



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Eventos de sobresaturación de oxígeno disuelto superficial y su relación con la temperatura y la comunidad fitoplanctónica, en un sector eutrófico de la bahía de Turbo, Urabá, Caribe colombiano.

Sergio Andrés Campiño-Londoño

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ecológo de Zonas Costeras

Asesora

Mónica María Zambrano Ortiz. Dr. Sc.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Ecología de Zonas Costeras
Turbo, Antioquia, Colombia

2025



Cita

(Campiño-Londoño, 2025)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Campiño-Londoño, S. (2025). Eventos de sobresaturación de oxígeno disuelto superficial y su relación con la temperatura y la comunidad fitoplanctónica, en un sector eutrófico de la bahía de Turbo, Urabá, Caribe colombiano. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.



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

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, por darme la oportunidad de culminar este trabajo, por darme sabiduría, fuerza y la perseverancia para llegar hasta aquí.

A mi madre y mi abuela por su apoyo constante y por creer en mí, incluso en los momentos más difíciles. A mis profesores, por compartir sus conocimientos, guiar mi camino académico y motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

A mi novia, mi cómplice en cada paso. Quien, a través de su apoyo y amor incondicional, ha logrado que nunca me desanime y siempre tener fuerzas para enfrentar todo.

Y a la naturaleza, fuente infinita de inspiración, por recordarme cada día por qué elegí este camino.

Este trabajo es para ustedes.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a la vida por darme la oportunidad y la fortaleza para llegar hasta este momento. A mi madre y mi abuela, por ser mis ejemplos de esfuerzo y dedicación, por brindarme su apoyo para seguir adelante y alcanzar mis metas. A mi pareja, Nathaly Villegas, por acompañarme en la recta final de este proceso, por su paciencia, motivación y por estar a mi lado en cada desafío que implicó la realización de este trabajo. Su presencia ha sido un apoyo invaluable en este camino.

A Doña Narly, por ser mucho más que un apoyo durante esta etapa. Gracias por brindarme su cariño, sus consejos y sobre todo, su cuidado a través de cada comida preparada con esmero. Su calidez y generosidad hicieron que este proceso se sintiera como estar en casa.

A mis profesores, especialmente a la profesora Mónica Zambrano, por su orientación, consejos y valioso conocimiento, que han sido clave en la realización de este trabajo.

A la Universidad de Antioquia, por brindarme las herramientas y el espacio para crecer tanto académica como personalmente, y por ser el escenario donde construí conocimientos, experiencias y relaciones que siempre llevaré conmigo.

A mis compañeros y a cada persona que, de alguna manera ha sido parte de este proceso.

A ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Contenido

Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Planteamiento del problema	13
2.1 Antecedentes	14
3. Justificación.....	16
4. Objetivos	17
4.1 Objetivo general	17
4.2 Objetivos específicos.....	17
5. Hipótesis.....	18
6. Marco teórico	19
7. Metodología	22
7.1 Área de estudio.....	22
7.2 Fase de campo	23
7.3 Análisis de datos.....	23
8. Resultados	25
8.1. Oxígeno disuelto	25
8.2. Temperatura	27
8.3. Fitoplancton.....	28
8.4. Oxígeno disuelto y temperatura	32
9. Discusión.....	33
10. Conclusiones	35
11. Recomendaciones.....	36

Referencias37

Lista de tablas

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del oxígeno disuelto superficial entre 2019 y 2024.25

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de oxígeno disuelto superficial y temperatura durante los años 2019 y 2024.....32

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio y de los sitios de muestreo.....	22
Figura 2. Oxígeno disuelto superficial del 2019 a 2024.	26
Figura 3. Comportamiento del oxígeno disuelto. Época húmeda (2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024) y época seca (2022, 2023, 2024).....	26
Figura 4. Temperatura superficial. Época húmeda (2019, 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024) y época seca (2022, 2023, 2024).	27
Figura 5. Valores porcentuales de abundancia de géneros de fitoplancton en la época húmeda (2019, 2020, 2021, 2022, 2023 2024) y época seca (2022, 2023 y 2024).	28
Figura 6. Géneros con abundancias mayores a 5000 Cel/L en época húmeda 2019, 2020, 2021, 2022, 2024 y época seca 2022, 2023 y 2024.....	30
Figura 7. Géneros con abundancias mayores a 5000 Cel/L en época húmeda 2023.	31
Figura 8. Comportamiento registrado por los parámetros oxígeno disuelto (OD) y la Temperatura.	31

Resumen

En esta investigación se evaluaron los eventos de sobresaturación de oxígeno disuelto superficial y su relación con la temperatura y la comunidad fitoplanctónica en un sector eutrófico de la bahía de Turbo, Urabá, Caribe colombiano, entre 2019 y 2024. Se monitorearon tres sitios con diferentes niveles de influencia antrópica durante épocas húmedas y secas, y bajo condiciones de bajamar y pleamar. Los resultados muestran una disminución progresiva del oxígeno disuelto (OD) superficial a lo largo del periodo de estudio, con valores críticos en bajamar, especialmente en sitios más impactados por actividades humanas. Se observó una relación inversa entre OD y temperatura, donde las temperaturas más altas coincidieron con menores niveles de oxígeno, favoreciendo condiciones de hipoxia y anoxia. Paralelamente, se registraron eventos atípicos de sobresaturación de OD con concentraciones muy por encima de los correspondientes a saturación para aguas tropicales, alcanzando hasta 15.05 mg/L en 2019, y 14.43 mg/L en 2020 ambos registrados en el sitio más alejado de fuentes antrópicas durante pleamar), y 15.03 mg/L en 2023 en el sitio intermedio, durante la bajamar). Estas concentraciones extremas coincidieron con floraciones algales puntuales, reflejadas en altas abundancias de géneros como *Euglena*, *Scrippsiella* y *Pseudonitzschia*, lo que sugiere una fuerte influencia de la producción primaria en la sobresaturación de oxígeno. La composición del fitoplancton varió espacial y temporalmente, pasando de comunidades dominadas por pocos géneros a una mayor diversidad desde 2022. La dinámica mareal también mostró ser clave, con mejores condiciones de oxigenación durante pleamar. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la interacción entre factores físicos, biológicos y climáticos en la evaluación de la calidad del agua y el manejo de ecosistemas costeros eutróficos.

Palabras clave: Sobresaturación de oxígeno, fitoplancton, épocas climáticas, eutrofización.

Abstract

This investigation evaluated the events of surface dissolved oxygen supersaturation and its relation with temperature and phytoplankton community in an eutrophic sector in the Turbo bay, Uraba, Colombian Caribbean, between 2019 and 2024. Three locations with different levels of anthropic influence were evaluated under wet and dry seasons within low tide and high tide conditions. The results show a progressive decrease of surface dissolved oxygen (DO) throughout the study timeframe, with critical values in low tide, specially in sites that are more impacted by human activity. An inversed relation between DO and temperature was observed, highest temperatures coincided with lower oxygen levels, favouring conditions of hypoxia and anoxia. In parallel, atypical events of OD sobresaturation with concentrations higher than the corresponding saturation for tropical waters were observed, reaching up to 15.05 mg/L in 2019, and 14.43 mg/L in 2020, (both registered in the farthest locations of anthropic sources during high tide) and 15.03 mg/L in 2023 in the intermediate site during low tide. These extreme concentrations coincided with localized algal blooms, reflected on the high abundance of genera, such as *Euglena*, *Scrippsiella*, and *Pseudonitzschia*, suggesting a strong influence over the primary oxygen sobresaturation. The Phytoplankton's composition varied in time and space, from communities dominated by few genera, to a higher diversity from 2022. The tidal dynamics showed up as a key, with better oxygenation conditions during high tide. These findings highlight the importance of considering the interaction between physical, biological and climatic factors in the evaluation of the water's quality and coast eutrophic ecosystem management.

Key words: Oxygen sobresaturation, phytoplankton, climatic seasons and eutrophication.

1. Introducción

En los cuerpos de agua costeros, como bahías y estuarios, la mecánica de las mareas juega uno de los roles principales en la distribución de los nutrientes y el oxígeno disuelto. En pleamar, el aumento del nivel del agua puede favorecer la mezcla vertical, promoviendo la difusión de oxígeno hacia las capas más profundas. Por otro lado, durante bajamar, la circulación es más limitada y puede provocar estratificación, lo que contribuye a la disminución de oxígeno en las capas más profundas y la acumulación de nutrientes, favoreciendo las condiciones de eutrofización (Cloern, 2001).

Los cuerpos de agua eutróficos son ecosistemas acuáticos determinados por una elevada concentración de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, esto favorece la proliferación excesiva de algunos organismos, principalmente fitoplancton y algas. Este fenómeno, conocido como eutrofización, puede ocurrir de manera natural, o por actividades humanas, como la agricultura intensiva, el vertido de aguas residuales y la deforestación, acelerando el proceso y comprometiendo la calidad del agua (Smith et al., 1999), la eutrofización está asociada con una serie de impactos ambientales negativos.

Entre las consecuencias de la eutrofización se encuentra la disminución de los niveles de oxígeno disuelto (OD), este es un parámetro indispensable para la vida acuática, ya que la mayoría de los organismos presentes en estos ambientes, dependen de este gas para su respiración. Por otra parte, el OD superficial es una variable crítica, en cuerpos de agua eutróficos, ya que la concentración de oxígeno en las capas superficiales del agua es fundamental. En cuerpos de agua eutróficos, la fotosíntesis del fitoplancton produce oxígeno en la capa superficial durante el día, pero este proceso es opuesto durante la noche, cuando la descomposición de la materia orgánica consume oxígeno (Diaz & Rosenberg, 2008). Este fenómeno puede conducir a fluctuaciones relevantes en los niveles de OD superficial, durante las floraciones algales, cuando la biomasa fitoplanctónica aumenta de manera excesiva (Fennel & Testa, 2019), este proceso incide en la formación de zonas muertas, áreas de agua que no pueden sustentar vida alguna debido a que los niveles de oxígeno son demasiado bajos (Diaz & Rosenberg, 2008).

