



**VARIABILIDAD DE LOS CONTAMINANTES ORGÁNICOS ANTE LOS CAMBIOS
NATURALES Y ANTROPOGÉNICOS DEL GOLFO DE MORROSQUILLO, CARIBE
COLOMBIANO**

Por:

Yirleza Tamayo Murillo

Trabajo de Grado

Asesor:

Pedro Pablo Vallejo Toro, Químico, Doctor en Ciencias del mar, Universidad de Antioquia.
Medellín-Colombia.

Universidad de Antioquia

Ciencias del mar

Oceanografía

Turbo-Antioquia

2024

Cita	(Tamayo Murillo, 2024)
Referencia	Tamayo Murillo, Y., (2024). <i>VARIABILIDAD DE LOS CONTAMINANTES ORGÁNICOS ANTE LOS CAMBIOS NATURALES Y ANTROPOGÉNICOS DEL GOLFO DE MORROSQUILLO, CARIBE COLOMBIANO</i> , Trabajo de grados. Universidad de Antioquia, Turbo-Antioquia.
Estilo APA 7 (2020)	



Corporación Académica Ambiental (CAA)

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR)



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por guiar mis pasos; a mi madre, por su amor incondicional y apoyo constante; y a mí, por la perseverancia y dedicación que me han llevado hasta aquí.

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecerle a Dios por permitirme vivir la experiencia de ser parte del Alma Mater, y cumplir el sueño de ser una profesional, agradezco a la Universidad de Antioquia por no cerrar las puertas del conocimiento a cada estudiante sin importar su condición económica, social, religiosa o física, a mi madre Nancy Murillo, por no rendirse y ser una mujer de admirar que trabajo día a día para ver a su hija realizarse, a Alex Coens por ser partícipe de mi formación académica y por brindarme apoyo en formas que no se pueden describir, gracias a los docentes y en especial al profesor Pedro Pablo Vallejo Toro, por su arduo trabajo y dedicación, gracias al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) por el apoyo y suministro de datos que hicieron posible este trabajo.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema	
1.1. Antecedentes	12
2. Justificación	12
3. Objetivos	12
3.1. Objetivo General	
3.2. Objetivos Específicos	
Hipótesis	
13	
Marco teórico	
13	
5.1 Contaminación en zona costera	
5.2. Contaminantes orgánicos en sedimentos costeros	
5.3. Efectos de los cambios naturales y antropogénicos en los sedimentos costeros	14
5.4. Relación entre la variabilidad de los contaminantes orgánicos y los cambios naturales y antropogénicos del sedimento en zonas costeras	
5.5. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)	15
5.5.1. Benzo(b)fluoranteno	
5.5.2. Benzo(k)fluoranteno	
5.5.3. Criseno	
5.5.4. Fenantreno	17
5.5.5. HAP-Fluoranteno	
5.5.6. HAP-Pireno	
5.6. CO ₃	18
5.7. Derivado de petróleo equivalente a Criseno	
5.8. LOI 550	
5.9. Datación con ²¹⁰ Pb	
5.10. Modelo CF/CS	20
Metodología	21
6.1. Área de Estudio	23
6.2. Metodología	
6.2.1. Recolección de datos	
6.2.2. Análisis de Muestras	
6.2.2.1. Análisis de Muestra en Laboratorio	24
6.2.3. Datos Recibidos	
6.2.4. Organización de Datos	26
Resultados	33
Discusión	40
Conclusiones	41

Recomendaciones

Referencias

43

Lista de tablas

Tabla 1 Estructura y fórmula molecular de los HAPs.	16
Tabla 2 Ubicación de los núcleos del sedimento recolectado.	24
Tabla 3 Base de datos con los límites de detección (LDM) y cuantificación (LCM) de los métodos utilizados.	25
Tabla 4 Concentración de HAPs y parámetros sedimentarios en diferentes profundidades del Golfo de Morrosquillo.	27

Lista de figuras

Figura 1 Mapa Golfo Morrosquillo y punto de muestreo INVEMAR	21
Figura 2 Núcleo representación Gráfica.	26
Figura 3 Concentraciones de HAP-Benzo(k)Fluoranteno en función de la profundidad en sedimentos.	34
Figura 4 Concentraciones de HAP-Benzo(b)Fluoranteno en función de la profundidad en sedimentos.	
Figura 5 Concentraciones de HAP-Criseno en función de la profundidad en sedimentos.	35
Figura 6 Concentraciones de HAP-Fluoranteno en función de la profundidad en sedimentos.	36
Figura 7 Concentraciones de HAP-Pireno en función de la profundidad en sedimentos.	
Figura 8 Concentraciones de HAP-Fenantreno en función de la profundidad en sedimentos.	37
Figura 9 Concentraciones de derivados de petróleo equivalentes a Criseno en función de la profundidad en sedimentos.	38
Figura 10 Porcentaje de Pérdida por Ignición a 550°C (LOI 550) en función de la profundidad en sedimentos.	39
Figura 11 Porcentaje de carbonato de calcio (CO ₃) en función de la profundidad en sedimentos.	

Siglas, acrónimos y abreviaturas

INVEMAR	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras
HAPs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
PCB	Bifenilos policlorados
OCP	Organoclorados
LOI	Loss On Ignition
CF/CS	Modelo de Flujo Constante y Sedimentación Constante
BDC	Núcleo 1 Bahía de Cispatá
GDMa	Núcleo 2 Desembocadura de la Bahía de Cispatá (sur)
GDMb	Núcleo 3 cerca Islas de San Bernardo (norte)
LCM	Límites de Cuantificación
LDM	Límites de Detección

Resumen

La contaminación ambiental es un problema global que afecta la calidad del agua, suelo y aire, así como la salud humana. En Colombia, las zonas costeras enfrentan serios desafíos debido a la contaminación del agua por contaminantes orgánicos, derivados de actividades como la industria, agricultura, ganadería, minería y mala gestión de residuos. El Golfo de Morrosquillo es particularmente vulnerable, ya que las actividades antropogénicas como la sedimentación, erosión costera y deforestación alteran la dinámica del sedimento y afectan la biodiversidad. Este trabajo busca investigar la relación entre la variabilidad de contaminantes orgánicos y los cambios en el sedimento en esta zona, con el objetivo de generar información para mejorar la gestión ambiental y proteger la salud humana y la biodiversidad.

Palabras clave: contaminación ambiental, calidad del agua, suelo

Abstract

Environmental pollution is a global issue that affects the quality of water, soil, and air, as well as human health. In Colombia, coastal areas face serious challenges due to water pollution from organic contaminants and heavy metals, derived from activities such as industry, agriculture, livestock, mining, and poor waste management. The Gulf of Morrosquillo is particularly vulnerable, as anthropogenic activities such as sedimentation, coastal erosion, and deforestation alter sediment dynamics and affect biodiversity. This study aims to investigate the relationship between the variability of organic contaminants and changes in sediment in this area, with the goal of generating information to improve environmental management and protect human health and biodiversity.

Keywords: environmental pollution, water quality, soil

Introducción

La presente investigación aborda la problemática de la contaminación ambiental en el Golfo de Morrosquillo, un tema crítico que impacta la calidad del agua, el suelo y la salud de las comunidades locales. El objetivo principal de este estudio es analizar la relación entre la variabilidad de contaminantes orgánicos y los cambios en el sedimento, buscando generar información que mejore la gestión ambiental y proteja la biodiversidad.

El planteamiento del problema se centra en la identificación de fuentes de contaminación derivadas de actividades industriales, agrícolas y mineras, así como su interacción con procesos naturales. La pregunta de investigación formulada es: ¿Cuál es la relación entre la variabilidad de los contaminantes orgánicos y los cambios en el sedimento en el Golfo de Morrosquillo?

La justificación de esta investigación radica en la necesidad de comprender las dinámicas de contaminación en la región, proporcionando así herramientas para la toma de decisiones informadas en políticas públicas.

1. Planteamiento del problema

La contaminación ambiental es uno de los principales problemas a nivel mundial, afectando la calidad del agua, el suelo, el aire y la salud humana (Gómez y Ramírez, 2017). En Colombia, la problemática ambiental afecta a varias regiones del país, especialmente las zonas costeras (Rodríguez et al., 2015). La contaminación del agua en estas áreas es un problema grave, debido a la presencia de contaminantes orgánicos que provienen de actividades antropogénicas como la industria, la agricultura, la ganadería, la minería y la disposición de residuos sólidos y líquidos (García y Pérez, 2019; Sánchez et al., 2020). Además, los cambios naturales y antropogénicos en el sedimento del Golfo de Morrosquillo representan un desafío ambiental significativo que puede afectar tanto la biodiversidad como la salud humana (Villamizar et al., 2018). En este sentido, la sedimentación, la erosión costera, la deforestación y la construcción de infraestructura costera son algunas de las actividades antropogénicas que pueden alterar la dinámica del sedimento y la calidad del agua en esta zona costera (López y Martínez, 2016; Villamizar et al., 2018). Por lo tanto, es necesario investigar la relación entre la variabilidad de los contaminantes orgánicos y debido a ello surgió el interrogante de ¿Cuál es la relación entre la variabilidad de los contaminantes orgánicos y los cambios naturales y antropogénicos del sedimento en una zona costera, como el Golfo de Morrosquillo?, con el fin de generar información relevante para la toma de decisiones y la implementación de medidas de gestión ambiental que protejan la salud humana y la biodiversidad de la zona.

1.1 Antecedentes

En el contexto del Golfo de Morrosquillo, estudios realizados por INVEMAR y otras instituciones han identificado la influencia de actividades antropogénicas, como la agricultura, la pesca y el desarrollo turístico, en la calidad del agua y los sedimentos. Estos estudios sugieren que las prácticas humanas han contribuido a la introducción de contaminantes orgánicos, afectando la salud de los ecosistemas marinos y los recursos pesqueros.

2. Justificación

La contaminación ambiental en el Golfo de Morrosquillo representa un desafío significativo, dado que esta zona costera es de gran importancia ecológica y social en Colombia. La calidad del agua y del sedimento en esta región no solo impacta la biodiversidad marina, sino que también tiene repercusiones directas en la salud y el bienestar de las comunidades locales que dependen de estos recursos para su sustento. La falta de información sistemática sobre la relación entre la variabilidad de los contaminantes orgánicos y los cambios en el sedimento limita la capacidad de los responsables de la formulación de políticas para implementar estrategias efectivas de gestión ambiental. Esta investigación tiene como objetivo llenar ese vacío de conocimiento, proporcionando datos que permitan comprender mejor los mecanismos de contaminación y sus efectos en el ecosistema.

Además, al ofrecer un análisis de la problemática, esta investigación contribuirá al desarrollo de políticas públicas que promuevan la conservación y sostenibilidad de los recursos naturales en el Golfo de Morrosquillo. La relevancia de este estudio se extiende no solo a la protección del medio ambiente, sino también a la promoción de la salud pública y el desarrollo económico sostenible en la región.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

3.1.1. Investigar la relación entre la variabilidad de contaminantes orgánicos y los cambios naturales y antropogénicos del sedimento en el Golfo de Morrosquillo, para contribuir a la gestión ambiental en la región.

3.2 Objetivos específicos

3.2.1. Analizar la presencia y concentración de contaminantes orgánicos en el sedimento del Golfo de Morrosquillo.

3.2.2. Evaluar el impacto de actividades antropogénicas como la minería, agricultura y urbanización en la calidad del agua y la dinámica del sedimento en la zona costera.

