**Logotipo

Descripción generada automáticamente**

**Impacto de la construcción de una obra de protección costera en la concentración de nutrientes en agua marina, sector Volcán de lodo, Arboletes, Antioquia.**

Luz Adriana Fuquen Bernal

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafa

Asesora  
Mónica María Zambrano Ortiz, Doctor (PhD) en Ciencias Biológicas

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Oceanografía

Turbo, Antioquia, Colombia

2024

|  |  |
| --- | --- |
| **Cita** | (Fuquen Bernal, 2024) |
| **Referencia**  **Estilo APA 7 (2020)** | Fuquen Bernal, L. (2024). *Impacto de la construcción de una obra de protección costera en la concentración de nutrientes en agua marina, sector de Volcán de lodo, Arboletes, Antioquia.* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia. |

**[](https://co.creativecommons.net/tipos-de-licencias/)** [](https://co.creativecommons.net/tipos-de-licencias/)

Grupo de Investigación Seleccione grupo de investigación UdeA (A-Z).

Seleccione centro de investigación UdeA (A-Z).

|  |  |
| --- | --- |
|  | Diagrama  Descripción generada automáticamente con confianza media |

Biblioteca Sede Ciencias del Mar (Turbo)

**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

A mi padre.

# Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi asesora Mónica María Zambrano Ortiz, a la Gobernación de Antioquia y al proyecto Plan Integral para la Mitigación y Monitoreo de la Erosión en el Litoral Antioqueño (PIMECLA) por hacer posible este estudio.

Agradezco a toda la comunidad universitaria de Ciencias del Mar por brindarme un segundo hogar para crecer profesional y personalmente.

Y gracias a mi hermana por impulsar y acompañar mi primer paso para poder formarme como oceanógrafa, a mi madre porque pese a las circunstancias siempre me brindó palabras sabias para seguir adelante.

Tabla de contenido

[Introducción 11](#_Toc180487968)

[Objetivos 13](#_Toc180487969)

[Objetivo general 13](#_Toc180487970)

[Objetivos específicos 13](#_Toc180487971)

[Hipótesis 14](#_Toc180487972)

[Área de estudios y metodología 15](#_Toc180487973)

[Área de estudio 15](#_Toc180487974)

[Metodología 17](#_Toc180487975)

[Fase de campo 17](#_Toc180487976)

[Análisis estadístico 18](#_Toc180487977)

[Resultados 19](#_Toc180487978)

[Nutrientes 19](#_Toc180487979)

[Nitratos 19](#_Toc180487980)

[Fósforo 22](#_Toc180487981)

[Oxígeno disuelto 22](#_Toc180487982)

[Sólidos suspendidos totales (SST) 26](#_Toc180487983)

[Discusión 29](#_Toc180487984)

[Conclusiones 33](#_Toc180487985)

[Recomendaciones 34](#_Toc180487986)

[Referencias 35](#_Toc180487987)

**Lista de tablas**

[**Tabla 1.** Puntos de muestreo georreferenciadas 16](#_Toc180500580)

[**Tabla 2.** Concentración de Nitratos (mg/L) registrados en el área de estudio durante el seguimiento al avance de las obras. 19](#_Toc180500581)

[**Tabla 4.** Concentración de Oxígeno Disuelto (mg/L) registrados en el área de estudio durante el seguimiento al avance de las obras. 22](#_Toc180500582)

[**Tabla 5.** Concentración de Sólidos suspendidos Totales (mg/L) registrados en el área de estudio durante el seguimiento al avance de las obras. 26](#_Toc180500583)

**Lista de figuras**

[**Figura 1.** Área de estudio, Volcán de lodo, Arboletes. 15](#_Toc180500590)

[**Figura 2.** Comportamiento de la concentración de nitratos en el área de estudio. 20](#_Toc180500591)

[**Figura 3.** Gráficas de tendencia de la concentración de nitratos en el área de estudio durante la ejecución de las obras. 21](#_Toc180500592)

[**Figura 4.** Comportamiento de la concentración de OD en el área de estudio. 23](#_Toc180500593)

[**Figura 5.**Gráficas de tendencia de la concentración de oxígeno disuelto en el área de estudio. 24](#_Toc180500594)

[**Figura 6.**Gráficas de tendencia de la concentración de oxígeno disuelto en el área de estudio 25](#_Toc180500595)

[**Figura 7.**Comportamiento de la concentración de sólidos suspendidos totales en el área de estudio. 27](#_Toc180500596)

[**Figura 8.** Gráficas de tendencia y correlación de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en el área de estudio. 28](#_Toc180500597)