La hipoxia puede tener efectos devastadores para la biodiversidad acuática, alterando las cadenas alimenticias, este fenómeno, impacta directamente en los organismos como el fitoplancton, un

diverso grupo de organismos acuáticos microscópicos que flotan en la columna de agua y tienen un papel clave en la red trófica. Realizan fotosíntesis y son la base de la cadena alimentaria en ecosistemas marinos y de agua dulce. Su diversidad es amplia e incluye diatomeas, cianobacterias, dinoflagelados, criptofitas y clorofitas (Gárate et al., 2014). Sin embargo, estos procesos no suceden de manera constante durante todo el año.

Los cambios estacionales, como la diferencia entre la época seca y la época húmeda, actúan de manera relevante en la dinámica del OD en las zonas costeras. En la época seca, la reducción en las precipitaciones y los caudales fluviales disminuyen el aporte de nutrientes y sedimentos desde los ríos, lo que provoca una menor carga de nutrientes y una mayor estabilidad en los niveles de OD (Turner & Rabalais, 2003). A diferencia de la época húmeda, las lluvias constantes aumentan el flujo de nutrientes desde los ríos, lo que puede incrementar la eutrofización, comprometiendo la calidad del agua y disminuyendo los niveles de OD (Rabalais et al., 2002).

Aparte de su papel en la cadena alimentaria, el fitoplancton tiene un rol clave en la regulación del clima global. A través de la fotosíntesis, absorbe grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y lo convierte en materia orgánica, reduciendo la cantidad de CO_2 en la atmósfera (Cobos & Cruz, 2025). Se estima que el fitoplancton produce alrededor del 50% del oxígeno en la atmósfera, lo cual lo convierte en uno de los grupos más importantes de organismos en la Tierra (Behrenfeld et al., 2006). Sin embargo, el fitoplancton también puede tener efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana, pues las floraciones de algas tóxicas pueden dañar la vida marina y la salud humana, afectando negativamente la pesca y el turismo en las áreas afectadas (Anderson et al., 2002). Es así como la concentración de clorofila constituye un buen indicador de la biomasa algal presente en un cuerpo de agua, ya que se correlaciona directamente con la cantidad de algas presentes en este medio (Paerl & Otten, 2013).

En el Caribe colombiano, la región de Urabá destaca por sus recursos hídricos, que incluyen ríos, lagunas y zonas inundadas, utilizados tanto para actividades agrícolas, ganaderas, recreativas y para abastecimiento de las comunidades. Sin embargo, la eutrofización en algunos de estos cuerpos de agua, inducida principalmente por el vertimiento de nutrientes, ha generado preocupaciones sobre sus consecuencias ambientales y socioeconómicas (Paerl & Otten, 2013).

A pesar de la necesidad de comprender y gestionar las floraciones algales, los bajos niveles de oxígeno y las descargas puntuales sobre los cuerpos de agua en la región de Urabá, la importancia

que se da a esta problemática es mínima, los aportes al conocimiento del estado de los recursos hídricos a partir de la investigación científica sobre el tema en el contexto local, van aumentando poco a poco, es así como ya existe interés a nivel nacional por abordar de manera adecuada e interinstitucional el problema, por lo que se ha creado el Sistema Nacional para la Detección, Evaluación y Manejo de los Eventos FAN (SINDEM - FAN), involucrando diversas entidades de orden nacional y/o regional, que desarrollan actividades en torno a los ambientes marinos.

2. Planteamiento del problema

En la bahía de Turbo, el cuerpo de agua del sector conocido como caño el Waffe se puede considerar eutrófico debido a que se ve influenciado por descargas puntuales de aguas residuales, que generan altas concentraciones de nutrientes y aparición de microorganismos como los coliformes y cambios en la comunidad fitoplanctónica, comprometiendo la calidad del agua; este proceso de eutrofización puede ocurrir de manera natural o como resultado de actividades antrópicas.

En estos ecosistemas, la variabilidad de las mareas, la diferencia de épocas climáticas, el aporte de agua de los ríos y el aumento de biomasa fitoplanctónica influyen en la concentración de oxígeno disuelto (OD), un parámetro esencial para la salud acuática. En los ambientes acuáticos, la fotosíntesis realizada durante el día produce oxígeno, pero este proceso se ve contrarrestado durante la noche, cuando el proceso de descomposición consume oxígeno, lo que puede provocar un descenso de los niveles de este gas y la formación de zonas muertas (Fennel & Testa, 2019; Diaz & Rosenberg, 2008).

Los fenómenos de sobresaturación, hipoxia y anoxia están asociados a las fluctuaciones de los niveles de OD, según la marea, la época y el sitio puede variar, disminuyendo o aumentando. Para el sector del Waffe se han adelantado seguimientos a la calidad del agua estableciendo sitios de referencia de acuerdo con la distancia de la zona interna (receptora de aguas servidas) hacia la zona externa (menor influencia de la actividad humana). El caño el Waffe se ha convertido en un cuerpo de agua eutrófico, lo que presenta una consecuencia grave para el sector, afectando negativamente a la biodiversidad acuática.

Los cuerpos de agua eutróficos presentan anomalías en la concentración de oxígeno, pues el aumento de nutrientes y las floraciones algales, no solo alteran la calidad del agua, sino que también pueden generar impactos económicos significativos, debido a la reducción de la actividad pesquera y el turismo (Anderson et al., 2002), pues de acuerdo con el grupo de organismos que constituyan la floración, esta puede generar mortalidad de diversas especies, incluyendo también afectaciones en la salud humana, e incluso mortalidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el golfo de Urabá la preocupación por la calidad del agua ha incrementado en las últimas décadas debido a la expansión de actividades humanas, lo que ha

generado incertidumbre sobre sus impactos en la biodiversidad acuática y los recursos naturales de la región (Paerl & Otten, 2013). Es así como, pese a la importancia de fenómenos como las fluctuaciones de oxígeno en términos ecológicos y socioeconómicos, existen vacíos en el conocimiento específico sobre los eventos anómalos de alta concentración de oxígeno disuelto superficial en la bahía de Turbo.

2.1 Antecedentes

En un estanque eutrófico poco profundo en Bangladesh durante septiembre de 2005 a julio de 2006 se observaron dos eventos conspicuos simultáneamente durante el período de estudio: alta concentración de fosfato-fósforo ($>3.03 \text{ mg l}^{-1}$) y proliferaciones cianobacterianas permanentes ($>3,981.88 \times 10^3 \text{ células l}^{-1}$ (SD 508.73)), proliferaciones que se caracterizaron por tres fases de abundancia, cada una de las cuales se asoció con diferentes procesos ecológicos. Por ejemplo, una alta concentración de nitrato-nitrógeno (>2.35 ; SD 0.83 mg l^{-1}) se asoció con alta abundancia de cianobacterias, estas proliferaciones estuvieron correlacionadas positivamente con la temperatura ($r = 0.345$) y el pH (0.833 ; $p = 0.05$) y correlacionadas negativamente con la transparencia ($r = -0.956$; $p = 0.01$). Mientras que *Euglena* fue considerada como oportunista (Jahan et al., 2010).

Una evaluación del estado de la calidad de las aguas superficiales del sistema de la laguna Aby en la región occidental de Ghana, donde la variación de la concentración de OD en la laguna no fue estadísticamente significativa entre las estaciones de muestreo registró variabilidad estacional con mayores valores durante la estación seca. El período húmedo registró un rango de OD entre $0,43 \text{ mg/L}$ y $1,77 \text{ mg/L}$ mientras que la estación seca registró valores dentro de $0,70 \text{ mg/L}$ y $5,32 \text{ mg/L}$. El estudio concluyó que las concentraciones relativamente bajas de OD en las muestras probablemente se asociaron con la descomposición de materia orgánica y desechos mientras que un nivel más alto de OD durante la estación seca pudo estar relacionado con las menores cantidades de escorrentía que generalmente transportan nutrientes y desechos a los cuerpos de agua (Miyittah et al., 2020).

La evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México, indicó que la concentración OD estuvo por debajo de 1.0 mg/L en la mayoría de los sitios estudiados, salvo los que se ubicaron cerca de efluentes de plantas de

tratamiento de aguas residuales (sitios 16 y 39), los cuales presentaron altos niveles de OD y una carga orgánica baja. En estos sitios la concentración de OD se incrementó hasta 5.0 mg/L, nivel aún por debajo de los valores de referencia (5.5–8.0 mg/L) (Guzmán-Colis et al., 2011).

En Cuba la evaluación de la calidad del agua marina en el Parque Nacional Caguanes, Sancti Spíritus, particularmente con relación al contenido de OD en el agua, osciló entre 3.13-5.54 mg/L concentraciones superiores a 3 mg/l y menores a 6 mg/l, indicando que el cuerpo de agua evaluado puede definirse como un cuerpo de agua de dudosa calidad, según lo establece la NC-25:(1999). Aunque existen valores por encima de los 5 mg/L, que lo clasifican como un cuerpo de buena calidad, en ese momento, particularmente en los muestreos que se corresponden a los años 2015, 2016, 2017 y 2019, específicamente en los meses de febrero y noviembre, no así en el año 2018 (Ramos et al., 2021)

En Colombia, específicamente en Cartagena se realizó un análisis de variación en la calidad del agua en la bahía de Barbacoas durante el periodo 2001-2014 donde se pudo notar que los promedios para todos los lugares de muestreo estuvieron por encima del valor mínimo permisible de 4.0 mg/L establecidos por Ministerio de Ambiente en Colombia para indicar las buenas condiciones de un cuerpo de agua. Sin embargo, en invierno se presentó un valor de 3.79 mg/L para la desembocadura del caño Matunilla en el 2007, mientras que para la temporada de verano se registró una concentración muy inferior, equivalente a 2.88 mg/L para el año 2010. En isla Barú se presentó un valor mínimo de 3.30 mg/L en verano del 2010 (Acosta et al., 2015).