4. Hipótesis

La variabilidad de los contaminantes orgánicos en sedimentos del Golfo de Morrosquillo está relacionada con los cambios naturales y antropogénicos en la zona costera.

5. Marco teórico

5.1. Contaminación en zonas costeras

Las zonas costeras son ecosistemas críticos que ofrecen una amplia gama de recursos naturales y servicios ambientales esenciales para el bienestar humano y la salud de los ecosistemas marinos. Estos ecosistemas proporcionan beneficios como la pesca, la protección contra tormentas y la regulación del clima. No obstante, debido a su cercanía a áreas urbanas, puertos y zonas industriales, también son extremadamente vulnerables a la contaminación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019). La contaminación en las costas puede tener múltiples orígenes, desde la descarga de aguas residuales hasta vertidos de petróleo y el uso indiscriminado de productos químicos y pesticidas en actividades agrícolas. Estas prácticas, aunque necesarias para el desarrollo económico, tienen consecuencias severas para la biodiversidad marina y la calidad del agua. Sin una gestión adecuada, la presión sobre estos ecosistemas seguirá aumentando, comprometiendo su capacidad para seguir brindando servicios ambientales clave.

5.2. Contaminantes orgánicos en sedimentos costeros

Los sedimentos marinos juegan un papel fundamental como uno de los principales depósitos de contaminantes orgánicos en las zonas costeras. La capacidad de los sedimentos para acumular estos compuestos los convierte en indicadores clave de la calidad ambiental. Los contaminantes presentes en los sedimentos pueden provenir de diversas fuentes, incluidas las actividades humanas, como la industria y la agricultura, así como la deposición atmosférica (Pinedo-Hernández et al., 2016). Entre los contaminantes orgánicos más comunes se encuentran los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), los bifenilos policlorados (PCB), los organoclorados (OCP) y diversos plaguicidas. Estas sustancias, aunque útiles en ciertos contextos, tienen un impacto significativo en la salud de los ecosistemas marinos debido a su

persistencia y toxicidad.

5.3. Efectos de los cambios naturales y antropogénicos en los sedimentos costeros

Los sedimentos costeros son dinámicos y están sujetos a una serie de cambios tanto naturales como antropogénicos. Factores naturales como la erosión costera, la sedimentación, las fluctuaciones del nivel del mar y eventos climáticos extremos, como tormentas y huracanes, tienen un impacto directo en la estructura y composición de los sedimentos en las zonas costeras. Sin embargo, los cambios provocados por las actividades humanas suelen ser más drásticos y acelerados. La urbanización, la deforestación, la agricultura intensiva, así como la construcción de infraestructuras costeras y la actividad portuaria y turística, son algunos de los principales motores de transformación de estos ecosistemas (Villamizar-Cordero & Rodríguez-Rodríguez, 2018). Estos cambios antropogénicos a menudo agravan los efectos naturales, intensificando la degradación de los sedimentos y afectando tanto a la biodiversidad como a la calidad ambiental.

5.4. Relación entre la variabilidad de los contaminantes orgánicos y los cambios naturales y antropogénicos del sedimento en zonas costeras

La variabilidad de los contaminantes orgánicos en los sedimentos costeros está fuertemente influenciada tanto por factores naturales como por actividades humanas. Cambios naturales, como la erosión costera y la sedimentación, pueden alterar la distribución y concentración de estos contaminantes, afectando la calidad del sedimento en diferentes áreas. Por otro lado, la actividad humana, como la industrialización y la urbanización, contribuye al aumento de la cantidad y la diversidad de contaminantes orgánicos en los sedimentos, lo que representa una amenaza para la salud de los ecosistemas marinos y la salud humana (Pinedo-Hernández et al., 2016).

La contaminación en las zonas costeras es, sin duda, un tema de preocupación global debido a los impactos negativos que puede tener en la biodiversidad y en las comunidades que dependen de estos ecosistemas. Además de las fuentes mencionadas, existen otros factores que agravan esta problemática. Un ejemplo claro es la agricultura, donde el uso excesivo de fertilizantes y pesticidas genera escorrentía hacia los cuerpos de agua costeros. Esta escorrentía contribuye a la eutrofización, que se caracteriza por el crecimiento excesivo de algas y una reducción significativa del oxígeno disuelto en el agua, lo que causa la muerte de peces y otras especies acuáticas. La sobrecarga de nutrientes y la consiguiente degradación del agua no solo afecta a la fauna marina, sino también a las comunidades humanas que dependen de la pesca y el turismo.

La industria es una de las principales fuentes de contaminación en las zonas costeras, contribuyendo a través de la descarga de aguas residuales y la liberación de productos químicos tóxicos. Las actividades industriales generan contaminantes como metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y productos químicos sintéticos, que pueden acumularse en los sedimentos costeros. Esta acumulación tiene efectos perjudiciales en los organismos marinos, afectando la

salud de los ecosistemas y de las comunidades que dependen de ellos para su sustento (Villamizar-Cordero & Rodríguez-Rodríguez, 2018).

La contaminación por petróleo representa una preocupación significativa en las zonas costeras. Los derrames de petróleo pueden ocurrir durante la extracción, el transporte y el almacenamiento, así como a raíz de accidentes en el mar, como los provocados por barcos petroleros. Estos derrames tienen consecuencias devastadoras para los ecosistemas costeros, resultando en la muerte de aves, peces y otros animales marinos, además de afectar negativamente la calidad del agua y la salud de los ecosistemas costeros durante años (García et al., 2019). Además de estas fuentes, la deposición atmosférica de contaminantes también contribuye a la contaminación en las zonas costeras. Contaminantes transportados por el aire, como los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno, pueden depositarse en los cuerpos de agua costeros a través de la lluvia y la deposición seca. Este proceso puede llevar a la acumulación de contaminantes en los sedimentos costeros, lo que resulta en efectos adversos sobre los organismos marinos y los ecosistemas costeros (Pérez et al., 2020).

Es importante destacar que la contaminación en las zonas costeras no solo impacta a los ecosistemas marinos, sino que también tiene implicaciones significativas para la salud humana. Las personas que residen cerca de estas áreas y dependen de los recursos marinos para su subsistencia, como la pesca y el turismo, están en riesgo de exposición a contaminantes. Esto puede ocurrir a través del consumo de alimentos marinos contaminados o por el contacto directo con agua contaminada. Estudios han demostrado que los contaminantes en los organismos marinos pueden acumularse en la cadena alimentaria, lo que representa un peligro para la salud pública (Álvarez et al., 2021). Además, la exposición prolongada a estas sustancias puede resultar en problemas de salud graves, como enfermedades respiratorias y trastornos neurológicos (Martínez et al., 2022).

5.5. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs)

Los HAPs, o Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, son un grupo de compuestos químicos orgánicos que se caracterizan por su estructura de anillos de carbono fusionados, lo que les confiere similitudes con el benceno. Estos compuestos pueden formarse durante la combustión incompleta de materiales orgánicos, como el carbón, el petróleo y la madera. Además, se encuentran en productos derivados del alquitrán de hulla y en el humo de cigarrillo, lo que representa una preocupación significativa para la salud humana y el medio ambiente (Marrugo-Negrete et al., 2017). La presencia de HAPs en el medio ambiente es especialmente alarmante debido a su potencial carcinogénico y su capacidad para bioacumularse en organismos acuáticos (González et al., 2019).

Algunos HAPs son reconocidos como carcinógenos, lo que implica que su inhalación o exposición prolongada puede incrementar el riesgo de desarrollar cáncer en humanos. Esta

característica ha llevado a una creciente preocupación en la comunidad científica y en la salud pública sobre la exposición a estos compuestos (IARC, 2010). Además de sus efectos cancerígenos, ciertos HAPs pueden ocasionar otros problemas de salud, como daño pulmonar y efectos adversos sobre el sistema inmunológico, lo que puede comprometer la capacidad del organismo para combatir infecciones y enfermedades (U.S. EPA, 2021).

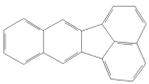
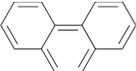
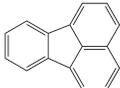
HAPs	Estructura	Fórmula molecular
<i>Benzo(b)fluoranteno</i>		C₂₀H₁₂
<i>Benzo(k)fluoranteno</i>		C₂₀H₁₂
<i>Criseno</i>		C₁₈H₁₂
<i>Fenantreno</i>		C₁₄H₁₀
<i>Fluoranteno</i>		C₁₆H₁₀
<i>Pireno</i>		C₁₆H₁₀

Tabla 1. Estructura y fórmula molecular de los HAPs

5.5.1. Benzo(b)fluoranteno

El hidrocarburo aromático policíclico (HAP) que consta de cuatro anillos de carbono fusionados es conocido por ser un contaminante persistente, lo que significa que su degradación en el medio ambiente es difícil y puede permanecer durante largos períodos (Wang et al., 2018). La exposición a este compuesto no se limita únicamente a las zonas industriales; también se encuentra en áreas urbanas debido al tráfico vehicular y en regiones rurales a causa de la quema de biomasa. Esta amplia distribución resalta la importancia de monitorear y regular la presencia de HAPs en diferentes entornos, ya que su acumulación puede tener efectos nocivos en la salud humana y el ecosistema (Zhang et al., 2020).

5.5.2. Benzo(k)fluoranteno

Hidrocarburo aromático policíclico (HAP) cuya estructura molecular consta de cinco anillos de benceno fusionados en una configuración específica. Estos anillos están dispuestos de tal manera que crean una molécula plana y extendida. La estructura química de los HAPs como el benzo(k)fluoranteno contribuye a su estabilidad y persistencia en el ambiente, así como a su capacidad para interactuar con el ADN y otras moléculas biológicas, lo que puede llevar a efectos tóxicos y carcinogénicos. Esta estructura contribuye a su baja solubilidad en agua y su alta afinidad por las partículas de suelo y sedimentos, lo que facilita su persistencia en el ambiente.

5.5.3. Criseno

El criseno es un hidrocarburo aromático policíclico (HAP) cuya estructura molecular está compuesta por cuatro anillos de benceno fusionados en una configuración angular. Esta disposición molecular influye en su degradación, dependiendo de la matriz ambiental en la que se encuentre.

- **Fotodegradación en la atmósfera:** Bajo la luz solar, el criseno puede experimentar fotodegradación en la atmósfera. Sin embargo, este proceso es relativamente lento debido a su estructura molecular estable (López et al., 2019).
- **Biodegradación en suelos y sedimentos:** La biodegradación por microorganismos en suelos y sedimentos es también un proceso lento para el criseno, lo que contribuye a su persistencia en el medio ambiente (Zhou et al., 2020).

5.5.4. Fenantreno

El fenantreno, un hidrocarburo aromático policíclico (HAP), presenta una estructura química compuesta por tres anillos de benceno fusionados en una configuración lineal. Esta estructura molecular contribuye a su persistencia en el medio ambiente, especialmente en sedimentos, por varias razones:

- Teoría:

1. **Estructura Molecular:** La estructura lineal del fenantreno, con enlaces π conjugados, favorece su adsorción a partículas del suelo y sedimentos debido a interacciones de tipo π - π entre los anillos bencénicos y las superficies sólidas. Esta adsorción reduce su movilidad en el medio acuático y facilita su acumulación en los sedimentos (Zhao et al., 2019).

