la contaminación. (Pazmiño, 2014)

La presente investigación tiene como objetivo determinar la concentración de metales pesados en los sedimentos marinos de la comuna Puerto Hondo, con el fin de generar información técnica que permita conocer el nivel de presencia de estos contaminantes en un entorno de pesca artesanal. Esta acción se enmarca en el artículo 71 de la Constitución del Ecuador, que reconoce a la naturaleza como sujeto de derechos, lo cual implica la responsabilidad de monitorear y preservar los ecosistemas. Por tanto, esta investigación también responde a un mandato constitucional, reconociendo el derecho de los ecosistemas a existir, mantenerse y regenerarse.

Dado que Ecuador actualmente no cuenta con criterios específicos para evaluar los límites máximos permisibles de metales pesados en sedimentos marinos, la investigación considerará normativas internacionales como referencia. Adicionalmente, se tomará en cuenta la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1108. Aunque esta norma está orientada principalmente a la calidad del agua para consumo humano, resulta una guía complementaria valiosa, ya que los sedimentos pueden actuar como una fuente importante de contaminación del agua.

Este proyecto se alinea directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por Naciones Unidas (2022):

- **ODS 3 (Salud y bienestar):**

Dentro del ODS tenemos la meta 3.9, que indica que para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo.

La investigación ofrece información clave para la prevención de enfermedades derivadas de la exposición a metales pesados, lo cual fortalece las políticas de salud pública en zonas rurales.

- **ODS 6 (Agua limpia y saneamiento):**

Dentro del ODS tenemos la meta 6.3, que indica que de aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento de sustancias peligrosas y minimizando la liberación de productos químicos y materiales nocivos, así como aumentar el reciclaje y la reutilización segura a nivel mundial.

Dentro del ODS tenemos la meta 6.6, que indica que de aquí a 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los ríos, acuíferos, lagos, humedales y zonas costeras.

El análisis de la presencia de metales pesados en sedimentos permite evaluar fuentes potenciales de contaminación que pueden afectar la calidad del agua y los ecosistemas asociados

- **ODS 14 (Vida submarina):**

Dentro del ODS tenemos la meta 14.1, que indica que de aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes.

Dentro del ODS tenemos la meta 14.2, que indica que de aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes, incluso fortaleciendo su resiliencia, y adoptar medidas para restaurarlos a fin de restablecer la salud y la productividad de los océanos.

Dentro del ODS tenemos la meta 14.a, que indica que aumentar los conocimientos científicos, desarrollar la capacidad de investigación y transferir tecnología marina, teniendo en cuenta los Criterios y Directrices para la Transferencia de Tecnología Marina de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental, a fin de mejorar la salud de los océanos y potenciar la contribución de la biodiversidad marina al desarrollo de los países en desarrollo, en particular los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países menos adelantados.

Al generar datos sobre la contaminación de sedimentos y su impacto en organismos marinos, se aporta evidencia para la protección de ecosistemas acuáticos vulnerables.

- **ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres):**

Dentro del ODS tenemos la meta 15.1, que indica que para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales.

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se destaca la meta 15.5, orientada a adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, frenar la pérdida de biodiversidad y, para el año 2020, proteger las especies amenazadas, evitando su extinción.

La evaluación de los sedimentos y manglares estuarinos apoya estrategias de conservación de hábitats esenciales y de uso sostenible de los recursos naturales.

Como resultado del estudio, se generará un mapa que muestra las concentraciones de arsénico (As) y Plomo (Pb) en los sedimentos de los puntos de pesca de Puerto Hondo, el cual será una herramienta clave para identificar las zonas con altos niveles de estos metales y desarrollar planes de remediación adecuados. De igual manera, el análisis de estas concentraciones contribuirá al fortalecimiento del conocimiento científico en áreas como la eco toxicología marina y la gestión ambiental, sirviendo de base para futuras investigaciones sobre la dinámica, dispersión y efectos de estos contaminantes en los ecosistemas costeros del país.

#### **1.4 Delimitación de la investigación**

- **Espacio:** La investigación se llevará a cabo en Puerto Hondo, una localidad ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas, Ecuador. El área de estudio se localiza en las coordenadas aproximadas 17 M 608418.05 m E 9757741 m S. Abarcará zonas del estuario, el manglar y aquellos sectores donde los comuneros desarrollan actividades de pesca artesanal, como la recolección de moluscos y otros recursos marinos.

**Figura 1.**  
**Delimitación de la zona de estudio**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

- **Tiempo:** El tiempo destinado para el desarrollo del proyecto investigativo es en un periodo de 6 meses, desde septiembre hasta febrero.
- **Población:** Puerto Hondo, ubicado al oeste de la ciudad, es una comuna con 11.000 habitantes y se encuentra junto a Vía a la Costa, en el kilómetro 17,5. (Alcaldía de Guayaquil, 2023).

### **1.5 Objetivo General**

Analizar la concentración y distribución espacial de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos superficiales del estuario de Puerto Hondo, Guayaquil, mediante la aplicación de muestreo de campo, análisis de laboratorio y representación cartográfica, con el propósito de establecer la existencia de zonas de riesgo ambiental vinculadas a fuentes antrópicas locales y a la presencia de metales pesados.

### **1.6 Objetivos Específicos**

- Determinar las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos superficiales mediante análisis de laboratorio, y compararlas con los

valores de referencia internacionales establecidos por la *Canadian Sediment Quality Guidelines (ISQG/TEL–PEL)*.

- Modelar la distribución espacial de los metales pesados (As y Pb) mediante interpolación geoespacial (IDW) utilizando el software QGIS.
- Elaborar medidas de gestión orientado a la prevención y mitigación de impactos ambientales en caso de detectarse niveles críticos de As y Pb.

### **1.7 Hipótesis**

Se plantea que los sedimentos de Puerto Hondo presentarán concentraciones de arsénico y plomo, con mayores valores en zonas intervenidas, pudiendo superar los límites ISQG/TEL y PEL.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estado del arte

En la bahía de Hangzhou, China, Md Abu, Weihua, Genhai, y Belal Hossain (2022) estudiaron la bioacumulación de metales en peces y mariscos de interés comercial. Encontraron concentraciones en orden decreciente de zinc, cobre, arsénico, cromo, cadmio, plomo y mercurio. Aunque la mayoría de los niveles estuvieron dentro de los límites permitidos, se registraron excedencias de arsénico y cadmio en peces, siendo *Portunus trituberculatus* y *Pinctada laevis* las especies con mayor acumulación. El estudio concluyó que los niños son los más vulnerables a los efectos tóxicos y carcinogénicos asociados a la exposición por consumo de estas especies, especialmente debido a arsénico y cadmio.

En el Atlántico Nororiental, Larsen y Hjermann (2022), presentaron el informe OSPAR sobre metales pesados en peces, mariscos y sedimentos, basado en datos recopilados entre 1979 y 2020. Los resultados mostraron que el plomo y el mercurio en biota generalmente excedían los niveles de fondo ambiental, mientras que el cadmio superaba los umbrales en algunas zonas. En los sedimentos, el mercurio y el plomo frecuentemente superaban el Nivel de Rango de Efectos (ERL), aunque el cadmio se mantuvo por debajo. A pesar de prohibiciones establecidas en décadas pasadas, las tendencias temporales reflejaron un aumento de metales en la biota y una disminución en los sedimentos, lo que sugiere una liberación desde éstos hacia el agua. La investigación concluyó que, aunque existen mejoras generales, el mercurio sigue representando un problema significativo en las áreas monitoreadas.

El estudio de Chen, Cai, Zhu, y Wei (2022) analizó la distribución espacial y las fuentes de metales pesados (As, Cu y Mn) en suelos urbanos de Chongqing, China. Se recolectaron 342 muestras superficiales, procesadas mediante digestión ácida y analizadas con ICP-MS. Para generar mapas de contaminación, compararon cuatro métodos de interpolación (kriging, IDW, polinómico local y RBF), identificando que IDW fue el más preciso al capturar la variabilidad local. Mediante regresión categórica y análisis geoespacial, determinaron que la densidad poblacional, la pendiente del terreno y la calidad del agua influyen significativamente en la acumulación de contaminantes, destacando la necesidad de estrategias ambientales preventivas.

En el caso del Perú, Custodio, Fow, De la Cruz, Huarcaya, y Chanamé (2024), evaluaron el riesgo ecológico de metales pesados en sedimentos de los ríos Chía y Miraflores. Mediante análisis con ICP-MS, determinaron que la mayoría de concentraciones estaban por debajo de los valores umbral internacionales. Sin embargo, en el río Miraflores la concentración media de mercurio (1.01 mg/kg) superó tanto la corteza continental como el valor de efecto probable (PEL), mientras que en el río Chía el zinc (120.12 mg/kg) rebasó únicamente la corteza continental. La conclusión fue que, si bien el riesgo ecológico potencial general resultó bajo, ciertos metales como el mercurio en Miraflores representan un alto riesgo de efectos adversos.

En México, Ramírez Ayala, Arguello Pérez, Tintos Gómez, y Mendoza Pérez (2021) analizaron sedimentos en las lagunas costeras de Barra de Navidad (Jalisco) y Cuyutlán (Colima). Las concentraciones de cadmio estuvieron por debajo del nivel de efecto umbral (TEL), pero el arsénico (10,7–25,4 µg/g) superó tanto el TEL como el ERL, mientras que el plomo (42,7–123,9 µg/g) excedió el nivel de efecto probable (PEL) en algunas estaciones. No se detectó mercurio por encima del límite de detección. El estudio concluyó que existe una contaminación relevante por arsénico y plomo en los sedimentos, con mayores concentraciones en las bocas de ambas lagunas.

El estudio de Giarikos et al. (2023) se realizó en el río Danubio inferior, Europa, con el propósito de evaluar el riesgo ecológico asociado a metales pesados en sedimentos. Para ello, se recolectaron muestras superficiales en dos localidades con diferente presión antrópica: WL y RF. Las muestras fueron analizadas en laboratorio para determinar concentraciones de metales como arsénico, plomo, zinc y cadmio, y luego se compararon con los valores TEL y PEL de la Guía Canadiense de Calidad de Sedimentos (ISQG). Los resultados mostraron que en WL un 58 % de las muestras superaba el TEL, mientras que en RF el porcentaje fue de 17 %, lo cual evidenció una clara diferencia atribuida al grado de impacto humano en cada sitio. El trabajo concluyó que la contaminación en los sedimentos está directamente relacionada con las actividades locales y representa un riesgo ecológico diferenciado.

En la zona alta del río Locumba (distrito de Ite, Perú), ubicada entre los 350 y 800 metros sobre el nivel del mar, Apaza et al. (2023) recolectaron muestras de

sedimentos durante las temporadas seca y lluviosa para evaluar la calidad ambiental mediante análisis por espectroscopia de plasma (ICP-OES), conforme a estándares USEPA. Los resultados revelaron concentraciones preocupantes de metales pesados, destacando un promedio de arsénico que superó los 58 ppm, boro con 8,2 ppm, cobre con 372 ppm y plomo con 121 ppm. Se concluyó que la calidad de los sedimentos no es adecuada y representa un riesgo ambiental significativo, afectando potencialmente la biota y los ecosistemas de la región, lo cual se vincula con la intensa actividad agrícola y minera en la subcuenca del río Locumba.

En el río Ramis, sector Achaya–Taraco, Puno (Altiplano sur peruano), Cano Esquinarila y Flores Pino (2021) realizaron un estudio con muestreo durante agosto, septiembre y octubre de 2019 en puntos de efluentes mineros (Poza 01 y Poza 02) y sedimentos (Ramis 01, Ramis 02, Ramis 03). Analizaron metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn) comparándolos con normativas peruanas y canadienses. Los resultados revelaron que las concentraciones de arsénico superaron los valores máximos permitidos, excepto en algunos meses en Poza 01, mientras que los demás metales (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) estuvieron dentro de los límites. Se concluyó que estas concentraciones elevadas de arsénico representan un riesgo ambiental potencial, y se recomienda implementar evaluaciones periódicas para proteger los ecosistemas, la fauna, la flora y la población local.

La investigación de De Cock et al. (2021) se llevó a cabo en el estuario del río Guayas, Ecuador, un sistema estuarino que incluye manglares y zonas de intensa actividad pesquera artesanal. El objetivo fue identificar la presencia de metales pesados a lo largo de la cadena trófica, desde sedimentos hasta organismos de consumo humano. Se recolectaron sedimentos, agua y organismos marinos representativos, que luego fueron analizados en laboratorio para determinar concentraciones de plomo, arsénico, cadmio y mercurio, entre otros. Los valores obtenidos se contrastaron con guías internacionales de calidad de sedimentos (TEL y PEL). Los resultados mostraron que, en algunos sectores, las concentraciones de plomo superaban los valores PEL, lo que implica un riesgo elevado no solo para la biota local, sino también para la salud de las comunidades que dependen de estos recursos como fuente alimenticia y económica.

En Ecuador, Ormaza González F. et al. (2024) evaluaron sedimentos del Estero Salado en Guayaquil y del Canal El Morro como referencia. En la zona urbana del Estero Salado, las concentraciones promedio fueron de 32,3 mg/kg para arsénico, 2,08 mg/kg para cadmio, 41,9 mg/kg para plomo y 0,12 mg/kg para mercurio, con un valor extremo de cadmio (6,08 mg/kg) en el Puente Miraflores. Todos estos resultados excedieron las Guías Canadienses de Calidad de Sedimentos (ISQG), indicando una clara contaminación. En contraste, el Canal El Morro presentó valores bajos en todos los metales. El estudio concluyó que el Estero Salado presenta un grado de contaminación de moderado a extremadamente contaminado, con el orden de riesgo  $As > Cd > Pb > Hg$ , asociado principalmente a fuentes urbanas.

En el trabajo de Maridueña, Fuentes, Guerrero, y Castro (2022) se evaluaron sedimentos, concha prieta y cangrejo rojo en manglares de Esmeraldas, Manabí, Guayas y El Oro. Se halló acumulación de arsénico, cadmio y plomo, con los niveles más altos en El Oro. Los organismos, en especial la hepatopáncreas del cangrejo, mostraron bioacumulación relevante, lo que plantea riesgos para la salud humana y confirma contaminación por actividades humanas en las zonas estuarinas.

## **2.2 Bases científicas y teóricas de la temática**

### **2.2.1 Estuarios.**

De acuerdo con la EPA (2025) un estuario es un cuerpo de agua costera parcialmente cerrado donde el agua dulce de los ríos y arroyos se mezcla con agua salada del océano. Los estuarios, y sus tierras circundantes, son lugares de transición de tierra a mar. Aunque están influenciadas por las mareas, están protegidas de toda la fuerza de las olas oceánicas, vientos y tormentas por formas terrestres como las islas de barrera o las penínsulas. Los ambientes de estuarinos se encuentran entre los más productivos del planeta, creando más materia orgánica cada año que las zonas de tamaño comparable de bosque, pastizales o tierras agrícolas. Las aguas protegidas de los estuarios también apoyan comunidades únicas de plantas y animales especialmente adaptados para la vida al margen del mar. Muchos tipos de hábitats diferentes se encuentran en y alrededor de los estuarios, incluyendo aguas abiertas poco profundas, marismas de agua dulce y de agua salada, pantanos, playas de arena, lodo y arena planos, costas rocosas,

arrecifes de ostras, bosques de manglares, deltas de río, piscinas de margas y camas de pastos marinos.

### **2.2.2 Estero salado.**

El Estero Salado es uno de los estuarios de mayor importancia, ya que forma parte del Golfo de Guayaquil, ubicado en la provincia del Guayas. Se inicia desde la ciudad de Guayaquil y se extiende hacia el suroeste, hasta el canal del Morro y tiene una extensión cerca de 74 km.

Según Córdova (2023), el Estero Salado se encuentra dividido en cuatro zonas que a continuación se describirán en una tabla:

**Tabla 1.**

#### **División del Estero Salado**

<b>Zonas</b>	<b>Descripción de las zonas</b>
I	Esta zona se ubicado en el canal del Morro frente a Posorja
II	La zona desde la línea que une la isla Puná y la camaronera Taipax, en la provincia de Santa Elena y la línea que se encuentra entre el extremo Suroeste de la isla Escalante hasta la fracción media de la isla Palo Santo.
III	Comienza al término de la zona II hasta el Estero “San Francisco” y la zona de Cuarentena. Esta extensión es considerada una zona de transición, además existe un dominio del sector camaronero.
IV	Pertenece al Estero que lindera a la ciudad de Guayaquil desde la zona del Puerto Marítimo hasta las ciudadelas de “Miraflores y Urdesa Norte”.

**Fuente: Córdova, 2023.**

El estudio se centra en el ramal oeste o, mejor conocido como zona III. A continuación, se describe la distribución de la zona a estudiar (Pazmiño, 2021). Ver Anexo 1.

#### **2.2.2.1. Características físicas**

Los estuarios son cuerpos de agua semicerrados que mantienen una conexión con el océano abierto y se caracterizan por una mezcla de agua salada y dulce proveniente de la descarga fluvial. Sus fondos se sumergen periódicamente

debido a la influencia de las mareas, que generan fluctuaciones en la salinidad, la temperatura y la luz solar a lo largo del día y las estaciones.

Según Monserrate y Medina (2011), las condiciones dinámicas obligan a la flora y la fauna a desarrollar adaptaciones específicas, de modo que los sistemas estuarinos son ecosistemas altamente productivos de gran importancia ecológica y económica, que sustentan poblaciones de peces, moluscos y crustáceos de valor comercial que contribuyen al sustento de las comunidades costeras.

Desde una perspectiva físico-ambiental, el estuario presenta corrientes de agua variables, altas tasas de sedimentación y procesos de erosión que afectan directamente la calidad del agua y la estabilidad de los hábitats acuáticos. Estas dinámicas han propiciado la formación de bancos de arena y otros ambientes sedimentarios, pero también han generado alteraciones significativas en algunas ramas del sistema ecológico, especialmente aquellas que atraviesan zonas urbanas (Barros, 2021); a pesar de estas transformaciones, el Estero Salado sigue siendo uno de los principales elementos naturales que caracterizan a la ciudad de Guayaquil, históricamente asociado a actividades recreativas y pesqueras, aunque actualmente enfrenta importantes desafíos ambientales derivados de la actividad humana.

#### **2.2.2.2. Importancia Ecológica.**

El Estero Salado y los esteros que lo conforman presentan flujos y reflujos constantes a lo largo de su recorrido, influenciados por las mareas oceánicas, lo que favorece el desarrollo de una alta biodiversidad de flora y fauna (Rojas, 2019).

El Estero Salado ha experimentado variaciones importantes a lo largo del tiempo, modificando su tamaño no solo por condiciones geomorfológicas, sino también por actividades antropogénicas en el área, lo que ha afectado la calidad de sus aguas. La importancia ecológica que representa para Guayaquil no se limita a sus beneficios naturales, ya que alberga manglares en gran parte de sus zonas, siendo estos el principal componente natural de autolimpieza (Calero, 2010).

Tiene una gran variedad de especies de mangle, seis en total, de los cuales tres son los comúnmente conocidos como mangle rojo (*Rhizophora mangle*, *R. harrisonii*, *R. racemosa*); luego se encuentra mangle jelí (*Conocarpus erectus*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle negro (*Avicennia germinans*). Asimismo, contiene otras formaciones vegetales y fauna (Morocho et al., 2022).

Se ha registrado la presencia de organismos fitoplanctónicos, entre los cuales se encuentran diatomeas céntricas, diatomeas pennadas, dinoflagelados y cianofitas (Cárdenas, 2010).

### **2.2.3 Sedimentos.**

Los sedimentos se pueden dividir en; sedimentos de fondo, siendo estos los que permanecen cubiertos por las aguas y, por último, sedimentos de orilla, los cuales pueden o no haber estado cubierto por agua. Se recalca que en ambos casos se tratan de muestras no estacionarias e inestables, principalmente en los sedimentos de fondo. (Muestreo de Sedimentos Fluviales, 2023)

De acuerdo con Calero (2010) dependiendo del tipo de sedimento encontrado en el fondo del Estero, es la distribución de las actividades bentónicas. Los tipos son los siguientes; Arena, grava, arcilla y limo. Siendo el comúnmente más encontrado el limo-arcilloso.

#### **2.2.3.1. Sedimentos como Indicadores de Contaminación**

Según la (FAO, s.f.) Los sedimentos actúan como sumideros y fuentes secundarias de contaminantes en ecosistemas acuáticos. Dada su naturaleza adsorbente, los metales pesados tienden a unirse a partículas de arcilla, materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso.

Los sedimentos actúan como registros históricos de la contaminación en un cuerpo de agua, ofreciendo una visión a lo largo del tiempo. Las concentraciones de contaminantes en los sedimentos son generalmente más estables y representativas de la polución a largo plazo, a diferencia de las del agua que pueden fluctuar temporalmente. Además, la disponibilidad para la biota es significativa, ya que los organismos bentónicos y los peces demersales están en contacto directo con estos sedimentos, lo que facilita la transferencia trófica de los contaminantes.

### **2.2.4 Metales Pesados.**

Según Heredia (2017) los metales pesados son un grupo de elementos químicos con una densidad relativamente alta (generalmente superior a 5 g/cm<sup>3</sup>) que, a pesar de ser oligoelementos esenciales en bajas concentraciones (como el cobre o el zinc), se convierten en tóxicos cuando superan ciertos umbrales. Arsénico (As) y Plomo (Pb) se consideran metales pesados o metaloides con alto

potencial tóxico y no tienen función biológica conocida en humanos o en la mayoría de los organismos;

### **2.2.5 Arsénico (As)**

De acuerdo con Rodríguez Padilla (2021), el arsénico es un metaloide altamente tóxico y ampliamente distribuido en la corteza terrestre, ocupando el vigésimo lugar en abundancia entre los elementos químicos. Forma parte natural de ciertos minerales y rocas, como la arsenopirita y diversos sulfuros. Mediante procesos de erosión, desintegración y disolución de estas formaciones, el arsénico puede incorporarse a los mantos acuíferos, donde se encuentra principalmente en forma de sales inorgánicas: arsenito (As III) y arsenato (As V), siendo el primero de mayor toxicidad. Debido a que carece de sabor y olor, su presencia en agua potable pasa desapercibida, lo que facilita el consumo inadvertido y la aparición del hidroarsenicismo crónico.