**Siglas, acrónimos y abreviaturas**

**PIMECLA** Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la erosión Costera en el Litoral Antioqueño

**OD** Oxígeno Disuelto

**SST** Sólidos Suspendidos Totales

# Resumen

En este estudio se analizó la variación en las concentraciones de nutrientes en agua marina durante la construcción de una obra de protección costera en el sector de Volcán de Lodo, de Arboletes, Antioquia. El Volcán de Lodo ha sido uno de los principales atractivos turísticos del Urabá Antioqueño, pero ha estado amenazado por la erosión costera de la región. Por ello, se adelantó la implementación de una obra de protección costera con el fin de mitigar el riesgo de colapso por erosión en la base del Volcán. Dado que el recurso pesquero es de suma importancia para los habitantes de Arboletes y teniendo en cuenta que este depende de los nutrientes y producción primaria; la construcción de una obra costera puede ocasionar que se vean afectados componentes clave en el ecosistema, como la disponibilidad de nutrientes para la producción primaria, así como otros parámetros que impactan a su vez dicha disponibilidad. Estos parámetros se midieron a través de muestras de agua de mar analizadas por el laboratorio de aguas Corpourabá. Los SST registraron concentraciones que variaron entre 33 mg/L y 312.9 mg/L, el OD presentó concentraciones mínimas en la estación E1 con 1.56 mg/L, mientras que el mayor registro se alcanzó en la misma estación con 7.8 mg/L. Entre los nutrientes la concentración de nitratos varió entre 0.17 mg/L y 0.99 mg/L, mientras que los ortofosfatos registraron concentraciones por debajo del umbral mínimo del método. Se aplicaron pruebas estadísticas de tendencia y correlación para evaluar el impacto de la obra en la variación de los parámetros medidos. Los resultados mostraron que tanto los nitratos como los SST tuvieron una correlación positiva fuerte con el avance de la obra, mientras que el OD presentó una correlación negativa fuerte. Esto indica que las concentraciones de nitratos y SST aumentaron conforme avanzaba la obra, mientras que el OD disminuyó. Sin embargo, solo en las estaciones E2B, E3A y E3B se demostró estadísticamente que la construcción de la obra de protección costera afectó significativamente la concentración de nitratos y en la estación E3B se demostró el impacto para el OD. Finalmente, se encontró que la construcción de la obra de protección costera tuvo un leve impacto en la concentración de nutrientes, pero esta construcción no representa un riesgo para la productividad primaria ni los ecosistemas marino-costeros.

*Plabras clave*: Obra de protección costera, erosión costera, nutrientes, eutrofización, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto.

# Abstract

In this study, the variation in nutrient concentrations in seawater during the construction of a coastal protection structure in the Volcán de Lodo area of Arboletes, Antioquia, was analyzed. The Volcán de Lodo has been one of the main tourist attractions in Urabá, Antioquia, but it has been threatened by coastal erosion in the region. For this reason, the implementation of a coastal protection structure was initiated to mitigate the risk of collapse due to erosion at the base of the volcano. Given that fishing resources are of great importance to the inhabitants of Arboletes, and considering that these resources depend on nutrients and primary production, the construction of a coastal structure could affect key ecosystem components, such as the availability of nutrients for primary production, as well as other parameters that in turn impact this availability. These parameters were measured through seawater samples analyzed by the Corpourabá water laboratory. Total suspended solids (TSS) recorded concentrations ranging from 33 mg/L to 312.9 mg/L, while dissolved oxygen (DO) presented minimum concentrations at station E1 with 1.56 mg/L, and the highest value was also recorded at the same station with 7.8 mg/L. Among the nutrients, nitrate concentrations varied between 0.17 mg/L and 0.99 mg/L, while orthophosphates recorded concentrations below the minimum threshold of the method. Statistical trend and correlation tests were applied to assess the impact of the construction on the variation of the measured parameters. The results showed that both nitrates and TSS had a strong positive correlation with the progress of the construction, while DO had a strong negative correlation. This indicates that nitrate and TSS concentrations increased as the construction progressed, while DO decreased. However, it was statistically demonstrated that the coastal protection construction significantly affected nitrate concentrations only at stations E2B, E3A, and E3B, and impacted DO concentrations at station E3B. Finally, it was found that the construction of the coastal protection structure had a slight impact on nutrient concentrations, but this construction does not pose a risk to primary productivity or marine-coastal ecosystems.

*Keywords***:** Coastal protection structure, coastal erosion, nutrients, eutrophication, total suspended solids, dissolved oxygen.

# Introducción

Las zonas costeras a lo largo del mundo son áreas dinámicas que han presentado grandes cambios representados en pérdidas o retrocesos del terreno, lo que genera riesgos e impactos sobre las comunidades y ecosistemas costeros (Ricaurte-Villota, 2018). Este fenómeno se conoce como erosión y puede ocurrir de manera natural debido a procesos oceanográficos, geológicos y atmosféricos. También puede ser causado por actividades humanas en zonas costeras o ribereñas, que generan un aumento en las tasas de remoción de material sedimentario.

Para el año 2018, en el documento de Amenaza y Vulnerabilidad por Erosión Costera para Colombia, el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andréis” - INVEMAR presenta resultados para la costa Caribe que evidencian que Córdoba es el departamento con valores de amenaza y vulnerabilidad más altos; los departamentos de Antioquía, Chocó-Caribe y Atlántico, registran baja amenaza, pero alta vulnerabilidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Ante los procesos de erosión que afectan el Caribe colombiano, la Gobernación de Antioquía trabajando en conjunto con la Universidad de Antioquía han adelantado esfuerzos para monitorear y mitigar esta problemática que afecta a las comunidades establecidas en la línea costera del departamento mediante el Programa Integral para el Monitoreo y Mitigación de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA); este programa abordó la problemática existente en el sector en que se encuentra el Volcán de Lodo del municipio de Arboletes, zona que ha presentado cambios durante los últimos años por la inestabilidad del talud costero. Por esto, mediante el Consorcio Tómbolos Artificiales, con el objeto de “construir obras para el control de erosión en la zona suroeste del volcán de lodo ubicado en el municipio de Arboletes en el departamento de Antioquía”, se llevó a cabo la construcción de dicha obra, la cual fue monitoreada para evaluar la calidad ambiental marina.

Los estudios relacionados con la evaluación de impacto ambiental incluyen entre los parámetros a tener en cuenta la concentración de nutrientes en agua marina, pues nutrientes como nitratos y fosfatos juegan un papel importante en los ciclos biogeoquímicos en el medio marino, siendo su seguimiento muy importante para comprender diversos procesos que se presentan en los ambientes acuáticos.