Para el golfo de Urabá, en el 2024 se adelantó un estudio basado en el OD, en el cual se puede establecer que las mayores concentraciones de oxígeno se encontraron en la capa superficial del golfo para ambas épocas climáticas, este comportamiento se puede relacionar con la incorporación de este gas desde la atmósfera (intercambio océano-atmósfera), de modo que su concentración está determinada en gran parte por la solubilidad en el agua de mar. También es común en ambientes con altos niveles de eutrofización que la concentración de oxígeno se encuentre relativamente alta durante el día, como consecuencia de su producción por parte del fitoplancton (Polo et al., 2014). No obstante, es importante destacar que estas concentraciones pueden experimentar variaciones significativas debido a múltiples factores. Algunos de estos factores incluyen las tasas de respiración y fotosíntesis, el aumento de materia orgánica, el flujo de agua dulce y marina, entre otros (Ortiz-Padilla, 2024).

3. Justificación

Esta investigación aborda una problemática que afecta directamente la salud de los ecosistemas acuáticos, así como la calidad del agua y la biodiversidad en la región. Es importante resaltar que las anomalías en la concentración de oxígeno, la eutrofización y las floraciones algales son fenómenos cada vez más constantes y preocupantes en numerosos cuerpos de agua alrededor del mundo (Paerl & Huisman, 2009). Las floraciones de algas pueden ser inofensivas; su aspecto positivo se relaciona con que indican áreas de alta productividad biológica y pueden incrementar la concentración de oxígeno. Sin embargo, el lado negativo, evidencia que pueden ser dañinas (debido a la reducción de oxígeno) o tóxicas (Sellner & Doucette, 2003).

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante comprender las razones por las que se registran eventos de alta concentración de oxígeno disuelto superficial y su relación con la temperatura y la comunidad fitoplanctónica.

En el sector del caño el Waffe han sido registrados eventos de sobresaturación de oxígeno, por lo que resulta relevante investigar esta anomalía en un contexto específico como el Caribe colombiano, donde la contaminación y la mala calidad del agua son problemas que tienden a crecer debido a la actividad humana desmesurada, situación que se acentúa debido a que las condiciones climáticas en la región son óptimas para que se presente un mayor deterioro, ya que se registran altas temperaturas, razón por la cual proporcionar información para comprender, mitigar y/o prevenir estos eventos se vuelve relevante.

De otra parte, eventos como anomalías con el oxígeno disuelto superficial y las floraciones algales pueden tener impactos económicos significativos debido a la reducción de la actividad pesquera y el turismo en la región afectada (Costanza et al., 2014) y los efectos adversos que puede generar sobre los recursos hidrobiológicos y sobre los consumidores de estos, incluyendo a la especie humana.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar los eventos de alta concentración de oxígeno disuelto superficial y su relación con la temperatura y la comunidad fitoplanctónica en un cuerpo de agua eutrófico de la bahía de Turbo, en el Caribe Colombiano.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar los grupos fitoplanctónicos característicos durante los eventos de sobresaturación de oxígeno disuelto.
- Caracterizar la concentración de oxígeno disuelto superficial durante diferentes condiciones climáticas (época seca y época húmeda).
- Evaluar la influencia de la temperatura y la variabilidad de las mareas en las fluctuaciones de oxígeno disuelto superficial.

5. Hipótesis

Los eventos de alta concentración de oxígeno disuelto superficial en la bahía de Turbo, Caribe colombiano, están directamente relacionados con la interacción de factores ambientales, y determinados por factores biológicos como la comunidad fitoplanctónica.

6. Marco teórico

El oxígeno disuelto (OD) es un componente esencial para el funcionamiento y mantenimiento de los ecosistemas marinos (American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation - APHA, 2017). Este gas, presente en el agua, es vital para la respiración de una amplia gama de organismos acuáticos, desde el fitoplancton hasta grandes mamíferos marinos (Breitburg et al., 2018). Su concentración varía según factores físicos, químicos y biológicos como la temperatura, salinidad, presión atmosférica, fotosíntesis, circulación oceánica y descomposición de materia orgánica.

En general, los niveles de OD tienden a disminuir con la profundidad debido a la reducción de la luz y la temperatura, así como al aumento de la presión (Breitburg et al., 2018). Además, el OD desempeña un rol fundamental en múltiples procesos ecológicos, incluyendo la remineralización de materia orgánica, la respiración y el ciclo del nitrógeno, conservando una gran diversidad biológica en los ecosistemas marinos (APHA et al., 2017). La disponibilidad adecuada de OD permite la proliferación de comunidades acuáticas saludables y resilientes.

En este contexto, el cambio climático representa una amenaza para los niveles de OD en los océanos, pues el aumento de la temperatura del agua, la intensificación de la estratificación de la columna de agua y la acidificación oceánica son factores que están contribuyendo a su disminución en distintas regiones del planeta (Pörtner et al., 2019). Esta reducción conlleva consecuencias negativas para la vida marina, tales como la pérdida de biodiversidad, mortalidad masiva de especies y alteraciones en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Pörtner et al., 2019). El aumento sostenido de la temperatura en los océanos agrava esta situación, influyendo no solo en la química del agua, sino también en los patrones de circulación y distribución de especies.

Los océanos, que cubren aproximadamente el 71% de la superficie terrestre, al absorber grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) y energía solar actúan como reguladores del clima (Levitus et al., 2012), lo cual ha sido evidenciado en diversos estudios, y modelos como el realizado por Shukla et al., (2017), quienes analizaron un modelo que muestra como un aumento en la tasa de emisión antropogénica de CO_2 conlleva un aumento en los niveles de equilibrio de la temperatura superficial y el nivel del agua del mar.

Las variaciones en la temperatura oceánica afectan a los ecosistemas marinos, también a los patrones meteorológicos, la circulación oceánica y el equilibrio climático terrestre. Entre los efectos más evidentes del calentamiento oceánico se encuentran la alteración de las corrientes, la pérdida de hábitats, fenómenos como el blanqueamiento de corales y la migración de especies hacia zonas más frías, lo cual genera una preocupación por las implicaciones ecológicas de estos cambios (Molina et al., 2017).

A la par de estos procesos, existen otros factores naturales que influyen directamente en los ecosistemas costeros, como los movimientos de bajamar y pleamar. Estos fenómenos, resultado de la interacción gravitacional entre la Tierra, la Luna y el Sol, determinan el nivel del mar en ciclos que ocurren aproximadamente cada 12 horas y 25 minutos (Pugh, 1987). La pleamar representa el punto más alto del nivel del mar (con el reflujo se incrementa la concentración de oxígeno), mientras que la bajamar es el más bajo. Estos cambios periódicos afectan significativamente la dinámica de los hábitats costeros y tienen implicaciones para diversas actividades humanas, incluyendo la pesca, la navegación y el turismo. Asimismo, factores como las condiciones meteorológicas y geografía local pueden modificar la amplitud y el comportamiento de las mareas, generando variabilidad en los ecosistemas dependientes de estos ritmos.

En combinación con estas variaciones naturales, se presentan impactos de origen antrópico que intensifican el deterioro de los ambientes acuáticos, como la eutrofización. Este fenómeno ocurre cuando los cuerpos de agua reciben una carga excesiva de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, provocando un aumento descontrolado de la productividad biológica (Carpenter et al., 1998). Las principales fuentes de estos nutrientes son actividades humanas como la agricultura intensiva, la descarga de aguas residuales y el uso de fertilizantes.

El crecimiento acelerado de algas y plantas acuáticas reduce la transparencia del agua, limitando la penetración de luz solar, afectando la fotosíntesis de especies bentónicas. Posteriormente, la descomposición de esta biomasa consume grandes cantidades de oxígeno, creando condiciones de anoxia o hipoxia que pueden resultar en la muerte masiva de organismos acuáticos.

Estos desequilibrios afectan también a comunidades fundamentales en la base de la cadena trófica, como el plancton. Este grupo de organismos, que flotan en la columna de agua, desempeña un papel importante en los flujos de energía y en el ciclo global del carbono (Behrenfeld et al., 2006). El plancton se divide principalmente en fitoplancton (organismos fotosintéticos) y zooplancton

(organismos heterótrofos), siendo el fitoplancton responsable de gran parte de la producción primaria en ambientes acuáticos. Su distribución y composición dependen de condiciones ambientales como la luz, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes (Gárate et al., 2014). Además de ser fuente de alimento para muchas especies en sus etapas larvales, como cangrejos y mejillones (Delgado & Stedman, 2004), el fitoplancton bajo ciertas condiciones puede desencadenar eventos de gran impacto ecológico.