#### **2.2.5.1. Efectos del arsénico en la salud humana.**

La exposición crónica al arsénico, especialmente en su forma inorgánica, representa un serio riesgo para la salud humana. Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016), su ingesta prolongada está asociada con un aumento del riesgo de cáncer de piel, pulmón, hígado, vejiga y vías urinarias. Además, estudios como el de Rodríguez Padilla (2021). resaltan que la exposición tanto ambiental (a través del agua o alimentos contaminados) como ocupacional (en minería y agricultura) se ha vinculado con alteraciones dermatológicas, daño hepático, y un alto potencial carcinogénico, lo que subraya la relevancia de considerar estas fuentes en el análisis médico-legal de intoxicaciones por arsénico.

### **2.2.6 Plomo (Pb)**

Es un metal altamente tóxico que se acumula en sedimentos debido a su baja solubilidad. Puede entrar en la cadena alimentaria a través de la bioturbación y la ingesta por organismos bentónicos. El plomo es un metal pesado, químicamente estable, con propiedades tóxicas para el ser humano y sin ninguna función fisiológica reconocida. Existe en el medio ambiente en tres formas: metal, plomo orgánico e inorgánico, siendo este último la principal fuente ocupacional de exposición (Fonseca, 2021).

### **2.2.6.1. Efectos del plomo en la salud humana.**

Según la OMS (2024), la exposición al plomo representa un riesgo grave para la salud, especialmente en niños, donde incluso niveles bajos pueden provocar daños permanentes en el cerebro, dificultades de aprendizaje y alteraciones del comportamiento., no existe un nivel seguro de plomo en sangre.

El boletín *Lead Safe Texas* (2022) advierte que, en exposiciones elevadas, el plomo puede causar convulsiones, pérdida del control muscular o coma, y que durante el crecimiento interrumpe el desarrollo infantil, originando retrasos, discapacidades de aprendizaje y problemas conductuales que pueden persistir aun cuando los niveles de plomo en el organismo se reduzcan. En adultos, la intoxicación crónica se asocia con hipertensión, enfermedades cardiovasculares, daño renal y complicaciones en el embarazo, como bajo peso al nacer o parto prematuro.

### **2.2.7 Toxicidad y Efectos Biológicos:**

El artículo de Farhan Jamil et al. (2023) revisa la acumulación de metales pesados en peces, sus efectos tóxicos (incluyendo daño renal, hepático, inmunológico y reproductivo), y su relevancia para la salud humana al consumir pescado contaminado.

- **Bioacumulación:** Es la absorción de una sustancia por un organismo más rápidamente de lo que puede eliminarla, resultando en una concentración mayor dentro del organismo que en el medio ambiente.

- **Biomagnificación:** Es el aumento progresivo de la concentración de una sustancia en los tejidos de los organismos a medida que se asciende en los niveles tróficos de una cadena alimentaria.

### **2.2.8 Movilidad de metales pesados en el suelo**

Esta movilidad depende de diversos factores, como el propio suelo, las propiedades del metal y las condiciones ambientales en las que se produce.

Una vez en el suelo, los metales pueden retenerse, pero también pueden incorporarse a las aguas subterráneas mediante diversos procesos químicos y biológicos. La redistribución de estos metales ocurre lentamente, con una rápida retención y una reactividad reducida con el tiempo, lo cual se ve afectado por el tipo de metal, las características del suelo, la fuente de contaminación y la duración de la exposición. (Han y Kingery, 2003)

La metilación es un proceso importante mediante el cual metales como Hg, As, Sb, Se y Sn pueden convertirse en formas metiladas, lo que altera su toxicidad y movilidad. Por ejemplo, las formas de metil-Hg son más tóxicas y pueden transformarse o acumularse en la materia orgánica del suelo y los tejidos biológicos. (Prieto et al., 2009)

Desde la perspectiva del comportamiento de los metales en el suelo, pueden seguir varias vías:

- Permanecen atrapados en diferentes fases del suelo (adsorbidos, precipitados, en sitios de intercambio).
- Son absorbidos por las plantas y entran en las cadenas alimentarias.
- Se volatilizan a la atmósfera.
- Se desplazan en forma líquida a través del agua, alcanzando aguas superficiales o subterráneas (Cruz, 2007).

La dinámica de los metales en el suelo también se ve influenciada por procesos físicos, como la lixiviación por escorrentía, el viento o la infiltración hídrica. La circulación y migración de estos metales en el agua puede ocurrir en diferentes direcciones: ascendente, descendente o lateral, según las condiciones del agua y el perfil del suelo. La acidez del suelo aumenta la movilidad de la mayoría de los metales, la cual aumenta a medida que disminuye el pH. (Anaya-Raymundo et al., 2025)

### **2.2.9 Pesca artesanal**

La pesca artesanal es aquella actividad pesquera realizada a pequeña escala, generalmente con embarcaciones no industrializadas y técnicas tradicionales. “Se caracteriza por el uso de medios manuales o de bajo impacto tecnológico, destinados a la obtención de recursos pesqueros para autoconsumo, comercialización local o subsistencia” (FAO, 2022, pág. 16)

### **2.2.10 Zonas de Pesca Artesanal**

De acuerdo con el estudio de Fernández et al. (2021) las zonas de pesca artesanal representan una fuente de sustento significativa para las comunidades locales. La contaminación en estas áreas tiene implicaciones directas para la seguridad alimentaria y la salud pública de los consumidores. Estas zonas suelen estar ubicadas cerca de áreas urbanas o industriales, haciéndolas particularmente susceptibles a la contaminación por efluentes y descargas no controladas.

### **2.2.11 Digestión ácida asistida por microondas (EPA 3051A o 3050B)**

Según la US EPA (2007) el método 3051A se define como un método de digestión rápida que utiliza ácido nítrico concentrado y energía de microondas para disolver metales presentes en una matriz sólida. Este método está diseñado para reducir el tiempo de preparación de la muestra y mejorar la reproducibilidad analítica, y es compatible con técnicas analíticas como la espectrometría de absorción atómica (AAS), la ICP-OES y la ICP-MS.

Este método requiere un sistema de digestión por microondas con control de temperatura y presión, recipientes de digestión resistentes al ácido (generalmente de TFM o PTFE), una balanza analítica, material de vidrio volumétrico, una campana extractora de gases y reactivos de alta pureza (principalmente ácido nítrico concentrado). Todo el equipo debe mantenerse limpio y libre de contaminación para evitar interferencias con el análisis.

Los controles de calidad incluyen el uso de blancos de reactivos, muestras duplicadas, estándares certificados y muestras fortificadas para evaluar la precisión y exactitud del método analítico. Estos controles verifican la ausencia de contaminación, la eficiencia del proceso de digestión y la fiabilidad de los resultados del análisis de metales.

Este método implica pesar una cantidad fija de muestra seca, añadir ácido nítrico concentrado y digerirla por microondas a temperatura y presión controladas. Tras la digestión, la solución se enfría, se filtra si es necesario y se lleva al volumen requerido para el posterior análisis instrumental de metales.

### **2.2.12 Método de interpolación Inverse Distance Weighting (IDW)**

Es una técnica determinística utilizada en el análisis espacial para estimar valores en puntos no muestreados a partir de un conjunto de datos conocidos. El principio fundamental del IDW es que la influencia de un punto de muestra sobre la estimación de un valor disminuye a medida que aumenta la distancia. En otras palabras, los puntos cercanos tienen mayor peso en la predicción, mientras que los más alejados tienen una influencia menor.

Matemáticamente, el valor estimado en una ubicación desconocida se obtiene como un promedio ponderado de los valores de las muestras cercanas, donde los pesos corresponden al inverso de la distancia elevada a una potencia  $p$ .

Generalmente,  $p=2$  es el más usado, lo que implica que la influencia disminuye cuadráticamente con la distancia. (Wende Chen, 2022)

### **2.2.13 Método de interpolación Kriging**

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio especificado, para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología. (Esri, s.f.)

### **2.2.14 Índice de la geoacarquía**

El índice de geo acumulación ( $I_{geo}$ ) permite realmente evaluar la contaminación comparando las concentraciones actuales y preindustriales utilizadas originalmente con sedimentos de fondo [21]; también se puede aplicar a la evaluación de la contaminación del suelo. El método evalúa el grado de contaminación metálica en términos de siete clases de enriquecimiento partir de los valores numéricos crecientes del índice. (Giarikos, y otros, 2023)

### **2.2.15 Prueba de Shapiro-Wilk**

Según Shapiro y Wilk (1965), la prueba de Shapiro-Wilk compara la distribución observada de los datos con una distribución normal teórica. El estadístico  $W$  mide qué tan bien los datos ordenados se ajustan a los valores esperados de una distribución normal.

- Si los datos siguen una distribución normal, el valor de  $W$  se aproxima a 1.
- Si los datos se desvían de la normalidad,  $W$  disminuye.

La decisión se toma mediante el p-valor:

- Si  $p > 0,05$ , no se rechaza la hipótesis de normalidad.
- Si  $p \leq 0,05$ , se concluye que los datos no siguen una distribución normal.

## 2.3 Marco legal

### 2.3.1 *Constitución de la República del Ecuador (2008)* .

**Art. 12.-** El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.

**Art. 14.-** Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.

**Art. 71.-** La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza.

**Art. 73.-** El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales.

**Art. 404.-** El patrimonio natural del Ecuador único e invaluable comprende, entre otras, las formaciones físicas, biológicas y geológicas cuyo valor desde el punto de vista ambiental, científico, cultural o paisajístico exige su protección, conservación, recuperación y promoción. Su gestión se sujetará a los principios y garantías consagrados en la Constitución y se llevará a cabo de acuerdo al ordenamiento territorial y una zonificación ecológica, de acuerdo con la ley.

**Art. 411.-** El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua.

### 2.3.2 *Guía Canadiense de Calidad de Sedimentos para la Protección de la Vida Acuática (2002)*.

La Guía canadiense de calidad de sedimentos fue realizada por el Consejo Canadiense de ministros del Ambiente como una herramienta para la protección de los ecosistemas acuáticos saludables.

ISQG/TEL: Límites por dejado, donde no se esperan efectos biológicos adversos.

PEL: Son las concentraciones en las cuales los efectos biológicos adversos se encuentran con frecuencia.

En cuanto al cadmio tiene 0.7 mg/Kg para ISQG/TEL y 4.2 - 4.3 mg/Kg para PEL. Plomo: 30.2 mg/Kg (ISQG/TEL) y 112 mg/Kg (PEL). Arsénico: 7.24 mg/kg para ISQG/TEL y 41.6 mg/kg para PEL.

### 2.3.3 *CODIGO ORGANICO DEL AMBIENTE (2018)*

**Art. 1.- Objeto.** Este Código tiene por objeto garantizar el derecho de las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como proteger los derechos de la naturaleza para la realización del buen vivir o *sumak kawsay*.

**Art. 26.-** Facultades de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Provinciales en materia ambiental. 8. Controlar el cumplimiento de los

parámetros ambientales y la aplicación de normas técnicas de los componentes agua, suelo, aire y ruido.

**Art. 198.- Monitoreo y seguimiento de la calidad de sedimentos.** La Autoridad Ambiental Nacional o los Gobiernos Autónomos Descentralizados Competentes, según corresponda, realizarán el seguimiento y monitoreo de la calidad ambiental por medio del análisis de sedimentos, de conformidad con las normas técnicas expedidas para el efecto.

### **2.3.4 Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019)**

#### **Art. 734.- Políticas nacionales oceánicas y costeras.**

- a) Conservar el patrimonio natural y cultural, los ecosistemas y la diversidad biológica de la zona marina y costera.
- b) Prevenir, controlar y mitigar la contaminación de los espacios marítimos nacionales y zonas costeras.
- c) Desarrollar y fomentar la formación, la investigación científica y la innovación tecnológica en los ámbitos oceánicos y marino-costeros.
- d) Reducir la vulnerabilidad y mejorar la adaptación de poblaciones y ecosistemas ante el cambio climático y eventos naturales que afecten a la zona oceánica y marino-costera.
- e) Establecer el ordenamiento territorial oceánico y marino costero para articular las diversas intervenciones humanas de manera coherente, complementaria y sostenible.

#### **Art. 737.- Instrumentos de gestión ambiental marino costera**

Son instrumentos para la gestión ambiental marino costera, entre otros:

- a) Planes de Manejo Costero Integrado.
- b) Planes de Manejo de sitios de importancia para la conservación de la biodiversidad.
- c) Planes de Manejo para los Acuerdos de Uso Sustentable y Custodia de ecosistemas marinos y costeros frágiles, tales como manglar, salitrales, comunidades coralinas, fondos rocosos y arenosos, playas y bajos de pesca.
- d) Planes de ordenamiento y control de pesquerías en la zona marina y marino costera.
- e) Programas y proyectos sostenibles de acuicultura y pesca.

#### **Art. 741.- Alcance del Manejo Costero Integrado.**

El Manejo Costero Integrado es un proceso adaptativo de gestión participativa de recursos naturales costeros y marinos destinado a conservar la biodiversidad marina y costera que incluye ecosistemas, especies y genes, mediante su uso sostenible y para mejorar la calidad de vida de los pobladores.

#### **Art. 748.- Alcance de los Planes de Manejo de la playa de mar y de la franja adyacente.**

- a) Ubicación de áreas de sensibilidad ecológica.
- b) Gestión de residuos y desechos.
- c) Gestión de riesgos y plan de contingencias.

### **2.3.5 Acuerdo Ministerial No. 097-A (2015).**

Anexo N° 2 Del libro VI Del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados.

4.4.2 Criterios de calidad del suelo. - Los criterios de calidad del suelo son valores de fondo aproximados o límites analíticos de detección para un contaminante presente en el suelo. Los valores de fondo se refieren a los niveles ambientales representativos para un contaminante en el suelo. Estos valores pueden ser el resultado de la evolución natural del área, a partir de sus características geológicas, sin influencia de actividades antropogénicas. Los criterios de calidad del suelo constan en la Tabla 1. Resaltando los criterios de plomo con 19 mg/Kg.

### **2.3.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por la Asamblea General de las Naciones Unidas en el año 2015, constituyen un marco global orientado a la protección del medio ambiente, la sostenibilidad de los recursos naturales y el bienestar humano.

En el contexto del presente estudio, enfocado en el análisis de metales pesados en sedimentos de zonas de pesca artesanal, se identifica el ODS 3: Salud y bienestar, a través de la meta 3.9, orienta la reducción de enfermedades asociadas a la exposición a sustancias químicas peligrosas y a la contaminación ambiental. Asimismo, el ODS 6: Agua limpia y saneamiento promueve la gestión sostenible del recurso hídrico y la protección de los ecosistemas acuáticos.

De igual manera, el ODS 14: Vida submarina impulsa la conservación y el uso sostenible de los océanos y recursos marinos, incluyendo la prevención de la contaminación por sustancias peligrosas como los metales pesados.

Finalmente, el ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres, mediante las metas 15.1 y 15.5, fomenta la conservación, restauración y uso sostenible de los ecosistemas, así como la protección de la biodiversidad.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Enfoque de la investigación

El estudio adoptará un enfoque cuantitativo, descriptivo y no experimental, dado que se recopilarán y analizarán datos numéricos de concentraciones de metales pesados sin manipular variables independientes (Escamilla, 2006). El diseño será transversal, pues la recolección de datos se realizará en un único periodo de muestreo, lo que permitirá obtener una fotografía del estado actual de contaminación del estuario (Stewart, 2025).

##### 3.1.1 Tipo de investigación.

Este estudio es de carácter aplicado porque aborda un problema ambiental específico: la posible contaminación por metales pesados en sedimentos del estuario de Puerto Hondo. Según Zúñiga, Palacios, y Cedeño (2023), la investigación aplicada “se centra en la aplicación práctica del conocimiento científico para resolver problemas concretos o mejorar situaciones existentes”. En este caso, los resultados proporcionarán información útil para la gestión local del suelo y el desarrollo de medidas preventivas contra la contaminación por arsénico y plomo.

De acuerdo con Maldonado, Macho, y Casallas (2023), este tipo de investigación parte de fundamentos teóricos previos y se orienta hacia la generación de soluciones con impacto social y ecológico, especialmente en contextos donde las actividades humanas pueden comprometer la calidad del ambiente.

Además, este estudio combinará investigación de campo y de laboratorio. La investigación se realizará directamente en el sitio de estudio, mediante la recolección de muestras in situ, complementada con análisis físico-químicos realizados en un laboratorio acreditado. Este método integrado permitirá la recopilación de datos objetivos y verificables que cumplen con los estándares internacionales de calidad ambiental.

En cuanto a su alcance, este estudio descriptivo busca describir las concentraciones de arsénico y plomo presentes en los sedimentos, sin establecer relaciones causales. Según Stewart (2025), los estudios descriptivos se orientan a detallar las propiedades o condiciones de un fenómeno tal como ocurre en la

realidad, proporcionando una base empírica para futuras investigaciones explicativas o correlacionales.

### **3.1.2 *Diseño de investigación.***

El diseño metodológico será no experimental, entendido como aquel en el que las variables no se manipulan deliberadamente, sino que se observan y analizan tal como ocurren en su entorno natural (Escamilla, 2006). Este tipo de diseño es ideal para la investigación ambiental, cuyo objetivo es evaluar las condiciones ambientales sin alterar las condiciones naturales, asegurando así resultados objetivos y precisos.

Dentro de esta categoría, el estudio adoptará un diseño transversal y descriptivo, pues la recolección de datos se realizará en un único periodo de muestreo. Este diseño permite caracterizar el estado actual de las concentraciones de As y Pb en los sedimentos del estuario y establecer su variabilidad espacial (Stewart, 2025).

La fase de campo contemplará una visita al sitio de estudio, donde se recolectarán 12 muestras individuales de sedimentos superficiales (0–10 cm) distribuidas en cuatro zonas (Z1–Z4) dentro de las zonas de pesca artesanal de camarones y peces. Los puntos serán determinados con coordenadas GPS y seleccionados por criterios de representatividad, accesibilidad y posible influencia antrópica.

Cada muestra se recolectará con una espátula metálica limpia y guantes de látex, y se almacenará en fundas plásticas herméticas a una temperatura inferior a 4 °C hasta su análisis. Se analizará el contenido de arsénico (As) y plomo (Pb) mediante el método de digestión ácida asistida por microondas, de acuerdo con la norma ISO/IEC 17025, en un laboratorio acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE). (Ver anexo 2)

## 3.2 Metodología

### 3.2.1 Variables.

#### 3.2.1.1. Variable independiente.

Puntos de muestreo (coordenadas geográficas).

Sedimentos (mg/kg)

Posibles fuentes de contaminación (Balneario, PTAR, Puerto, Camaronera)

#### 3.2.1.2. Variable dependiente.

Concentración As (mg/Kg)

Concentración Pb (mg/Kg)

### 3.2.2 Matriz de operacionalización de variables

Tabla 2.

#### *Variable Independiente*

Variables	Tipo	Nivel de medida	Descripción
Puntos de muestreo	Cualitativa	Nominal	Ubicación georreferenciada basada en el criterio de los pescadores y observación de campo.
Sedimentos	Cuantitativa	Razón/ Ordinal	Concentración de metales pesados (As y Pb) determinada en muestras de sedimento superficial, expresada en mg/kg.
Posibles fuentes de contaminación	Cualitativa	Nominal	Identificación de descargas, actividades o infraestructuras cercanas que puedan aportar metales pesados al estuario.

Elaborado por: La Autora, 2025

Tabla 3.

#### *Variables Dependientes*

Variables	Tipo	Nivel de medida	Descripción
Concentración de As	Cuantitativa	Razón	mg/kg de arsénico en el sedimento
Concentración de Pb	Cuantitativa	Razón	mg/kg de plomo en el sedimento

Elaborado por: La Autora, 2025

### 3.2.3 Recolección de datos

#### 3.2.3.1. Recursos.

La siguiente tabla detalla los recursos que se emplearán en la investigación, incluyendo tanto el hardware como el software y los materiales necesarios.

**Tabla 4.**

#### **Descripción de los recursos materiales y tecnológicos**

Recursos	Descripción
<b>Materiales y tecnológicos</b>	
Laptop	Búsqueda y almacenamiento de fuentes bibliográficas.
Celular	Para la toma de fotografías.
GPS	Obtener las coordenadas de los puntos de muestreo.
Pendrivel	Para guardar la información referencial.
Pala de hierro	Recolección de sedimentos superficiales.
Espátula	Servirá para recoger las muestras.
Fundas herméticas	Se ocupa para el almacenamiento de la muestra.
Rotulador	Etiquetado de muestras.
Hielera	Transporte de muestras.

Elaborado por: La Autora, 2025

**Tabla 5.**

#### **Descripción de los recursos software utilizados**

Recursos software	Descripción
Word	Creación y edición de documentos.
Excel	Elaboración de tablas y gráficos.
SIG	Ubicación de puntos y elaboración de mapas de interpolación.
R	Procesamiento y análisis estadístico de los datos, incluyendo pruebas de normalidad, comparación entre grupos y generación de gráficos.