2. **Baja Solubilidad en agua:** El fenantreno exhibe una baja solubilidad en agua, dado su carácter hidrofóbico, lo que limita su dispersión en el medio acuático y favorece su retención en los sedimentos una vez que entra en contacto con el agua (Mao et al., 2020).

3. **Resistencia a la degradación:** La estructura química del fenantreno lo hace resistente a la degradación biológica y química en el medio ambiente. La ausencia de grupos funcionales reactivos dificulta su metabolismo por microorganismos y enzimas, lo que prolonga su permanencia en los sedimentos (González et al., 2018).

¿Por qué el fenantreno es uno de los HAPs más persistentes en el sedimento?

El fenantreno exhibe una mayor persistencia en los sedimentos debido a su estructura molecular lineal, que favorece su adsorción a las superficies sólidas (Pérez et al., 2018). Esta estructura, junto con su baja solubilidad en agua, limita su dispersión en el medio acuático, permitiendo que el fenantreno se acumule en sedimentos (Mao et al., 2020). Además, su resistencia a la degradación biológica y química, causada por la falta de grupos funcionales reactivos, contribuye a su persistencia en el medio ambiente (González et al., 2018). Estas características hacen que el fenantreno sea menos susceptible a la degradación, lo que resulta en una acumulación significativa en los sedimentos a lo largo del tiempo.

5.5.5. HAP-Fluoranteno

El fluoranteno es un hidrocarburo aromático policíclico (HAP) compuesto por cuatro anillos de benceno, que se origina principalmente de la combustión incompleta de materiales orgánicos, como combustibles fósiles y el humo del tabaco (Arias et al., 2017). Este compuesto es persistente en el medio ambiente debido a su baja solubilidad en agua y alta lipofilia, lo que facilita su acumulación tanto en sedimentos como en organismos acuáticos (Gao et al., 2018). Su persistencia y tendencia a la bioacumulación lo convierten en un contaminante de preocupación en ecosistemas acuáticos (Zhao & Liu, 2019)

5.5.6. HAP-Pireno

El pireno es un hidrocarburo aromático policíclico (HAP) que se genera principalmente por la combustión incompleta de materiales orgánicos, como carbón, petróleo y madera (Zhou et al., 2016). Es altamente persistente en sedimentos acuáticos debido a su baja solubilidad en agua y su

tendencia a adsorberse a partículas sólidas, lo que puede llevar a una acumulación en ecosistemas acuáticos (Sun et al., 2018). Aunque el pireno es resistente a la degradación química, ciertos microorganismos pueden metabolizarlo, lo que puede ser aprovechado en procesos de bioremediación para reducir su concentración en ambientes contaminados (Mishra et al., 2019).

5.6. CO₃

La abreviatura CO₃²⁻ se refiere al ion carbonato, compuesto por un átomo de carbono (C) y tres átomos de oxígeno (O), con una carga neta de -2 (Jones et al., 2015). Este ion es uno de los más comunes entre los iones poliatómicos y juega un rol esencial en diversos procesos tanto químicos como geológicos (Smith & Taylor, 2017). El ion carbonato se presenta en diversas formas, siendo las más comunes el carbonato de calcio (CaCO₃) y el carbonato de sodio (Na₂CO₃) (Brown et al., 2019). Estos compuestos son fundamentales en una amplia gama de procesos, como la formación de rocas sedimentarias y la producción industrial de productos químicos (Anderson & Green, 2018).

5.7. Derivado de petróleo equivalente a Criseno

El criseno (C₁₈H₁₂) es un hidrocarburo aromático policíclico (HAP) compuesto por cuatro anillos bencénicos fusionados. Se genera principalmente como un subproducto de la combustión incompleta de materiales orgánicos, incluidos los combustibles fósiles y la biomasa (Zhang et al., 2017). Este compuesto es persistente en el medio ambiente debido a su baja solubilidad en agua y su capacidad de adsorberse a partículas sólidas, lo que facilita su acumulación en los sedimentos (Wang & Chen, 2019). Sin embargo, se han identificado cepas bacterianas capaces de metabolizar el criseno, lo que abre la posibilidad de utilizar estrategias de biorremediación para reducir su concentración en ambientes contaminados, aunque la eficacia de estos procesos depende en gran medida de las condiciones ambientales (Liu et al., 2020).

5.8. LOI 550

LOI 550 está relacionado con contaminantes y es un método de análisis utilizado para medir la materia orgánica que se quema a 550 °C (aproximadamente 1022 °F) durante un proceso de análisis. LOI es la abreviatura de "Loss On Ignition" (Pérdida por Calcinación) (Heiri et al., 2001). En el contexto de análisis de contaminantes, el LOI 550 se refiere a la cantidad de materia orgánica que se descompone o se volatiliza a 550 °C en una muestra determinada (Santisteban et al., 2004). Este tipo de análisis es comúnmente utilizado para caracterizar muestras de suelo, sedimentos o residuos con el fin de determinar el contenido de materia orgánica volátil y otros materiales que se queman a esa temperatura (Schumacher, 2002).

El resultado de este análisis proporciona información valiosa sobre la composición y las propiedades de la muestra, lo que puede ser útil para evaluar su impacto ambiental o su idoneidad para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, en suelos contaminados, el LOI 550 puede utilizarse para evaluar la cantidad de materia orgánica combustible, que podría influir en las estrategias de

remediación ambiental (Dean, 1974).

5.9. Datación con ^{210}Pb

La datación con plomo-210 (^{210}Pb) es un método utilizado para determinar la edad de sedimentos y otros materiales geológicos recientes, con una antigüedad máxima de unos pocos cientos de años (Appleby & Oldfield, 1978). El plomo-210 es un isótopo radiactivo del plomo que se forma por la desintegración del radón-222 en la atmósfera y se deposita en la superficie terrestre a través de la lluvia y otros procesos atmosféricos (Krishnaswamy et al., 1971).

Cuando el plomo-210 se deposita en los sedimentos, comienza a desintegrarse con una vida media de aproximadamente 22 años (Noller, 2000). Durante este proceso, el plomo-210 se convierte primero en bismuto-210 y luego en polonio-210, ambos también radiactivos. La cantidad de plomo-210 presente en un sedimento disminuye con el tiempo debido a esta desintegración radiactiva (Appleby, 2001). El método de datación se basa en medir la cantidad de plomo-210 que queda en un núcleo de sedimento a diferentes profundidades. Al comparar la concentración de plomo-210 en las capas más superficiales con las capas más profundas, es posible estimar cuánto tiempo ha pasado desde que se depositó cada capa de sedimento (Carroll & Lerche, 2003).

5.10. Modelo CF/CS

En este estudio, se utilizó el Modelo de Flujo Constante y Sedimentación Constante (CF-CS) para determinar la edad de los sedimentos recolectados en el Golfo de Morrosquillo. Este modelo, mencionado en el trabajo de Castillo Fallas y Cubero Campos (2021), es una herramienta común en la datación de sedimentos y se basa en dos ideas principales:

1. **Flujo constante de ^{210}Pb :** El modelo asume que el isótopo radiactivo ^{210}Pb no soportado llega al sedimento a una tasa constante a lo largo del tiempo (Krishnaswamy et al., 1971).
2. **Tasa constante de sedimentación:** También se supone que la acumulación de sedimentos ocurre de manera uniforme, es decir, la cantidad de sedimento que se deposita cada año es la misma (Appleby & Oldfield, 1978).

A medida que el ^{210}Pb se acumula en las capas de sedimento, su actividad disminuye con la profundidad debido a la **desintegración radiactiva**. Al medir la concentración de ^{210}Pb en diferentes capas, se puede calcular cuánto tiempo ha pasado desde que esos sedimentos se depositaron. Esto permite estimar la **tasa de sedimentación** y la **edad** de las capas de sedimento (Appleby, 2001). Este método es clave para entender cómo han variado los contaminantes orgánicos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), en el tiempo. Así, podemos relacionar estos cambios con eventos naturales o actividades humanas que han afectado al Golfo de Morrosquillo, aportando información valiosa para el análisis ambiental en la región (Castillo Fallas & Cubero Campos, 2021).

6. Metodología

6.1. Área de Estudio

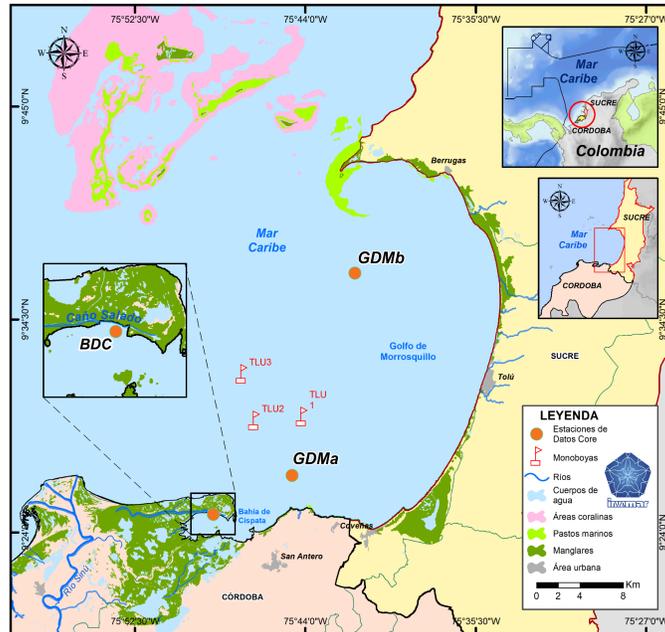


Fig.1. Mapa Golfo Morrosquillo y punto de muestreo Invemar

El **golfo de Morrosquillo** es un golfo situado en el sur del mar Caribe, en la costa norte de Colombia, perteneciente a los departamentos de Sucre y Córdoba. Tiene, de oeste a este, unos 80 kilómetros, desde la Punta Mestizos, la Bahía Cispatá y la Bocas de Tinajones, desembocadura del río Sinú, en Córdoba, hasta la punta San Bernardo, en Sucre.

El golfo de Morrosquillo está localizado en el sector meridional de la costa Caribe colombiana (Figura 1), geográficamente localizado entre las siguientes coordenadas:

09022'00" 09°45'00" Lat. Norte
75°33'00" 75°55'00" Long. Oeste

presenta una amplitud aproximada de 40 km y 35 m de profundidad. Morfológicamente está constituido hacia la zona central por una extensa llanura costera que limita al norte y al sur con dos cuerpos de terrazas coralinas. En la zona suroeste se aprecia la desembocadura del río Sinú, cuya evolución y dinámica dependen de los procesos fluviales y marinos especialmente de los regímenes de olas y mareas (Main, 1985).

- **Recolección Histórica del Golfo de Morrosquillo y su Impacto Ambiental**

El Golfo de Morrosquillo, situado en la región Caribe colombiana, ha sido un área de importancia tanto ecológica como económica para las comunidades que lo rodean. Su historia se caracteriza por una fuerte relación entre los recursos marinos y las poblaciones humanas, que desde tiempos precolombinos se han asentado en esta región, aprovechando su riqueza pesquera y su posición estratégica en el comercio marítimo.

Contexto Histórico

Desde la época de la colonización española, el Golfo de Morrosquillo ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de la costa norte de Colombia. Los primeros asentamientos humanos en esta área basaron su economía en la pesca artesanal y la agricultura de subsistencia, pero con el tiempo, la región experimentó una transformación significativa con la construcción de infraestructura portuaria, especialmente en el municipio de Tolú. El desarrollo portuario y turístico ha sido constante a lo largo del siglo XX, lo que ha llevado a una expansión demográfica y urbana considerable (González, 2019).