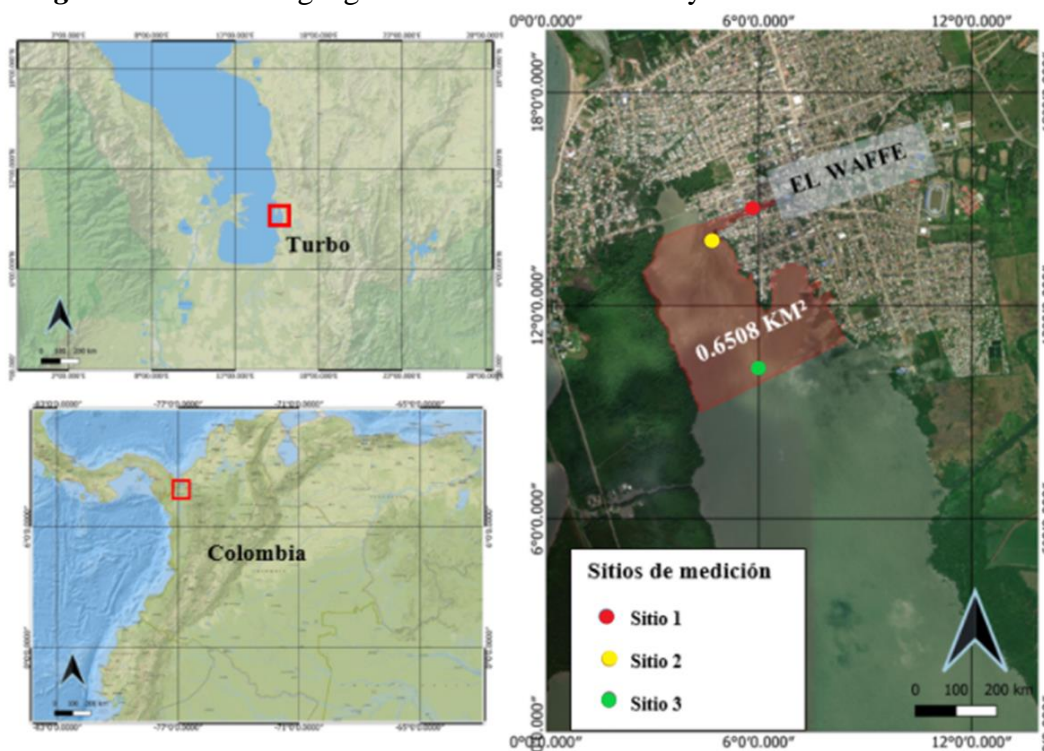
Entre estos eventos se encuentran las floraciones algales, fenómenos naturales en los que algunas especies de algas proliferan de manera excesiva en cuerpos de agua dulce o salada (Smayda, 1997). Estas floraciones pueden ser beneficiadas por condiciones como la alta radiación solar, el exceso de nutrientes y temperaturas elevadas (Anderson, 2002; Glibert & Burkholder, 2018). En ocasiones, las especies involucradas producen toxinas que se acumulan en los tejidos de organismos marinos, representando un riesgo para la salud pública si se ingieren productos contaminados (Anderson et al., 2002). Además, al decaer, estas floraciones pueden reducir significativamente los niveles de oxígeno disuelto, contribuyendo a la formación de zonas muertas y generando episodios de mortalidad masiva en especies sensibles (Paerl & Otten, 2013).

7. Metodología

7.1 Área de estudio

El golfo de Urabá, ubicado en el Caribe Sur, limita con Panamá, y es la más extensa entrada de mar en la costa colombiana, con una superficie de 4,291 km². Este cuerpo de agua tiene una forma alargada con orientación norte-sur y una morfología en "U", con una extensión de 80 km de largo y un ancho promedio de 25 km. Debido a la oscilación de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), el clima en la región se divide en dos estaciones: una temporada seca, que ocurre entre diciembre-marzo y junio-julio, cuando predominan los vientos alisios del noreste y la temperatura media es de 28.5 °C; y una temporada húmeda, que abarca los meses de abril-mayo y agosto-noviembre, con temperaturas promedio de 27 °C, influenciada por los vientos alisios del sureste. La precipitación anual en la zona es de aproximadamente 2.500 mm/año (Blanco-Libreros, 2016). En el sector suroriental del Golfo de Urabá se encuentra localizado el caño El Waffe, un cuerpo de agua creado artificialmente, el cual se encuentra ubicado en el Distrito de Turbo, departamento de Antioquia, con coordenadas 8° 5' 23,2" N y 76° 43' 57,0" W (figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio y de los sitios de muestreo.



Este cuerpo de agua ha sufrido modificaciones en su cauce debido al dragado continuo para mejorar la navegación. Se caracteriza por su flujo lento, alta turbidez y elevadas concentraciones de sedimentos fangosos, coliformes fecales, nutrientes y sólidos, lo que altera sus propiedades físicas y su dinámica ecológica (Rúa et al., 2019).

El caño recibe descargas directas de aguas residuales y residuos sólidos provenientes de ocho barrios cercanos. Además, afluentes como Veranillo desembocan en él, transportando contaminantes generados por las actividades humanas en sus zonas de influencia (Pemberthy et al., 2020).

7.2 Fase de campo

El muestreo se realizó en tres sitios (Figura 1) con diferentes características ambientales y niveles de influencia antrópica. El sitio 1 (S1) se localiza cerca de la boca del caño El Waffe, adyacente a urbanizaciones que carecen de sistema de alcantarillado. Además, colinda con una zona de intensa actividad económica centrada en la comercialización de pescado, madera y mercancías. S1 es también el punto más próximo a los afluentes Puerto Tranca y Veranillo, siendo además la zona más somera del sistema debido a la constante deposición de material transportado por los caños, razón por la cual requiere dragado periódico (punto rojo).

El sitio 2 (S2) se encuentra aproximadamente a 100 metros de S1, ya fuera del caño El Waffe y un poco más alejado de la costa. En este lugar se observa una diferencia en la tonalidad del agua con respecto al interior del caño, lo que sugiere variaciones en la calidad y mezcla de las masas de agua (punto amarillo).

El sitio 3 (S3) está ubicado a unos 100 metros del sitio 2 y presenta características similares, aunque con un mayor oleaje. Al estar en la parte más externa del caño, S3 experimenta una mayor influencia de la marea y, por tanto, de aguas con características más marinas en comparación con S1 y S2 (punto verde).

7.3 Análisis de datos

El estudio se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo y descriptivo, basado en el análisis de variables fisicoquímicas y biológicas recolectadas en campañas de monitoreo realizadas entre 2019 y 2024 en tres sitios establecidos en el caño el Waffe, bahía de Turbo, Urabá (Caribe colombiano),

en condiciones de marea (bajamar y pleamar), considerando además épocas húmedas y secas.

Para el tratamiento y análisis de los datos se utilizaron los programas estadísticos Microsoft Excel y IBM SPSS Statistics. Con Excel se procesaron y organizaron las matrices de datos, se realizaron cálculos preliminares de estadística descriptiva (promedios, máximos, mínimos, desviación estándar) y se elaboraron gráficas comparativas para representar los cambios temporales y espaciales de algunas variables.

La integración de los programas permitió un análisis robusto y visualmente claro de los datos, facilitando la interpretación de patrones espacio-temporales y la identificación de condiciones críticas como eventos de hipoxia o sobresaturación, así como su asociación con la dinámica fitoplanctónica en el área de estudio.

8. Resultados

Los resultados obtenidos se presentan por separado para cada parámetro analizado, a través de análisis estadísticos, tablas y diagramas de cajas y bigotes.

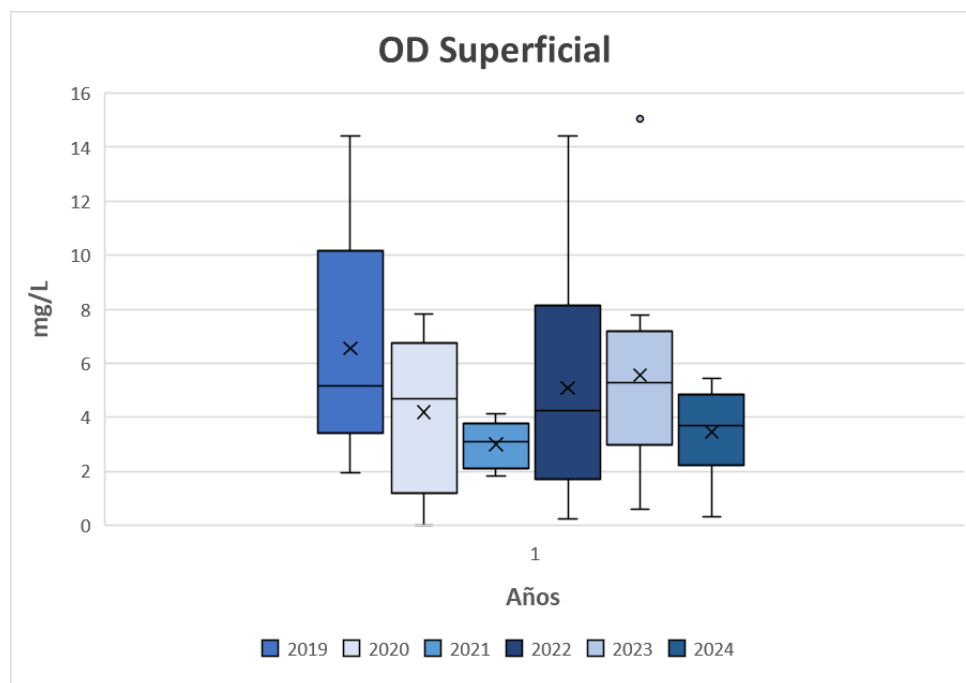
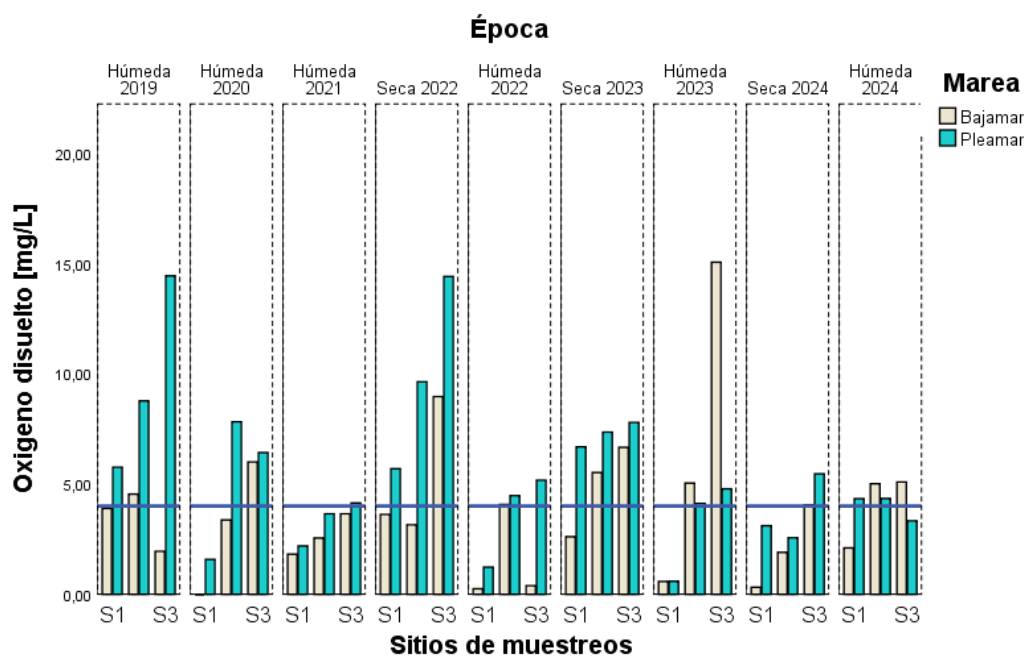
8.1. Oxígeno disuelto