Elaborado por: La Autora, 2025

### 3.2.3.2. Métodos y técnicas

#### 3.2.3.2.1. Delimitación y georreferenciación de las zonas de muestreo

##### a) Caracterización del área de estudio y selección de puntos de muestreo:

El área de estudio abarca el estuario de Puerto Hondo, ubicado al suroeste del cantón de Guayaquil, caracterizado por una intensa actividad pesquera artesanal de camarón. El sector está delimitado por elementos naturales, como esteros secundarios, cuerpos de agua estuarinos y amplias áreas de manglares, así como elementos antropogénicos, que incluyen vías de acceso, áreas urbanas cercanas, camaroneras y áreas de uso recreativo, que inciden directamente en la dinámica ambiental del sitio. El ecosistema de manglares en el área de estudio presenta una gran biodiversidad, con cuatro especies principales de manglares presentes: mangle rojo, mangle blanco, mangle negro y mangle picneo. También se han identificado otras especies de plantas asociadas, incluyendo árboles, arbustos y epífitas típicas de este tipo de ecosistema. La fauna del área incluye diversas especies de aves, reptiles, anfibios, crustáceos y algunos mamíferos, con una diversidad particularmente alta de aves residentes y migratorias. (DJEsgaro, 2016)

Según Monserrate Maggi y Medina Carrión (2011) los sedimentos presentes en la región de Puerto Hondo, que forma parte del sistema de manglares del Estero Salado, cerca de la ciudad de Guayaquil, son principalmente de origen litogénico. Estos sedimentos se caracterizan por una mezcla de arcilla, limo y material arcilloso fino, típica de ambientes de manglares con alta carga de materia orgánica y una importante influencia de la sedimentación continental. Estas propiedades sedimentológicas favorecen la retención y acumulación de contaminantes, especialmente metales pesados, lo que constituye un factor crucial para la interpretación de los resultados obtenidos en el análisis de arsénico y plomo en los sedimentos.

Mediante conversaciones informales con pescadores locales, se identificó que la pesca artesanal se extiende a lo largo del estuario, desde Puerto Hondo hasta la estación Tres Bocas, una zona de alta actividad camaronera. La información obtenida en campo sirve de base para delimitar las áreas de estudio,

destacando los sectores donde las comunidades realizan actividades pesqueras y donde existe una mayor exposición a contaminantes.

**Figura 2.**

**Recorrido de pescadores**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

Con base en este contexto y considerando los criterios de representatividad ambiental, accesibilidad, posibles fuentes de contaminación y condiciones de seguridad, se delimitaron cuatro zonas de muestreo (Z1, Z2, Z3 y Z4), siguiendo las directrices metodológicas establecidas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2015) y la Guía de Muestreo de Sedimentos de Ohio (2001).

Dentro de estas zonas se establecieron un total de doce puntos de muestreo distribuidos estratégicamente para captar la variabilidad espacial del estuario. Este diseño permite una cobertura más representativa del área de estudio, facilita la identificación de posibles gradientes de contaminación y contribuye al análisis de la dinámica de las actividades antrópicas, particularmente la actividad pesquera en la zona.

**Figura 3.**  
**Determinación de puntos de muestreo**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

### **b) Protocolo de recolección de muestras**

Las muestras se recolectarán durante los períodos de estiaje y sequía, ya que estas condiciones facilitan el acceso a los sedimentos y minimizan la perturbación por las corrientes. En cada punto de recolección, se recogen los sedimentos superficiales (de 0 a 10 cm de profundidad) con espátulas de plástico limpias o cucharas estériles. Se evita el contacto directo con las manos para evitar la contaminación cruzada. Cada muestra pesa aproximadamente entre 0,5 y 1 kg, suficiente para los análisis fisicoquímicos necesarios (EPA, 2015)

### **c) Conservación, rotulado y transporte**

Las muestras se colocarán en bolsas de plástico herméticas, debidamente etiquetadas con el código del sitio de recolección, las coordenadas, la fecha y el nombre del recolector. Posteriormente, se almacenarán en un contenedor refrigerado con refrigerante a temperaturas inferiores a 4 °C, según las directrices de almacenamiento de la EPA (2015), para minimizar la alteración biogeoquímica del material. El traslado al laboratorio se efectuará el mismo día del muestreo para garantizar la integridad de las muestras.

### **3.2.3.2.2. Determinación de concentraciones de As y Pb en sedimentos**

#### **a) Análisis de laboratorio**

Los análisis se realizarán en el laboratorio ecuatoriano Mérieux NutriSciences, acreditado por el Servicio Ecuatoriano de Acreditación (SAE) según la norma ISO/IEC 17025, lo que garantiza la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos.

En este laboratorio, se utilizará el método de digestión ácida asistida por microondas (EPA 3051A o 3050B) para extraer los metales presentes en los sedimentos, seguido de una determinación instrumental mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS) con un horno de grafito para cuantificar el arsénico (As) y el plomo (Pb). Los resultados se expresarán en miligramos por kilogramo (mg/kg) de peso seco y se compararán con los valores de referencia ISQG/TEL y PEL establecidos por las Directrices Canadienses de Calidad de Sedimentos (2002) para evaluar el nivel de contaminación estuarina.

#### **b) Control de calidad y validación**

El laboratorio deberá incluir blancos, duplicados y muestras fortificadas para verificar la exactitud y precisión de los resultados.

Las concentraciones finales se expresarán en miligramos por kilogramo (mg/kg) en base seca.

#### **c) Comparación con valores de referencia internacionales**

Los resultados obtenidos para arsénico y plomo se compararán con los valores guía de calidad de sedimentos establecidos por la Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2002):

**As:** ISQG/TEL = 7,24 mg/kg; PEL = 41,6 mg/kg

**Pb:** ISQG/TEL = 30,2 mg/kg; PEL = 112 mg/kg

A modo de comparación, podemos determinar si la concentración detectada supera los límites permisibles requeridos para la seguridad de los organismos acuáticos y la pesca en pequeña artesanal.

### **3.2.3.2.3. Modelar la distribución espacial y las implicaciones**

**a) Georreferenciación de puntos de muestreo:** Cada punto de recolección de muestras se georreferenciará mediante un instrumento GPS de alta precisión, con sus coordenadas registradas en el sistema de coordenadas UTM WGS84. Los

datos se integrarán en una base de datos espacial en formato vectorial y se estructurarán mediante el software QGIS/ARGIS.

**b) Ingreso de datos en SIG:** Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, las concentraciones de As y Pb serán asociadas a sus coordenadas correspondientes y cargadas en un software SIG, como QGIS/ARGIS. La información será estructurada en capas vectoriales (puntos) con atributos numéricos.

**Tabla 6.**

**Puntos Georreferenciados**

N. Zonas	Descripción	Coordenadas	
Z1	Orilla del balneario	608510.902	9757613.940
Z2	Cerca de camaronera	608716.96	9757398.63
Z3	Puerto	609295.684	9757430.448
Z4	Ramal del estero	609474.43	9756804.27

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**c) Procesamiento en Sistema de Información Geográfica (SIG):** Las concentraciones de As y Pb obtenidas del laboratorio se asociarán a sus respectivas coordenadas mediante una tabla de atributos dentro de QGIS/ARGIS. Esta información se almacenará como capa de puntos y servirá para generar la visualización espacial de las concentraciones.

**Tabla 7.**

**Resultados de las concentraciones (As/Pb)**

N. Zonas	N. Muestras	Grado de contaminación (mg/kg)
Z1	M1	X1
	M2	X2
	M3	X3
	M4	X4
Z2	M5	X5
	M6	X6
	M7	X7
Z3	M8	X8
	M9	X9

	M10	X10
Z4	M11	X11
	M12	X12

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**d) Interpolación espacial:** Para estimar la variación de los metales en zonas no muestreadas, se aplicará el método Inverse Distance Weighting (IDW), el cual asigna valores a partir de la distancia entre los puntos medidos. Este método resulta adecuado para estudios exploratorios con número limitado de muestras, ya que produce superficies continuas que permiten identificar zonas críticas de acumulación o dispersión (Yunfeng et al., 2011).

**e) Exportación e interpretación:** Los mapas resultantes se exportarán en formato PNG y PDF y se incorporarán al informe técnico. Se analizarán las áreas que superen los umbrales de contaminación permitidos, se identificarán las zonas de riesgo ambiental y se destacarán los posibles patrones de contaminación relacionados con la dinámica hidrológica del estuario.

#### ***3.2.3.2.4. Elaboración de medidas de gestión sobre metales pesados y fuentes de contaminación***

Con base en los resultados de los objetivos mencionados, se elaborarán medidas de gestión para prevenir y mitigar la contaminación por metales pesados en la cuenca. Este plan se desarrollará con un enfoque sistemático, integral y participativo. Identificará las áreas clave de contaminación relacionadas con las actividades humanas, así como las áreas con altas concentraciones de metales pesados, identificadas mediante análisis de laboratorio y evaluaciones de campo.

En este caso, se identifican las posibles fuentes de contaminación combinando observaciones de campo y análisis geoespaciales. Esto permite identificar actividades que pueden contribuir a la contaminación, como vertidos de aguas residuales, actividades industriales y escorrentías agrícolas (Santos et al., 2023). Sin embargo, si las concentraciones de contaminantes no superan los límites máximos permitidos, las medidas priorizarán la prevención y mitigación de posibles impactos. Este se estructurará en tres ejes estratégicos: la gestión y el control de las posibles fuentes de contaminación, la educación ambiental y la sensibilización ciudadana, y las recomendaciones a las autoridades locales para la gestión adecuada de las zonas identificadas (Fernández, 2014).

### **3.2.4 Población y muestra**

#### **3.2.4.1. Población**

La población de estudio consiste en una sección delimitada del estuario de Puerto Hondo, ubicada al suroeste del cantón de Guayaquil, provincia del Guayas, con una longitud aproximada de 2054,54 metros lineales. Esta sección incluye el cauce principal y las áreas adyacentes de influencia directa donde se desarrollan actividades humanas, como la pesca artesanal, el tráfico fluvial y la infraestructura cercana. Dentro de esta longitud total, se identificaron cuatro zonas de estudio, considerando criterios de representatividad ambiental, accesibilidad, seguridad y posible presencia de fuentes de contaminación. La selección de los doce puntos de muestreo se realizó mediante un muestreo no probabilístico, priorizando los sectores con mayor interacción entre la dinámica estuarina y las actividades humanas.

#### **3.2.4.2. Muestra**

Para el presente estudio se recolectarán 12 muestras de sedimentos superficiales distribuidas en cuatro zonas (Z1, Z2, Z3 y Z4) dentro del estuario de Puerto Hondo, seleccionadas con base en criterios de representatividad ambiental, accesibilidad y presión antrópica, conforme a los lineamientos establecidos por la Environmental Protection Agency (EPA, 2015) y el Ohio Sediment Sampling Guide (2001).

Se tomarán muestras individuales separadas entre 50 y 100 metros entre sí, dentro de la capa superficial de 0 a 10 cm de profundidad. Esta distancia permitirá evaluar la variabilidad espacial del sedimento dentro de cada zona de pesca artesanal y obtener una cobertura representativa del estuario. Cada muestra tendrá un peso aproximado de 0.5-1 Kg de sedimento húmedo.

La recolección se realizará utilizando espátulas plásticas limpias y guantes de látex, evitando el contacto directo con los sedimentos para prevenir contaminación cruzada. Las muestras serán rotuladas, almacenadas en fundas plásticas herméticas y conservadas en una hielera con refrigerante a temperaturas inferiores a 4 °C, conforme a las recomendaciones de preservación de la EPA (2015), hasta su entrega en el laboratorio Mérieux NutriSciences Ecuador, acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) bajo la norma ISO/IEC 17025.

En dicho laboratorio se procederá a la determinación de arsénico (As) y plomo (Pb) en base seca, aplicando el método de digestión ácida asistida por microondas y análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS).

### **3.2.5 Análisis estadístico**

El análisis estadístico se centrará en los datos obtenidos de la determinación de las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos superficiales recolectados en el estuario de Puerto Hondo, con el fin de evaluar el nivel de contaminación, la relación entre los metales y su distribución espacial. Los resultados del laboratorio se ingresarán en Microsoft Excel para el procesamiento estadístico y en QGIS/ARGIS para el análisis geoespacial.

#### **3.2.5.1. Interpretación y análisis de los resultados de laboratorio**

Una vez que el laboratorio entregue los resultados de las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb), se procederá a realizar un análisis estadístico descriptivo.

Para caracterizar los niveles de contaminación, se aplicarán estadísticos descriptivos básicos: media muestral, desviación estándar, y rango, los cuales permitirán cuantificar la magnitud y variabilidad de las concentraciones.

**Ecuación 1** Fórmula para calcular la media muestral

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

**Fuente: OpenStax (2025)**

**Ecuación 2** Fórmula para calcular la desviación estándar muestral

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

**Fuente: OpenStax (2025)**

Donde

- x = media o promedio.
- s= desviación estándar.
- xi= valor individual de concentración en cada muestra.
- n= número de muestras analizadas.

Estos resultados permitirán describir los niveles de contaminación y compararlos con normas ambientales de referencia. (Hernández et al. 2014)

### 3.2.5.2. Prueba de normalidad

Se evaluará la distribución de los datos mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, la cual contrasta la hipótesis nula de que una muestra proviene de una población con distribución normal. Este método compara los valores observados con los valores esperados de una distribución normal teórica, permitiendo identificar desviaciones respecto a la normalidad. Si el valor de significancia es menor al nivel establecido ( $p \leq 0,05$ ), se rechaza la hipótesis de normalidad y se concluye que los datos no siguen una distribución normal. A partir de este resultado, se seleccionará el método estadístico más adecuado para comparar las concentraciones de arsénico y plomo entre las zonas de muestreo.

### 3.2.5.3. Prueba de Shapiro-Wilk

La prueba de Shapiro-Wilk evalúa si una muestra proviene de una población con distribución normal. El estadístico de prueba  $W$  se calcula mediante la siguiente ecuación:

#### Ecuación 3. Formula de la prueba de Shapiro-Wilk

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

**Fuente: (Shapiro y Wilk, 1965)**

Donde:

- $W$  = estadístico de la prueba de Shapiro-Wilk
- $x_{(i)}$  = valores ordenados de la muestra (de menor a mayor)
- $x_i$  = valores observados de la muestra
- $\bar{x}$  = media de la muestra
- $a_i$  = coeficientes constantes calculados a partir de los valores esperados de una distribución normal
- $n$  = tamaño de la muestra

### 3.2.5.4. Prueba de hipótesis

Para evaluar las posibles diferencias en las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) entre las distintas zonas de muestreo, primero se analizará la normalidad de los datos.

En caso de que los datos presenten una distribución normal, se aplicará la prueba paramétrica de Análisis de Varianza de una vía (ANOVA), con el fin de

comparar las medias de concentración entre las zonas de muestreo. Para esta prueba, las hipótesis planteadas serán las siguientes:

**Hipótesis nula ( $H_0$ ):** Todas las medias de concentración de los grupos son iguales.

**Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):** Al menos un grupo presenta una media de concentración diferente.

Por otro lado, si los datos no presentan una distribución normal, se aplicará la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, la cual permite comparar las medianas de concentración entre las zonas de muestreo. Para esta prueba, las hipótesis planteadas serán las siguientes:

**Hipótesis nula ( $H_0$ ):** Las medianas de concentración de arsénico o plomo son iguales en todas las zonas de muestreo.

**Hipótesis alternativa ( $H_1$ ):** Al menos una zona presenta una mediana de concentración de arsénico o plomo diferente a las demás.

El criterio de decisión se establecerá con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ . Cuando el valor p sea inferior a 0,05, se rechazará la hipótesis nula ( $H_0$ ), concluyendo que existen diferencias estadísticamente significativas entre las zonas evaluadas. Por el contrario, cuando el valor p sea superior a 0,05, no se rechazará la hipótesis nula, lo que indicará que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las zonas de muestreo.

En caso de que la prueba estadística aplicada indique la existencia de diferencias significativas entre las zonas, se realizará una prueba post hoc de comparación múltiple para identificar específicamente entre qué zonas se presentan dichas diferencias. Si se aplica ANOVA y se cumplen los supuestos correspondientes, se utilizará la prueba de Tukey, especialmente cuando las varianzas entre grupos sean homogéneas. En cambio, si se aplica la prueba de Kruskal-Wallis, se utilizará la prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni, considerada una alternativa adecuada para comparaciones múltiples en pruebas no paramétricas.

### **3.2.5.5. Índice de Geoacumulación (Igeo)**

El Índice de Geoacumulación (Müller, 1969) permite determinar el grado de contaminación de los sedimentos al comparar la concentración observada con el valor de fondo natural del metal

#### Ecuación 4. Índice de la geoacumulación

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n} \quad (4)$$

Fuente: Giarikos et al. (2023)

Donde:

- $C_n$ : es la concentración del metal medido en el sedimento.
- $B_n$ : es la concentración de fondo (valor de referencia) del metal.

El factor 1.5 se utiliza como una corrección por la posible variación de las concentraciones de fondo debido a efectos litológicos (diferencias en la composición de la roca).

**Tabla 8. Índice de geoacumulación ( $I_{geo}$ ) para los niveles de contaminación en el suelo**

Clase	Intervalo de $I_{geo}$	Nivel de contaminación
0	$I_{geo} \leq 0$	Sin contaminación
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	Sin contaminados/moderadamente contaminados
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderadamente/fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	Fuerte/extremadamente contaminado
6	$I_{geo} > 5$	Extremadamente contaminado

Fuente: Giarikos et al. (2023)

#### 3.2.5.6. Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI)

El Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI) propuesto por Hakanson (1980) se usará para evaluar el riesgo ambiental total asociado a la presencia de As y Pb.

#### Ecuación 5. Riesgo ecológico por metal

$$E_r^i = T_r^i * \frac{C_n}{B_n} \quad (5)$$

Fuente: Custodio et al. (2024)

**Ecuación 6. Riesgo ecológico potencial total**

$$RI = \sum E_r^i \quad (6)$$

**Fuente: Hakanson (1980)**

Donde:

- $T_r^i$ : factor de respuesta tóxica (Pb = 5; As = 10).
- Cn: concentración medida,
- Bn: concentración de fondo.

Interpretación del RI:

- $RI < 150 \rightarrow$  Riesgo bajo
- $150 \leq RI < 300 \rightarrow$  Riesgo moderado
- $300 \leq RI < 600 \rightarrow$  Riesgo considerable
- $RI \geq 600 \rightarrow$  Riesgo muy alto

**3.2.5.7. Interpolación espacial (IDW)**

Para analizar la distribución espacial de los metales, se aplicará el método de Interpolación por Inverso de la Distancia (IDW), que estima la concentración en áreas no muestreadas según la proximidad a los puntos medidos.

**Ecuación 7. Fórmula para estimar un valor en  $x_0$  mediante IDW con potencia ppp**

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i)}{d(x_0, x_i)^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}} \quad (7)$$

**Fuente: ArcGIS Pro (s.f.)**

Donde:

- $Z(x_0)$  = valor estimado en el punto  $x_0$ .
- $Z(x_i)$  = valor medido en el punto  $i$ .
- $d(x_0, x_i)$  = distancia entre  $x_0$  y  $x_i$
- $p$  = potencia (usualmente 2).

Este método se escoge por su sencillez y efectividad para estudios ambientales con muestras limitadas. Los mapas generados permitirán identificar las zonas críticas de acumulación de metales pesados y compararlas con las áreas

de pesca artesanal, aportando evidencia visual para la toma de decisiones. (Chen et al. 2022)

### 3.2.5.8. La fórmula de kriging

El método kriging es similar al de IDW en que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

#### Ecuación 8. Fórmula de kriging

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (8)$$

**Fuente: (Esri, s.f.)**

**Donde:**

- $Z(s_i)$  = valor medido en la ubicación n.º i
- $\lambda_i$  = peso desconocido para el valor medido en la ubicación n.º i
- $s_0$  = ubicación de la predicción
- $N$  = número de valores medidos

### 3.2.5.9. Fórmula de la media del error

El Error Absoluto Medio (MAE, por sus siglas en inglés) es una medida de los errores entre observaciones pareadas que expresan el mismo fenómeno. Es un método para medir qué tan cercanos están los pronósticos o predicciones a los resultados finales.

#### Ecuación 9. Fórmula de la media del error

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (9)$$

**Fuente: (Rico, 2022)**

**Donde:**

- $n$  = es el número total de observaciones o puntos de datos
- $y_i$  = es el valor real
- $\hat{y}_i$  = es el valor predicho

### 3.2.5.10. Fórmula del error de cuadrado medio de la raíz

El error de cuadrado medio de la raíz (RMSE) se utiliza ampliamente como medida de rendimiento en la predicción de movimiento continuo. Mide la diferencia promedio de los puntos de datos reales de los valores predichos, y la diferencia es cuadrada para evitar la cancelación de valores positivos y negativos, mientras se resumen

#### Ecuación 10. Fórmula del error de cuadrado medio de la raíz (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\hat{y}_t - y_t^2}{n}} \quad (10)$$

**Fuente:** (Luzheng y Cuntai, 2019)

**Donde:**

- $n$ = es el número total de observaciones o puntos de datos
- $y_t$ =es el valor real
- $\hat{y}_t$ = es el valor estimado

### 3.2.5.11. Modelo KNN (K-Nearest Neighbors)

El modelo KNN (K-Nearest Neighbors) de regresión es un algoritmo de aprendizaje supervisado que predice valores continuos promediando las etiquetas de los K ejemplos más cercanos en el espacio de características. Utiliza métricas de distancia (euclidiana, Manhattan) para medir la proximidad y es versátil, aunque sensible a la escala de datos y al ruido (HOLMAN, 2023).

En el presente estudio, se utilizará un modelo KNN de regresión implementado en el software ArcGIS, con el objetivo de predecir espacialmente las concentraciones de metales pesados en zonas no muestreadas, a partir de la similitud entre puntos de muestreo cercanos.

### 3.2.5.12. Comparación normativa

Los resultados obtenidos se contrastarán con los valores guía de la *Canadian Sediment Quality Guidelines (2002)*.

Tabla 9.

**Comparación de los resultados obtenido en plomo con la Guía Internacional Canadiense**

Zona	Concentración de plomo (mg/kg)	Guía internacional canadiense			
		ISQG/TEL (mg/Kg)	Cumplimiento	PEL (mg/Kg)	Cumplimiento
Z1	X1	30.2	SI/NO	112	SI/NO
Z2	X2	30.2	SI/NO	112	SI/NO
Z3	X3	30.2	SI/NO	112	SI/NO
Z4	X4	30.2	SI/NO	112	SI/NO

Elaborado por: La Autora, 2025

Tabla 10.