El auge turístico en la década de 1970 marcó un punto de inflexión en la relación entre la población y el medio ambiente del Golfo. La construcción de hoteles, la urbanización costera y el incremento en las actividades recreativas impactaron los ecosistemas marinos y terrestres de la zona (Pérez, 2018). La creciente demanda de servicios turísticos también llevó a un incremento en la pesca comercial, lo que ejerció presión sobre las especies locales y alteró los equilibrios ecológicos tradicionales (INVEMAR, 2020).

Cambios Ambientales: Naturales y Antropogénicos

Los cambios ambientales en el Golfo de Morrosquillo pueden dividirse en dos grandes categorías: los de origen natural y los causados por la actividad humana. En términos de factores naturales, el golfo ha experimentado eventos como la erosión costera y las variaciones en los patrones climáticos, que han afectado la dinámica de los sedimentos y la salinidad del agua (Torres & Castillo, 2020). Sin embargo, los impactos antropogénicos han sido más significativos en los últimos años (INVEMAR, 2020).

Entre los principales cambios de origen humano se destacan la deforestación en las áreas circundantes, la construcción de viviendas sin planificación ambiental adecuada y el vertimiento de desechos industriales y domésticos en los cuerpos de agua (Instituto Humboldt, 2017). El aumento de la contaminación ha afectado la calidad del agua, incrementando la presencia de nutrientes que propician el crecimiento de algas y contribuyen a la eutrofización (INVEMAR, 2020). Esta situación ha alterado la biodiversidad marina, afectando particularmente a los corales y a las especies asociadas a estos ecosistemas (Díaz & Martínez, 2019).

Un aspecto crucial en el análisis histórico del Golfo de Morrosquillo es el impacto de las actividades industriales y portuarias en los últimos 50 años. La expansión de la infraestructura industrial en la zona ha generado un aumento en la emisión de contaminantes orgánicos, lo que ha tenido repercusiones directas sobre la fauna marina y las comunidades pesqueras locales (INVEMAR, 2020). En un estudio de INVEMAR, se documenta cómo la acumulación de contaminantes en los sedimentos marinos ha afectado la salud de los ecosistemas y ha contribuido a la pérdida de especies clave en la región (INVEMAR, 2020).

Adaptaciones y Perspectivas Futuras

La historia del Golfo de Morrosquillo también incluye esfuerzos por mitigar los efectos negativos de la intervención humana. A lo largo de las últimas décadas, las autoridades ambientales y organizaciones no gubernamentales han implementado proyectos de restauración de manglares y conservación de hábitats marinos (CARSUCRE, 2019). Estos esfuerzos han buscado no solo preservar la biodiversidad de la zona, sino también garantizar la sostenibilidad de las actividades económicas, especialmente en el sector pesquero (CARSUCRE, 2021).

Sin embargo, estos proyectos enfrentan retos significativos debido a la falta de un control efectivo sobre las fuentes de contaminación y la creciente demanda turística. El futuro del Golfo dependerá en gran medida de la capacidad de las autoridades locales y nacionales para equilibrar el desarrollo económico con la protección ambiental (INVEMAR, 2020).

6.2. Metodología

Este trabajo de grado fue realizado con el apoyo de los suministros del INVEMAR, lo que permitió que, como estudiante, no fuera necesario realizar la recolección de muestras en campo. Sin embargo, el esquema metodológico que se llevó a cabo fue el siguiente:

6.2.1. Recolección de datos:

Se recolectaron datos en diferentes secciones del Golfo de Morrosquillo en el mes de Septiembre del año 2019, se utilizó un muestreador de gravedad UWITEC TM con un revestimiento transparente (1.2 m de largo, 8.5 cm de diámetro interno).

- Los puntos de muestreo fueron: (*ver Fig.1. Mapa Golfo Morrosquillo y punto de muestreo Invemar*)

- Punto 1: BDC en la Bahía de Cispatá
- Punto 2: GDMa en el sur, cerca de la desembocadura de la Bahía de Cispatá
- Punto 3: GDMb en el norte, cerca de las formaciones coralinas y los pastos marinos de las Islas de San Bernardo

6.2.2. Análisis de Muestras:

- Los núcleos fueron transportados inmediatamente al laboratorio, extruidos y subsampleados cada 1 cm.

- La masa de cada sección se registró antes y después del secado a 40 °C. Los sedimentos se molieron hasta obtener polvo utilizando un mortero de ágata y mano de mortero.

- Las muestras se almacenaron en bolsas de polietileno y luego se analizaron en la Unidad de Laboratorios de Calidad Ambiental Marina – LABCAM de INVEMAR.

Tabla 2.

Ubicación de los núcleos del sedimento recolectado.

Código del Núcleo	Latitud	Longitud	Longitud De Núcleo (cm)
BDC	9°24'54.180" (N)	75°48'35.230" (W)	72
GDMa	9°32'10.360" (N)	75°41'23.795" (W)	70
GDMb	9°36'47.275" (N)	75°41'31.351" (W)	81

Nota: Adaptado de (INVEMAR, 2019)

6.2.2.1. Análisis de Muestra en Laboratorio:

Para estimar la actividad total de ^{210}Pb (^{210}Pb Tot) en las muestras, se utilizó espectrometría alfa, midiendo la actividad de su producto de desintegración, ^{210}Po , bajo el supuesto de que ambos se encuentran en equilibrio secular (Flynn, 1968; Hamilton y Smith, 1986). La precisión de los resultados se validó utilizando un material de referencia certificado, el mineral de Uranio-Torio DL1-A (Centro Canadiense de Tecnología de Minerales y Energía). Los isótopos de polonio se midieron con un espectrómetro alfa de barrera de superficie de silicio (EG&G Ortec Mod. ENS-U450), que se distingue por su alta resolución energética, bajo ruido de fondo y estabilidad. Las mediciones de los discos se realizaron hasta que la tasa de conteo de ^{210}Po alcanzó una incertidumbre inferior al 5%, conforme a las directrices de la IAEA (2012). Las actividades se reportaron en base al peso seco de las muestras.

La espectrometría gamma se aplicó para medir el ^{210}Pb soportado a través del ^{226}Ra , evaluando la actividad de ^{214}Pb mediante sus líneas de emisión a 295 keV y 351 keV. Asimismo, la actividad de ^{137}Cs se calculó a partir de su emisión a 662 keV (Appleby, 2001). Las muestras se analizaron en un detector coaxial de germanio de alta pureza (HPGe) de CANBERRA, con 8 cm

de diámetro, y se contaron durante una semana. Para calibrar la energía y la eficiencia del equipo, se utilizaron materiales de referencia certificados: DL1-A para 210Pb y 226Ra, IAEA-375 para 137Cs, y KCl de alta pureza ($\geq 99.5\%$) fabricado por Merck para 40K.

El contenido de materia orgánica total se determinó mediante la pérdida por ignición (LOI550) como indicador, junto con la evaluación del contenido de carbonatos. Para ello, se tomó una porción de aproximadamente 1.0 g de cada muestra, previamente secada a 105 °C, y se colocó en un horno de alta temperatura (Thermo Scientific Liendberg Blue M). La pérdida de peso se calculó a 550 °C para la LOI y a 950 °C para los carbonatos, siguiendo el procedimiento descrito por Luque Marín (2003). La precisión de estos análisis fue corroborada mediante la comparación de resultados obtenidos a partir de muestras duplicadas, y se encontró que los valores obtenidos estuvieron dentro de los márgenes de diferencia porcentual relativa establecidos por LABCAM.

6.2.3. Datos Recibidos:

- Como estudiante, recibí los datos de los HAPs mencionados anteriormente, así como la delimitación de las cantidades visibles de cada uno y el número de muestras encontradas.

Tabla 3.

Base de datos con los límites de detección (LDM) y cuantificación (LCM) de los métodos utilizados.

Variable	Matriz	Método de análisis	Unidades	LCM	LDM
Benzo(b)Fluoranteno	Sedimento		ng/g p.s	6,00	1,61
Benzo(k)Fluoranteno	Sedimento	Extracción soxhlet, fraccionamiento	ng/g p.s	6,00	1,68
Criseno	Sedimento	sílica:alúmina y cuantificación por	ng/g p.s	6,00	1,71
Fenantreno	Sedimento	GC-MSD. EPA	ng/g p.s	6,00	1,83
Fluoranteno	Sedimento	3540C:1996, EPA	ng/g p.s	6,00	2,25
Pireno	Sedimento	8270E:2017	ng/g p.s	6,00	1,53
Hidrocarburos del Petróleo Equivalente de Criseno	Sedimento	Extracción soxhlet con diclorometano: acetona y cuantificación fluorométrica	µg/g p.s	0,10	-

*ng/g (Nanogramos); µg/g (Microgramo)

Nota. Adaptado de INVEMAR (2019).

6.2.4. Organización de Datos:

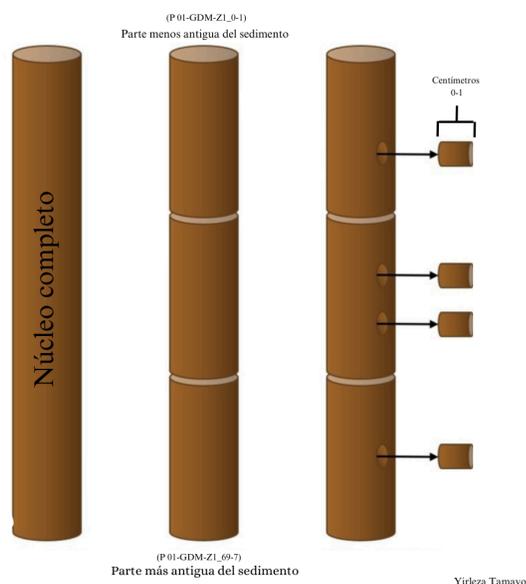


Fig.2. Núcleo representación Gráfica

- Basado en la información recibida, se organizó una nueva matriz que refleja todos los contaminantes encontrados en cada uno de los puntos con sus proporciones en los centímetros del (P01-GDM-Z1_0-1) al (P01-GDM-Z1_69-7), (siendo P 01-GMD el punto de muestreo e indicativo del Núcleo y Z1_ (0-1) los centímetros más nuevos del Núcleo o con menos edad geológica, mientras que Z1_(69-70) corresponde a la parte inferior del Núcleo o con mayor edad geológica). Dejando ver que la muestra más antigua del sedimento es aproximadamente del año 1850.

A continuación se encontrarán las tablas de resultados del núcleo en diferentes centímetros, en las cuales se evidencia el cambio de los HAPs. La primera tabla corresponde a la parte más antigua del núcleo y la última a la más reciente en términos de edad geológica. Se puede apreciar cómo hay variaciones en la concentración de estos compuestos a través de los años, observándose las mayores concentraciones en los centímetros más profundos del núcleo (más antiguos). En la actualidad, se encuentra una leve concentración de fenantreno, siendo este el más persistente, mientras que los demás HAPs han desaparecido con el tiempo o se presentan en cantidades tan pequeñas que no logran ser detectados.

Tener en cuenta lo siguiente para poder entender las tablas:

Identificación de colores para interpretación de los HAPs en las tablas.