Entre los estados tróficos que registran los cuerpos de agua, presenta gran interés el proceso de eutrofización, este es una respuesta a la contaminación por enriquecimiento de nutrientes en los cuerpos de agua continentales y marinos, donde la productividad primaria tiene un crecimiento masivo, perjudicando otras especies existentes, ya que se generan cambios importantes en las propiedades químicas del agua, causando que los ambientes marinos y costeros se vean amenazados por tensores y residuos contaminantes provenientes de múltiples actividades socioeconómicas, estas generan deterioro en la calidad del agua que conllevan a la pérdida de los servicios ecosistémicos(Vivas-Aguas et al., 2021, en Invemar y Minambiente, 2019).

En la costa Caribe antioqueña desembocan gran variedad de ríos, en ellos, las principales fuentes de contaminación son los vertimientos de aguas residuales domésticas sin tratamiento y la inadecuada disposición de residuos sólidos, residuos de la agricultura intensiva, ganadería, comercio, turismo y actividad marítima portuaria (INVEMAR, 2010). Según el informe de la Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (INVEMAR, 2022), en el análisis histórico de calidad de agua marina y costera para el departamento de Antioquía se estableció que la zona costera del departamento presentaba deterioro y las condiciones de oxígeno disuelto, sólidos disueltos y nutrientes se encontraban afectadas por las descargas de aguas residuales domésticas.

Los ríos aportan material orgánico y nutrientes al mar, estos inciden de manera directa en la productividad de las zonas costeras, pero su incremento desproporcionado puede generar un desequilibrio en el sistema, el cual varía de acuerdo con la concentración que estos alcanzan en el cuerpo de agua receptor y las características particulares del mismo, llegando a alterar su productividad primaria; es así como en el Caribe colombiano se han identificado tres zonas con posible persistencia de floraciones algales de acuerdo con Coronado-Franco et al., (2018), siendo una de ellas el Golfo de Urabá. Estos cambios en la calidad del agua pueden conllevar a impactos variables en la productividad de los ecosistemas de influencia y a las comunidades de dependen del recurso pesquero.

Debido a los cambios que ha experimentado el Volcán de Lodo de Arboletes en los últimos años, la erosión costera representa una amenaza para el municipio. Construir una obra de protección costera es una solución que mitiga dicha amenaza; sin embargo, puede haber variaciones en el flujo de nutrientes, sólidos suspendidos y oxígeno disuelto en el agua marina adyacente a la obra, lo que podría alterar la producción primaria en el ecosistema.

# Objetivos

Objetivo general

Analizar el impacto de la construcción de la obra de protección costera en la concentración de nutrientes disponibles para la producción primaria en el ecosistema.

Objetivos específicos

* Identificar posibles tendencias de las concentraciones de nutrientes y su relación con la construcción de la obra de protección costera.
* Evaluar si la obra de protección costera tuvo impacto en la concentración de nutrientes y otros parámetros que puedan alterar la producción primaria en la zona.

# **Hipótesis**

La construcción de la obra de protección costera en el sector de Volcán de lodo incrementa las concentraciones de nutrientes en el agua marina debido a la re-suspención de sedimentos y la alteración del flujo de nutrientes.

# Área de estudios y metodología

## Área de estudio

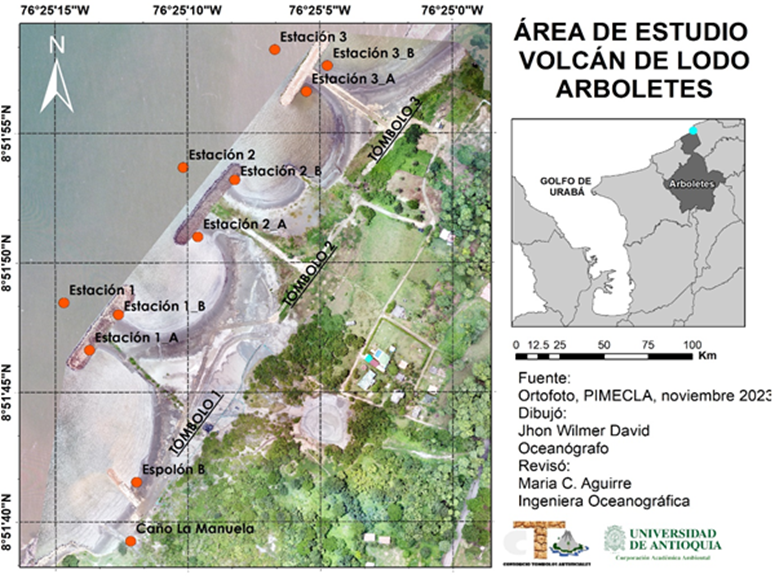
El Golfo de Urabá es un cuerpo de agua semicerrado al sur del mar Caribe, en el noroeste de Colombia, se extiende desde Arboletes, Antioquia hasta Capurganá, Chocó.

El municipio de Arboletes tiene una extensión de 718.27 km2, de los cuales 12 km son de playa, se encuentra ubicado al noreste del departamento de Antioquia, en la subregión de Urabá, limitando con el departamento de Córdoba. El Municipio tiene un potencial ecoturístico por sus paisajes, por sitios como el Volcán de lodo, sus playas y río Hobo.

El Volcán de lodo del municipio, también conocido como El Totumo, es una formación geológica singular ubicada en la costa del Golfo de Urabá, en el departamento de Antioquia, Colombia (Figura 1). El volcán de lodo es considerado un atractivo turístico para la región, sin embargo, su actividad podría tener un impacto ambiental negativo en el largo plazo, ya que el gas metano que emite es un potente gas de efecto invernadero y puede contribuir al cambio climático.

**Figura 1.**

Área de estudio, Volcán de lodo, Arboletes.



*Nota:* Fuente: Programa Integral de Monitoreo de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA, 2023).