La información de estadística descriptiva relacionada con las concentraciones de OD determinadas en los sitios de muestreo durante el periodo de estudio se presenta en la tabla 1, mientras que la variación anual entre 2019 y 2024 se refleja en cada caja del diagrama de cajas y bigotes (Figura 2), en la que puede observarse la distribución de los valores obtenidos en cada año de muestreo, incluyendo la mediana, los cuartiles y los valores atípicos.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos del oxígeno disuelto superficial entre 2019 y 2024.

Año	Rango de OD (mg/L)	Mediana (mg/L)	Rango intercuartil (mg/L)	Promedio (mg/L)	Valor atípico
2019	1.95 – 14.43	5.15	3.405 – 10.1775	6.555	14.43 mg/L
2020	0.0 – 7.28	4.685	1.185 – 6.77	4.198	--
2021	1.82 – 4.14	3.1	2.0975 – 3.7725	3.1	--
2022	0.25 – 14.4	4.47	1.23 – 8.96	5.22	14.4 mg/L
2023	0.58 – 7.79	5.28	2.9875 – 7.1825	5.56	15.05 mg/L
2024	0.32 -5.46	3.69	2.22 – 4.84	3.47	--

La variabilidad del oxígeno disuelto en los tres sitios de muestreo (S1, S2 y S3) durante la época húmeda y seca de los años 2019 a 2024, se representa en la figura 3, diferenciando entre bajamar (barras grises) y pleamar (barras azules). Para ambas épocas a lo largo de los años, se observaron fluctuaciones en la concentración de oxígeno disuelto. En 2019 y 2022, los valores más altos se registraron durante la pleamar, especialmente en el sitio S3. En contraste, con los niveles de oxígeno que en 2024 fueron más uniformes entre los tres sitios, con valores entre 3.3 mg/L y 5.1 mg/L tanto en bajamar como en pleamar. Por otro lado, en la época seca del 2022, las concentraciones fueron más elevadas, destacando S3 en pleamar, donde se registró el valor más alto a lo largo de los seguimientos a la zona, con 14.4 mg/L. Para 2023, los niveles disminuyeron ligeramente.

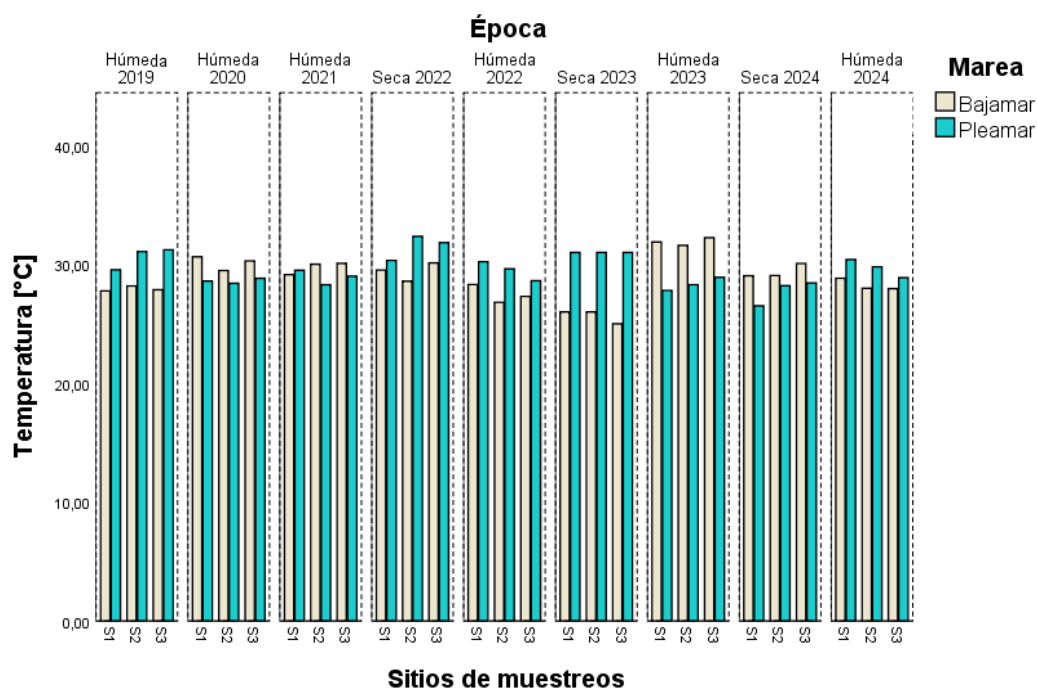
Figura 2. Oxígeno disuelto superficial del 2019 a 2024.**Figura 3.** Comportamiento del oxígeno disuelto. Época húmeda (2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024) y época seca (2022, 2023, 2024)

En 2024, se observó una caída mayor en los niveles de oxígeno, registrando los valores más bajos de toda la serie de datos, especialmente durante el periodo de bajamar en S1 con una concentración de 0.32 mg/L.

8.2. Temperatura

La variabilidad registrada por de la temperatura superficial del agua (TSM) en los tres sitios de muestreo (S1, S2 y S3) durante la época húmeda y época seca de los años 2019 a 2024, diferenciando entre periodos mareales (bajamar -barras grises y pleamar -barras azules) se puede observar en la figura 4.

Figura 4. Temperatura superficial. Época húmeda (2019, 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024) y época seca (2022, 2023, 2024).



En la época húmeda la TSM se mantuvo dentro de un rango relativamente estable, oscilando entre 26°C y 32°C. Para la mayoría de los casos, la temperatura registrada fue ligeramente mayor durante la pleamar. No se presentaron cambios drásticos entre los años evaluados, pero se pudo notar que en algunos puntos específicos, como ocurrió en 2022, la temperatura disminuyó ligeramente en

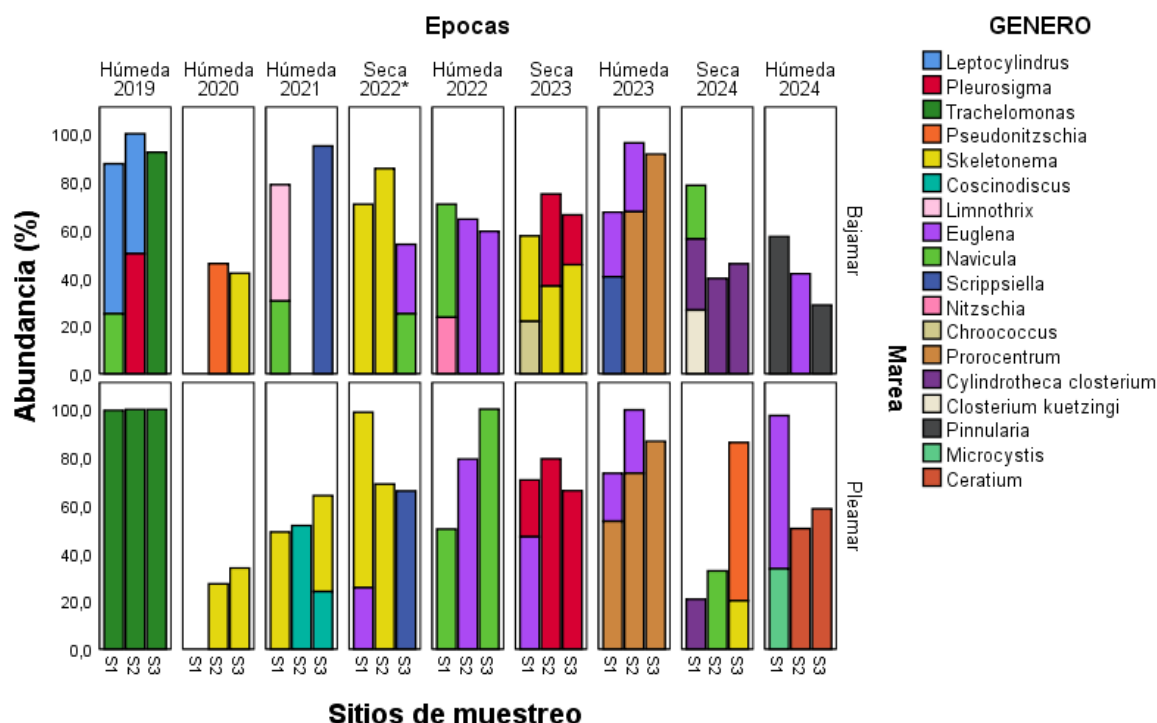
comparación con los años restantes, mientras que en la época seca la TSM en pleamar fue más alta en comparación con los registros correspondientes a la bajamar, con valores entre 28.58°C y 32.35°C.