ND=No detectado
<6,0 (menor)
>6,0(mayor)

Tabla 4.*Concentración de HAPs, LOI y carbonatos en sedimentos del Golfo de Morrosquillo*

<i>Punto</i>	<i>Benzo(b) Fluoranteno (ng/g p.s)</i>	<i>Benzo(k) Fluoranteno (ng/g p.s)</i>	<i>Criseno (ng/g p.s)</i>	<i>Fenantreno (ng/g p.s)</i>	<i>Fluoranteno (ng/g p.s)</i>	<i>Pireno (ng/g p.s)</i>	LOI 550 (%)	CO3 (%)
<i>GDM-ZI_69-70</i>	9,50	7,53	7,21	14,7	7,56	7,28	7,67	4,79
<i>GDM-ZI_60-61</i>	9,17	7,27	6,96	14,2	7,29	7,03	8,16	4,22
<i>GDM-ZI_36-37</i>	<6,00	<6,00	<6,00	<6,00	<6,00	<6,00	7,81	5,32
<i>GDM-ZI_24-25</i>	<6,00	<6,00	<6,00	8,85	<6,00	<6,00	7,55	6,28
<i>GDM-ZI_18-19</i>	ND	ND	ND	<6,00	ND	<6,00	7,78	5,68
<i>GDM-ZI_12-13</i>	ND	ND	ND	6,15	ND	<6,00	8,64	5,02
<i>GDM-ZI_6-7</i>	<6,00	<6,00	<6,00	7,81	<6,00	<6,00	8,69	5,64
<i>GDM-ZI_4-5</i>	ND	ND	ND	6,02	ND	<6,00	8,51	6,23
<i>GDM-ZI_0-1</i>	<6,00	<6,00	ND	<6,00	<6,00	<6,00	10,06	9,59

La tabla presenta las concentraciones de diferentes Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) como Benzo(b)fluoranteno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Fenantreno, Fluoranteno y Pireno, en sedimentos del Golfo de Morrosquillo. Además, se incluyen las mediciones de pérdida por ignición a 550°C (LOI 550) y la concentración de carbonatos (CO3) en porcentaje. Los datos corresponden a varias profundidades del núcleo de sedimento.

Las concentraciones de HAPs varían entre las diferentes capas de sedimento. En las capas más profundas (por ejemplo, 69-70 cm y 60-61 cm), las concentraciones de Fenantreno son más elevadas, alcanzando 14,7 ng/g p.s., mientras que en las capas más superficiales, las concentraciones de HAPs tienden a disminuir o no se logran detectar (ND). La LOI 550 y la concentración de CO3 muestran un aumento en las capas superiores, indicando una mayor cantidad de materia orgánica y carbonatos en los sedimentos recientes.

6.2.5. Análisis Detallado

- Se seleccionó el núcleo GDMa el cual estaba ubicado al sur, cerca de la desembocadura de la Bahía de Cispatá, para un análisis más detallado, donde se comparó la variabilidad entre los HAPs en función del tiempo y su persistencia, observando anomalías y la pérdida de algunos

compuestos, así como la reaparición de otros.

- Se graficaron los cambios y picos de cada HAP y de los Hidrocarburos del Petróleo Equivalente de Criseno, notando así que los contaminantes estaban presentes en mayores proporciones en años pasados que en la actualidad, además se percibieron notables variaciones temporales entre los centímetros (Z1 60-61 y Z1 69-70) con relación a la gran diferencia entre los centímetros (Z1 0-1 y Z1 4-5) donde la presencia de los HAPs fue casi nula.

7 Resultados

- **Valores no detectados (ND):** Para ciertos niveles de profundidad, los valores de algunos HAPs fueron reportados como "No Detectado" (ND), lo que indica que las concentraciones estaban por debajo del límite de detección establecido (2.00 ng/g p.s.).
- **Límite de Cuantificación (LCM):** El LCM se estableció en 6.00 ng/g p.s. para todos los HAPs analizados en este estudio. Las concentraciones inferiores a este valor se reportaron como <6.00, indicando que el compuesto se logra detectar pero no se logra cuantificar
- **Límite de detección (LDM):** El LDM se estableció en 2.00 ng/g p.s. Esto significa que cualquier concentración por debajo de este valor no fue detectable por el equipo o método de análisis utilizado en el estudio.

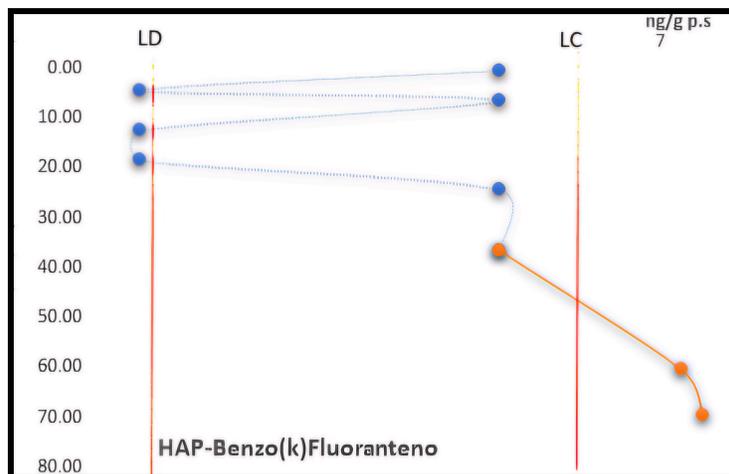


Fig.3. Concentraciones de HAP-Benzo(k)Fluoranteno en función de la profundidad en sedimentos. Los valores ajustados a 5.00 reflejan detecciones en el rango entre el Límite de Detección Mínimo (LDM) y el Límite de Cuantificación (LCM)

Observando los datos de HAP-Benzo(k)Fluoranteno a distintas profundidades, se observa que las concentraciones tienden a fluctuar. En varias profundidades (0.50 cm, 6.50 cm, 24.50 cm, 36.50 cm), los valores alcanzan los 5.00, (valores estimados o ajustados para los ND). Sin embargo, en las mayores profundidades (60.50 cm y 69.50 cm), las concentraciones aumentan a 7.27 y 7.53, lo que sugiere que hay una mayor presencia de este compuesto a mayor profundidad. Aunque la

mayoría de las profundidades muestran valores relativamente bajos (cercaos o iguales a 5.00), la elevación de las concentraciones a mayor profundidad sugiere una posible acumulación de HAP-Benzo(k)Fluoranteno en capas más profundas del sedimento, lo que podría estar relacionado con procesos históricos de deposición o fuentes de contaminación más antiguas.

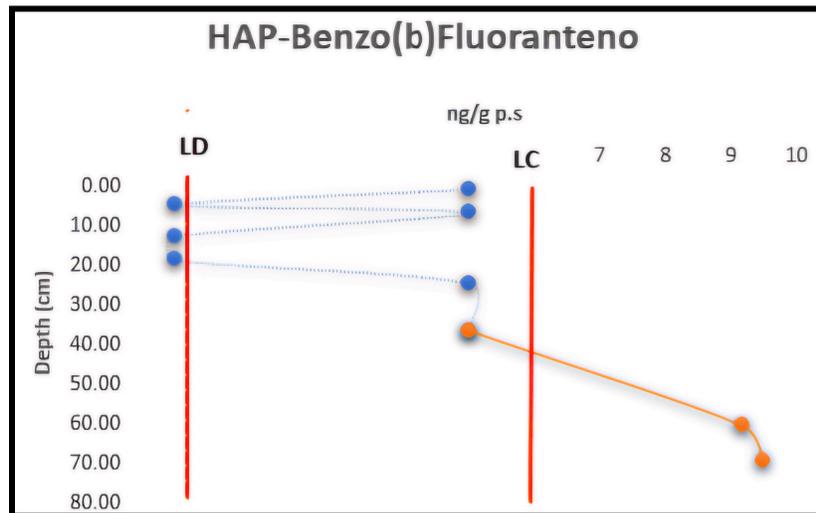


Fig.4. Concentraciones de HAP-Benzo(b)Fluoranteno en función de la profundidad en sedimentos. Los valores ajustados a 5.00 se sitúan entre el Límite de Detección Mínimo (LDM) y el Límite de Cuantificación (LCM).

A lo largo de la columna de sedimentos, los valores de HAP-Benzo(b)Fluoranteno también muestran fluctuaciones. En las profundidades de 0.5 cm, 6.5 cm, 24.5 cm y 36.5 cm, los valores se ajustaron a 5.00, lo que indica que no fueron detectados o caían en la zona entre el LDM y el LCM. En las capas más profundas (60.5 cm y 69.5 cm), los valores aumentan a 9.17 y 9.50, respectivamente, lo que muestra una tendencia de acumulación en profundidades mayores. Los datos de HAP-Benzo(b)Fluoranteno también muestran un comportamiento similar al del HAP-Benzo(k)Fluoranteno, donde las concentraciones son relativamente bajas en las capas más superficiales, con un incremento notable en las capas más profundas.

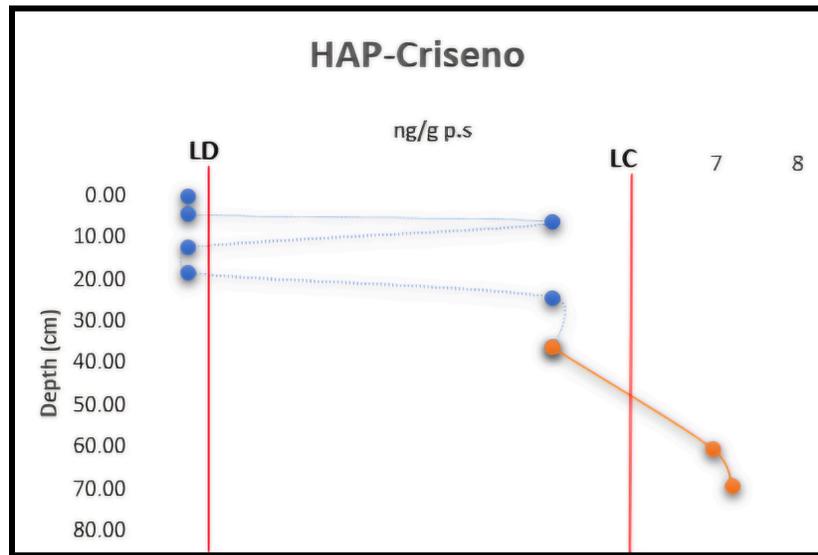


Fig.5. Concentraciones de HAP-Criseno en función de la profundidad en sedimentos. Los valores ajustados a 5.00 indican detecciones en el rango entre el Límite de Detección Mínimo (LDM) y el Límite de Cuantificación (LCM).

Cuando observamos a lo largo de la columna de sedimento, se nota que los valores de HAP-Criseno son bajos en las capas superiores (0.5 cm, 4.5 cm, 12.5 cm, 18.5 cm) donde se observan valores de 0.5, muy por debajo del LCM. Sin embargo, a profundidades intermedias (6.5 cm, 24.5 cm, 36.5 cm), los valores fueron ajustados a 5.00 debido a su clasificación como ND o por estar dentro del rango de incertidumbre. Finalmente, en las capas más profundas (60.5 cm y 69.5 cm), las concentraciones aumentan de manera considerable a 6.96 y 7.21, respectivamente. Al igual que en los casos anteriores, la concentración de HAP-Criseno muestra un incremento significativo en las profundidades mayores.