Teniendo en cuenta la importancia del monitoreo en la zona y con el fin de dar cumplimiento al seguimiento a la calidad ambiental marina, se designaron once estaciones de muestreo, que fueron distribuidas en el área adyacente al Volcán de lodo. Del total de estaciones establecidas, nueve (9) fueron distribuidas alrededor de tres tómbolos, una (1) fue ubicada al lado derecho del espolón y la onceava estación fue ubicada en el caño La Manuela (Figura 1) (Zambrano. M et. al, 2023).

Durante los monitoreos realizados para el periodo correspondiente al 25% y 50% del avance de la obra se tomaron las muestras en las estaciones 1, 2 y 3. Para los monitoreos realizados en el periodo correspondiente al 75% y 100% del avance de la obra se tomaron las muestras en las estaciones restantes.

La distribución de las estaciones de muestreo se basó en las pautas establecidas en la resolución 1667 de 2009, la cual otorga la licencia ambiental. Las coordenadas correspondientes a los sitios de muestreo se presentan en la Tabla 1, siendo proyectadas en el sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, asimismo se destaca que las muestras fueron recolectadas antes de que se cumpliera con el 100% de avance en el desarrollo de la obra (Zambrano M. et. al, 2023).

**Tabla 1.**

Puntos de muestreo georreferenciadas

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ESTACIÓN | SIGLAS | DESCRIPCIÓN | COORDENADAS | | MATRIZ |
| N | W |
| Estación 1 | E1 | Frente al tómbolo 1 | 8°51'48,47" | 76°25'14,76" | Marino |
| Estación 2 | E2 | Frente al tómbolo 2 | 8°51'53,68" | 76°25'10,25" | Marino |
| Estación 3 | E3 | Frente al tómbolo 3 | 8°51'58,408" | 76°25'7,004" | Marino |
| Estación 1\_A | E1A | Interior del tómbolo 1, lado A | 8°51'46,90" | 76°25'13,50" | Marino |
| Estación 1\_B | E1B | Interior del tómbolo 1, lado B | 8°51'48,00" | 76°25'12,70" | Marino |
| Estación 2\_A | E2A | Interior del tómbolo 2, lado A | 8°51'51,00" | 76°25'9,70" | Marino |
| Estación 2\_B | E2B | Interior del tómbolo 2, lado B | 8°51'53,20" | 76°25'8,30" | Marino |
| Estación 3\_A | E3A | Interior del tómbolo 3, lado A | 8°51'56,60" | 76°25'5,60" | Marino |
| Estación 3\_B | E3B | Interior del tómbolo 3, lado B | 8°51'57,60" | 76°25'4,80" | Marino |
| Estación Espolón\_B | EEB | Interior del espolón, lado B | 8°51'42,05" | 76°25'13,54” | Marino |
| La Manuela | CM | Caño continental | 8°51'39,26" | 76°25'12,25" | Continental |

*Nota:* Fuente: Programa Integral de Monitoreo de la Erosión Costera en el Litoral Antioqueño (PIMECLA, 2023).

## Metodología

### Fase de campo

Tras el inicio de las obras se realizaron monitoreos teniendo en cuenta el avance en la implementación de las estructuras, estos muestreos se adelantaron en las siguientes fechas:

* 25%: diciembre del 2019
* 50%: marzo del 2020
* 75%: julio de 2023
* 100%: octubre de 2023

Se tomaron muestras de agua en recipientes plásticos opacos de 4 L de capacidad, para el posterior análisis de pH, materia orgánica, sólidos disueltos, sólidos totales, sólidos suspendidos totales (SST), turbidez, nutrientes (nitrógeno amoniacal (NH3-N), nitritos (NO2-), nitratos (NO3-), fosfatos (PO43-), sulfatos (SO42-)) y metales pesados (cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg), plomo (Pb), zinc (Zn) y cromo total (Cr)).

En la estación del caño La Manuela se tomó una muestra de agua para el análisis de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), hierro (Fe), pH, sólidos disueltos, sólidos totales, sólidos suspendidos, dureza, conductividad, alcalinidad, fósforo total, fosfatos (PO43-), sulfatos (SO42-), cloruros (Cl-), turbidez, nitrógeno amoniacal (NH3-N), nitritos (NO2-), nitratos (NO3-) y empleando un frasco Schott estéril de 100 mL de capacidad, se colectó una muestra para la determinación de coliformes totales y fecales.

Para determinar la concentración de oxígeno disuelto (OD) se colectaron muestras de agua en botellas Winkler, evitando la formación de burbujas, tras llenar las botellas se agregaron rápidamente las soluciones fijadoras (1 mL de sulfato de manganeso (MnSO4) + 1 mL de yoduro-alcalina (KI)), se agitó y transcurridos unos minutos se adicionó 1 mL de ácido sulfúrico (H2SO4), finalmente, el análisis fue realizado en laboratorio empleando el método Winkler.

Cada una de las muestras fue rotulada, almacenada en un lugar fresco y oscuro, posteriormente, transportada al laboratorio para su respectivo análisis, el cual fue adelantado en el laboratorio de aguas de Corpouraba.

### Análisis estadístico

Con el fin de evaluar la variación en los parámetros a lo largo de los avances en la construcción de la obra de protección costera se realizó un análisis de tendencia con correlación en el programa de Jupyter Notebook, el cual permite identificar un aumento o disminución de las variables medidas, mediante el coeficiente de correlación *r* y la relación que tiene con el avance de la construcción de la obra, con el valor p, cuando p<0.05 existe relación estadísticamente significativa y cuando p>0.05 esta relación no es estadísticamente significativa.