En 2023, se observó una mayor diferencia entre las dos condiciones de marea, con temperaturas más bajas en bajamar (25°C - 26°C) y más altas en pleamar (31°C). Para 2024, las temperaturas de bajamar y pleamar se acercaron más entre sí, con un rango que varió entre 26.51°C y 30.07°C.

8.3. Fitoplancton

Con respecto a la comunidad fitoplanctónica, las abundancias relativas de los géneros registrados se expresaron en porcentajes para cada condición de marea, sitio y año, destacando en la Figura 5 los géneros que superaron el 20%.

Figura 5. Valores porcentuales de abundancia de géneros de fitoplancton en la época húmeda (2019, 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024) y época seca (2022, 2023 y 2024).



En la época húmeda de 2019, el género *Trachelomonas* fue dominante, superando el 90% en S3 durante bajamar, y dominando en los tres sitios (S1, S2 y S3) durante la pleamar, mientras que para

el 2020, durante la misma época, se destacaron *Pseudonitzschia* en S2 y *Skeletonema* en S3, con representaciones del 46% y 42% respectivamente, durante el periodo de bajamar.

En 2021, también durante la época húmeda, predominaron *Scrippsiella* en S3 durante bajamar (95%) y *Coscinodiscus* en S2 durante pleamar (52%). En el periodo seco de 2022, *Skeletonema* dominó en S1 y S2 en ambos periodos mareales con porcentajes superiores al 68%, mientras que durante la época húmeda del mismo año, durante el periodo de pleamar *Euglena* alcanzó un 79% en S2 y *Navicula* alcanzó el 100% en S3.

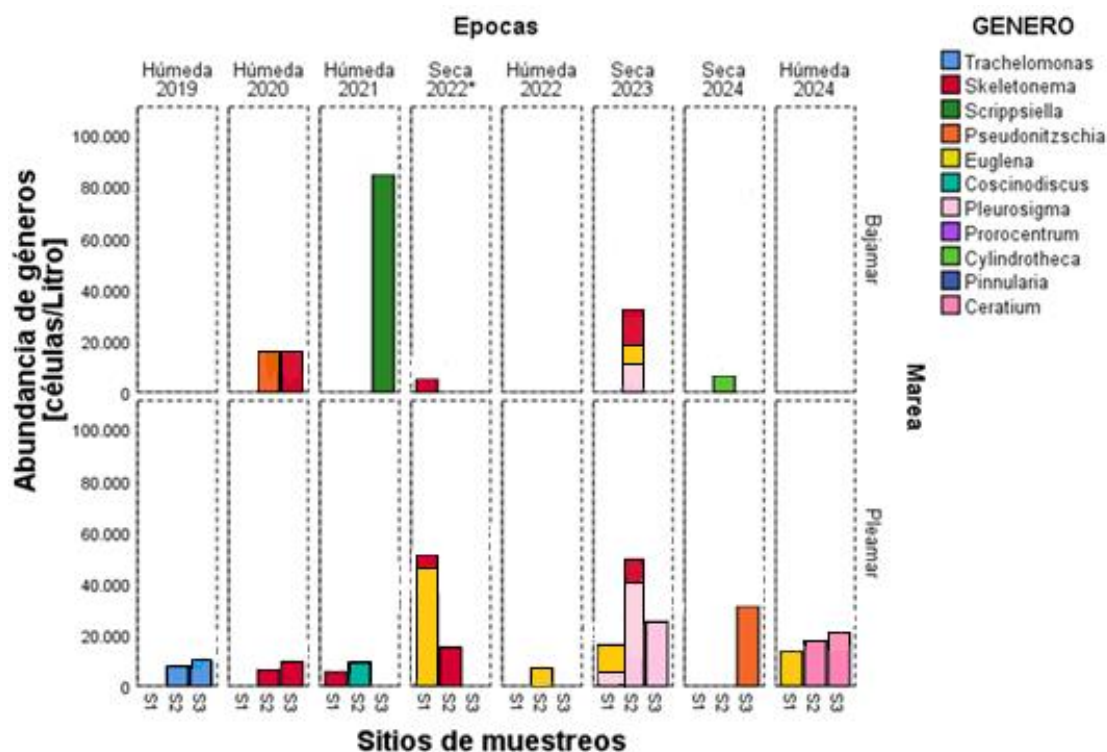
Para la época seca de 2023, el género *Pleurosigma* tuvo un porcentaje superior al 20% en todos los sitios muestreados, mientras que *Euglena* dominó en S1 en el periodo de pleamar con un 47%. En la época húmeda de ese mismo año, *Prorocentrum* se destacó durante pleamar con aportes mayores al 50% y en bajamar con un 68% en S2 y un 92% en S3.

Para la época seca de 2024, *Pseudonitzschia* fue dominante en S3 durante la pleamar, con el 65,9%. Finalmente, en la época húmeda de 2024, se registró el predominio de *Euglena* en S1 (63,8%) en pleamar, y *Pinnularia* con un 57,1%, en bajamar; mostrando una gran variabilidad en la composición fitoplanctónica del caño Waffe. Se identificaron un total de 82 géneros fitoplanctónicos en los muestreos realizados durante las épocas evaluadas (húmedas de 2019 a 2024 y las épocas secas de 2022 a 2024). Según el sitio de muestreo y la fase de marea la abundancia de estos géneros presentó variaciones.

La Figura 6 muestra exclusivamente los géneros que superaron las 5000 células por litro, en los muestreos realizados durante bajamar en las épocas húmedas de 2019, 2022 y 2024, las densidades fueron bajas comparándolas con los periodos restantes. Durante la época húmeda de 2024 se registraron valores altos durante pleamar para géneros como *Euglena* (13,410 cel/L) en S1, *Pinnularia* (5,655 cel/L) en S2 y *Ceratium* con 18,183 cel/L y 20,787 cel/L en S2 y S3, respectivamente.

Durante la época húmeda de 2019, el género más relevante fue *Trachelomonas*, mientras que en 2020 predominó *Pseudonitzschia*. Para la época húmeda de 2021, prevaleció *Scrippsiella*, mientras que en la época seca de 2022 predominó *Skeletonema*. En 2023, los géneros *Pleurosigma* y *Skeletonema* fueron los más destacados, seguidos por *Euglena* y *Prorocentrum* durante la época húmeda.

Figura 6. Géneros con abundancias mayores a 5000 Cel/L en época húmeda 2019, 2020, 2021, 2022, 2024 y época seca 2022, 2023 y 2024.



Finalmente, en la época seca de 2024 se registraron altas abundancias de *Pseudonitzschia* y *Skeletonema*, mientras que en la húmeda del mismo año sobresalieron *Euglena*, *Pinnularia* y *Ceratium* (Figura 7).

En la figura 7 se ilustra la notable presencia y abundancia de *Prorocentrum cordatum* durante la época húmeda de 2023, presentando una mayor abundancia en los tres sitios durante pleamar y en S2 y S3 en bajamar. En S2 (pleamar) alcanzó una concentración de 1,250,625 cel/L y en S3 (bajamar) se registró un pico aún mayor de 22,420,000 cel/L.

La relación entre la temperatura y el oxígeno disuelto en los sitios de muestreo a lo largo de los años 2019 a 2024 evidenciaron concentraciones de OD con fluctuaciones más notorias, creando una relación inversa con la temperatura en la mayoría de los casos (Figura 8).

En años como 2019 y 2022, los valores más altos de oxígeno se registraron en pleamar, especialmente en el sitio S3. Para 2024, tanto la temperatura como el OD presentaron valores más uniformes entre los sitios de muestreo, en ese año los niveles de oxígeno se situaron entre 3.3 mg/L y 5.1 mg/L, en bajamar y en pleamar respectivamente.

Figura 7. Géneros con abundancias mayores a 5000 Cel/L en época húmeda 2023.