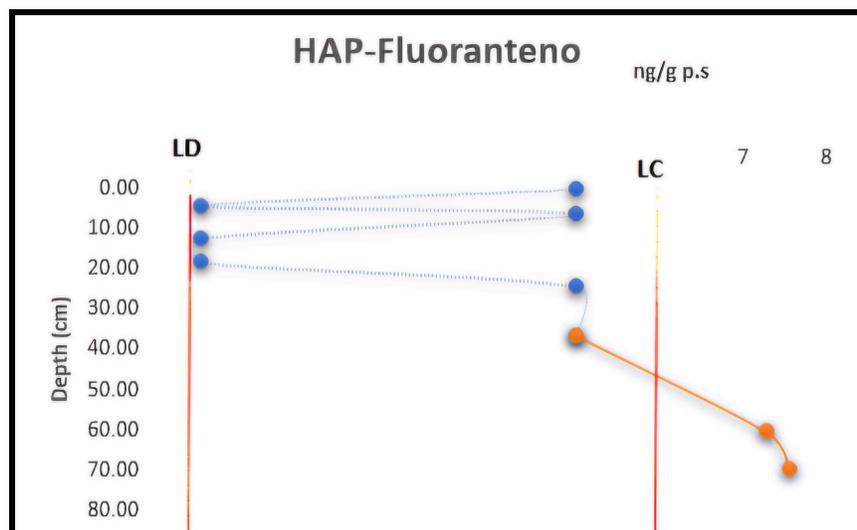


Fig.6. Concentraciones de HAP-Fluoranteno en función de la profundidad en sedimentos.

Se observan fluctuaciones en las concentraciones de HAP-Fluoranteno, a lo largo de la columna de sedimentos en las capas superficiales (0.50 cm, 6.50 cm, 24.50 cm, 36.50 cm), las concentraciones se ajustaron a 5.00, lo que indica que estas estaban por debajo del LCM o eran valores no detectados. Las capas intermedias (4.50 cm, 12.50 cm, 18.50 cm) muestran valores más bajos de 0.50, que también caen por debajo del LCM. Finalmente, las concentraciones aumentan en las capas más profundas, alcanzando 7.29 en 60.50 cm y 7.56 en 69.50 cm.

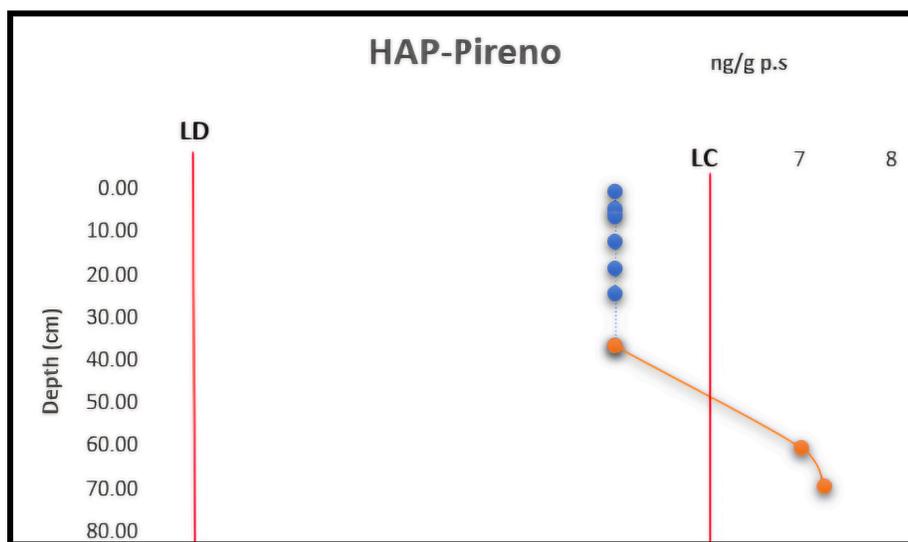


Fig.7. Concentraciones de HAP-Pireno en función de la profundidad en sedimentos. Los valores ajustados a 5.00 indican detecciones en el rango entre el Límite de Detección Mínimo (LDM) y el Límite de Cuantificación (LCM).

Las concentraciones de HAP-Pireno son constantes en las capas más superficiales e intermedias, a lo largo de la columna de sedimento con un valor de 5.00 en todas ellas (desde 0.50 cm hasta 36.50 cm). En las profundidades más profundas (60.50 cm y 69.50 cm), las concentraciones aumentan a 7.03 y 7.28, respectivamente, lo que indica una mayor presencia del compuesto en las capas más antiguas del sedimento. A diferencia de otros HAPs analizados, las concentraciones de HAP-Pireno son uniformes en las capas superiores e intermedias, con valores de 5.00 en cada una de ellas, lo que sugiere que, aunque no fueron detectadas, las concentraciones ajustadas se mantienen estables en estas profundidades. Sin embargo, en las capas más profundas, se observa un aumento significativo en las concentraciones, lo que sugiere una acumulación de este contaminante en capas más antiguas.

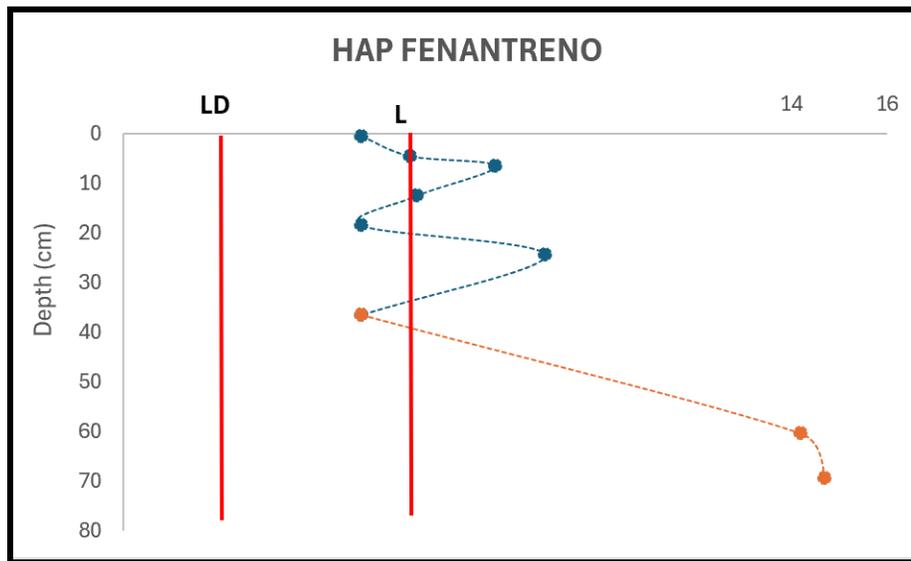


Fig.8. Concentraciones de HAP-Fenantreno en función de la profundidad en sedimentos.

Los datos muestran variaciones significativas en las concentraciones de fenantreno a diferentes profundidades. La mayor concentración se registra a 60.5 cm con un valor de 14.2, seguida por 14.7 a 69.5 cm. Estos valores indican una presencia notable de este hidrocarburo aromático policíclico en las capas más profundas del sedimento. En las profundidades más superficiales, se observa una concentración de 5 a 0.5 cm, con un incremento moderado a 6.02 en 4.5 cm y 7.81 a 6.5 cm. Sin embargo, en 12.5 cm y 18.5 cm, los valores disminuyen a 6.15 y 5 respectivamente, lo que sugiere una fluctuación en la cantidad de fenantreno presente en esas capas. La presencia de concentraciones más altas en las profundidades mayores puede sugerir un origen más antiguo o una acumulación de contaminantes a lo largo del tiempo. El comportamiento variable en las capas superiores puede estar relacionado con la dinámica de deposición y la influencia de factores ambientales sobre la contaminación en la zona.

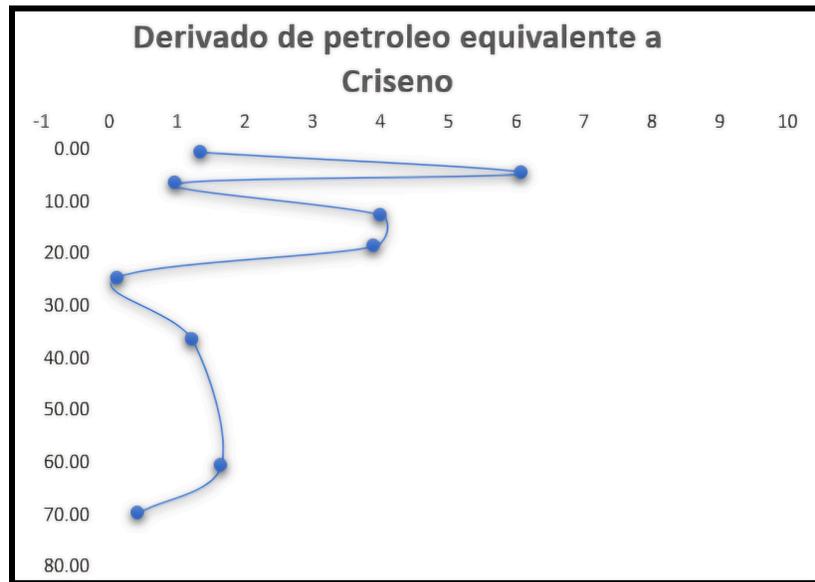


Fig.9. Concentraciones de derivados de petróleo equivalentes a Criseno en función de la profundidad en sedimentos.

Los datos muestran una variabilidad significativa en las concentraciones de derivados de petróleo a lo largo del perfil de sedimentación. La mayor concentración se observa a 4.50 cm con un valor de 6.09, lo que indica una posible fuente de contaminación reciente. Otras concentraciones relevantes incluyen 4.00 a 12.50 cm y 3.90 a 18.50 cm, sugiriendo que las capas superiores del sedimento presentan niveles más altos de este contaminante. Las concentraciones en las profundidades de 0.98 a 6.50 cm, 0.12 a 24.50 cm, 1.23 a 36.50 cm, 1.65 a 60.50 cm, y 0.43 a 69.50 cm son considerablemente más bajas. Esto puede indicar que, en estas profundidades, la contaminación puede ser mínima o que los compuestos se han degradado a lo largo del tiempo. Los resultados muestran que, aunque hay una presencia general de derivados de petróleo equivalente a Criseno en varias profundidades, las concentraciones son predominantemente más altas en las capas superiores. Este patrón sugiere que los sedimentos más profundos podrían haber sido menos impactados por eventos de contaminación recientes o que los contaminantes han sido removidos o degradados en esas capas.

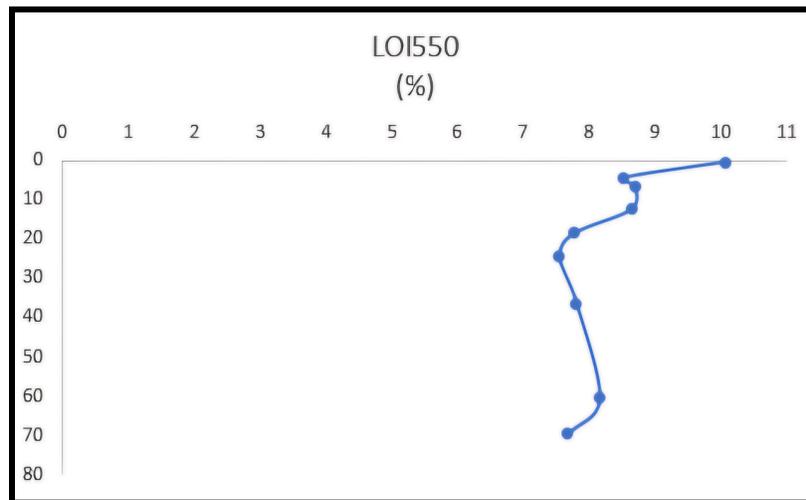


Fig.10. Porcentaje de Pérdida por Ignición a 550°C (LOI 550) en función de la profundidad en sedimentos.