**Comparación de los resultados obtenido en arsénico con la Guía Internacional Canadiense**

Zona	Concentración de Arsénico (mg/kg)	Guía internacional canadiense			
		ISQG/TEL (mg/Kg)	Cumplimiento	PEL (mg/Kg)	Cumplimiento
Z1	X1	7.24	SI/NO	41.6	SI/NO
Z2	X2	7.24	SI/NO	41.6	SI/NO
Z3	X3	7.24	SI/NO	41.6	SI/NO
Z4	X4	7.24	SI/NO	41.6	SI/NO

Elaborado por: La Autora, 2025

### 3.3 Cronograma de actividades

(Ver Apéndice N° 1)

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Determinación de las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) en sedimentos superficiales mediante análisis de laboratorio y comparación con valores de referencia internacionales (ISQG/TEL-PEL)

#### 4.1.1 Inspección in-situ al área.

Durante la fase de campo se recolectaron doce muestras de sedimento distribuidas en cuatro zonas (1–4), cada una subdividida en tres puntos (A, B y C). La selección de los puntos se realizó mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando la accesibilidad durante marea baja, la seguridad del personal y la identificación de áreas con potencial influencia antrópica, tales como el puerto, la camaronera y la planta de tratamiento de aguas residuales. La recolección se efectuó mediante una draga manual (“draga casera”), lo que permitió extraer sedimento superficial durante condiciones de mínima turbulencia.

#### **Tabla 11.**

#### ***Puntos de muestreo preliminares y observaciones de campo***

<b>Punto</b>	<b>Coordenadas (UTM 17M)</b>	<b>Descripción del sitio</b>
1	608432 E – 9757545 N	Manglar cerrado; sedimento oscuro y fino; olor moderado.
2	608537 E – 9757632 N	Cerca del balneario y PTAR; tubería de descarga; olor fuerte.
3	608577 E – 9757550 N	Área somera; sedimento marrón oscuro; restos vegetales.
4	608654 E – 9757438 N	Manglar denso; mancha blanca atribuida a camaronera; olor fuerte.
5	608797 E – 9757353 N	Zona semiexpuesta; lodo arcilloso; olor leve.
6	608876 E – 9757376 N	Interior del estero; sedimento oscuro y denso; olor moderado.
7	609090 E – 9757505 N	Próximo al puerto; sedimento muy oscuro; olor fuerte.
8	609207 E – 9757378 N	Influencia portuaria; sedimento fangoso; olor intenso.
9	609463 E – 9757273 N	Esteros angostos; sedimento oscuro espeso; olor fuerte.
10	609449 E – 9756814 N	Sedimento muy oscuro; olor marcado; ostiones muertos visibles.
11	609540 E – 9756787 N	Mejor circulación de agua; lodo marrón claro; sin olor desagradable.
12	609390 E – 9756672 N	Cercano a camaronera; sedimento oscuro; olor fuerte.

**Elaborado por: La Autora, 2025.**

#### 4.1.2 Georreferenciación de los puntos de muestreo.

Una vez seleccionados los puntos se procedió al uso de una herramienta SIG la cual nos permitió georreferenciar las coordenadas tomadas por el GPS para una mejor percepción de la zona a estudiar.

**Figura 4.**

#### Puntos de muestreo georreferenciados



**Elaborado por: La Autora, 2025.**

Los puntos mostraron diferencias notables en la coloración y el olor del sedimento. En los puntos 7, 8, 9, 10 y 12 así como en 3, 4 y 6, el sedimento presentó un color oscuro y un olor fuerte, lo que sugiere condiciones reductoras y posible acumulación de materia orgánica, fenómenos asociados a zonas impactadas por descargas domésticas o acuícolas (Santos et al., 2023). En el punto 10, se observó además presencia de ostiones muertos adheridos a raíces de manglar, lo que constituye un indicador biológico de estrés ambiental. En contraste, el punto 11 presentó lodo marrón claro y ausencia de olor desagradable, lo cual sugiere mejores condiciones de oxigenación y menor influencia antrópica.

En el punto 3, se identificó una tubería que, según moradores del sector, corresponde a la descarga de la planta de tratamiento. Este punto coincidió con uno de los sedimentos más oscuros y con olor más intenso. En 4, el pescador responsable del traslado reportó la presencia recurrente de una mancha blanca atribuida a la camaronera colindante, lo cual fue visible durante la recolección.

Las coordenadas exactas y observaciones de campo de cada punto se presentan en la Tabla 11.

Las doce muestras recolectadas en Puerto Hondo fueron analizadas en el laboratorio Mérieux NutriSciences Ecuador, acreditado por el SAE. Se determinó la concentración de arsénico (As) y plomo (Pb) en base seca, y los resultados fueron comparados con los valores TEL (*Threshold Effect Level*) y PEL (*Probable Effect Level*) establecidos por la *Canadian Sediment Quality Guidelines* (CCME, 2002).

#### 4.1.3 Caracterización general y resultados del muestreo

**Tabla 12.**

##### **Resultados de concentraciones de As y Pb en sedimentos superficiales**

Zonas	Muestra	Arsénico (mg/kg)	Plomo (mg/kg)
Z1	1	5,07	7,46
	2	5,07	14,8
	3	4,02	6,17
	4	4,37	6,32
Z2	5	5,23	5,84
	6	5,11	5,57
	7	3,33	4,24
Z3	8	2,96	4,15
	9	1,41	3,76
Z4	10	6,58	3,72
	11	1,27	4,27
	12	1,72	4,19

Elaborado por: La Autora, 2025.

#### 4.1.4 Concentración de plomo.

**Tabla 13.**

**Comparación de los resultados obtenidos en plomo con la Guía Internacional Canadiense**

Zonas	Puntos	Concentración de plomo (mg/kg)	Guía Internacional Canadiense		
			ISQG/TEL (mg/kg)	Cumplimiento	PEL (mg/kg)
Z1	1	7,46	30.2	SÍ	112
	2	14,8	30.2	SÍ	112
	3	6,17	30.2	SÍ	112
	4	6,32	30.2	SÍ	112
Z2	5	5,84	30.2	SÍ	112
	6	5,57	30.2	SÍ	112
	7	4,24	30.2	SÍ	112
Z3	8	4,15	30.2	SÍ	112
	9	3,76	30.2	SÍ	112
	10	3,72	30.2	SÍ	112
Z4	11	4,27	30.2	SÍ	112
	12	4,19	30.2	SÍ	112

Elaborado por: La Autora, 2025.

#### 4.1.5 Concentración de plomo.

**Tabla 14.**

**Comparación de los resultados obtenidos en arsénico con la Guía Internacional Canadiense**

Zonas	Puntos	Concentración de arsénico (mg/kg)	Guía Internacional Canadiense		
			ISQG/TEL (mg/kg)	Cumplimiento	PEL (mg/kg)
Z1	1	5,07	7.24	SÍ	41.6
	2	5,07	7.24	SÍ	41.6
	3	4,02	7.24	SÍ	41.6
	4	4,37	7.24	SÍ	41.6
Z2	5	5,23	7.24	SÍ	41.6
	6	5,11	7.24	SÍ	41.6
	7	3,33	7.24	SÍ	41.6
Z3	8	2,96	7.24	SÍ	41.6
	9	1,41	7.24	SÍ	41.6
	10	6,58	7.24	SÍ	41.6
Z4	11	1,27	7.24	SÍ	41.6
	12	1,72	7.24	SÍ	41.6

Elaborado por: La Autora, 2025.

**Tabla 15.****Comparación con valores de referencia TEL–PEL (CCME, 2002)**

Metal	ISQG/TEL (mg/kg)	PEL (mg/kg)
Arsénico (As)	7.24	41.6
Plomo (Pb)	30.2	112

Nota: ISQG/TEL: Límites por dejado, donde no se esperan efectos biológicos adversos. PEL: Son las concentraciones en las cuales los efectos biológicos adversos se encuentran con frecuencia.

**Fuente: (Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, 2002), Elaborado por: La Autora, 2025**

El análisis individual de las doce muestras indicó que ninguna superó los valores guía ISQG/TEL ni PEL para arsénico (As) y plomo (Pb), lo que sugiere que, de acuerdo con la normativa canadiense, no se evidenciaron efectos adversos probables sobre los organismos bentónicos en los sedimentos evaluados.

No obstante, se identificaron variaciones espaciales relevantes entre muestras. En el punto P2, se registró la mayor concentración de plomo (14,80 mg/kg), coincidiendo con un sector cercano al balneario y a la planta de tratamiento de aguas residuales, donde durante el muestreo se percibieron olores intensos en el sedimento. De forma similar, en el punto P10, ubicado próximo a la camaronera, se registró la concentración más alta de arsénico (6,58 mg/kg), asociada a sedimentos muy oscuros y a la presencia de ostiones muertos observada en campo.

En contraste, las muestras P9 y P11, localizadas en sectores más alejados de las principales actividades antrópicas, presentaron las concentraciones más bajas de arsénico (1,41 y 1,27 mg/kg, respectivamente) y valores de plomo relativamente menores, lo cual coincide con condiciones físicas más favorables, como ausencia de olores fuertes y sedimentos de coloración marrón.

**4.1.6 Estadísticos descriptivos de las concentraciones de metales pesados****Tabla 16.****Estadísticos descriptivos de las concentraciones de Arsénico (mg/kg)**

Zona	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Z1	4.72	5.07	4.02	5.07	0.61
Z2	4.90	5.11	4.37	5.23	0.46
Z3	2.57	2.96	1.41	3.33	1.01
Z4	3.19	1.72	1.27	6.58	2.97

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Las concentraciones de arsénico fueron más altas en las zonas 1 y 2, con valores promedio cercanos a 5 mg/kg y baja dispersión de datos. La zona 3 mostró concentraciones más bajas, con un promedio de aproximadamente 2,57 mg/kg. La zona 4 presentó mayores fluctuaciones, con la mayor desviación estándar y un valor máximo significativamente superior al de otras observaciones.

**Tabla 17.**

***Estadísticos descriptivos de las concentraciones de Plomo (mg/kg)***

<b>Zona</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desviación estándar</b>
Z1	9.48	7.46	6.17	14.80	4.69
Z2	5.91	5.84	5.57	6.32	0.38
Z3	4.05	4.15	3.76	4.24	0.25
Z4	4.06	4.19	3.72	4.27	0.30

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Las concentraciones de plomo fueron más altas en la Zona 1 y fluctuaron significativamente en comparación con otras zonas. Las concentraciones de plomo en las Zonas 2, 3 y 4 fueron menores y relativamente uniformes, con desviaciones estándar menores.

#### **4.1.7 Índice de Geoacumulación (Igeo)**

Con el fin de evaluar el grado de contaminación de los sedimentos superficiales por arsénico (As) y plomo (Pb), se aplicó el Índice de Geoacumulación (Igeo), propuesto originalmente por Müller (1969). Este índice permite comparar la concentración medida de un metal en el sedimento con su concentración de fondo natural, incorporando un factor de corrección para variaciones litológicas, y es ampliamente utilizado en estudios de contaminación de sedimentos marinos y estuarinos.

##### **4.1.7.1. Valores de fondo utilizados**

Dado que Ecuador no dispone de valores oficiales de fondo geoquímico para sedimentos marinos o estuarinos, se emplearon valores de referencia internacionales ampliamente aceptados en la literatura científica. En este estudio se adoptaron los valores de fondo propuestos por (Turekian y Wedepohl, 1961), correspondientes a la composición promedio de lutitas (*average shale*), los cuales han sido utilizados de forma consistente en evaluaciones de contaminación sedimentaria a nivel global.

Tabla 18.

## Valores de fondo utilizados

Metal	Valor de fondo (Bn)	Unidad	Material de referencia
Arsénico (As)	13	mg/kg	(average shale)
Plomo (Pb)	20	mg/kg	(average shale)

Fuente: (Turekian y Wedepohl, 1961), Elaborado por: La Autora, 2025

## 4.1.7.2. Resultados del Igeo

El índice se calculó de manera individual para cada muestra (1–12), utilizando las concentraciones reales obtenidas en laboratorio.

Tabla 19.

## Índice de Geoacumulación (Igeo)

Zonas	Igeo As	Clase	Igeo Pb	Clase
Z1	-2,05	0	-1,66	0
Z2	-1,99	0	-2,34	0
Z3	-2,93	0	-2,89	0
Z4	-2,61	0	-2,88	0

Elaborado por: La Autora, 2025

Los valores de Igeo resultaron menores o iguales a 0 tanto para arsénico como para plomo en los cuatro puntos de muestreo.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Müller (1969), estos valores corresponden a la Clase 0 ( $I_{geo} \leq 0$ ), lo que indica que los sedimentos analizados se clasifican como incontaminados por As y Pb. Este resultado fue consistente en todos los puntos evaluados, incluso en aquellos donde se observaron condiciones físicas particulares del sedimento, como coloración oscura u olores intensos.

## 4.1.8 Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI)

Con el propósito de evaluar el riesgo ecológico potencial asociado a la presencia conjunta de arsénico y plomo en los sedimentos, se aplicó el Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI), desarrollado por (Hakason, 1979). Este índice integra la concentración del metal, su valor de fondo y su toxicidad relativa, permitiendo una evaluación más completa del posible impacto ambiental que la simple comparación con normas de calidad.

**Tabla 20.**

**Valores sedimentológico-toxicológicos (Sti) para las ocho sustancias incluidas en el enfoque del índice de riesgo**

Substance	St-value
As	10
Pb	5

**Fuente: (Hakason, 1979), Elaborado por: La Autora, 2025**

#### **4.1.8.1. Resultados del RI**

Al aplicar el modelo a las concentraciones medidas en las doce muestras, los valores del índice RI resultaron inferiores a 150 en todos los puntos evaluados. Según la clasificación de (Hakason, 1979), estos valores corresponden a un riesgo ecológico bajo.

**Tabla 21.**

**Índice de Riesgo Ecológico Potencial (RI)**

Zona	$E_r(\text{As})$	$E_r(\text{Pb})$	$RI = E_r(\text{As}) + E_r(\text{Pb})$	Interpretación RI
Z1	3,63	2,37	6,00	Riesgo bajo
Z2	3,77	1,48	5,25	Riesgo bajo
Z3	1,98	1,01	2,99	Riesgo bajo
Z4	2,45	1,01	3,47	Riesgo bajo

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Este resultado indica que, considerando simultáneamente la concentración, el valor de fondo y la toxicidad relativa del arsénico y el plomo, no se evidenció un riesgo ecológico significativo para los organismos asociados al sedimento en el estuario de Puerto Hondo durante el período de estudio.

Cabe destacar que, aunque en ciertos puntos se observaron indicios físicos de influencia antrópica (olor fuerte, sedimento oscuro, presencia de organismos muertos), dichos factores no se tradujeron en niveles de riesgo ecológico elevados desde el punto de vista geoquímico, lo que refuerza la importancia de integrar observaciones de campo con herramientas cuantitativas de evaluación ambiental.

#### **4.1.9 Prueba de Normalidad**

Para evaluar la distribución de los datos y determinar el tipo de análisis estadístico apropiado, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk sobre las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) obtenidas de sedimentos superficiales.

**Tabla 22.**

**Resultados de la prueba de normalidad Shapiro-Wilk para las concentraciones de metales pesados.**

<b>Variable</b>	<b>Estadístico W</b>	<b>p-valor</b>	<b>Distribución</b>
Plomo (Pb)	0.67172	0.0004562	No normal
Arsénico (As)	0.92568	0.3365	Normal

**Elaborado por: La Autora, 2025**

La prueba de Shapiro-Wilk mostró que las concentraciones de plomo presentaron una distribución no normal ( $p \leq 0,05$ ), mientras que las concentraciones de arsénico presentaron una distribución normal ( $p > 0,05$ ). Dado que al menos una variable no cumplía el supuesto de normalidad, se optó por un método no paramétrico para las comparaciones intergrupales.

Debido a que al menos una de las variables no cumple con el supuesto de normalidad, se optó por emplear un método estadístico no paramétrico para comparar las concentraciones entre las zonas de muestreo.

#### **4.1.10 Comparación de concentraciones entre zonas**

##### **4.1.10.1. Distribución de plomo por zona**

Debido a que las concentraciones de plomo (Pb) no presentaron una distribución normal, según la prueba de Shapiro-Wilk previamente realizada, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

**Tabla 23.**

**Resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para para las concentraciones de plomo.**

<b>Variable evaluada</b>	<b>Chi-cuadrado</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>p-valor</b>	<b>Nivel de significancia</b>	<b>Decisión estadística</b>
Plomo (Pb)	8,9487	3	0,02998	0,05	Se rechaza $H_0$

**Elaborado por: La Autora, 2025**

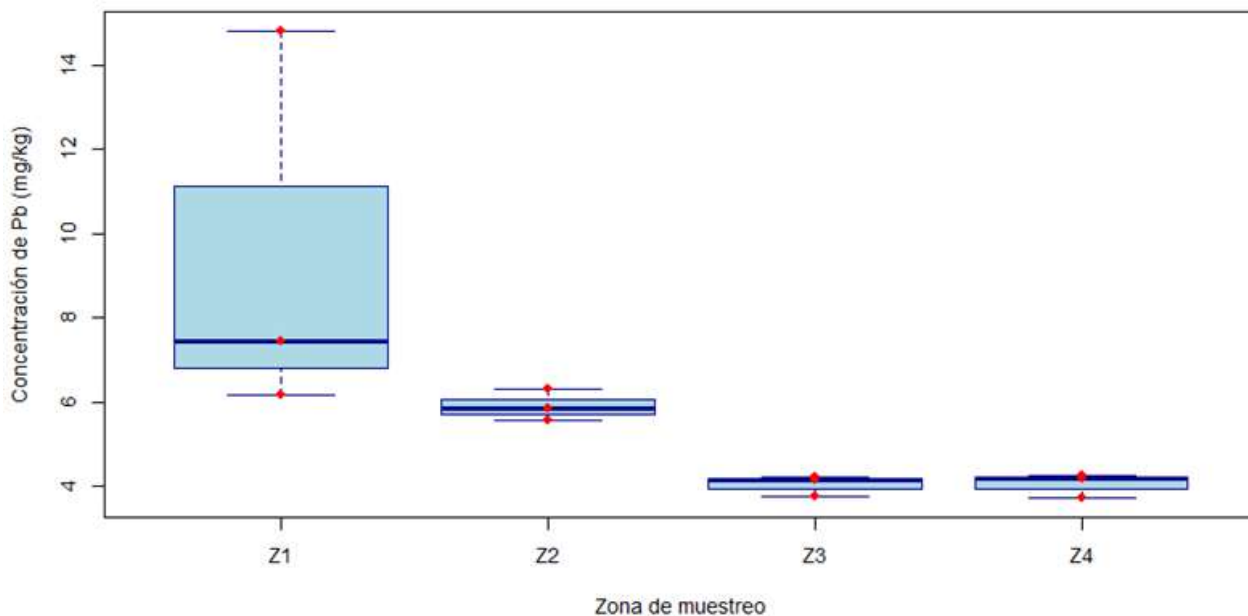
Dado que el p-valor obtenido es menor que el nivel de significancia establecido:  $p = 0,02998 < \alpha = 0,05$  se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ). Esto indica que existen diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de plomo entre las zonas de muestreo.

Por lo tanto, se concluye que las concentraciones de Pb no se distribuyen de manera homogénea entre las zonas evaluadas. Al menos una de las zonas

presenta una mediana de concentración diferente respecto a las demás. Esta diferencia se relaciona principalmente con los valores más elevados registrados en la Zona 1.

### Figura 5.

#### Concentración de plomo por zona de muestreo



#### Elaborado por: La Autora, 2025

El diagrama de caja muestra que la Zona 1 presenta las concentraciones de plomo más altas y una mayor variabilidad en comparación con las demás zonas. El valor máximo es de 14,80 mg/kg, mientras que las zonas Z3 y Z4 presentan concentraciones más bajas y uniformes, de alrededor de 4 mg/kg. La zona 2 presenta valores intermedios.

Los puntos rojos corresponden a los valores individuales de concentración de plomo medidos en cada muestra. Estos puntos permiten observar la distribución real de los datos dentro de cada zona.

**Tabla 24.****Resultados de la prueba post hoc de Dunn para plomo con ajuste de Bonferroni**

<b>Comparación entre zonas</b>	<b>Estadístico Z</b>	<b>p-valor sin ajustar</b>	<b>p-valor ajustado Bonferroni</b>	<b>Interpretación</b>
Z1 – Z2	0,792539	0,4280145	1,0000000	No significativa
Z1 – Z3	2,491009	0,0127381	0,0764283	No significativa
Z2 – Z3	1,6984156	0,08942935	0,53657615	No significativa
Z1 – Z4	2,377781	0,0174113	0,1045078	No significativa
Z2 – Z4	1,585188	0,1129366	0,67754196	No significativa
Z3 – Z4	-0,113227	0,9098503	1,0000000	No significativa

**Elaborado por: La Autora, 2025**

Los resultados de la prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni muestran que ninguna de las comparaciones entre pares de zonas presentó un p-valor ajustado menor a 0,05. Por lo tanto, aunque la prueba de Kruskal-Wallis evidenció diferencias significativas de manera global, la prueba post hoc no permitió identificar diferencias estadísticamente significativas entre pares específicos de zonas después de aplicar el ajuste de Bonferroni.

No obstante, las comparaciones que presentaron los valores de p ajustado más bajos fueron:

Z1 – Z3: p ajustado = 0,0764

Z1 – Z4: p ajustado = 0,1045

Aunque estos valores no son estadísticamente significativos bajo el criterio de  $\alpha = 0,05$ , sugieren una tendencia de mayor diferencia entre la Zona 1 y las zonas 3 y 4. Esto coincide con la interpretación visual del gráfico de cajas y con los estadísticos descriptivos, donde Z1 presentó la media y el valor máximo más altos de concentración de plomo.

#### 4.1.10.2. Distribución de arsénico por zona

Debido a que las concentraciones de arsénico (As) presentaron una distribución normal, según la prueba de Shapiro-Wilk previamente realizada, se aplicó la prueba paramétrica de ANOVA.