Aunque para los monitoreos realizados para el 75% y 100% de avance de la obra en las estaciones E1A, E1B, E2A, E2B, E3A, E3B, Caño la Manuela y Espolón B, se midieron una amplia variedad de nutrientes que permitirían un análisis completo de estos frente al impacto de la obra en el ecosistema; para los monitoreos realizados en el primer avance de la obra (25% y 50%) en las estaciones E1, E2 y E3, solo se incluyeron pH, fósforo total, nitrato, sólidos suspendidos totales y oxígeno disuelto.

No fue posible analizar la variación en las estaciones Caño la Manuela y Espolón B ya que no fueron tenidas en cuenta en los dos primeros monitoreos y no brindan un panorama general del impacto de la obra. Y teniendo en cuenta que para el momento en que se llevaron a cabo los monitoreos del primer 50% de la obra, las zonas aledañas a las estaciones E1, E2 y E3 no se encontraban intervenidas por la obra, se asumió que los valores obtenidos de nitratos, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos totales en dichas estaciones serían equivalentes a los valores del 25% de avance de la obra en las estaciones E1A, E1B, E2A, E2B, E3A y E3B.

Para realizar un análisis del impacto que tuvo la construcción de la obra se prestó principal atención en el primer monitoreo de la zona de estudio, puesto que se realizó antes de completar el 25% de avances en la construcción de la obra, en diciembre del 2019. Este monitoreo dio un panorama cercano del estado inicial del ecosistema ya que la zona se encontraba poco intervenida; el monitoreo final que se realizó antes de culminar el 100% de avance de la obra, en octubre del 2023, refleja el estado del ecosistema una vez se culmina la obra.

# Resultados

## Nutrientes

### Nitratos

Los resultados de nitratos en las diferentes estaciones monitoreadas durante la construcción de la obra costera se muestran en la **Tabla *2***. Donde se registraron concentraciones menores a 0,40 mg NO3-N/L durante los muestreos realizados en la primera fase (primer 50% de avance) de la obra costera. En el área de construcción muestreada para los avances del 75% y 100% de la obra se presentó un incremento en la mayor parte de las estaciones, la estación E1B en el 100% mostró una concentración cercana a 1 mg/L, superior al incremento registrado en las demás estaciones.

**Tabla 2.**

Concentración de Nitratos (mg/L) registrados en el área de estudio durante el seguimiento al avance de las obras.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estaciones** | **Porcentaje de avance de la obra** | | | |
| **25** | **50** | **75** | **100** |
| Espolón B |  |  |  | 0,46 |
| Caño |  |  | 0,11 | 0,55 |
| E1 | 0,17 | 0,19 |  |  |
| E2 | 0,21 | 0,22 |  |  |
| E3 | 0,23 | 0,33 |  |  |
| E 1A |  |  | 0,5 | 0,48 |
| E 1B |  |  | 0,5 | 0,99 |
| E 2A |  |  | 0,5 | 0,42 |
| E 2B |  |  | 0,4 | 0,58 |
| E 3A |  |  | 0,5 | 0,49 |
| E 3B |  |  | 0,4 | 0,46 |

En el caso de la estación denominada Caño La Manuela, para el monitoreo correspondiente al 75% de avance de la obra se presentó una concentración de nitrato baja (>0,20 mg) y un aumento considerable para el monitoreo del 100% (**Figura *2***).

**Figura 2.**

Comportamiento de la concentración de nitratos en el área de estudio.

Gráfico, Gráfico de barras

Descripción generada automáticamente

A lo largo del avance de la construcción de la obra de protección, se presentó un aumento en la concentración de nitratos en la zona intervenida por la obra. El incremento de estos niveles finalizando la obra (75% y 100%) fue equivalente al doble en la mayor parte de los puntos de muestreo, respecto a los niveles detectados en los primeros seguimientos al avance de la obra (25% y 50%). La correlación entre nitratos y el avance de la obra (>0.85) es positiva fuerte en todas las estaciones y el valor *p* para las estaciones E1A, E1B, E2A, E2B, E3A y E3B fue de 0.1156, 0.0773, 0.1548, 0.0444, 0.0168 y 0.0228 respectivamente, donde las estaciones E1A, E1B y E2A tiene un valor *p*>0.05 indica que no hay relación estadísticamente significativa entre nitratos y el avance de la obra, mientras que las demás estaciones (E2B, E3A y E3B) si tienen relación estadísticamente significativa (**Figura *3***).

**Figura 3.**

Gráficas de tendencia de la concentración de nitratos en el área de estudio durante la ejecución de las obras.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

### Fósforo

El fósforo es un elemento esencial para la vida en el océano, afectando desde la producción primaria hasta la salud general de los ecosistemas marinos. Las concentraciones de fósforo total en agua marina con fines recreativos en Colombia no deben exceder los 0.05 mg/L, sin embargo, las muestras procesadas durante todos los monitoreos estuvieron por debajo rango mínimo de detección del método (<0.1 mg/L) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por esta razón, no fue posible establecer un análisis del impacto de la construcción de la obra en los ortofosfatos para el área de estudio.

## Oxígeno disuelto

En la **Tabla *3*** se presentan las concentraciones de OD obtenidas en el área de estudio.

**Tabla 3.**

Concentración de Oxígeno Disuelto (mg/L) registrados en el área de estudio durante el seguimiento al avance de las obras.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estaciones** | **Porcentaje de avance de la obra** | | | |
| **25** | **50** | **75** | **100** |
| Caño |  |  | 1,37 | 1,66 |
| E1 | 7,80 | 1,65 |  |  |
| E2 | 7,65 | 2,42 |  |  |
| E3 | 7,66 | 1,94 |  |  |
| E 1A |  |  | 5,93 | 6,87 |
| E 1B |  |  | 6,33 | 6,18 |
| E 2A |  |  | 6,61 | 6,51 |
| E 2B |  |  | 5,28 | 6,29 |
| E 3A |  |  | 5,73 |  |
| E 3B |  |  | 6,44 | 5,95 |

Durante la construcción de la obra las concentraciones de OD disminuyeron respecto a los registros obtenidos para el 25% de avance cuando se determinaron las concentraciones más altas, con un máximo de 7,8 mg/L. Para el monitoreo del 50% se registró la mayor disminución, con los menores niveles de OD, que variaron entre 1,65 y 2,42 mg/L. Sin embargo, la menor concentración obtenida a lo largo de los monitoreos se presentó en el Caño, con 1,37 mg/L durante el seguimiento al 75% de avance de la obra. (**Figura *4***).