Los valores de LOI 550 muestran una tendencia general de disminución con la profundidad. La mayor concentración se observa a 0.5 cm con un 10.06%, lo que indica una mayor cantidad de materia orgánica en las capas superficiales. A medida que se desciende en el perfil, los porcentajes disminuyen, llegando a un valor de 7.55% a 24.5 cm. A partir de 36.5 cm, el LOI 550 muestra una leve fluctuación en los valores. Por ejemplo, en 36.5 cm, se observa un 7.81%, seguido de un ligero aumento en 60.5 cm (8.16%) y luego una caída a 7.67% en 69.5 cm. Esto podría reflejar variaciones en la composición del sedimento a esas profundidades, posiblemente debido a cambios en las condiciones ambientales o en la deposición de materia orgánica a lo largo del tiempo. La disminución en los valores de LOI550 a medida que se incrementa la profundidad puede indicar una menor acumulación de materia orgánica en los sedimentos más profundos.

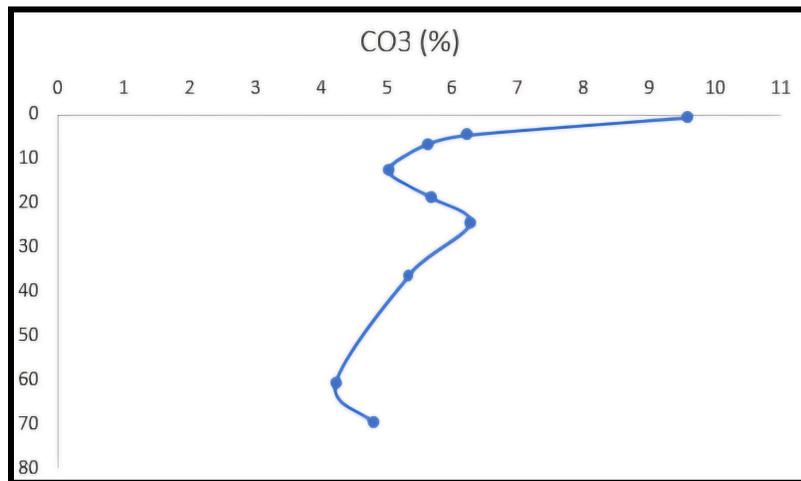


Fig.11. Porcentaje de carbonato de calcio (CO₃) en función de la profundidad en sedimentos.

Los valores de CO₃ muestran una tendencia general a la disminución con la profundidad. La mayor concentración se observa en 0.5 cm con un 9.59%, lo que sugiere una alta presencia de carbonatos en las capas superficiales. A medida que se profundiza, los porcentajes disminuyen, alcanzando un mínimo de 4.22% a 60.5 cm. A lo largo del perfil, hay cierta fluctuación en los porcentajes de carbonatos. Por ejemplo, después de la disminución inicial, el porcentaje se eleva ligeramente a 6.28% a 24.5 cm, antes de descender nuevamente a 5.32% en 36.5 cm. Sin embargo, en 69.5 cm, el valor se incrementa a 4.79%. Estas variaciones pueden estar relacionadas con cambios en las condiciones sedimentarias, como la deposición de sedimentos o la influencia de organismos que secretan carbonatos.

- **Datación por ²¹⁰Pb y análisis cronológico del núcleo de sedimento del Golfo de Morrosquillo**

La datación por ²¹⁰Pb aplicada al núcleo de sedimento extraído del Golfo de Morrosquillo permitió establecer una cronología confiable que abarca desde el año 2018 en la capa superficial (0,5 cm) hasta aproximadamente el año 1936 a una profundidad de 33,5 cm. Este análisis cronológico fue posible gracias al modelo CFCS (Constant Flux Constant Sedimentation), el cual asume una tasa de sedimentación constante a lo largo del tiempo y una entrada uniforme de ²¹⁰Pb atmosférico al sedimento. El perfil de la concentración de ²¹⁰Pb total disminuye con la profundidad, lo que es característico de los sedimentos que reciben este radionucleido principalmente desde la atmósfera. A su vez, la concentración de ²¹⁰Pb en exceso (²¹⁰Pb_{ex}), que representa la fracción atmosférica de este radionucleido no producida in situ por la desintegración de ²²⁶Ra, sigue la misma tendencia. Este comportamiento permitió calcular la edad de los sedimentos en función de su profundidad, utilizando la constante de desintegración radiactiva de ²¹⁰Pb (0.03118 yr⁻¹). A una profundidad de 0,5 cm, la edad calculada corresponde

al año 2018, mientras que en las capas más profundas, como a 40,5 cm, el sedimento tiene una edad aproximada de 1936. Este rango temporal es de gran utilidad para correlacionar los eventos históricos con las concentraciones de contaminantes encontrados, especialmente los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). En particular, los HAPs muestran mayores concentraciones en las capas profundas, lo que indica una posible fuente histórica relacionada con la actividad antropogénica o natural en la zona. La tabla de datación (**Tabla 13.**) revela que en el intervalo comprendido entre los 6,5 cm y los 27,5 cm de profundidad, los sedimentos datan entre los años 2008 y 1954, lo que cubre un período de mayor industrialización y cambios en los patrones de uso del suelo en la región del Caribe colombiano. Esto sugiere que los eventos que afectaron la entrada de contaminantes, como los HAPs, pudieron haber estado influenciados tanto por actividades antropogénicas como por factores naturales, como incendios de manglares o procesos de erosión. El análisis de la composición del sedimento y los contaminantes demuestra que, en las capas más superficiales, la mayor concentración de HAPs está relacionada con un aumento en la materia orgánica, medido a través de la pérdida por ignición (LOI 550). Esto se debe a la capacidad de los sedimentos ricos en materia orgánica para retener contaminantes. Sin embargo, en las capas más profundas, la presencia de HAPs apunta a una preservación a largo plazo bajo condiciones anóxicas, que favorecen la estabilidad de estos compuestos en el tiempo. Finalmente, los resultados indican que la tasa de sedimentación ha sido relativamente constante durante este período, lo que valida el uso del modelo CFCS. Este hallazgo es crucial para entender no solo la historia de la deposición de contaminantes en el Golfo de Morrosquillo, sino también los procesos ambientales que han influido en la evolución de esta región del Caribe colombiano. La preservación de compuestos orgánicos en capas profundas y el análisis cronológico detallado proporcionan una perspectiva histórica valiosa para futuras investigaciones y para la gestión ambiental de esta área.

Tabla 13.

Datación de sedimentos mediante 210Pb en el Golfo de Morrosquillo

					CFCS	
Depth (cm)	Mass depth (g/cm ²)	Pb210	Pb210exc	ln	age I	
0,5	0,13	121,80	94,8	4,551296 99	0,6	2018
1,5	0,37	110,40	83,4	4,423094 702	1,8	2017
4,5	1,44	101,14	74,1	4,305399 724	7,1	2012

6,5	2,32	84,58	57,5	4,052351 825	11,5	2008
9,5	3,63	86,36	59,3	4,082854 168	18,0	2001
12,5	5,08	107,79	80,7	4,391285 63	25,2	1994
15,5	6,58	91,22	64,2	4,161677 585	32,6	1986
18,5	8,15	64,46885 301	37,4	3,622294 574	40,4	1979
21,5	9,791190952	52,17774 939	25,1	3,224151 34	48,5	1970
24,5	11,50341089	60,00594 489	33,0	3,495307 808	57,0	1962
27,5	13,15147982	34,79297 375	7,7	2,047365 143	65,2	1954
30,5	14,94961479	34,76343 432	7,7	2,043545 068	74,1	1945
33,5	16,76763168	27,29637 625	0,3	-1,382847 321	83,1	1936
40,5	20,85408299	27,04551 301			103,3	
Cte de desintegración (l, yr-1)		0,031180 70988				
Incertidumbre u(l)		0,000168 3169224				

8. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de los análisis de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en el Golfo de Morrosquillo revelan una marcada variabilidad en la concentración de contaminantes orgánicos en las diferentes profundidades del sedimento. Esta variabilidad está asociada con factores como la deposición histórica de contaminantes y la dinámica de los sedimentos en la región.

El Fenantreno, uno de los HAPs más representativos en los datos analizados, muestra una tendencia notable de concentración a lo largo de todo el núcleo de sedimentos. Aunque las concentraciones de este compuesto son relativamente bajas en las capas superficiales (con valores de 5 a 0.5 cm y 18.5 cm), se observa un aumento sustancial en las capas más profundas, alcanzando concentraciones máximas de 14.2 a 60.5 cm y 14.7 a 69.5 cm. Esto sugiere una posible acumulación histórica de este contaminante, probablemente como resultado de actividades antropogénicas en la zona que han afectado el ambiente marino a lo largo del tiempo.

La relación entre la concentración de contaminantes y los cambios en las propiedades físicas y químicas del sedimento, como la pérdida por ignición (LOI 550) y la concentración de carbonatos (CO₃), indica que la presencia de materia orgánica y carbonatos también podría estar vinculada a la capacidad del sedimento para retener contaminantes orgánicos. Los valores más altos de LOI 550 en las capas superficiales (10.06% a 0.5 cm) sugieren una mayor concentración de materia orgánica, que es un factor clave en la adsorción y retención de HAPs. Sin embargo, en las profundidades mayores, donde los valores de LOI 550 disminuyen, los contaminantes como el fenantreno parecen concentrarse más, lo que puede estar relacionado con una deposición más antigua y su posterior preservación en condiciones anóxicas en los sedimentos profundos.

Los otros compuestos, como el benzo(k)fluoranteno, benzo(b)fluoranteno, crisenos, fluoranteno y pireno, presentan una menor variabilidad en comparación con el fenantreno, pero también muestran fluctuaciones en las concentraciones a lo largo del núcleo. En varios casos, como el fluoranteno y el pireno, los valores de 5 en múltiples profundidades fueron sustituidos debido a valores no detectados (ND), indicando que las concentraciones pudieron haber estado por debajo de los límites de detección y cuantificación establecidos.

El comportamiento de los derivados de petróleo equivalente a criseno también varía notablemente con la profundidad, con concentraciones más altas en las capas superficiales (6.09 a 4.5 cm) y valores mucho menores en las capas más profundas (0.43 a 69.5 cm), lo que puede ser indicativo de una fuente de contaminación más reciente en comparación con los otros contaminantes estudiados.

9. Conclusiones

El análisis de los contaminantes orgánicos en los sedimentos del Golfo de Morrosquillo muestra una clara relación entre la variabilidad de estos compuestos y los cambios en la composición del sedimento a lo largo de la profundidad. El fenantreno fue el contaminante con mayor presencia a lo largo del núcleo de sedimento, alcanzando concentraciones máximas en las capas más profundas, lo que sugiere una acumulación histórica, probablemente proveniente de fuentes antropogénicas pasadas.