**Tabla 25.**

**Resultados del ANOVA para las concentraciones de arsénico**

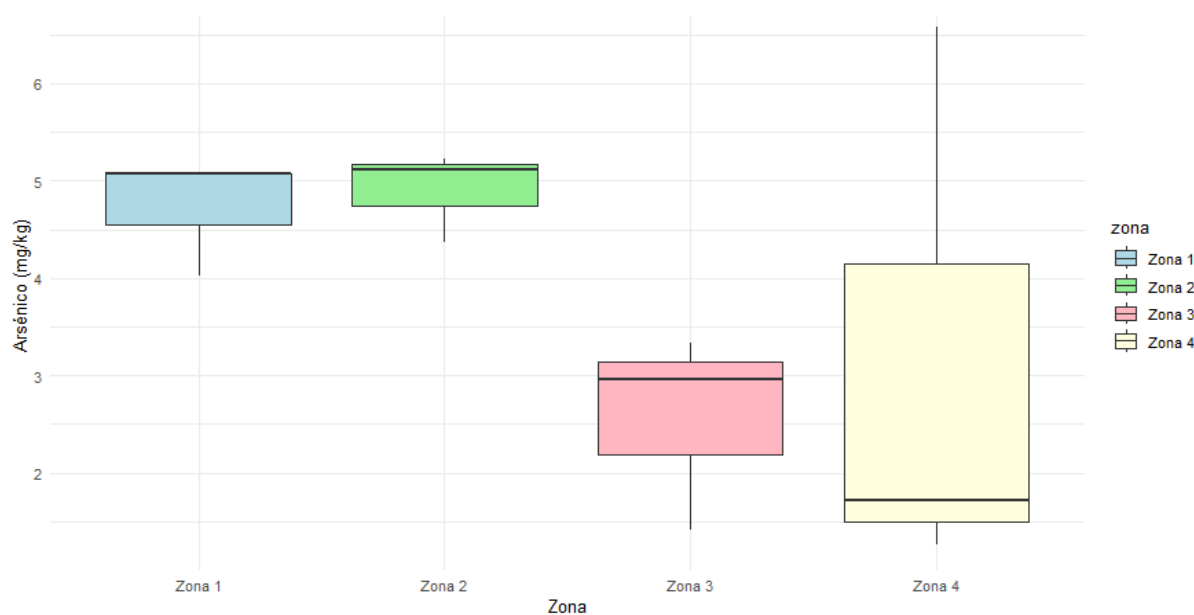
Variable evaluada	Estadístico F	Grados de libertad	p-valor	Nivel de significancia	Decisión estadística
Arsénico (As)	1,535	3; 8	0,279	0,05	No se rechaza $H_0$

**Elaborado por: La Autora, 2025**

En la Tabla 25 se presentan los resultados del análisis de varianza de una vía aplicado a las concentraciones de arsénico entre las zonas de muestreo. El ANOVA mostró un valor de  $F = 1,535$ , con grados de libertad 3 y 8, y un p-valor = 0,279. Debido a que el p-valor obtenido fue mayor que el nivel de significancia establecido de  $\alpha = 0,05$ , no se rechazó la hipótesis nula. Por lo tanto, no existe evidencia estadísticamente significativa para afirmar que las concentraciones medias de arsénico difieren entre las zonas evaluadas.

**Figura 6.**

**Concentración de arsénico por zona**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

En la Figura 6 se presenta el diagrama de cajas correspondiente a las concentraciones de arsénico por zona de muestreo. Se observa que las zonas Z1 y Z2 presentan valores relativamente similares, con medianas cercanas a 5 mg/kg. La zona Z3 muestra concentraciones menores, mientras que la zona Z4 evidencia una mayor dispersión de los datos, asociada principalmente al valor máximo registrado en el punto 10, correspondiente a 6,58 mg/kg. No obstante, aunque gráficamente se aprecian diferencias entre las zonas, estas no necesariamente implican diferencias estadísticamente significativas.

Debido a que el ANOVA no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre las zonas, no fue necesario interpretar la prueba post hoc de Tukey, ya que no se identificó una diferencia global que requiriera comparaciones múltiples entre pares de zonas.

## **4.2 Modelación de la distribución espacial de los metales pesados (As y Pb) mediante interpolación geoespacial (IDW) utilizando el software QGIS.**

La distribución espacial de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos superficiales del estuario de Puerto Hondo fue evaluada mediante interpolación geoestadística por el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW), empleando el software QGIS. La interpolación se realizó a partir de los valores obtenidos en laboratorio para cada muestra de las cuatro zonas de muestreo, permitiendo representar la variabilidad espacial de ambos metales a lo largo del cuerpo de agua y su entorno inmediato.

La superficie interpolada fue posteriormente recortada al área efectiva del estero mediante una máscara espacial, con el fin de evitar la extrapolación de valores fuera del sistema acuático y mejorar la interpretación ambiental de los resultados.

### **4.2.1 Distribución espacial del arsénico (As)**

El mapa de interpolación IDW del arsénico muestra una distribución heterogénea a lo largo del estuario, con predominio de concentraciones bajas a moderadas en la mayor parte del área de estudio. De acuerdo con los resultados de laboratorio, las concentraciones de arsénico en los puntos de muestreo oscilaron entre valores mínimos cercanos a 1,27 mg/kg (P11) y máximos de hasta 6,58 mg/kg (P10), manteniéndose en todos los casos por debajo del valor guía ISQG/TEL de 7,24 mg/kg.

El mapa obtenido evidencia un patrón heterogéneo, caracterizado por zonas con concentraciones relativamente mayores alrededor de algunos puntos de muestreo específicos, mientras que amplios sectores del estuario presentan valores bajos. Este comportamiento indica que la presencia de arsénico en los sedimentos responde principalmente a condiciones locales del sistema estuarino.

**Figura 7.**  
**Distribución espacial del arsénico (As)**

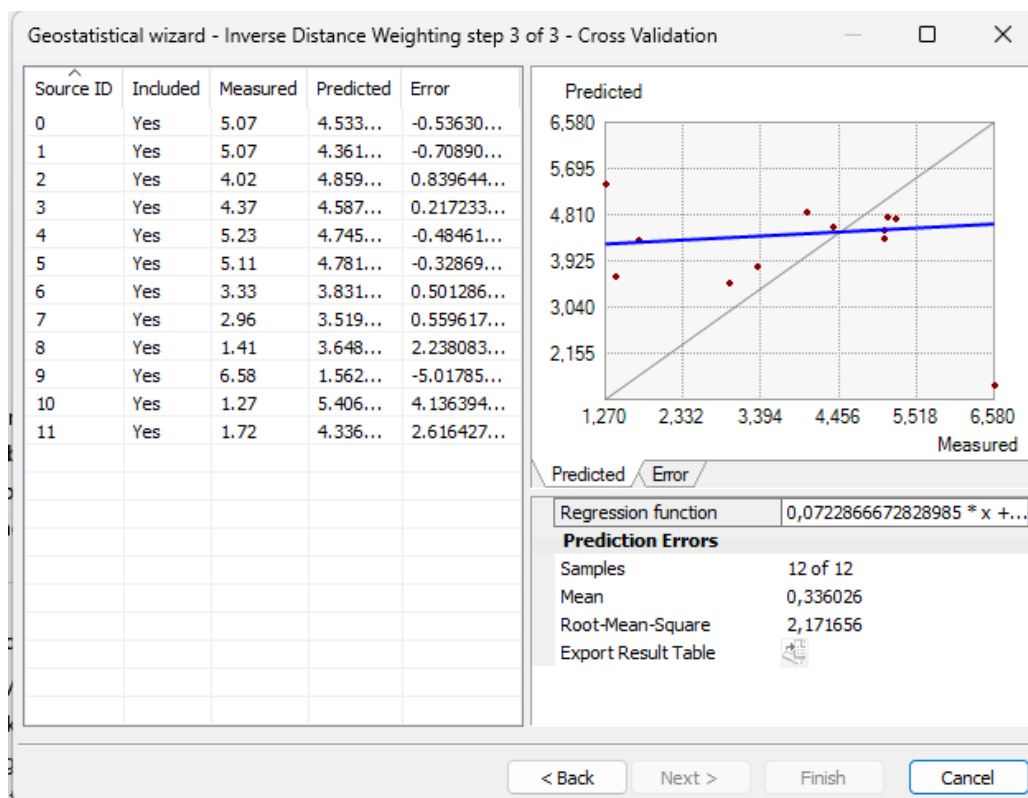


**Elaborado por: La Autora, 2025**

La interpolación espacial muestra que las áreas con concentraciones relativamente más altas de arsénico se localizan en sectores cercanos a las zonas Z1, Z2 y Z4, donde el modelo genera áreas de mayor intensidad de color. Sin embargo, estas áreas de mayor concentración no alcanzan ni superan los valores de referencia internacionales, lo que indica la ausencia de contaminación significativa por arsénico en los sedimentos superficiales del estuario.

En contraste, extensas áreas del cauce principal muestran valores interpolados bajos, lo que refleja una distribución espacial dominada por concentraciones inferiores al umbral máximo permisible. Este patrón concuerda con los resultados analíticos puntuales, lo que sugiere que el arsénico presente en el sistema se debe principalmente a las condiciones naturales de los sedimentos y a los procesos de acumulación local, más que a aportaciones antropogénicas significativas.

**Figura 8.**  
**Geostatistical wizard - IDW en As**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

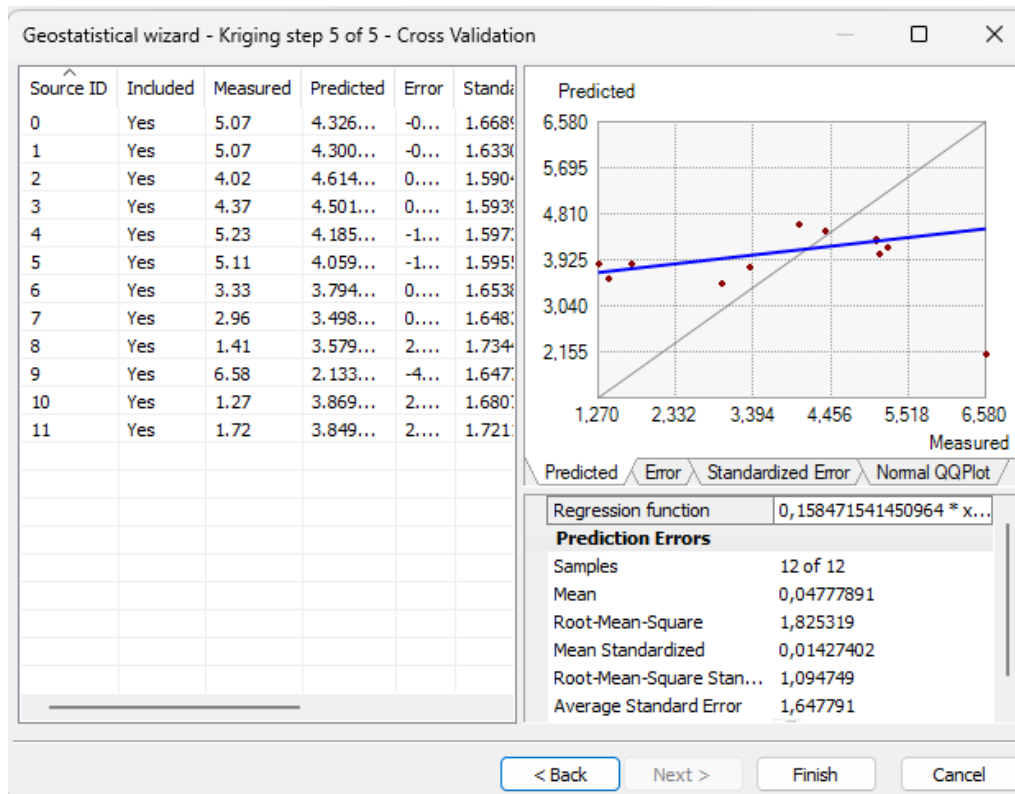
Se utilizó la herramienta Geostatistical Wizard del software ArcGIS para seleccionar y evaluar el método de interpolación más adecuado, considerando la matriz de datos y la distribución espacial de los puntos de muestreo. En una primera aproximación se aplicó el método Inverse Distance Weighting (IDW), empleando un vecindario de búsqueda con un mínimo de 8 y un máximo de 10 vecinos, sobre un conjunto de 12 puntos de muestreo. La validación cruzada arrojó un Mean Error (ME) de 0,33 mg/kg, lo que indica la presencia de un sesgo positivo leve, es decir, una ligera sobreestimación promedio de los valores reales. No obstante, al tratarse de un valor cercano a cero, dicho sesgo no se considera significativo desde el punto de vista estadístico.

Asimismo, el Root Mean Square Error (RMS) obtenido fue de 2,17 mg/kg, lo que implica que, en promedio, las predicciones realizadas mediante IDW presentan una desviación de  $\pm 2,17$  mg/kg respecto a los valores medidos. Este indicador refleja el error global del modelo, siendo deseable que su magnitud sea lo más baja posible. En este sentido, los resultados sugieren que el modelo IDW es estable y

estadísticamente aceptable para la representación espacial de los datos, sin evidenciar un sesgo estructural relevante.

**Figura 9.**

### Geostatistical wizard - Kriging en As



**Elaborado por: La Autora, 2025**

Al aplicar el método Kriging mediante la herramienta Geostatistical Wizard, utilizando un vecindario de búsqueda con un mínimo de 8 y un máximo de 10 vecinos sobre un conjunto de 12 puntos de muestreo, la validación cruzada evidenció un Mean Error (ME) de 0,04 mg/kg. Este valor, al ser muy cercano a cero, indica la presencia de un sesgo negativo leve, es decir, una ligera subestimación promedio de los valores reales; sin embargo, dicho sesgo no es estadísticamente significativo y no compromete la confiabilidad del modelo.

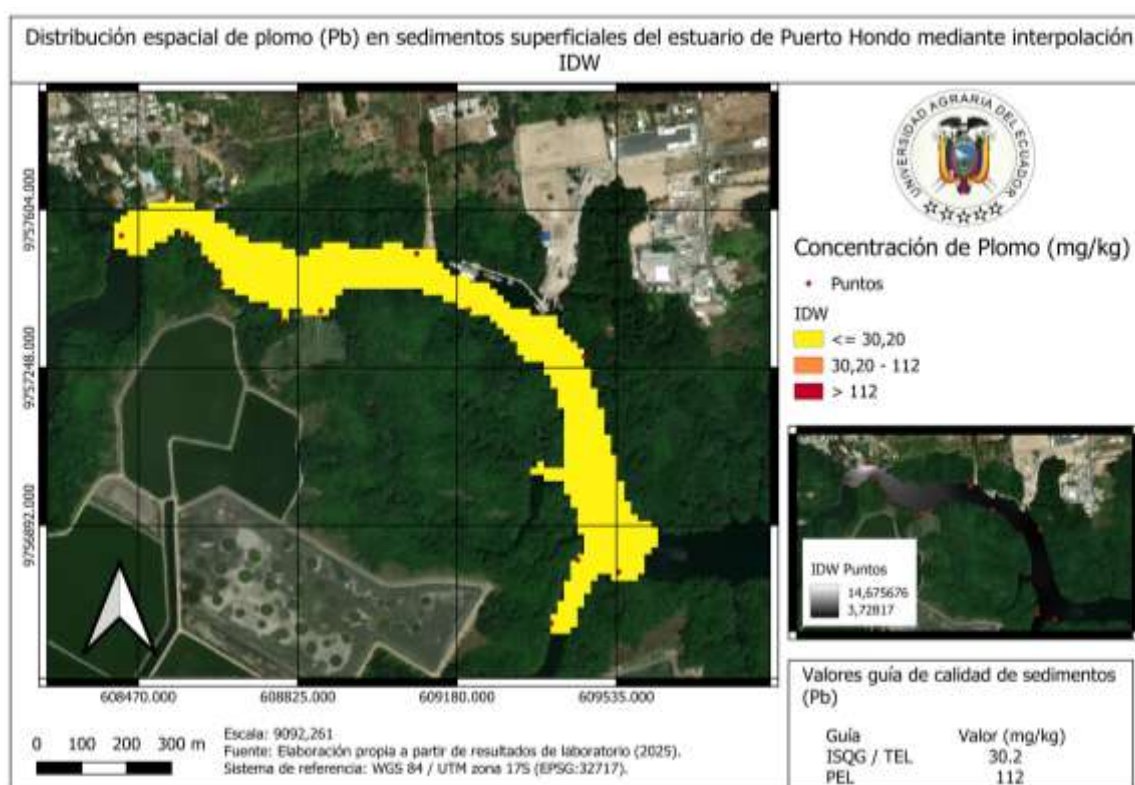
Por otra parte, el Root Mean Square Error (RMS) obtenido fue de 1,82 mg/kg, lo que implica que, en promedio, las predicciones realizadas mediante el método Kriging presentan una desviación de  $\pm 1,82$  mg/kg respecto a los valores medidos. Este valor es inferior al obtenido con el método IDW, lo que evidencia una mejora en la precisión global del modelo.

#### 4.2.2 Distribución espacial del plomo (Pb)

El mapa de interpolación IDW del plomo evidencia una mayor variabilidad espacial en comparación con el arsénico, coherente con los resultados de laboratorio obtenidos. Las concentraciones de plomo registradas en las muestras variaron aproximadamente entre 3,72 mg/kg (P10) y 14,8 mg/kg (P2), valores que se mantienen por debajo de los límites establecidos por la guía canadiense (ISQG/TEL = 30,2 mg/kg; PEL = 112 mg/kg).

**Figura 10.**

#### Distribución espacial del plomo (Pb)



**Elaborado por: La Autora, 2025**

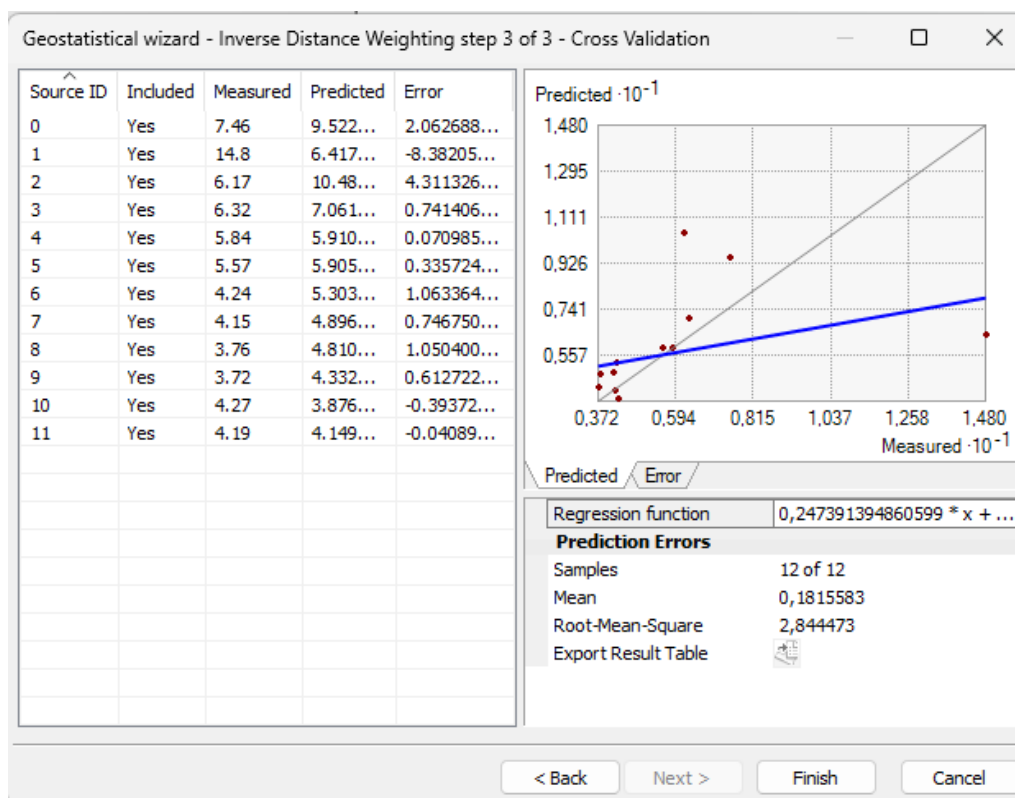
A nivel espacial, el modelo IDW identifica zonas con concentraciones relativamente más altas de plomo en sectores asociados al punto P2, donde se observa un núcleo localizado de mayor intensidad en el mapa interpolado. Estas áreas contrastan con zonas extensas del estuario donde predominan valores bajos, especialmente hacia los tramos intermedios y finales del canal, reflejando una distribución no uniforme del metal.

Es importante destacar que, si bien la mayor parte del área presenta concentraciones inferiores al nivel máximo permitido, existen sectores puntuales donde el plomo alcanza valores relativamente más elevados en comparación con

el entorno inmediato. Estas concentraciones localizadas no representan un riesgo ecológico crítico, pero sí evidencian procesos de acumulación diferencial del metal en determinados tramos del estero, posiblemente asociados a condiciones hidrodinámicas, características del sedimento o aportes locales.