**Figura 4.**

Comportamiento de la concentración de OD en el área de estudio.

Gráfico, Gráfico de barras

Descripción generada automáticamente

Los monitoreos del 75% y 100% registraron niveles de OD aceptables para la salud del ecosistema (>4,0 mg/L), al igual que los valores registrados en el monitoreo del 25%; estos tres monitoreos coinciden en que se realizaron en época húmeda.

En la primera prueba de tendencia y correlación aplicada a los datos obtenidos en las estaciones E1A, E1B, E2A, E2B y E3B se obtuvieron coeficientes de correlación entre -0.03 y 0.07 y pendientes cercanas a cero o nulas (**Figura *5***) que no muestran claramente una tendencia al aumento o disminución de la concentración de oxígeno en el área de estudio. Los valores p en todas las estaciones fueron mayores a 0.92. En la estación E3A no fue posible aplicar la prueba estadística por falta de datos.

**Figura 5.**

Gráficas de tendencia de la concentración de oxígeno disuelto en el área de estudio.

Gráfico

Descripción generada automáticamente

Debido a que los valores obtenidos de OD en el monitoreo del 50% presenta una diferencia notoria con niveles más bajos respecto a los demás monitoreos (25%, 75% y 100%), se procedió a realizar un análisis estadístico de tendencia para el OD sin tener en cuenta los valores obtenidos en el monitoreo del 50%.

Para el segundo análisis de tendencia y correlación (**Figura *6***), en la mayoría de las estaciones, se observa una correlación negativa fuerte (<-0.65) entre el avance de la obra y la concentración de OD.

**Figura 6.**

Gráficas de tendencia de la concentración de oxígeno disuelto en el área de estudio

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

Sin embargo, solo en la estación E3B esta relación es estadísticamente significativa (p<0.05), lo que implica que en ese sitio el impacto de la obra en el oxígeno disuelto es más evidente. Y en las otras estaciones la relación no es estadísticamente significativa (p>0.05).

## Sólidos suspendidos totales (SST)

Las concentraciones de sólidos suspendidos totales medidos en las estacione de muestreo se muestran en la

**Tabla *4***.

**Tabla 4.**

Concentración de Sólidos suspendidos Totales (mg/L) registrados en el área de estudio durante el seguimiento al avance de las obras.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Estaciones** | **Porcentaje de avance de la obra** | | | |
| **25** | **50** | **75** | **100** |
| Espolón B |  |  |  | 312,9 |
| Caño |  |  | 9399 | 26909 |
| E1 | 49 | 33 |  |  |
| E2 | 39 | 73 |  |  |
| E3 | 103 | 72 |  |  |
| E 1A |  |  | 63 | 108 |
| E 1B |  |  | 65 | 140,8 |
| E 2A |  |  | 57 | 48,3 |
| E 2B |  |  | 59 | 101,5 |
| E 3A |  |  | 43 | 128,6 |
| E 3B |  |  | 53 | 106 |

En el área de estudio, los niveles de SST registraron concentraciones menores a 100 mg/L en todas las estaciones durante los monitoreos del 25%, 50% y 75%. En el monitoreo realizado para el 100% de avance de la obra, las concentraciones de SST fueron superiores a los 100 mg/L en las estaciones 1A, 1B, 3A, 3B y Espolón B; este último tuvo la concentración de SST más alta con una concentración de 313 mg/L (**Figura *7***).

Durante los muestreos de 25% y 50% de avance de la obra, en las estaciones 1, 2 y 3, se registraron las mayores concentraciones de SST en la estación 3 (**Figura *7***).

**Figura 7.**

Comportamiento de la concentración de sólidos suspendidos totales en el área de estudio.

Gráfico, Gráfico de barras

Descripción generada automáticamente

Luego de procesar los datos obtenidos de SST estadísticamente, el análisis de tendencia (**Figura *8***) mostró que, en las estaciones E1A, E1B y E2B, se observan tendencias de aumento en la concentración de SST conforme avanza la obra, siendo más marcadas en las estaciones E1B y E1A. En las estaciones E2A, E3A y E3B, la concentración de SST se mantiene bastante estable, con incrementos muy pequeños o nulos. En la estación E3B incluso hay una ligera disminución.

En las estaciones E1A, E1B y E2B, la correlación muestra una tendencia positiva fuerte con coeficientes mayores a 0.83, las estaciones E2A y E3A presentaron coeficientes de 0.11 y 0.17 respectivamente indicando correlación positiva leve y en el caso de la estación E3B fue negativa leve (-0.05), en ninguno de los casos la relación entre el avance de la obra y la concentración de SST resulta ser estadísticamente significativa, ya que todos los p-valores son superiores a 0.05.

**Figura 8.**

Gráficas de tendencia y correlación de la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en el área de estudio.

Gráfico, Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente

# Discusión

Gracias al ingreso de materia orgánica en los cuerpos de agua marinos se encuentran disueltos nutrientes nitrogenados y fosfatados que son fundamentales para la producción primaria, medir estos parámetros indica el estado de los ecosistemas marino-costeros. El nitrógeno en el agua marina se encuentra disuelto en las formas iónicas más comunes como el amonio (NH4+), el nitrito (NO2 –) y el nitrato (NO3 –) (Camargo & Alonso, 2007). De estos los nitratos (NO3⁻) son una de las formas de nitrógeno más comunes en los ecosistemas acuáticos, y su concentración en el agua marina es un indicador clave del estado de salud y calidad del ambiente marino.