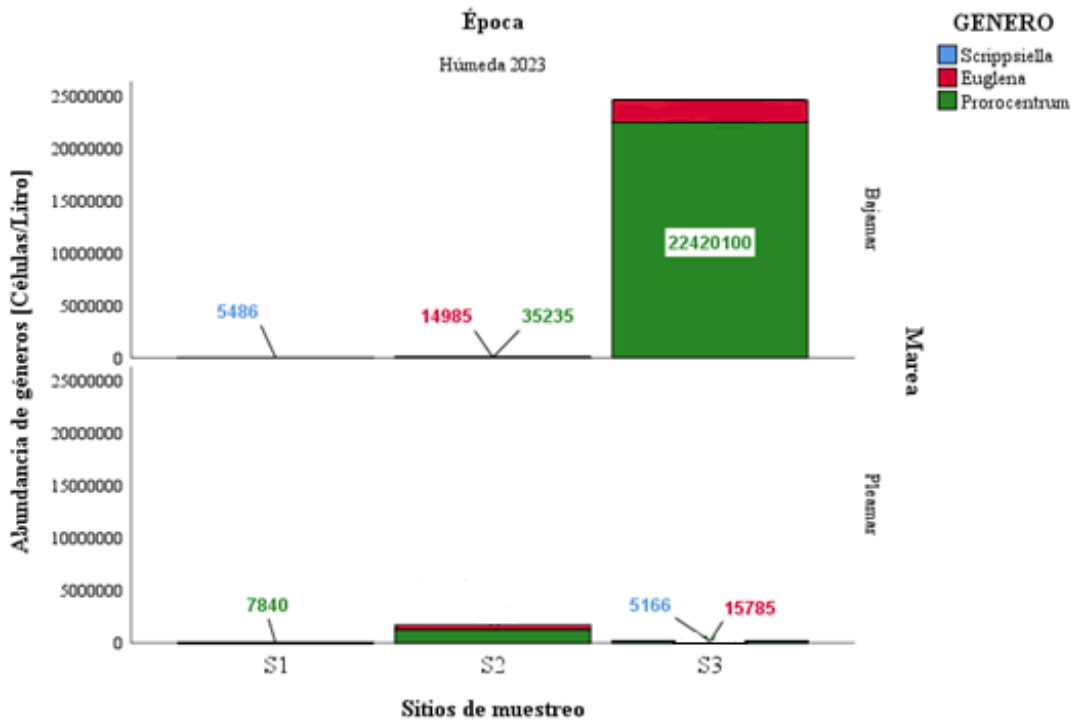
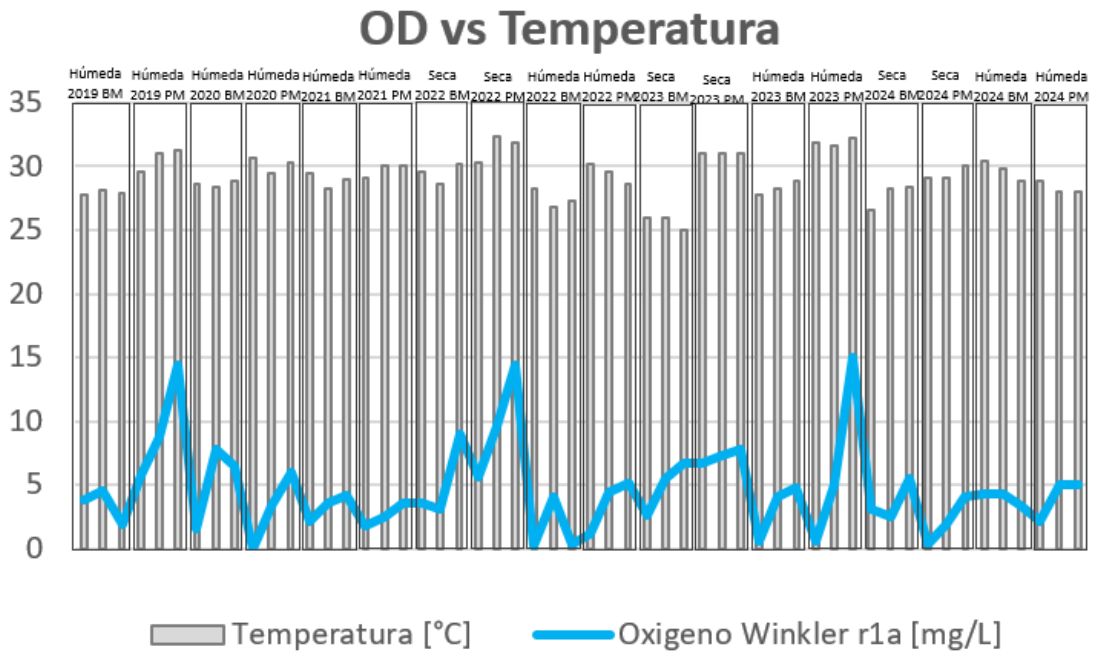


Figura 8. Comportamiento registrado por los parámetros oxígeno disuelto (OD) y la Temperatura.



8.4. Oxígeno disuelto y temperatura

En la figura 8 se representa la relación entre la temperatura y el OD a lo largo del periodo de estudio, evidenciando una clara tendencia inversa entre ambos parámetros. Las condiciones de marea mostraron una influencia significativa en la temperatura, la cual se mantuvo en un rango relativamente estable, oscilando entre 26°C y 32°C, con tendencias a aumentar moderadamente en mayor medida durante la pleamar, con respecto a la bajamar.

Este comportamiento fue marcado en la mayoría de los años y sitios de muestreo, aunque en algunos casos se registraron diferencias notorias, como en 2023, cuando la temperatura en bajamar se situó entre 25°C y 26°C, mientras que en pleamar alcanzó hasta 31°C.

La tabla 2 muestra los rangos de temperatura y OD registrados durante bajamar y pleamar entre los años 2019 y 2024. En términos de temperatura, los valores más altos durante bajamar se observaron en 2020 (29.48 – 30.63 °C) y 2023 (25 – 32.24 °C), mientras que los más bajos ocurrieron en 2022 (26.8 – 30.12 °C) y 2024 (27.96 – 30.07 °C). Durante pleamar, se detectaron temperaturas máximas en 2019 (29.54 – 31.22 °C) y 2022 (28.62 – 32.35 °C), destacando que en todos los años los valores de pleamar presentaron tendencia de incremento respecto a los registrados durante la bajamar.

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de oxígeno disuelto superficial y temperatura durante los años 2019 y 2024

PARÁMETRO	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Temperatura (C°)						
Bajamar	27.76 – 28.18	29.48 – 30.63	29.13 – 30.08	26.8 – 30.12	25 – 32.24	27.96 – 30.07
Pleamar	29.54 – 31.22	28.4 – 28.82	28.28 – 29.5	28.62 – 32.35	27.8 – 31	26.51 – 30.4
OD (mg/L)						
Bajamar	1.95 – 4.54	0 – 6	1.82 – 3.65	0.25 – 8.96	0.58 – 15.05	0.32 – 5.09
Pleamar	5.76 – 14.43	1.58 – 7.82	2.19 – 4.14	2.19 – 14.4	0.59 – 7.79	2.56 – 5.46

En cuanto al OD, se observó una marcada diferencia entre bajamar y pleamar. Durante bajamar, los valores fueron generalmente más bajos, alcanzando concentraciones críticas como 0.0 mg/L en 2020 y 0.25 mg/L en 2022, lo que indica condiciones de anoxia y en ocasiones hipoxia severa. Por el contrario, durante pleamar los niveles de OD fueron notablemente más altos, destacando el año 2019 con un máximo de 14.43 mg/L.

9. Discusión

La dinámica del OD superficial en la bahía de Turbo entre 2019 y 2024 mostró un comportamiento en el cual el sistema costero fue sumamente influenciado por factores físicos (temperatura y mareas), antrópicos (aporte de nutrientes y descargas urbanas) y biológicos (comunidad fitoplanctónica) (Rúa et al., 2019; Blanco-Libreros, 2016). Las concentraciones alcanzaron niveles de sobresaturación de OD, en 2019 (14.43 mg/L), 2020 (14.4 mg/L) y 2023 (15.05 mg/L) durante bajamar y pleamar, coincidieron con las masivas floraciones de géneros como *Euglena*, *Pseudonitzschia*, *Prorocentrum* y *Scrippsiella*, evidenciando una relación entre la producción primaria y la sobresaturación de oxígeno (Smayda, 1997; Anderson et al., 2002).

Aunque estas floraciones incrementan momentáneamente los niveles de OD, también producen grandes cantidades de materia orgánica que posteriormente, durante el proceso de descomposición, contribuyen a la hipoxia nocturna o en fases sin luz (Diaz & Rosenberg, 2008; Paerl & Otten, 2013). Este patrón es mayormente reflejado en los datos del sitio S1, con menores registros de OD, siendo el más afectado por cargas orgánicas, a diferencia de S3, mejor oxigenado posiblemente por su mayor intercambio de aguas (Pemberthy et al., 2020).

Existe una tendencia decreciente del OD superficial a lo largo del tiempo, lo que sugiere condiciones de hipoxia severa, con valores mínimos en bajamar que incluso alcanzaron concentraciones cercanas o inferiores a 1 mg/L. Las bajas concentraciones de OD coincidieron con aumentos graduales de temperatura, principalmente durante la época húmeda, donde la combinación con una mayor carga de nutrientes, radiación solar y limitada renovación del agua durante el periodo de bajamar parecen beneficiar tanto a eventos de floraciones algales como a la desoxigenación (Breitburg et al., 2018; Fennel & Testa, 2019).

Esta diferencia sugiere que la renovación del agua durante pleamar mejora las condiciones de oxigenación, mientras que durante bajamar pueden predominar condiciones con menos circulación, con mayor carga orgánica y consumo de oxígeno, especialmente en años como 2020, 2022 y 2023. Estos patrones son clave para comprender la dinámica ecológica del sistema costero y su influencia sobre la biodiversidad, especialmente del fitoplancton (Gárate et al., 2014).

Aunque con eventos puntuales de dominancia por géneros específicos en bajamar, la composición fitoplanctónica mostró un cambio progresivo hacia una mayor diversidad desde 2022. Esta

fluctuación demuestra que el fitoplancton es muy susceptible a las condiciones ambientales, especialmente las relacionadas con la concentración de nutrientes, las condiciones mareales y térmicas (Cloern, 2001).