**Figura 11.**

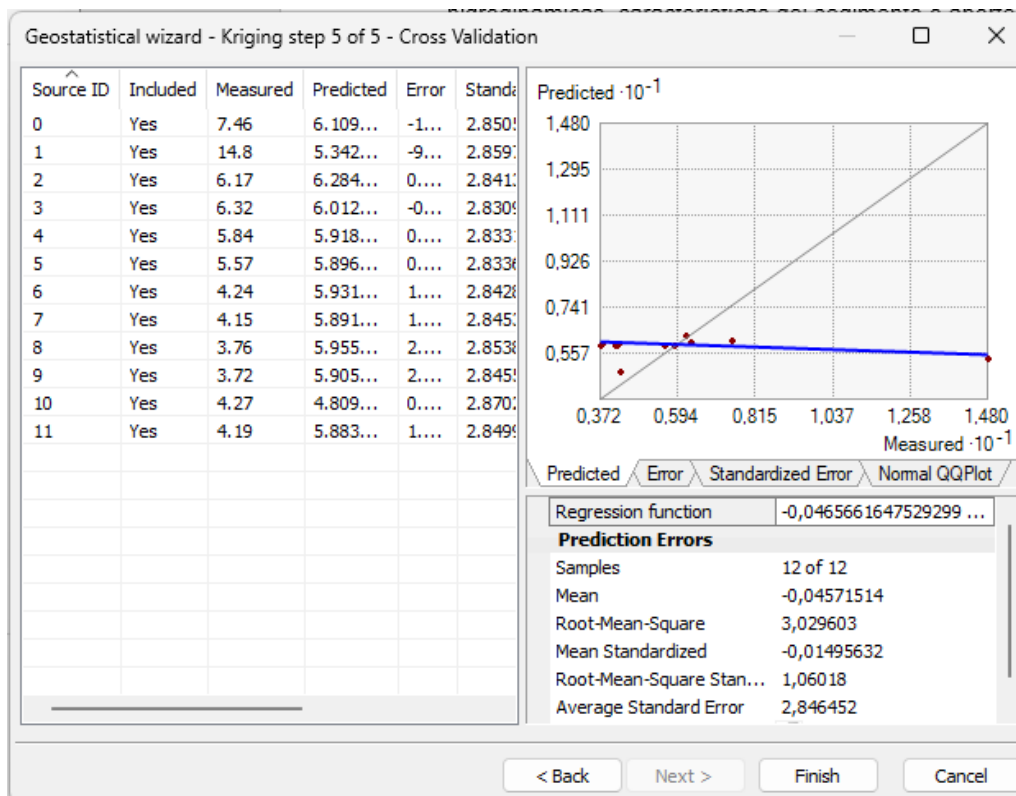
**Geostatistical wizard - IDW en Pb**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

La validación cruzada del método Inverse Distance Weighting (IDW) aplicada a la concentración de plomo mostró un Mean Error de 0,18 mg/kg, lo que indica una ligera sobreestimación promedio de los valores reales. Asimismo, el Root Mean Square Error (RMS) obtenido fue de 2,84 mg/kg, lo que implica que, en promedio, las estimaciones realizadas mediante IDW presentan una desviación de  $\pm 2,84$  mg/kg respecto a los valores medidos. Aunque estos resultados evidencian un desempeño aceptable del método, la presencia de un sesgo leve y una mayor dispersión de los errores sugieren una menor robustez en comparación con métodos geoestadísticos como Kriging.

**Figura 12.**  
**Geostatistical wizard - Kriging en Pb**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

La validación cruzada del método Kriging aplicada a la concentración de plomo evidenció un Mean Error de  $-0,046$  mg/kg, valor cercano a cero que indica ausencia de sesgo sistemático en las estimaciones. El Root Mean Square Error (RMS) fue de  $3,03$  mg/kg, lo que representa la desviación promedio entre los valores medidos y predichos. Adicionalmente, los errores estandarizados presentaron valores próximos a los ideales (Mean Standardized  $\approx 0$ ; RMS Standardized  $\approx 1$ ), lo que confirma una adecuada calibración del modelo geoestadístico. En conjunto, estos resultados respaldan el uso del método Kriging como una alternativa robusta para la interpolación espacial del plomo, aun cuando el RMS sea marginalmente superior al obtenido con IDW.

### **4.3 Elaboración de medidas de gestión orientadas a la prevención y mitigación de impactos ambientales ante la detección de niveles críticos de As y Pb.**

Los resultados muestran concentraciones relativamente más altas de plomo (Pb) en las zonas cercanas al balneario y a la planta de tratamiento de aguas residuales, así como mayores concentraciones de arsénico (As) en las zonas cercanas a la camaronera, lo que indica el impacto local de las actividades humanas en la dinámica de los sedimentos. Estudios previos han demostrado que los sedimentos estuarinos actúan como reservorios temporales de metales pesados que pueden ser movilizados nuevamente por cambios hidrodinámicos o perturbaciones físicas, lo que aumenta su biodisponibilidad y su posible impacto ecológico. (Rivas, 2025)

En este contexto, las medidas de gestión ambiental se diseñan como herramientas preventivas. Este enfoque se alinea con los Lineamientos Generales de Planificación Ambiental promovidos por la Organización de los Estados Americanos (OEA), que enfatizan la importancia de anticipar los posibles impactos ambientales, particularmente en ecosistemas frágiles, mediante medidas de bajo impacto, coordinación institucional y la participación de los actores locales. En entornos como estuarios y manglares, la dinámica natural y las presiones antropogénicas pueden tener efectos acumulativos. (OEA, 2005)

#### **4.3.1 Propósito**

Prevenir y reducir los riesgos ambientales asociados a la acumulación localizada de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos superficiales del estuario de Puerto Hondo, mediante medidas de gestión enfocadas en el control de fuentes, la reducción de la resuspensión del sedimento, la conservación del manglar y el monitoreo ambiental periódico.

Estas medidas buscan evitar que los metales presentes en el sedimento se movilicen hacia la columna de agua o la biota acuática, especialmente en sectores donde existen actividades humanas que pueden alterar la estabilidad del sedimento, como descargas, tránsito de usuarios, actividades acuícolas, mantenimiento de embarcaciones o disposición inadecuada de residuos.

#### **4.3.2 Objetivo**

Proponer medidas de gestión ambiental orientadas a la prevención y mitigación de impactos potenciales asociados a la presencia de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos superficiales del estuario de Puerto Hondo, considerando las zonas de mayor acumulación identificadas mediante análisis de laboratorio e interpolación espacial

#### **4.3.3 Alcance**

Las medidas tienen un alcance preventivo, mitigación y de seguimiento ambiental. Se aplican al área de estudio del estuario de Puerto Hondo, con énfasis en los sectores donde se registraron mayores concentraciones relativas de As y Pb: el área cercana al balneario/PTAR y la zona próxima a la camaronera.

El alcance se centra en la gestión ambiental de sedimentos superficiales y actividades locales que puedan favorecer la entrada, acumulación o redistribución de metales pesados. No se plantean acciones de remediación activa, dragado o retiro de sedimentos, debido a que las concentraciones no superan los valores guía internacionales. En su lugar, se priorizan medidas tempranas de prevención, control de fuentes, educación ambiental, conservación del manglar y monitoreo.

#### **4.3.4 Justificación**

La formulación de medidas de gestión ambiental se justifica porque, aunque las concentraciones de As y Pb no superaron los valores guía ISQG/TEL y PEL, los sedimentos pueden funcionar como reservorios de contaminantes y representar un riesgo futuro si son removidos o si cambian las condiciones hidrodinámicas y químicas del ecosistema.

La guía de gestión integrada del sedimento establece que las actividades humanas pueden alterar la cantidad y calidad de los sedimentos, generar desequilibrios y comprometer la integridad de los sistemas acuáticos. Además, indica que muchas sustancias, incluidos metales y nutrientes, pueden acumularse en los sedimentos con el tiempo y liberarse hacia el agua o contaminar especies acuáticas.

Por ello, las medidas propuestas se orientan a actuar antes de que exista una condición crítica de contaminación. Este enfoque permite gestionar el riesgo ambiental desde la prevención, evitando nuevas fuentes de aporte y reduciendo actividades que puedan causar resuspensión o movilización de sedimentos.

#### **4.3.5 Verificación y seguimiento**

La verificación de las medidas se realizará mediante indicadores documentales, ambientales y comunitarios. Se considerarán como medios de verificación: registros fotográficos, actas de socialización, informes de inspección, señalética instalada, reportes de limpieza, registros de residuos recolectados, checklists de buenas prácticas e informes de laboratorio.

El seguimiento deberá priorizar los puntos con mayores concentraciones relativas: P2 para plomo y P10 para arsénico. Se recomienda realizar monitoreos periódicos de sedimentos superficiales, especialmente después de eventos de lluvia intensa, limpieza de canales, actividades de mantenimiento, remoción de sedimentos o cambios visibles en el ecosistema. La guía también resalta la importancia de aplicar una jerarquía de mitigación, dando preferencia a las medidas que eviten impactos adversos y, si esto no es posible, aplicar acciones de mitigación en el origen o lo más cerca posible de la fuente.

#### **4.3.6 Análisis e interpretación**

Las medidas de gestión se sustentan en los resultados del análisis de laboratorio y en la distribución espacial obtenida mediante interpolación IDW. Si bien no se identificaron niveles críticos de As y Pb, la presencia de zonas con mayores concentraciones relativas evidencia que las actividades antrópicas pueden estar influyendo en la dinámica de los sedimentos.

La prevención se enfoca en evitar nuevos aportes de contaminantes y reducir las actividades que puedan alterar el sedimento. La mitigación, por su parte, busca disminuir los efectos en caso de que exista resuspensión, acumulación localizada, deterioro del manglar o presencia de residuos con potencial aporte de metales.

#### **4.3.7 Medidas preventivas y de mitigación**

##### **4.3.7.1. Medidas de prevención**

###### **4.3.7.1.1. Subprograma de señalización ambiental**

Se colocará señalética ambiental en los sectores cercanos al balneario, la PTAR, la camaronera y las áreas de manglar, indicando la prohibición de remover sedimentos, arrojar residuos, ingresar a zonas sensibles o alterar la vegetación ribereña.

La señalética deberá ubicarse en puntos visibles para usuarios del balneario, pescadores, operadores turísticos y comunidad local. Su contenido deberá ser claro, preventivo y orientado a evitar actividades que puedan favorecer la resuspensión de sedimentos o el ingreso de contaminantes al estuario.

#### ***4.3.7.1.2. Subprograma de gestión de residuos sólidos***

Se implementarán acciones de manejo adecuado de residuos sólidos en las zonas de mayor afluencia de personas, principalmente en el balneario, áreas de pesca y riberas del estuario.

Se realizarán campañas de limpieza y sensibilización ambiental dirigidas a pescadores, operadores turísticos y comunidad local. Los residuos recolectados deberán ser clasificados y entregados a gestores autorizados cuando correspondan a materiales peligrosos o contaminantes.

#### ***4.3.7.1.3. Medidas para la protección de la calidad del agua y aportes de sedimentos***

Se evitará la disposición directa de efluentes, residuos sólidos, aceites, combustibles o lodos hacia el cuerpo de agua.

Se verificará periódicamente el funcionamiento de la PTAR y se controlará la presencia de descargas domésticas o clandestinas hacia el estuario.

En la zona cercana a la camaronera, se revisará el manejo de efluentes, canales de drenaje y lodos, evitando descargas directas al estuario sin tratamiento o retención previa.

Se evitará la remoción del sedimento superficial en zonas cercanas al balneario, manglar y puntos donde se identificaron mayores concentraciones relativas de As y Pb.

#### ***4.3.7.1.4. Medidas de educación y participación comunitaria***

Se desarrollarán actividades de educación ambiental dirigidas a pescadores, operadores turísticos, usuarios del balneario y comunidad local sobre la relación entre residuos, sedimentos, manglar y metales pesados.

Se promoverá la participación comunitaria en la identificación y reporte de descargas, acumulación de residuos, remoción de sedimentos o afectación al manglar.

Se difundirá información sobre la importancia de evitar la alteración del sedimento superficial, debido a que este puede actuar como reservorio de metales pesados.

#### ***4.3.7.1.5. Medidas para el control de actividades en zonas sensibles***

Se promoverá el ordenamiento del uso recreativo y turístico en el balneario, evitando el ingreso a zonas de sedimento blando, raíces de manglar o áreas con acumulación visible de residuos.

Se priorizará la vigilancia ambiental en los puntos donde se identificaron mayores concentraciones relativas de As y Pb, especialmente P2 y P10.

#### **4.3.7.2. Medidas de mitigación**

##### ***4.3.7.2.1. Medidas para la protección de la calidad del agua y sedimentos***

Las actividades de limpieza deberán ejecutarse de forma manual y superficial, evitando la alteración directa del fondo sedimentario.

Se deberá disponer de materiales absorbentes para actuar de manera inmediata ante posibles derrames menores de lubricantes, combustibles o sustancias similares.

En caso de derrames, se deberá contener el material, impedir su ingreso al cuerpo de agua, recuperar el producto derramado y reportar el incidente a la autoridad o responsable correspondiente.

##### ***4.3.7.2.2. Medidas frente a la resuspensión de sedimentos***

Se realizará una inspección técnica del área afectada y se registrará el evento mediante fotografías, ubicación y descripción del incidente.

Cuando exista incremento sostenido de As o Pb en los puntos críticos, se reforzarán los controles en las fuentes potenciales asociadas al balneario/PTAR, camaronera y zonas de intervención antrópica.

##### ***4.3.7.2.3. Medidas de mitigación para residuos sólidos y materiales contaminantes***

Se elaborarán registros de las jornadas de limpieza, incluyendo cantidad aproximada de residuos recolectados, tipo de residuo, fotografías y participantes.

Los residuos encontrados en riberas, manglar o zonas de pesca deberán retirarse de forma controlada, evitando su arrastre hacia el cuerpo de agua.

#### **4.3.7.2.4. Medidas de monitoreo y seguimiento ambiental**

Se realizarán monitoreos periódicos de sedimentos superficiales en los puntos de mayor concentración relativa, principalmente P2 para Pb y P10 para As.

Los resultados deberán compararse con los valores guía ISQG/TEL y PEL.

Se elaborarán mapas comparativos de distribución espacial cuando existan nuevos datos de monitoreo.

Si las concentraciones aumentan o se acercan a los valores guía, se deberá activar una revisión técnica de las fuentes potenciales y fortalecer las medidas de control ambiental.

Para efectos de organización y claridad en la presentación del documento, la tabla que contiene las medidas de gestión propuestas se ha incluido en el apartado de Apéndice N.º14. En dicho apartado se expone de manera detallada la información correspondiente para su adecuado análisis.

## 5. DISCUSIÓN

Según los resultados de este estudio, las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos superficiales del estuario de Puerto Hondo se sitúan por debajo de los valores de referencia internacionales ISQG/TEL-PEL establecidos por la normativa canadiense. Esto sugiere que, en las condiciones evaluadas, no existe una contaminación significativa que pueda provocar con frecuencia efectos adversos en los organismos bentónicos. Sin embargo, la variación en las concentraciones observada entre los puntos de muestreo sugiere la presencia de procesos de acumulación locales relacionados principalmente con fuentes antropogénicas cercanas, las condiciones hidrológicas y las características de los sedimentos.

Al comparar estos resultados con estudios realizados en otros sectores del Estero Salado de Guayaquil, se observa que Puerto Hondo presenta niveles menores de contaminación. Un estudio de Ormaza-González (2024), realizado en sedimentos superficiales del Estero Salado, se reportaron concentraciones promedio de 32,3 mg/kg para As y 41,9 mg/kg para Pb en la zona urbana del estuario; mientras que en el canal El Morro, considerado una zona relativamente menos intervenida, los promedios fueron de 6,6 mg/kg para As y 7,9 mg/kg para Pb. Esta comparación sugiere que los valores registrados en Puerto Hondo se acercan más a los encontrados en zonas con menor impacto humano que en las zonas urbanas del Estero Salado, donde la carga antropogénica es elevada. Además, los autores señalan que las concentraciones de metales aumentan a medida que el sistema estuarino se aproxima a la zona metropolitana de Guayaquil, lo que respalda la influencia de las actividades humanas en la acumulación de metales en los sedimentos.

De manera similar, Acosta y Alfonso (2021) reportaron concentraciones de Pb de 36,82 mg/kg en 2019 y 54,86 mg/kg en 2021 en el Puente Ecológico del Estero Salado, valores superiores a los registrados en el presente estudio. Asimismo, en el Puente Zig-Zag se reportó una concentración de 49,03 mg/kg para el año 2021, superando los límites considerados por la normativa canadiense. Estos resultados contrastan con los obtenidos en Puerto Hondo, donde el Pb presentó acumulaciones puntuales, pero sin alcanzar niveles críticos.

La diferencia entre los valores registrados en la zona urbana de Estero Salado y los obtenidos en Puerto Hondo puede explicarse por el grado de influencia de la actividad humana. Según estudios previos, se ha demostrado que el Estero Salado se ha visto afectado por descargas industriales, aguas residuales, residuos sólidos y crecimiento urbano. En este sentido, investigaciones sobre sedimentos de manglar en Guayaquil han relacionado la presencia de Pb, Cd, Zn, Ni y otros metales con descargas de aguas residuales industriales, señalando que estos ecosistemas han estado sometidos a perturbaciones constantes durante décadas (Fernández, 2014).

En el presente estudio, la mayor concentración de Pb se registró en el punto P2, cercano a una planta de tratamiento y a zonas de uso recreativo. Este comportamiento coincide con lo reportado por Acosta y Alfonso (2021), quienes atribuyen el incremento de Pb en ciertos sectores del Estero Salado a la acumulación de contaminantes en zonas con limitada circulación de agua, sedimentación y obstrucción del canal, condiciones que dificultan el lavado natural de los elementos tóxicos hacia áreas de mayor volumen de agua.

En lo que respecta al arsénico, la concentración más elevada se observó en el punto de muestreo P10, situado cerca de una camaronera, donde también se confirmaron la presencia de sedimentos de color oscuro, un fuerte olor y organismos muertos. Estos indicios pueden estar relacionados con condiciones caracterizadas por una elevada carga orgánica y un entorno reductor, lo que puede favorecer el transporte y la retención de ciertos metales en los sedimentos estuarinos. De acuerdo con De Cock et al. (2021), el arsénico puede provenir tanto de fuentes naturales como de actividades antrópicas, entre ellas minería, uso de combustibles fósiles, agricultura, fertilizantes e industrias. Por ello, aunque las concentraciones de As en Puerto Hondo no superaron los valores guía, su presencia en sectores cercanos a actividades productivas justifica la necesidad de seguimiento ambiental.

En cuanto a la distribución espacial, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en los niveles de As entre las distintas zonas, lo que sugiere una distribución relativamente uniforme dentro del área de estudio. Por el contrario, sí se observaron diferencias significativas en el caso del Pb, con una acumulación más heterogénea en determinados puntos de acumulación. Esta

tendencia concuerda con los resultados de un estudio realizado en Estero Salado, donde las concentraciones más elevadas de Pb se concentraban en zonas específicas afectadas por actividades urbanas, vertidos de aguas residuales y baja circulación hídrica.

La interpolación espacial mediante IDW identificó focos localizados de mayor concentración, en particular de Pb en la zona asociada al punto P2 y de As en las zonas Z1, Z2 y Z4. Aunque estos valores no indican una contaminación crítica, la representación cartográfica muestra que los metales pesados no se distribuyen de manera uniforme, sino que son el resultado de la interacción entre fuentes locales, la dinámica estuarina, la materia orgánica y la capacidad de retención de los sedimentos. En este sentido, los resultados respaldan la aplicación de medidas preventivas, orientadas al control de descargas, monitoreo periódico y gestión ambiental de actividades cercanas al estuario.

La hipótesis planteada se rechaza, debido a que las concentraciones de arsénico y plomo registradas en los sedimentos superficiales de Puerto Hondo no superaron los valores guía ISQG/TEL ni PEL establecidos por la normativa canadiense. Si bien se identificaron mayores concentraciones en puntos asociados a presión antrópica, como áreas cercanas a la PTAR, zonas recreativas y la camaronera, dichos valores se mantuvieron por debajo de los umbrales de referencia. Por tanto, no se confirma la existencia de niveles críticos de contaminación por As y Pb; sin embargo, los resultados evidencian acumulaciones localizadas que reflejan la influencia de actividades humanas sobre la distribución espacial de estos metales.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

Las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) determinadas en los sedimentos superficiales del estuario de Puerto Hondo se mantienen por debajo de los valores de referencia internacionales establecidos por la Canadian Sediment Quality Guidelines (ISQG/TEL–PEL). Este comportamiento indica que, durante el periodo de estudio, no se evidencian condiciones de contaminación significativa ni la probabilidad de efectos adversos sobre los organismos bentónicos. El análisis estadístico evidenció comportamientos distintos entre los metales evaluados. Para arsénico, el ANOVA presentó  $p = 0,279$ , mayor que  $\alpha = 0,05$ , por lo que no se rechazó  $H_0$  y se concluyó que las medias entre zonas son similares. En cambio, para plomo, Kruskal-Wallis obtuvo  $p = 0,02998$ , menor que  $\alpha = 0,05$ , por lo que se rechazó  $H_0$ , evidenciando diferencias significativas globales entre zonas, asociadas principalmente a mayores concentraciones en Z1, sin superar los valores guía ambientales de referencia.

La distribución espacial de arsénico y plomo, evaluada mediante interpolación geoespacial de dos métodos (IDW y Kriging), evidencia un patrón heterogéneo en los sedimentos del estuario de Puerto Hondo. Aunque las concentraciones interpoladas no superan los límites normativos, los mapas generados permiten identificar zonas puntuales con valores relativamente más elevados, asociadas a sectores de mayor intervención humana y a condiciones hidrodinámicas de baja energía. Ambos métodos permitieron identificar zonas sensibles; sin embargo, el método Kriging presentó un mejor desempeño estadístico, con errores medios cercanos a cero y menores errores globales, especialmente para el arsénico, lo que indica una mayor precisión en la representación de la variabilidad espacial.

Las medidas de gestión propuestas constituyen una herramienta orientada a reducir el riesgo ambiental asociado a la presencia de arsénico y plomo en los sedimentos del estuario de Puerto Hondo. A pesar de que los resultados no evidencian incumplimientos normativos, la identificación de sectores con concentraciones relativamente mayores justifica la aplicación de medidas de control, conservación del manglar, fortalecen la gestión ambiental local y

contribuyen a la protección de un ecosistema estuarino de alta importancia ecológica y socioeconómica.

## **6.2 Recomendaciones**

Fortalecer la educación ambiental comunitaria, mediante programas de capacitación dirigidos a pescadores, personal de seguridad y comunidad, con énfasis en los lugares con alta probabilidad de acumulación de metales pesados y buenas prácticas ambientales.

Dado que el tamaño de muestra actual ( $n = 12$ ) puede limitar la representatividad espacial de los resultados y producir un efecto de suavizado en el modelo de interpolación, se recomienda aumentar el número de puntos de muestreo en futuros estudios del Estero Salado para mejorar la precisión del análisis espacial y reducir la incertidumbre en la interpretación de la distribución de contaminantes.