En este estudio, se analizaron los niveles de nitratos a lo largo del avance de una obra costera en diferentes sitios, con el objetivo de identificar posibles tendencias y evaluar si las actividades de construcción tienen un impacto directo en la concentración de este nutriente. Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante análisis de regresión lineal para cada sitio de muestreo, permitiendo determinar si existe una relación significativa entre el avance de la obra y los cambios en la concentración de nitratos en el agua.

Una vez se aplicó la prueba de tendencia y correlación en las estaciones E2B, E3A, y E3B, se presentaron pendientes positivas con valores cercanos a cero que indican los nitratos tuvieron un leve aumento conforme la construcción de la obra costera avanzó, aunque es poco, es estadísticamente significativo y detectable. Estadísticamente en estas estaciones la construcción de la obra costera tuvo un impacto leve en la concentración de nutrientes.

Por el contrario, en las estaciones restantes (E1A, E1B y E2A) no hay evidencia estadística que demuestre que el avance de la obra costera esté impactando la concentración de nitratos en dichas estaciones. Esta variación en la concentración de nutrientes en las estaciones E1A, E1B y E2A puede deberse a factores externos, como la proximidad de estas estaciones a la estación Caño La Manuela, que aporta aguas continentales al área de estudio. Estas aguas podrían estar recibiendo aguas residuales, lo que incrementa la cantidad de materia orgánica presente y, por lo tanto, la concentración de nutrientes como los nitratos. Ya que la obra costera puede estar limitando el flujo y dispersión de las aguas del caño en forma paralela a la costa, lo que genera una contención parcial de la concentración de nutrientes en las estaciones cercanas al caño.

Ya que las concentraciones de fósforo en el área de estudio estuvieron por debajo del umbral mínimo de detección del método no es posible tener este parámetro como referente para analizar el impacto de la obra costera en la concentración de nutrientes. Por esto se procedió a realizar un análisis a los datos que se obtuvieron de oxígeno disuelto y sólidos suspendidos totales en todos los monitoreos realizados en el avance de la construcción de la obra costera como indicadores de que los niveles de nutrientes tengan una variación en el área de estudio.

Medir el oxígeno disuelto en el agua de mar es un indicador de la presencia de materia orgánica en los ecosistemas marino-costeros, los niveles de este parámetro varían de acuerdo con las tasas de degradación de sustancias orgánicas e inorgánicas que son oxidables (Instituto de Hidrología, 2007). También puede ser indicador de otros problemas de calidad ambiental como la eutrofización en los ecosistemas acuáticos. El OD permite comprender la salud y funcionamiento de los ecosistemas y así poder implementar planes de gestión sostenible de los recursos.

De otra parte, la construcción de una obra costera puede alterar los niveles de OD en el área de estudio, puesto que la implantación de esta puede modificar los flujos de agua y la dinámica del ecosistema, afectando la mezcla y circulación de aguas. Con esto, se pueden presentar zonas hipóxicas y/o anóxicas. Es así como tras aplicar la prueba de tendencia y correlación a los datos obtenidos de OD en el área de estudio esta indica que, en la mayoría de las estaciones, no se observa una correlación significativa entre el avance de la obra y las concentraciones medidas. Los valores de p son muy altos, lo que indica que cualquier cambio observado en las concentraciones podría deberse al azar, y no a un efecto directo del avance de la obra. Además, los coeficientes de correlación son extremadamente bajos, lo que refuerza la idea de que las concentraciones no parecen estar relacionadas de manera significativa con el progreso de la obra.

Al momento de realizar el análisis del OD fue evidente que los datos obtenidos en el monitoreo del 50% de avance de la obra destacan por ser concentraciones bajas respecto a los datos obtenidos en los demás monitoreos (25%, 50% y 100%). Teniendo en cuenta que las concentraciones de OD en la capa superficial del agua marina varía por diversos factores, que pueden ser mecánicos, relacionados con la intensidad del viento y la acción del oleaje o pueden deberse a la actividad biológica.

Se evaluaron las épocas climáticas predominantes para cada uno de los monitoreos, donde el 25%, 75% y 100% coinciden al realizarse en época húmeda, mientras que el monitoreo del 50% se adelantó durante la transición de época seca a húmeda con predominancia de época seca. Considerando que los monitoreos del 25% y 100% son los que dan un panorama general de los cambios que se presentaron en el área de estudio se realizó nuevamente el análisis de tendencia y correlación sin tener en cuenta el monitoreo realizado en el 50% de avance de la obra.

El análisis de tendencia y correlación de oxígeno disuelto (OD), realizado sin considerar los datos obtenidos en el monitoreo al 50% de avance de la obra, indica que hubo una disminución de las concentraciones de OD con una fuerte correlación en la mayoría de las estaciones muestreadas. Sin embargo, solo la estación E3B presentó una relación estadísticamente significativa que sugiere un impacto del avance de la obra costera en la disminución de la concentración de OD en la zona. Estadísticamente, no hay evidencia de que el avance de la construcción de la obra haya tenido un impacto directo en la concentración de OD en el área de estudio, exceptuando la estación E3B.

Finalmente se analizaron las concentraciones de los sólidos suspendidos totales ya que para proteger los ecosistemas marino-costero y garantizar la calidad ambiental es significativo medir los SST en el agua de mar. La construcción de la obra costera implica movimiento de sedimentos y se pueden liberar partículas en el agua, que puede provocar una turbidez elevada, esto afecta principalmente a organismos de la producción primaria por la reducción de la luz disponible para hacer fotosíntesis, y a organismos filtradores dificultando su alimentación.