La composición del sedimento, evaluada mediante indicadores como la pérdida por ignición (LOI 550) y la concentración de carbonatos (CO_3), influye en la capacidad de los sedimentos para retener contaminantes. Se encontró que los niveles más altos de materia orgánica están asociados con mayores concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en las capas superficiales. Sin embargo, la presencia de contaminantes en capas profundas indica que, una vez depositados, estos compuestos tienden a permanecer en el sedimento durante largos periodos, favorecidos por condiciones anóxicas que promueven su preservación.

Estos hallazgos resaltan la importancia de la interacción entre los contaminantes orgánicos y las propiedades sedimentarias. Las capas más profundas del sedimento actúan como un reservorio de contaminantes históricos, mientras que las capas superficiales reflejan fuentes de contaminación más recientes.

Basado en la información recopilada y arrojada por la toma de datos realizada en el Golfo de Morrosquillo en septiembre de 2019, se evidencia un acontecimiento que señala la presencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) en esta zona. Sin embargo, debido a la escasa información histórica existente del Golfo en torno al año 1850, deducimos que la presencia de estos HAPs pudo haberse originado a partir de un incendio relativamente grande de manglares o bosques cercanos a la región. En aquel tiempo, la zona no estaba altamente poblada y desarrollada como lo está en la actualidad. A pesar del avance actual, no se han registrado concentraciones elevadas de HAPs, lo que nos lleva a proponer la hipótesis de que los HAPs encontrados en los sedimentos, los cuales por estudios geológicos se datan aproximadamente hacia el año 1850, surgieron como resultado de un incendio en las cercanías del área.

10. Recomendaciones

-Se recomienda establecer un programa de monitoreo a largo plazo en el Golfo de Morrosquillo para evaluar la evolución de los contaminantes orgánicos, especialmente del fenantreno, que mostró mayores concentraciones en las capas profundas. Esto permitiría detectar nuevas fuentes de contaminación y evaluar la efectividad de las políticas ambientales implementadas en la región.

-Se recomienda hacer un análisis de HAPs en todas las capas de sedimento, lo cual permitiría tener un mayor nivel de detalle y resolución de la variabilidad de estos compuestos en el tiempo, junto con un análisis de Carbono-14 para tener mayor certeza de las edades de los sedimentos en la base.

-Se recomienda analizar variables sedimentológicas en todo el núcleo de sedimento con el fin de realizar un análisis estadístico robusto de las condiciones geoquímicas del Golfo de Morrosquillo.

-Sería útil realizar estudios detallados que identifiquen y cuantifiquen las principales fuentes antropogénicas responsables de la contaminación por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en el área. Estos estudios podrían enfocarse en actividades industriales, urbanas y agrícolas en los alrededores del Golfo de Morrosquillo, permitiendo así diseñar estrategias más precisas de mitigación.

-Se sugiere realizar estudios de toxicidad y bioacumulación de HAPs en la fauna y flora marina del Golfo de Morrosquillo. La investigación sobre los efectos de estos contaminantes en las cadenas tróficas y los ecosistemas marinos permitirá evaluar mejor los riesgos ambientales asociados con la acumulación de contaminantes en sedimentos.

Referencias

1. Álvarez, J., Rodríguez, P., & Gómez, C. (2021). Contaminación marina y salud pública: Un análisis de riesgos en comunidades costeras. *Revista de Salud Ambiental*, 15(4), 200-215.
2. Anderson, J., & Green, P. (2018). Calcium and Sodium Carbonates in Industrial Applications. *Industrial and Engineering Chemistry*, 57(2), 134-142.
3. Appleby, P. G. (2001). Chronostratigraphic techniques in recent sediments using lead-210. In Last, W. M. & Smol, J. P. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments*(pp. 171-203). Springer.
4. Appleby, P. G., & Oldfield, F. (1978). The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment. *Catena*, 5(1), 1-8.
5. Arias, B., Gómez, R., & Sánchez, J. (2017). Sources and environmental behavior of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), 442-459.
6. Brown, L., Walker, S., & Evans, R. (2019). Common Carbonate Compounds in Nature and Industry. *Environmental Chemistry Letters*, 17(3), 453-460.
7. Carroll, J., & Lerche, I. (2003). Sediment dating and implications for long-term environmental monitoring. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58(4), 737-752.
8. Castillo Fallas, J. C., & Cubero Campos, M. (2021). Datación y modelado de sedimentos utilizando el modelo CF-CS. Consultado en enlace.
9. CARSUCRE. (2021). Estrategias de conservación para el Golfo de Morrosquillo.
10. Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE). (2019). Restauración de manglares en el Golfo de Morrosquillo.
11. Dean, W. E. (1974). *Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods*. Journal of Sedimentary Research, 44(1), 242-248.
12. Díaz, S., & Martínez, H. (2019). "Impacto de la eutrofización en los arrecifes de coral del Caribe colombiano". *Ecología Marina*.
13. González, A., Pinedo-Hernández, J., & Martínez, R. (2018). Polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic environments: Sources, distribution and degradation pathways. *Environmental Pollution*, 235, 193-203.
14. González, A., Torres, P., & Silva, M. (2019). Contaminación por HAPs en sedimentos marinos: Implicaciones para la salud humana y la biodiversidad. *Ecología y Conservación*, 8(1), 89-104.
15. González, J. (2019). Historia del desarrollo urbano en el Golfo de Morrosquillo. Editorial Costera.

16. Gao, J., Meng, Y., & Wang, Y. (2018). Environmental persistence and bioaccumulation of fluorantene in aquatic systems. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 76-83.
17. García, A., & Pérez, C. (2019). *Contaminación hídrica en áreas costeras: Un análisis de fuentes y consecuencias*. *Ciencias Ambientales*, 8(3), 112-130.
18. García, A., Torres, C., & López, M. (2019). Impactos de los derrames de petróleo en los ecosistemas costeros: Un análisis crítico. *Revista de Ecología y Conservación*, 10(2), 55-72.
19. Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101-110.
20. International Agency for Research on Cancer (IARC). (2010). Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 92, 1-853.
21. Instituto Humboldt. (2017). *Deforestación y sus efectos en los ecosistemas costeros del Caribe*.
22. INVEMAR. (2020). *Informe sobre la calidad ambiental del Golfo de Morrosquillo*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.
23. INVEMAR. (2020). *Monitoreo de la calidad del agua en el Golfo de Morrosquillo*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.
24. Jones, A., Roberts, M., & Baker, P. (2015). Polyatomic Ions in Chemistry and Geology. *Journal of Chemical Education*, 92(4), 665-672.
25. Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J. M., & Meybeck, M. (1971). Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1-5), 407-414.
26. Liu, X., Ma, Q., & Zhou, H. (2020). Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: The Role of Microorganisms in Chrysene Degradation. *Journal of Environmental Management*, 253, 109745.
27. López, A., Martínez, J., & Pinedo-Hernández, J. (2019). Degradación ambiental de hidrocarburos aromáticos policíclicos: Procesos y factores influyentes. *Journal of Environmental Management*, 235, 24-35.
28. López, E., & Martínez, G. (2016). Alteración de la dinámica sedimentaria en zonas costeras colombianas. *Oceanografía y Sostenibilidad*, 7(4), 133-147.
29. Mao, Y., Wang, T., & Li, Z. (2020). Influence of hydrophobicity on the partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121155.
30. Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., & Olivero-Verbel, J. (2017). Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos: Fuentes y efectos en ecosistemas acuáticos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 14(2), 112-123.
31. Martínez, R., Torres, S., & Villanueva, M. (2022). Impactos de la contaminación costera en la salud humana: Un enfoque integral. *Salud y Medio Ambiente*, 7(1), 35-50.

-
32. Mishra, S., Singh, S., & Jain, R. K. (2019). Bioremediation of pyrene-contaminated environments by microbial degradation pathways: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 374, 97-109.
 33. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Informe de la situación ambiental en las zonas costeras de Colombia. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
 34. Noller, J. S. (2000). Lead-210 dating of recent sediments: The application of isotope geochemistry in earth sciences. *Quaternary Geochronology*, 19, 229-235.
 35. Pérez, M. (2018). Impacto del turismo en la biodiversidad del Caribe colombiano. Universidad del Norte.
 36. Pérez, R., Martínez, J., & Gómez, L. (2020). Contaminación costera: Efectos de la deposición atmosférica en ecosistemas marinos. *Ciencias del Mar*, 8(3), 124-138.
 37. Piccardi, M., Correa, I. D., & Pranzini, E. (2020). Cispatá Bay and Mestizos Evolution as Reconstructed from Old Documents and Maps (16th–20th Century). *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), 669. <https://doi.org/10.3390/jmse8090669>
 38. Pinedo-Hernández, J., Olivero-Verbel, J., & Marrugo-Negrete, J. (2016). Contaminantes orgánicos en sedimentos marinos: Fuentes y efectos en zonas costeras. *Revista de Ciencias Marinas*, 12(3), 112-125.
 39. Rodríguez, P., Morales, S., & Rojas, F. (2015). Efectos de la contaminación en las zonas costeras de Colombia. *Informe Ambiental Colombiano*, 12(1), 78-93.
 40. Sánchez, L., Ortega, R., & Vázquez, M. (2020). La contaminación por metales pesados en ecosistemas marinos. *Estudios en Contaminación Marina*, 4(1), 55-69.
 41. Schumacher, B. A. (2002). Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments. US EPA.
 42. Smith, D., & Taylor, K. (2017). The Role of Carbonates in Geological Processes. *Earth Sciences Review*, 175, 285-302.
 43. Sun, J., Xu, L., & Wang, X. (2018). Adsorption behavior and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment environments: Focus on pyrene. *Environmental Pollution*, 243, 749-758.
 44. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): Health Effects. Recuperado de EPA.gov.
 45. Villamizar, J., Martínez, P., & Silva, M. (2018). Variabilidad de los sedimentos en el Golfo de Morrosquillo: Un enfoque de cambios naturales y antropogénicos. *Ciencias del Mar y Costas*, 3(2), 101-119.
 46. Villamizar-Cordero, J., & Rodríguez-Rodríguez, L. (2018). Impacto de las actividades humanas sobre los sedimentos costeros en el Caribe colombiano. *Revista de Ciencias del Mar*, 15(4), 97-108.
 47. Wang, P., & Chen, L. (2019). Environmental Fate and Transport of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Aquatic Systems: Focus on Chrysene. *Marine Chemistry*, 212, 1-10.

-
48. Wang, Y., Hu, J., & Chen, X. (2018). Environmental persistence and degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22), 21695-21705.
 49. Zhang, Q., Wang, J., & Liu, Y. (2020). Sources and health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 78, 103359.
 50. Zhang, T., Wang, J., & Li, Y. (2017). Sources and Behavior of Chrysene in the Environment. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6760-6768.
 51. Zhou, J., Wang, L., & Wu, H. (2020). Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: A comprehensive review. *Science of The Total Environment*, 738, 139691.
 52. Zhou, X., Zhang, G., & Chen, H. (2016). Emission sources and environmental fate of pyrene in aquatic environments. *Environmental Science & Technology*, 50(18), 9830-9840.
 53. Zhao, J., Liu, Y., & Zhang, Q. (2019). Adsorption mechanisms of polycyclic aromatic hydrocarbons on soil and sediment: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(19), 19258-19270.
 54. Zhao, J., & Liu, Y. (2019). Fate and transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments: Focus on fluorantene. *Science of The Total Environment*, 678, 224-232.