Coordinar con los responsables de las camaroneras y la administración del balneario la implementación de sistemas de monitoreo, con el fin de evaluar la descarga de residuos y efluentes hacia el estuario de Puerto Hondo, como medida preventiva para evitar la acumulación progresiva de metales pesados en los sedimentos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Reinoso, D. C., & Alfonso Franco, D. M. (2021). *Evaluar la concentración de plomo en sedimento* [Trabajo de titulación, Universidad de Guayaquil].  
[https://www.institutopesca.gob.ec/wp-content/uploads/2022/01/34\\_TESIS-Plomo-en-sedimento-del-Estero-Salado.pdf](https://www.institutopesca.gob.ec/wp-content/uploads/2022/01/34_TESIS-Plomo-en-sedimento-del-Estero-Salado.pdf)
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2016). *Resúmenes de salud pública: Arsénico (Arsenic)*.  
[https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs\\_es\\_phs2.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs_es_phs2.html)
- Alcaldía de Guayaquil. (2023, 14 de septiembre). *Todo listo para la segunda feria ciudadana en Puerto Hondo*. <https://guayaquil.gob.ec/todo-listo-para-la-segunda-feria-ciudadana-en-puerto-hondo-dacmse-capacita-a-200-comerciantes/>
- Anaya-Raymundo, M. A., Ruíz-Janje, A., Blas-Montenegro, L. P., Angulo-Valdivia, R. M., & Cámaco, D. P. (2025). Origen, distribución y dinámica de metales pesados en suelos agrícolas: Implicaciones edáficas y ambientales. *Manglar*, 22(2). <https://doi.org/10.57188/manglar.2025.030>
- Angon, P. (2024). Fuentes, efectos y perspectivas actuales de la contaminación por metales pesados en suelos, plantas y cadena alimentaria humana. *Heliyon*, 10(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
- Apaza, R. M., Gonzales, L. F., & Ancca, S. M. (2023). Niveles de concentración de metales pesados en sedimentos de zona alta del río Locumba, Perú. *Dialnet*, 18(2), 103–115.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9626992>
- Asamblea Nacional Constituyente. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. <https://www.defensa.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador\_act\_ene-2021.pdf

Aveiga Ortiz, A., Banchón Bajaña, C., Mendoza Cedeño, L., Calderón Pincay, J., & Delgado Moreira, M. (2022). Distribución de metales pesados en agua, sedimentos y peces del río Carrizal, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(3).

Aveiga Ortiz, A., Cárdenas Guillén, F., Peñarrieta Macías, F., & Alcántara Boza, F. (2020, diciembre 30). Bioacumulación de mercurio y zinc en especies ictícolas de la subcuenca del río Carrizal, Manabí, Ecuador. *Revista Iberoamericana Ambiente y Sustentabilidad*, 3(2), 49–66.

Aveiga Ortiz, A., Peñarrieta Macías, F., & Santana Zambrano, M. (2024). Assessing heavy metal contamination in *Anadara tuberculosa*. *Journal of Ecological Engineering*, 25(12), 60–69.  
<https://doi.org/10.12911/22998993/193755>

Barros Salazar, D. V. (2021). *Calidad del agua en Estero Salado, sector norte de la ciudad de Guayaquil, y sus efectos en flora y fauna, 2020–2021* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Tumbes].  
<https://repositorio.untumbes.edu.pe/server/api/core/bitstreams/8876f548-96ab-494e-934f-033a2c457e71/content>

Benavides, T. E. (1999). *Usos del recurso agua y manglares*. Universidad Internacional de Andalucía.  
[https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/69/0037\\_Estrella.pdf](https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/69/0037_Estrella.pdf)

Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (2015). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.

<https://global.oup.com/academic/product/principles-of-geographical-information-systems-9780198742845>

Calero Chiriboga, R. M. (2010). *La gobernanza del Estero Salado* [Tesina, Universidad Técnica Particular de Loja].

Canadian Council of Ministers of the Environment. (2002). *Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life*.

[https://support.esdat.net/Environmental%20Standards/canada/ccme/sedqg\\_summary\\_table.pdf](https://support.esdat.net/Environmental%20Standards/canada/ccme/sedqg_summary_table.pdf)

Cano Esquinarila, L. E., & Flores Pino, M. F. (2021). *Determinación de metales pesados en sedimentos del río Ramis procedentes de efluentes mineros informales, Puno* [Tesis, Universidad César Vallejo].

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/72533>

Cárdenas Calle, M. (2010). *Efecto de la contaminación hidrocarburífera sobre la estructura comunitaria de macroinvertebrados bentónicos presentes en el sedimento del Estero Salado*.

Cedeño Vines, K., Pacheco Flores de Valgaz, A., & Ballesteros, J. (2014).

Quantification of heavy metal content in *Anadara tuberculosa* from the Gulf of Guayaquil using ICP-OES: Assessing marine contamination. *Applied Sciences*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/app14051704>

Chen, W., Cai, Y., Zhu, K., & Wei, J. (2022). Spatial heterogeneity analysis and source identification of heavy metals in soil: A case study of Chongqing, Southwest China. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(50). <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00313-3>

Chicco, D., Sichenze, A., & Jurman, G. (2025). Una guía sencilla para el uso de la prueba t de Student, la prueba U de Mann-Whitney, la prueba de chi-

cuadrado y la prueba de Kruskal-Wallis en bioestadística. *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s13040-025-00465-6>

Código Orgánico del Ambiente. (2018). <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Codigo-Organico-del-Ambiente.pdf>

Córdova Coronel, A. A. (2023). *Análisis de la concentración de cadmio y plomo en los sedimentos del ramal norte del Estero Salado, año 2023* [Trabajo de titulación, Universidad Agraria del Ecuador].

Cruz-Guzmán, A. M. (2007). *La contaminación de suelos y aguas: Su prevención con nuevas sustancias naturales*. Editorial Universidad de Sevilla.

<https://editorial.us.es/es/detalle-libro/40074/la-contaminacion-de-suelos-y-aguas>

Custodio, M., Fow, A., De la Cruz, H., Huarcaya, J., & Chanamé, F. (2024).

Potential ecological risk from heavy metals in surface sediment of lotic systems in central region Peru. *Frontiers*, 5.

De Cock, A., De Troyer, N., Forio Eurie, M., Garcia Arevalo, I., Echelpoel, W., & Jaxsens, L. (2021). From mangrove to fork: Metal presence in the Guayas Estuary (Ecuador) and commercial mangrove crabs. *Foods*, 10(8).

<https://doi.org/10.3390/foods10081880>

DJEsgaro. (2016, febrero 9). *Reserva de Producción Faunística Manglares El Salado (Puerto Hondo)*.

<https://djesgaro.wordpress.com/2016/02/09/reserva-de-produccion-faunistica-manglares-el-salado-puerto-hondo-see-more-at-httpturismo-guayaquil-gob-ec-es-naturalezadel-norte-de-la-ciudad-reserva-de-produccion-faunistica-manglares-puert/>

- Encyclopaedia Britannica. (2026, febrero 27). *Student's t-test*.  
<https://www.britannica.com/science/Students-t-test>
- EPA. (2015). *Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: Technical manual*.  
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/Sediment-Sampling.pdf>
- EPA. (2025). *Basic information about estuaries*. <https://www.epa.gov/nep/basic-information-about-estuaries>
- Escamilla, M. D. (2006). *Aplicación básica de los métodos científicos*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <http://www.uaeh.edu.mx/virtual>
- Esri (s. f.). *How inverse distance weighted interpolation (IDW) works*.  
<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-works.htm>
- Esri. (s. f.). *Cómo funciona Kriging*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- FAO. (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: Hacia la transformación azul*. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Farhan Jamil, E., Md Fazle, R., Sumaiya, N., & Tuj Jannat, M. (2023). Bioaccumulation and bioremediation of heavy metals in fishes: A review. *Toxics*. <https://doi.org/10.3390/toxics11060510>
- Fernández Espinosa, C., Brito Paredes, P., Mendoza Torres, G., & Villavicencio Aguilar, C. (2021). Tradición pesquera artesanal e identidad sociocultural de Puerto Bolívar: Contexto del Golfo de Guayaquil-Ecuador. *Revista de Ciencias Sociales*, 27(2), 386–400.

- Fernández-Cadena, J., S., A., S.-C., C. L., & D. I., R. (2014). Heavy metal concentration in mangrove surface sediments from the north-west coast of South America. *Marine Pollution Bulletin*, 82(1–2), 221.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.016>
- Flores, C. M., Del Angel, E., Frías, D. M., & Gómez, A. L. (2020). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (s. f.).  
*Contaminación provocada por los sedimentos*.  
<https://www.fao.org/4/w2598s/w2598s04.htm>
- Giarikos, D., White, L., Daniels, A., Santos, R., Baldauf, P., & Hirons, A. (2023). Assessing the ecological risk of heavy metal sediment contamination from Port Everglades, Florida, USA. *PeerJ*, 11.  
<https://doi.org/10.7717/peerj.16152>
- Hakanson, L. (1979). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975–1001.  
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Han, F. X., & Kingery, W. (2003). New approach to studies of heavy metal redistribution in soil. *Advances in Environmental Research*, 8(1), 113–120.  
[https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00142-9](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00142-9)
- Heredia, M. D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12).
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación*. <https://www.esup.edu.pe/wp->

content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf

Holman, O. M. (2023, noviembre 3). *Curso analítico de datos / K-nearest neighbors algorithm*. <https://rpubs.com/HOM05/KNN>

Huayamave Navarrete, J. (2013). *Estudio de las aguas y sedimentos del río Daule, en la provincia de Guayas, desde el punto de vista físico químico, orgánico, bacteriológico y toxicológico*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press.

Kruskal, W. H., & Wallis, A. W. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

Larsen, M., & Hjermann, D. (2022). *Estado y tendencia para metales pesados (mercurio, cadmio y plomo) en fish, shellfish y sediment*. OSPAR Commission.

Lead Safe Texas. (2022). *Intoxicación por plomo*. <https://www.dshs.texas.gov/es/blood-lead-surveillance-group/lead-safe-texas-newsletters>

Lemus, M., Castañeda, J., & Chun, K. (2014). Heavy metals in fish and invertebrates from the Gulf of Paria, Venezuela. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2).

Luzheng, B., & Cuntai, G. (2019). A review on EMG-based motor intention prediction of continuous human upper limb motion for human-robot

collaboration. *Biomedical Signal Processing and Control*, 51, 113–127.

<https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.02.011>

Maldonado, J. J., Macho, L. K., & Casallas, E. C. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75).

<https://doi.org/10.14483/22487638.19171>

Maridueña Bravo, A., Fuentes, M., Guerrero, M., & Castro-Rendón, R. (2022).

*Contenido de elementos traza (As, Cd, Hg y Pb) en sedimentos, concha prieta (Anadara...)*. Subsecretaría de Calidad e Inocuidad.

McKenzie, H. (2023). *Interpolación espacial: Qué técnica es la mejor y cómo*

*ejecutarla*. <https://carto.com/blog/spatial-interpolation-techniques-tutorial>

Md Abu Noman, M., Feng, W., Zhu, G., & Hossain, M. B. (2022). Bioacumulación

y posibles riesgos para la salud humana de los metales en peces y mariscos de importancia comercial de la bahía de Hangzhou, China.

Mero, M., Arcos, V., Egas, F., & Siavichay, R. (2012). Determinación de metales

pesados (Cd y Pb) en moluscos bivalvos de interés comercial (*Anadara tuberculosa* y *A. grandis*) de Puerto El Morro, Ecuador. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 4(4), 1–14.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 097-A*.

Registro Oficial.

Monserate Maggi, B. L., & Medina Carrión, J. F. (2011). *Estudio de condiciones*

*físicas, químicas y biológicas en la zona intermareal de dos sectores del Estero Salado con diferente desarrollo urbano* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/20925/3/T-92012%20MONSERRATE-MEDINA.pdf>

Morocho, R., González, I., Ferreira, T. O., & Otero, X. L. (2022). Mangrove forests in Ecuador: A two-decade analysis. *Forests*, 13(5), 656.

<https://doi.org/10.3390/f13050656>

Naciones Unidas. (2022, mayo 24). *Objetivos de desarrollo sostenible*.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Navarrete Forero, G., Morales Baren, L., Domínguez Granda, L., Pontón Cevallos, J., & Marín Jarrín, J. R. (2019). Heavy metals contamination in the Gulf of Guayaquil: Even limited data reflects environmental impacts from anthropogenic activity. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 731–755.

OEA. (2005). *Gestión ambiental y desarrollo sostenible: Planes de acción ambiental*. <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea10s/ch011.htm>

Ohio Environmental Protection Agency. (2001). *Sediment sampling guide*.

<https://clu-in.org/download/contaminantfocus/sediments/sampling-guide-ohio-sedman2001.pdf>

OMS. (2024). *Intoxicación por plomo*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

OpenStax. (2025, marzo 17). *Introductory business statistics 2e*.

[https://stats.libretexts.org/Bookshelves/Applied\\_Statistics/Business\\_Statistics\\_\(OpenStax\)/02%3A\\_Descriptive\\_Statistics/2.04%3A\\_Sigma\\_Notation\\_and\\_Calculating\\_the\\_Arithmetic\\_Mean](https://stats.libretexts.org/Bookshelves/Applied_Statistics/Business_Statistics_(OpenStax)/02%3A_Descriptive_Statistics/2.04%3A_Sigma_Notation_and_Calculating_the_Arithmetic_Mean)

Ormaza-González, F. I., Castro-Rendón, R. D., Maridueña-Bravo, A., Bobadilla-Cordova, N., Ramos-Castañeda, I., & Statham, P. J. (2024). Hg, Cd, As, and Pb in surface sediments from the tropical coastal lagoon Estero Salado, Gulf of Guayaquil-Ecuador. *Frontiers*, *11*, 11.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1457548>

Padilla, C. R. (2021). Intoxicación por arsénico. *Scielo*, *38*(2), 13.  
[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1409-00152021000300004](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152021000300004)

Pazmiño Carrillo, L. A. (2021). *Sistematización y análisis de la calidad de agua para determinar la influencia de las actividades humanas en el Estero Salado en el sector urbano de Guayaquil* [Trabajo de titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil].  
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/17471/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-424.pdf>

Pazmiño, B. G. (2014). *Capital social de Campo Alegre y Puna Vieja, prácticas ancestrales y modernidad* [Tesis de maestría, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales].

Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., & Prieto García, A. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *10*(1), 29–44.  
<https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Quispe Yana, R., Belizario Quispe, G., & Chui Betancur, H. (2019). Concentración de metales pesados: Cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú.

- Ramírez Ayala, E., Arguello Pérez, M. A., Tintos Gómez, A., & Mendoza Pérez, J. A. (2021). Heavy metals in sediment and fish from two coastal lagoons of the Mexican Central Pacific. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 49(5), 818–827.
- Rico, V. A. (2022, julio 7). *Calcular el error absoluto medio (MAE) | Métricas para evaluar modelos de regresión*. YouTube.  
[https://www.youtube.com/watch?v=1P3wD\\_UprvM&t=2s](https://www.youtube.com/watch?v=1P3wD_UprvM&t=2s)
- Rivas Basurto, M. M. (2025). *Análisis de metales pesados en el río Portoviejo, parroquia Picoazá* [Trabajo de titulación, Universidad Estatal del Sur de Manabí].  
<https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/7932/1/Rivas%20Basurto%20Mar%c3%ada%20Mariuxi.pdf>
- Rojas Mosquera, M. N. (2019). *El Estero Salado en el desarrollo urbano de Guayaquil: Crónicas de un recurso natural en decadencia*. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://doi.org/10.5821/siiu.6590>
- S. n. (2023). *Muestreo de sedimentos fluviales*. Scribd.  
<https://es.scribd.com/document/677998066/Practica-1>
- Salazar, V. D. (2021). *Calidad del agua en Estero Salado, sector norte de la ciudad de Guayaquil, y sus efectos en flora y fauna, 2020–2021* [Tesis, Universidad Nacional de Tumbes].  
<https://repositorio.untumbes.edu.pe/server/api/core/bitstreams/8876f548-96ab-494e-934f-033a2c457e71/content>
- Sánchez Padilla, P. (2016). *Determinación de la concentración de metales pesados (Pb, Cd y Hg) en el sedimento del Estero San Camilo-Durán* [Trabajo de titulación, Universidad de Especialidades Espíritu Santo].

- Santos, T. T., Valente Marins, R., & Alves, L. P. (2023). Review on metal contamination in equatorial estuaries in the Brazilian Northeast. *Frontiers*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1142649>
- Sarria Villa, R., Pabón Guerrero, S., Benítez, R., & Gallo Corredor, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción: Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://sci2s.ugr.es/keel/pdf/algorithm/articulo/shapiro1965.pdf>
- Stewart, L. (2025). *¿Qué es la investigación descriptiva y cómo se utiliza?* ATLAS.ti. <https://atlasti.com/es/research-hub/investigacion-descriptiva>
- Torres, F. L. (2025, febrero 9). *Guayaquil: Puerto Hondo, una perla desperdiciada*. *Expreso*.
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2), 175–192.
- US EPA. (2007). *Método 3051A (SW-846): Digestión ácida asistida por microondas de sedimentos, lodos y aceites* (Rev. 1).
- Wende Chen, Y. C. (2022). Spatial heterogeneity analysis and source identification of heavy metals in soil: A case study of Chongqing, Southwest China. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(50), 21. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00313-3>
- Yunfeng, X., Tong-bin, C., Lei, M., Yang, J., Guo, Q.-j., Song, B., & Zhou, X.-y. (2011). Distribución espacial de la contaminación metálica del suelo

pesada estimada por diferentes métodos de interpolación: Análisis de precisión e incertidumbre. *Chemosphere*, 82, 468–476.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.053>

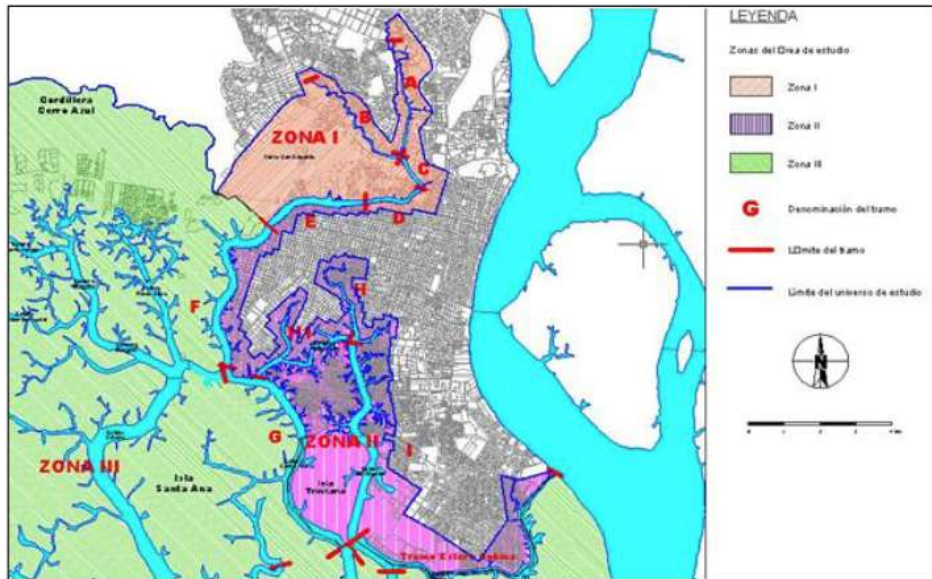
Zuñiga Guevara, G. V. (2007). *Descripción y propuesta de desarrollo del área turística: Puerto Hondo - Cerro Blanco, vía E40* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].

Zúñiga, P. I., Palacios, I. A., & Cedeño, R. J. (2023). Metodología de la investigación científica: Guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 40. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i4.7658](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658)

## 7. ANEXOS

### Anexo N° 1.

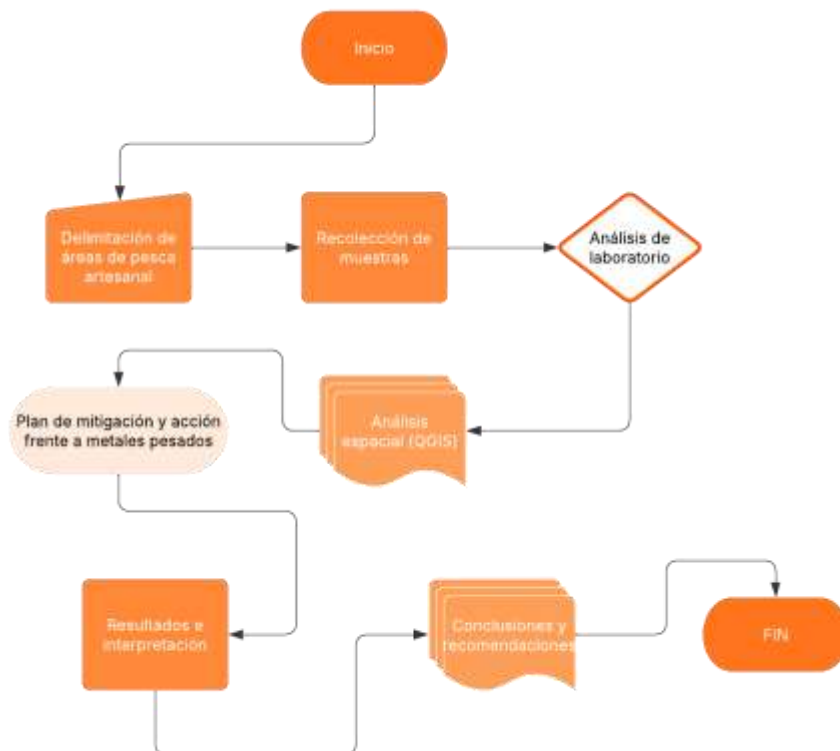
#### Zonas I, II, III del Estero Salado.