Los SST incluyen fragmentos de materia orgánica, sedimentos, restos de organismos marinos, y otros materiales, y su concentración puede ser afectada por procesos naturales como la erosión, el transporte de sedimentos por corrientes, y la bioturbación, así como por actividades antropogénicas, tales como la construcción marina y el dragado.

El análisis estadístico reveló que las estaciones E1A, E1B y E2B mostraron tendencias de aumento en la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) a medida que avanzaba la obra, siendo más marcadas en las estaciones E1B y E1A. En contraste, las estaciones E2A, E3A y E3B mantuvieron concentraciones de SST bastante estables, con incrementos muy pequeños o nulos, e incluso en la estación E3B se observó una ligera disminución.

Para esta zona del Golfo de Urabá el oleaje de mayor influencia es oleaje del noreste (Molina et al., 1996) la estación 3 se encuentra en el frente de deriva litoral. Teniendo en cuenta lo anterior, los espolones 1, 2 y 3 estaban construidos en su totalidad para el monitoreo del avance del 100%. Las estaciones 2A y 2B, tienen menores concentraciones de SST, esto se debe a la menor energía del oleaje en las zonas aledañas al espolón 2.

Esto sugiere que los cambios observados en la concentración de SST no se deben únicamente al avance de la obra, y podrían estar influenciados por otros factores ambientales o locales, como que para el momento de realizar el monitoreo correspondiente al 100% de avances de la obra aún se estaban llevando a cabo la construcción del espolón B, lo que pudo incrementar las concentraciones de las estaciones E1A y E1B por la cercanía entre el Espolón B y el Espolón 1.

Finalmente, los parámetros evaluados adicionalmente mostraron que el oxígeno disuelto (OD) puede verse alterado por la construcción de la obra, pero también puede variar por condiciones externas a la obra, por lo que no es un indicador; el impacto de la obra en la concentración de nutrientes y el comportamiento de los sólidos suspendidos totales (SST) sugiere que, aunque exista una relación de aumento con el progreso de la obra costera, el impacto en el ecosistema se da a corto plazo.

# **Conclusiones**

La construcción de la obra de protección costera tuvo un leve impacto en la concentración de nutrientes en el área de estudio, lo que indica que esta construcción no representa un riesgo para la productividad primaria ni los ecosistemas marino-costeros.

Aunque el oxígeno disuelto presentó disminución en su concentración a lo largo de la construcción de la obra no hay evidencia estadística que indique que esta disminución esté relacionada con el incremento de nutrientes en el área de estudio.

El comportamiento del oxígeno disuelto y los sólidos suspendidos totales no representaron de forma estadística el impacto de la obra de protección costera en la concentración de nutrientes ya que suelen presentar alteraciones por factores externos.

# Recomendaciones

Para lograr evaluar de forma más confiable el impacto de una obra costera es necesario realizar los monitoreos antes, durante y después en los mismos puntos de muestreo.

Incluir la medición de todas las formas iónicas que puedan tener los nutrientes en el ambiente marino y no solo las formas más abundantes, con el fin de tener un balance completo de los nutrientes. Y mantener un monitoreo a largo plazo de estas variables.

# 

# Referencias

Camargo, J. A., & Alonso, A. (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Revista Ecosistemas, 16(2), 98–110. http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/457

Coronado-Franco, K. V., Selvaraj, J. J., & Mancera Pineda, J. E. (2018). Algal blooms detection in Colombian Caribbean Sea using MODIS imagery. Marine Pollution Bulletin, 133, 791–798. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.021

Instituto de Hidrología, M. y E. A. (IDEAM). (2007). FICHA TÉCNICA: Oxígeno disuelto. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 1–4. http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubFile922&downloadname=Oxígeno Disuelto.zip

INVEMAR. (2010). Diagnóstico y evaluación de la Calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano. Red de vigilacia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. Diagnóstico nacional y regional 2010. 208.

INVEMAR. (2022). Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras en el Caribe y Pacífico.

John Wilmer. Garces Teheran, H. Z. O. M. M. V. N. N. P. D. S. (2023). CONTRATO DE SERVICIOS DE OBRA REALIZAR LA BATIMETRÍA Y PERFILES DE PLAYA Y MEDICIONES DE PARÁMETROS AMBIENTALES EN SEDIMENTOS, CALIDAD DE AGUA DULCES, AGUAS MARINAS Y COMUNIDADES BENTÓNICAS.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Erosión costera en Colombia. 9.

Molina, L. E., Perez, F., Martinez, J., Franco, J. V., Marin, L., Gonzalez, J. L., & Carvajal, J. (1996). Geomorfologia Y Aspectos Erosivos Del Litoral Caribe Colombiano. Ingeominas, 21, 1–114.

Ricaurte-Villota, C. . C.-D. O. . G. M. E. . B.-E. M. . M. D. F. . C.-R. C. . B.-Z. F. . L. G. A. y A. M. E. (2018). Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia enfoque regional para la gestión del riesgo = Coastal erosion hazard and vulerabilidad in Colombia : regional approach to risk management. https://www.researchgate.net/publication/335502006\_Amenaza\_y\_vulnerabilidad\_por\_erosion\_costera\_en\_Colombia\_enfoque\_regional\_para\_la\_gestion\_del\_riesgo

Vivas-Aguas, L. J., Obando Madera, O. P. S., Córdoba Meza, T. L., Castillo Viana, M. J., & Espinosa Díaz, L. F. (2021). Boletín Índice de Calidad de Aguas Marinas y Costeras – ICAM. Reporte año 2020. Reporte Año 2020, 17.