Se evidenció una relación inversa entre OD y temperatura, validando el efecto limitante de la solubilidad del oxígeno ante las altas temperaturas y resaltando la vulnerabilidad que presentan los ecosistemas eutróficos enfrentando el calentamiento global (Molina et al., 2017; Levitus et al., 2012). En algunos años, las temperaturas registradas durante pleamar fueron más altas, probablemente debido al ingreso de masas de agua más cálidas (Pörtner et al., 2019). La dinámica mareal, especialmente la diferencia entre bajamar y pleamar, resultó ser un factor clave para la configuración de las comunidades biológicas, la oxigenación superficial y la dispersión de nutrientes, aumentando la necesidad de incorporar estas variables en los programas de monitoreo ambiental.

Se debe fortalecer el monitoreo en ecosistemas costeros vulnerables, considerando su relación directa con la calidad del agua y la biodiversidad. La presencia de floraciones algales nocivas y las zonas de hipoxia son fenómenos cada vez más frecuentes y si no se gestionan adecuadamente, podrían repercutir negativamente en la pesca, la salud pública y el equilibrio ecológico de la región (Sellner et al., 2003; Costanza et al., 2014).

10. Conclusiones

Se evidenciaron eventos atípicos de sobresaturación de oxígeno en 2019, 2020 y 2023, con concentraciones superiores a 14 mg/L, resultados asociados a eventos de floraciones algales.

Entre 2019 y 2024 se observó una tendencia general a la disminución del OD superficial, en sitios cercanos a fuentes de contaminación urbana, especialmente durante bajamar, indicando un deterioro de las condiciones ambientales en el sistema ante un ingreso importante aguas residuales que son vertidas a este sector a través de cuerpos de agua continental.

La comunidad fitoplanctónica presentó mayor diversidad en periodos de pleamar, especialmente desde el año 2022, pues este periodo de marea resulta más favorable ecológicamente, al aportar aguas renovadas con condiciones adecuadas para el desarrollo de los organismos.

Se evidenció una relación inversa entre temperatura superficial y concentración de OD, con niveles críticos de oxígeno que se asociaron con las temperaturas más altas, principalmente en el periodo de bajamar, limitando las condiciones viables para el desarrollo de muchas especies acuáticas.

Las diferencias relevantes entre las condiciones de bajamar y pleamar juegan un papel fundamental en la distribución del fitoplancton y la regulación del oxígeno disuelto. En pleamar se favorecen las condiciones adecuadas para el desarrollo de la vida acuática debido a que se presenta una mayor renovación del agua, mientras que durante la bajamar, especialmente en zonas con alta carga orgánica, se presenta mayor vulnerabilidad a la hipoxia/anoxia.

La presencia de géneros fitoplanctónicos potencialmente nocivos como *Pseudonitzschia*, *Microcystis* y *Scrippsiella*, se registraron recurrentemente, algunos de estos poseen capacidad toxigénica, representando un riesgo sanitario y ecológico para la región, subrayando la urgencia de monitorear la cantidad y la composición del fitoplancton.

11. Recomendaciones

Se recomienda continuar con los programas de monitoreo ambiental de manera periódica, ya que fenómenos como las floraciones algales y las zonas hipóxicas están ocurriendo con mayor frecuencia y representan una amenaza significativa para la estabilidad ecológica del sistema costero. Su seguimiento constante permitirá anticipar cambios en la calidad del agua y tomar medidas de gestión adecuadas.

Es fundamental incluir en los futuros monitoreos la medición de oxígeno disuelto (OD) a diferentes profundidades de la columna de agua. Aunque en la capa superficial se registran eventos de sobresaturación, en las capas más profundas podrían presentarse condiciones de hipoxia no detectadas en análisis superficiales. Esta información es clave para una evaluación más completa del estado ecológico del sistema.

Se recomienda implementar programas de educación y concienciación ambiental dirigidos a las comunidades locales, especialmente aquellas ubicadas cerca de cuerpos de agua, con el fin de reducir las descargas de residuos y fomentar prácticas sostenibles que mitiguen la eutrofización y sus efectos sobre la calidad del agua.

Referencias

- Acosta, J. C., Baldiris, I., & Pacheco, H. P. (2015). Análisis de la variación en la calidad del agua en la Bahía de Barbacoas-Cartagena durante el periodo 2001-2014. *Ingeniería e Innovación*, 3(1), 7-17.
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). Washington, DC: APHA, AWWA, WEF.
- Anderson, D. M., Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2002). Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 25(4b), 704-726. <https://doi.org/10.1007/BF02804901>
- Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. C., Milligan, A. J., Falkowski, P. G., Letelier, R. M., & Boss, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752-755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>
- Blanco-Libreros, J. F. (2016). Global changes in Gulf of Urabá mangroves (Colombia): between the changing coastline and the expanding agricultural frontier. *Actualidades Biológicas*, 38(104), 53-70.
- Breitburg, D., Grégoire, M., & Isensee, K. (2018). Global Ocean Oxygen Network 2018. The ocean is losing its breath: Declining oxygen in the world's ocean and coastal waters. IOC-UNESCO, IOC Technical Series, 137.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559-568.
- Cobos-Murcia, J. A., & Cruz-Ortiz, L. (2025). Fitoplancton: una solución prometedora para capturar y almacenar CO₂. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*. 12(24), 18-21.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 26, 152-158.
- Cloern, J. E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223-253.
- Delgado, P., & Stedman, S. M. (2004). La región del Caribe Estadounidense: humedales y peces, una conexión vital (Vol. 55). Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera

(NOAA), Oficina de Pesquerías de NOAA, División de Conservación de Habitáculo.

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891), 926–929.

Fennel, K., & Testa, J. M. (2019). Biogeochemical controls on coastal hypoxia. *Annual review of marine science*, 11(1), 105-130.

Gárate, I., Siqueiros, D., Verdugo, G., & Guerrero, R. (2014). Dinámica del Fitoplancton en el Sistema Lagunar Magdalena-Almejas. Ciudad de México: Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. México.

Guzmán-Colis, G., Thalasso, F., Ramírez-López, E. M., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A. L., & Avelar-González, F. J. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(2), 89-102.

Glibert, P. M., & Burkholder, J. M. (2018). Causes of harmful algal blooms. *Harmful algal blooms: A compendium desk reference*, 1-38.

Jahan, R., Khan, S., Haque, M. M., & Choi, J. K. (2010). Study of harmful algal blooms in a eutrophic pond, Bangladesh. *Environmental monitoring and assessment*, 170, 7-21. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1210-4>

Miyittah, M. K., Tulashie, S. K., Tsyawo, F. W., Sarfo, J. K., & Darko, A. A. (2020). Assessment of surface water quality status of the Aby Lagoon System in the Western Region of Ghana. *Heliyon*, 6(7).

Molina, M., Sarukhán, J., & Carabias, J. (2017). El cambio climático: causas, efectos y soluciones. Fondo de Cultura Económica.

Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Baranova, O. K., Garcia, H. E., Locarnini, R. A., ... & Zweng, M. M. (2012). World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*, 39(10).

Ortiz Padilla, C. (2024). Oxígeno disuelto en el golfo de Urabá, Caribe Colombiano [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.

Paerl, H.W., & Otten, T.G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 65(4), 995-1010.

Paerl, H. W., & Huisman, J. (2009). Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 1(1), 27-37. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2008.00004.x>

- Pemberthy, D., Padilla, Y., Echeverri, A., & Peñuela, G. A. (2020). Monitoring pharmaceuticals and personal care products in water and fish from the Gulf of Urabá, Colombia. *Heliyon*, 6(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04215>
- Polo, C., Marín, J., Rojas, J., Behling, E., Mesa, M., Fernández, A., & Flores, J. (2014). Variaciones espaciales de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en sedimentos costeros del Lago de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 48(1), 21-38.
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., & Weyer, N. M. (2019). The ocean and cryosphere in a changing climate. IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate, 1155, 10-1017.
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. Ed. John Wiley & Sons Ltd. Great Britain. 472 pp.
- Rabalais, N. N., Turner, R. E., & Díaz, R. J. (2002). Nitrogen in aquatic ecosystems. *Ambio*, 31(2), 102-111
- Ramos, I. H., Escuela, D. Y. B., Castillo, M. C., Yera, J. A. C., & Méndez, A. F. (2021). Evaluación de la calidad del agua marina en el Parque Nacional Caguanes, Sancti Spíritus, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 41(2 (Especial 3)), 5-17.
- Rúa, A., Zambrano, M. M., Córdoba, N. I., Villalba, N. P., Llorente, A. J. & Garcés, H. (2019). Monitoreo fisicoquímico y ecológico de aguas costeras en la bahía de Turbo como instrumento de análisis de las cargas contaminantes del caño Waffe. Informe final. Convenio Interadministrativo 006. Universidad de Antioquia. Corporación Académica Ambiental CAA - Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP). 68 pp
- Sellner, K. G. & Doucette, G. J. & Kirkpatrick, G. J. (2003). *Journal of industrial microbiology & biotechnology*. 30. 383-406.
- Shukla, J.B., Maitri Verma, A. & Misra, K. (2017). Effect of global warming on sea level rise: A modeling study, *Ecological Complexity*, (32), Part A, 99-110, <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2017.10.007>.
- Smayda, T.J. (1997). Harmful algal blooms: Their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnology and Oceanography*, 42(5), 1137-1153. https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.5_part_2.1137
- Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 100(1-3), 179-196.

Turner, R. E., & Rabalais, N. N. (2003). Linking landscape and water quality in the Mississippi River Basin for 200 years. *Bioscience*, 53(6), 563-572. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0563:LLAWQI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0563:LLAWQI]2.0.CO;2)