Fuente: Pazmiño, 2021

### Anexo N° 2.

#### Diagrama de flujo



Elaborado por: La Autora, 2025

**Anexo N° 3.**

**Recolección de las muestras en el Punto 1**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 4. Recolección de las muestras en el Punto 2**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 5.**

**Recolección de las muestras en el Punto 3**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 6.**

**Recolección de las muestras en el Punto 4**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 7.**

**Recolección de las muestras en el Punto 5**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 8.**

**Recolección de las muestras en el Punto 6**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 9.**

**Recolección de las muestras en el Punto 7**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 10.**

**Recolección de las muestras en el Punto 8**



**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Anexo N° 11.**

**Recolección de las muestras en el Punto 9**



Elaborado por: La Autora, 2025

**Anexo N° 12.**

**Recolección de las muestras en el Punto 10**



Elaborado por: La Autora, 2025

**Anexo N° 13.**

**Recolección de las muestras en el Punto 11**



Elaborado por: La Autora, 2025

**Anexo N° 14.**

**Recolección de las muestras en el Punto 12**



Elaborado por: La Autora, 2025

## 8. Apéndice

### Apéndice N° 1.

### Cronograma de actividades

TÍTULO DEL PROYECTO	ANÁLISIS DE METALES PESADOS (As, Pb) EN SEDIMENTOS DE ZONAS DE PESCA ARTESANAL EN PUERTO HONDO, GUAYAQUIL	INSTITUCIÓN	UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR
RESPONSABLE DEL PROYECTO	ALMACHI LINDAO AYLEN GIULIANNA	FECHA	29 DE AGOSTO DEL 2025

NÚMERO EDT	TÍTULO DE LA TAREA	FECHA DE INICIO	FECHA DE ENTREGA	DURACIÓN	SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				FEBRERO			
					S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
<b>1</b>	<b>Delimitar mediante encuestas con los pescadores locales, las áreas de pesca artesanal en los manglares de Puerto Hondo, para establecer los puntos de muestreo representativos.</b>																											
1.1	Visita al lugar de estudio	27/09/25	03/10/25	6																								
1.1.1	Realización de encuestas	04/10/25	10/10/25	6																								
1.2	Delimitación de puntos	11/10/25	12/10/25	1																								
<b>2</b>	<b>Cuantificar las concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) en los sedimentos recolectados en las zonas de pesca artesanal delimitadas, mediante un laboratorio acreditado.</b>																											
2.1	Recolección de muestras	18/10/25	19/10/25	1																								
2.2	Análisis de laboratorio	20/10/25	26/10/25	6																								
2.3	Análisis de resultados (estadística)	27/10/25	16/11/25	19																								
<b>3</b>	<b>Analizar la distribución espacial de las concentraciones de As y Pb en los sedimentos de Puerto Hondo, contrastando los resultados con los lineamientos internacionales de calidad de sedimentos (ISQG/TEL y PEL), a fin de establecer el nivel de riesgo ambiental.</b>																											
3.1	Creación de mapas SIG (DW/temáticos)	17/11/25	14/12/25	27																								
3.2	Comparación con normativa (Gula Canadiense)	15/11/25	16/11/25	1																								
3.2.1	Redacción de resultados y discusión	19/12/25	08/01/26	19																								
3.3	Elaboración del documento final (integración y formato)	12/01/26	26/01/26	14																								
3.4	Revisión y corrección del borrador	27/01/26	09/02/26	12																								
3.4.1	Entrega versión final	10/02/26	10/02/26	0																								

Elaborado por: La Autora, 2025

## Apéndice N° 2.

### Resultados de laboratorio Punto 1

**Mérieux**  
LaboSciences

INFORME DE ENSAYO N° 205437 Muestras 16

Pág. 11 / 12

Solicitante:	AYUDA ALMACEN UNIDAD
Cliente:	AYUDA ALMACEN UNIDAD
Dirección:	Guayaquil P.O. 20 de Julio
Producto:	MS-32046470
Número de Muestra:	1 muestra
Presentación:	Bolsa plástica
Procedimiento de la muestra:	Muestra preparada por el cliente
Código Lote:	Punto 16 - Olla en Salmorejo (Protección) Cruz
Identificación de la muestra:	MS-32046470
	Lot: 2
	-MS-364 (Unidades)
Punto de recepción de las muestras:	10112020
Punto de inicio de análisis:	10112020
Punto de término de análisis:	20112020
Código de Trabajo (CT):	1020-02

Parámetro	Unidad	Resultado	LMC	LOD
Amplias (M)	CFU	1976	-	-
Punto 16	CFU	1976	-	-



Almacén S.A.S. | T 081 4084322 E  
 Av. F. L. Ochoa 10-20 km. T 081 5757043 N  
 Laboratorio de Análisis: Pasteur  
 Vía a M. Coma  
 Ecuador | Guayaquil | No ciudad  
 www.merieux.com.ec

Elaborado por: La Autora, 2025

## Apéndice N° 3.

### Resultados de laboratorio Punto 2

**Mérieux**  
LaboSciences

INFORME DE ENSAYO N° 205438 Muestras 26

Pág. 11 / 12

Solicitante:	AYUDA ALMACEN UNIDAD
Cliente:	AYUDA ALMACEN UNIDAD
Dirección:	Guayaquil P.O. 20 de Julio
Producto:	MS-32046470
Número de Muestra:	1 muestra
Presentación:	Bolsa plástica
Procedimiento de la muestra:	Muestra preparada por el cliente
Código Lote:	Punto 16 - Olla en Salmorejo (Protección) Cruz
Identificación de la muestra:	MS-32046470
	Lot: 2
	-MS-364 (Unidades)
Punto de recepción de las muestras:	10112020
Punto de inicio de análisis:	10112020
Punto de término de análisis:	20112020
Código de Trabajo (CT):	1020-02

Parámetro	Unidad	Resultado	LMC	LOD
Amplias (M)	CFU	1976	-	-
Punto 16	CFU	1976	-	-



Almacén S.A.S. | T 081 4084322 E  
 Av. F. L. Ochoa 10-20 km. T 081 5757043 N  
 Laboratorio de Análisis: Pasteur  
 Vía a M. Coma  
 Ecuador | Guayaquil | No ciudad  
 www.merieux.com.ec

Elaborado por: La Autora, 2025

**Apéndice N° 4.**  
**Resultados de laboratorio Punto 3**

**Mérieux**  
 NutriSciences

INFORME DE ENSAYO N° 289459 Muestras 3/F

Substrato: #FLDN ALMACEN LINDAO  
 Cliente: #FLDN ALMACEN LINDAO  
 Dirección: Guayaquil Av. 25 de Julio  
 Producto: MS SEDIMENTO  
 Número de Muestras: 1 muestra  
 Presentación: Bolsa plástica  
 Procedencia de la muestra: Muestra proporcionada por el cliente  
 Código Lote: Punto 1 C - Ordo del Salween (Profundidad 2 m)  
 Identificación de la muestra: MS  
 Tipo: 2  
 UNIC Med. (Unidades)  
 Fecha de recepción de las muestras: 08/11/2025  
 Fecha de inicio de análisis: 08/11/2025  
 Fecha de término de análisis: 25/11/2025  
 Orden de Trabajo (OT): 289459

Parámetro	Acced	Result	UMC	LDQ
Análisis (F)	-	11.52	mg/g	-
Punto (F)	-	0.17	mg/g	-

**Elaborado por: La Autora, 2025**  
**Apéndice N° 5.**  
**Resultados de laboratorio Punto 4**

**Mérieux**  
 NutriSciences

INFORME DE ENSAYO N° 289508 Muestras 4/F

Substrato: #ATLEN ALMACEN LINDAO  
 Cliente: #ATLEN ALMACEN LINDAO  
 Dirección: Guayaquil Av. 25 de Julio  
 Producto: MW SEDIMENTO  
 Número de Muestras: 1 muestra  
 Presentación: Bolsa plástica  
 Procedencia de la muestra: Muestra proporcionada por el cliente  
 Código Lote: Punto 2 A - Cerca de Cansanera (Profundidad 10 m)  
 Identificación de la muestra: MW  
 Tipo: 2  
 UNIC Med. (Unidades)  
 Fecha de recepción de las muestras: 08/11/2025  
 Fecha de inicio de análisis: 08/11/2025  
 Fecha de término de análisis: 25/11/2025  
 Orden de Trabajo (OT): 289508

Parámetro	Acced	Result	UMC	LDQ
Análisis (F)	-	14.27	mg/g	-
Punto (F)	-	0.32	mg/g	-

**Elaborado por: La Autora, 2025**



**Apéndice N° 8.**  
**Resultados de laboratorio Punto 7**



INFORME DE ENSAYO N° 290850 Muestras 1/6

Pág 11 2

Solicitante : AYLEN ALMACHO LINDAO  
 Cliente : AYLEN ALMACHO LINDAO  
 Dirección : Guayaquil AV. 25 de Julio  
 Producto : M: SEDIMENTO  
 Número de Muestras : 1 muestra  
 Presentación : Bolsa plástica  
 Proveniencia de la muestra : Muestra proporcionada por el cliente  
 Código Lote : 3A Puerto ( Profundidad 10 cm )  
 Identificación de la muestra : M0  
 -Peso : 202g  
 -Unid. Med. : g  
 Fecha de recepción de las muestras : 24/11/2025  
 Fecha de inicio de análisis : 24/11/2025  
 Fecha de término de análisis : 01/12/2025  
 Orden de Trabajo (OT) : 19823-25

Parámetro	Acord.	Result.	IND.	LOG.
Arsenico (As)	1	4,35	mg/kg	0,25
Cromo (Cr)	1	4,35	mg/kg	0,25

Método	Norma
Arsenico	OPPA 801-14, Sistema Anál. de metales pesados, método por HPLC/MS
Cromo	OPPA 801-14, Sistema Anál. de metales pesados, método por HPLC/MS

Nota 1:  
 Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras recibidas en el laboratorio.  
 Los resultados corresponden únicamente a las muestras analizadas y no a las no analizadas.  
 La identificación de las muestras de responsabilidad del cliente. Para cualquier duda o comentario, por favor comunicarse con el laboratorio.  
 Este reporte no debe ser reproducido, copiado o distribuido, excepto con la autorización escrita del laboratorio.  
 Propiedad e información confidencial de Mérieux Nutrisciences S.A.  
 La información contenida en este informe es válida y confiable en la fecha de emisión.

Las unidades y abreviaturas que se indican a continuación, según el SI, son las unidades de medida de los resultados de los análisis.  
 Nota 2:  
 LOD: Límite de Detección  
 MD: No detectado o Trazo de detección  
 LLOQ: Límite de cuantificación, LOD Límite de detección  
 LLOQ (multiplicado) o EPANORMA, basado en un nivel de confianza de 0.9999.  
 Si B o Si B es la muestra analizada, consulte en el sitio internet de la muestra con respecto a un factor de ajuste, no se aplica el valor estándar.  
 (\*) Método de análisis de laboratorio.  
 (\*\*) Por favor de seguir de validación del método.  
 (\*\*) Referencia a Normativa.

Guayaquil, 1 de Diciembre de 2025

**Elaborado por: La Autora, 2025**  
**Apéndice N° 9.**  
**Resultados de laboratorio Punto 8**



INFORME DE ENSAYO N° 290851 Muestras 2/6

Pág 11 2

Solicitante : AYLEN ALMACHO LINDAO  
 Cliente : AYLEN ALMACHO LINDAO  
 Dirección : Guayaquil AV. 25 de Julio  
 Producto : M: SEDIMENTO  
 Número de Muestras : 1 muestra  
 Presentación : Bolsa plástica  
 Proveniencia de la muestra : Muestra proporcionada por el cliente  
 Código Lote : 3B Puerto ( Profundidad 5 cm )  
 Identificación de la muestra : M0  
 -Peso : 238g  
 -Unid. Med. : g  
 Fecha de recepción de las muestras : 24/11/2025  
 Fecha de inicio de análisis : 24/11/2025  
 Fecha de término de análisis : 01/12/2025  
 Orden de Trabajo (OT) : 19823-25

Parámetro	Acord.	Result.	IND.	LOG.
Arsenico (As)	1	4,04	mg/kg	0,25
Cromo (Cr)	1	4,13	mg/kg	0,25

Método	Norma
Arsenico	OPPA 801-14, Sistema Anál. de metales pesados, método por HPLC/MS
Cromo	OPPA 801-14, Sistema Anál. de metales pesados, método por HPLC/MS

Nota 1:  
 Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras recibidas en el laboratorio.  
 Los resultados corresponden únicamente a las muestras analizadas y no a las no analizadas.  
 La identificación de las muestras de responsabilidad del cliente. Para cualquier duda o comentario, por favor comunicarse con el laboratorio.  
 Este reporte no debe ser reproducido, copiado o distribuido, excepto con la autorización escrita del laboratorio.  
 Propiedad e información confidencial de Mérieux Nutrisciences S.A.  
 La información contenida en este informe es válida y confiable en la fecha de emisión.

Las unidades y abreviaturas que se indican a continuación, según el SI, son las unidades de medida de los resultados de los análisis.  
 Nota 2:  
 LOD: Límite de Detección  
 MD: No detectado o Trazo de detección  
 LLOQ: Límite de cuantificación, LOD Límite de detección  
 LLOQ (multiplicado) o EPANORMA, basado en un nivel de confianza de 0.9999.  
 Si B o Si B es la muestra analizada, consulte en el sitio internet de la muestra con respecto a un factor de ajuste, no se aplica el valor estándar.  
 (\*) Método de análisis de laboratorio.  
 (\*\*) Por favor de seguir de validación del método.  
 (\*\*) Referencia a Normativa.

Guayaquil, 1 de Diciembre de 2025

**Elaborado por: La Autora, 2025**

**Apéndice N° 10.**  
**Resultados de laboratorio Punto 9**



INFORME DE ENSAYO N° 290852 Muestras 3/6 Pag. 11 / 2

Solicitante	AYLEN ALMACH LINDAO
Cliente	AYLEN ALMACH LINDAO
Dirección	Guayaquil AV. 25 de Julio
Producto	M3 SEDIMENTO
Número de Muestras	1 muestra(s)
Presentación	Bolsa plástica
Procedencia de la muestra	Muestra proporcionada por el cliente
Código Lote	3C Puerto ( Profundidad 0 cm )
Identificación de la muestra	M3 -Peso : 2000 -Unid. Med. : g
Fecha de recepción de las muestras	26/11/2025
Fecha de inicio de análisis	26/11/2025
Fecha de término de análisis	01/12/2025
Orden de Trabajo (OT)	19523-25

Parámetro	Acord.	Result.	UMI	LOG
Asbestos (As)		1.41	mg/kg	0.25
Plomo (Pb)		3.75	mg/kg	0.25

**Método:**

Asbestos	APHA 801-01, Espectroscopía de absorción atómica por fluorescencia
Plomo	APHA 801-01, Espectroscopía de absorción atómica por fluorescencia

**Nota 1:**  
 Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras recibidas en el laboratorio.  
 Los resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas y no a las de origen.  
 La identificación de los contaminantes reportados en el informe Food Testing Institute Europe S.L. es un procedimiento por el cual el cliente proporciona información sobre la muestra por medio de un formulario de identificación de la muestra.  
 Prácticamente todos los análisis de laboratorio se realizan en un laboratorio acreditado por el cliente.  
 La información contenida en este certificado debe usarse a discreción por el cliente interesado.

**Nota 2:**  
 Los siguientes valores máximos que se indican a continuación, están fijados de acuerdo a la legislación de A.S.A.  
 Nota 3:  
 CCM Límite de Decisión  
 MD: No detectado en todo el análisis.  
 LCM: Límite de cuantificación (LQ) Límite de decisión.  
 LCM (microorganismos) y BIFURCADA, basados en un nivel de confianza de 95% y 20000.  
 N.B. En el 95% de las ocasiones de decisión, cualquier nivel de decisión de la muestra recibida podría por el hecho de análisis, no ser el más adecuado.  
 (\*) Por favor, tener presente los niveles de contaminación.  
 (\*\*) Por favor, tener presente los niveles de contaminación.  
 (\*\*) Distribución Subnormalidad.

Guayaquil, 1 de Diciembre de 2025

**Elaborado por: La Autora, 2025**  
**Apéndice N° 11.**  
**Resultados de laboratorio Punto 10**



INFORME DE ENSAYO N° 290853 Muestras 4/E Pag. 11 / 2

Solicitante	AYLEN ALMACH LINDAO
Cliente	AYLEN ALMACH LINDAO
Dirección	Guayaquil AV. 25 de Julio
Producto	M4 SEDIMENTO
Número de Muestras	1 muestra(s)
Presentación	Bolsa plástica
Procedencia de la muestra	Muestra proporcionada por el cliente
Código Lote	4A Bordo de Estero Cerro de Capanera ( Profundidad 15 cm )
Identificación de la muestra	M4 -Peso : 9500 -Unid. Med. : g
Fecha de recepción de las muestras	26/11/2025
Fecha de inicio de análisis	26/11/2025
Fecha de término de análisis	01/12/2025
Orden de Trabajo (OT)	19523-25

Parámetro	Acord.	Result.	UMI	LOG
Asbestos (As)		0.58	mg/kg	0.25
Plomo (Pb)		3.72	mg/kg	0.25

**Método:**

Asbestos	APHA 801-01, Espectroscopía de absorción atómica por fluorescencia
Plomo	APHA 801-01, Espectroscopía de absorción atómica por fluorescencia

**Nota 1:**  
 Los resultados reportados corresponden únicamente a las muestras recibidas en el laboratorio.  
 Los resultados corresponden únicamente a las muestras recibidas y no a las de origen.  
 La identificación de los contaminantes reportados en el informe Food Testing Institute Europe S.L. es un procedimiento por el cual el cliente proporciona información sobre la muestra por medio de un formulario de identificación de la muestra.  
 Prácticamente todos los análisis de laboratorio se realizan en un laboratorio acreditado por el cliente.  
 La información contenida en este certificado debe usarse a discreción por el cliente interesado.

**Nota 2:**  
 Los siguientes valores máximos que se indican a continuación, están fijados de acuerdo a la legislación de A.S.A.  
 Nota 3:  
 CCM Límite de Decisión  
 MD: No detectado en todo el análisis.  
 LCM: Límite de cuantificación (LQ) Límite de decisión.  
 LCM (microorganismos) y BIFURCADA, basados en un nivel de confianza de 95% y 20000.  
 N.B. En el 95% de las ocasiones de decisión, cualquier nivel de decisión de la muestra recibida podría por el hecho de análisis, no ser el más adecuado.  
 (\*) Por favor, tener presente los niveles de contaminación.  
 (\*\*) Por favor, tener presente los niveles de contaminación.  
 (\*\*) Distribución Subnormalidad.

Guayaquil, 1 de Diciembre de 2025

**Elaborado por: La Autora, 2025**



**Apéndice 14.**

**Medidas de gestión ambiental de prevención asociadas a As y Pb**

Aspecto ambiental	Impacto identificado	Metal asociado	Medida preventiva	Indicador	Medio de verificación
Descarga de efluentes acuícolas	Acumulación potencial de As en sedimentos cercanos al P10	As	Revisar periódicamente el manejo de efluentes, lodos y canales cercanos a la camaronera, a fin de prevenir aportes de material hacia el estuario.	Concentración de As en sedimento del P10 estable o con tendencia decreciente, sin superar el valor de referencia.	Informes de laboratorio; registros de monitoreo semestral
Manejo de lodos y sedimentos canales acuícolas	Acumulación de materia orgánica y de posible retención de As en sedimentos superficiales	As	Mantener prácticas adecuadas de manejo y disposición de lodos acuícolas, evitando su acumulación o descarga en zonas próximas al manglar y al estuario.	Presencia o ausencia de lodos acuícolas en áreas cercanas al campo	Registro fotográfico; ficha de inspección de campo

Aspecto ambiental	Impacto identificado	Metal asociado	Medida preventiva	Indicador	Medio de verificación
Descarga de aguas residuales cercanas a la PTAR	Posible acumulación progresiva de Pb en sedimentos superficiales	Pb	Verificación periódica del funcionamiento de la PTAR y la identificación de posibles descargas domésticas o controladas hacia el estuario	Concentración de Pb en sedimentos superficiales del P2 estable o con tendencia decreciente.	Informes técnicos; resultados de laboratorio
Tránsito de usuarios y actividades recreativas en el balneario	Alteración física del sedimento superficial en zonas de acumulación de Pb	Pb	Delimitar áreas sensibles y colocar señalética ambiental sobre la importancia de evitar la remoción de sedimentos, excavaciones o ingreso no controlado a zonas de manglar	Número de puntos señalizados en zonas sensibles	Registro fotográfico georreferenciado; acta de instalación
Presencia de zonas con concentraciones localizadas de As y Pb en sedimentos	Incremento progresivo no detectado de As y Pb	As, Pb	Realizar monitoreo semestral de sedimentos superficiales en los puntos críticos P2 y P10, comparando los resultados con los valores ISQG/TEL y PEL	Variación semestral de As y Pb en mg/kg	Informes de laboratorio; mapas comparativos

Elaborado por: La Autora, 2025

## Apéndice 15.

### Medidas de gestión ambiental de mitigación asociadas a As y Pb

Aspecto ambiental	Impacto identificado	Metal asociado	Medida de mitigación	Indicador	Medio de verificación
Manejo inadecuado o acumulación de lodos provenientes de la actividad acuícola	Incremento de la concentración de As en sedimentos superficiales cercanos al P10	As	Fortalecer el manejo y retiro controlado de lodos acuícolas, o evitando su acumulación cerca del manglar	Cantidad de lodos sedimentos retirados de forma controlada	Registro de retiro; informe técnico; registro fotográfico
Descargas domésticas o efluentes no controlados hacia el estuario	Incremento de Pb en sedimentos superficiales cercanos al P2	Pb	Gestionar la corrección de descargas no controladas y reforzar el mantenimiento de la infraestructura sanitaria cercana al estuario	Número de descargas no controladas corregidas	Informes técnicos; registros de mantenimiento
Presencia de fuentes potenciales de origen antrópico en sectores críticos	Incremento progresivo de As o Pb en sedimentos superficiales.	As, Pb	Activar una revisión técnica de las posibles fuentes asociadas a PTAR, balneario y camaronera cuando se detecten aumentos sostenidos de As o Pb	Tendencia temporal de As y Pb posterior a la revisión técnica	Informes de laboratorio; mapas de tendencia; actas técnicas

**Elaborado por: La Autora, 2025**