

# Calidad de agua marina para la sostenibilidad de Golfos de zonas tropicales, una revisión bibliográfica

## Seawater quality for the sustainability of tropical gulfs, a literature review

Dennis Marlon Alvarenga Sandoval<sup>1</sup>  y Clifford Jerry Herrera Castrillo<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>. Departamento de Acuicultura y Biología Marina, Universidad Nacional Autónoma de Honduras.

<sup>2</sup>. Departamento de Ciencias de la Educación y Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Centro Universitario Regional de Estelí.

### Resumen

Este artículo analiza la calidad del agua marina como elemento esencial para la sostenibilidad de los golfos y la resiliencia de los ecosistemas costeros. Mediante una revisión de la literatura científica, informes gubernamentales y publicaciones profesionales de los últimos siete años, se examinan parámetros clave de calidad del agua, contaminación, impactos ambientales y estrategias de desarrollo sostenible. Los parámetros más evaluados incluyen propiedades físicas y químicas del agua, mientras que las principales fuentes de contaminación son las emisiones urbanas e industriales, los residuos agrícolas y el tráfico marítimo. Estas actividades generan efectos adversos como eutrofización y zonas anóxicas, que disminuyen la biodiversidad y afectan los servicios ecosistémicos. Además de las políticas implementadas, se destaca la importancia de realizar estudios longitudinales y de utilizar tecnologías avanzadas para el monitoreo continuo. El estudio subraya la necesidad urgente de proteger la calidad de agua en los Golfos de zonas tropicales.

**Palabras claves:** Calidad de agua marina, golfos tropicales, contaminación industrial, mitigación, impacto.

---

### Abstract

This article analyzes marine water quality as an essential element for the sustainability of gulfs and the resilience of coastal ecosystems. Through a review of scientific literature, government reports, and professional publications over the past seven years, key parameters of water quality, pollution, environmental impacts, and sustainable development strategies are examined. The most evaluated parameters include physical and chemical properties of water, while the main sources of pollution are urban and industrial emissions, agricultural waste, and maritime traffic. These activities generate adverse effects such as eutrophication and anoxic zones, which decrease biodiversity and affect ecosystem services. Besides the policies implemented, the importance of conducting

longitudinal studies and using advanced technologies for continuous monitoring is highlighted. The study underscores the urgent need to protect water quality in tropical gulfs.

**Keywords:** water quality, tropical gulfs, industrial pollution, mitigation, impact.

## Introducción

La protección de la calidad del agua marina en los golfos está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2022), en particular con el ODS 14, que busca reducir la contaminación marina y mejorar la gestión sostenible de los ecosistemas costeros y oceánicos. Este objetivo resalta la urgencia de adoptar políticas y estrategias de conservación que mitiguen los impactos negativos de la actividad humana y promuevan la resiliencia de los ecosistemas marinos frente al cambio climático y otras amenazas ambientales (Gómez Duque, 2021). En este sentido, este trabajo pretende contribuir al marco global de sostenibilidad mediante el análisis de la calidad del agua en los golfos y la identificación de medidas efectivas para su protección.

El estado del agua en los golfos desempeña un papel fundamental en la preservación de los ecosistemas marinos y en el bienestar de las poblaciones costeras. Dado que los golfos son masas de agua parcialmente cerradas, presentan una mayor susceptibilidad a la acumulación de contaminantes, ya que las corrientes oceánicas en estas áreas suelen ser insuficientes para dispersar eficazmente las sustancias perjudiciales (Parada *et al.*, 2023). El deterioro de los cuerpos de agua superficiales aumenta cuando los sectores sociales e industriales disponen de manera inadecuada los desechos generados en las actividades cotidianas, usando ríos, humedales, lagos, lagunas, mares y los océanos como vertederos (Sandí *et al.*, 2020).

El índice de Salud de los Océanos [Ocean Health Index] (OHI, por sus siglas en inglés) es una herramienta útil para la toma de decisiones en el desarrollo de áreas marinas de una región. Asimismo, permite medir el desempeño en el uso y conservación de los ecosistemas oceánicos. De acuerdo con Syukri Raihan *et al.* (2024) “los indicadores empleados para calcular el OHI abarcan una amplia gama de variables que pueden servir como referencia para determinar sus valores”.

Para hacer frente a esta problemática, es fundamental implementar y fomentar con urgencia estrategias de gestión ambiental que aseguren la conservación y el equilibrio de los ecosistemas marinos y costeros. Investigaciones recientes han evidenciado que el deterioro de la calidad del agua en los golfos no solo perjudica la biodiversidad marina, sino que también impacta la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de las comunidades que dependen de la pesca y el turismo. Según Liu *et al.* (2019), la idoneidad ecológica hace referencia a la influencia del entorno en la supervivencia de los organismos, lo que resalta la importancia de evaluar la calidad del agua en estos ecosistemas. Este análisis es clave para el diseño de estrategias de manejo ambiental que favorezcan la sostenibilidad y permitan a los ecosistemas adaptarse a los desafíos futuros.

Se consideran parámetros de calidad como la presencia de nutrientes, contaminantes orgánicos e inorgánicos, y la variación en las condiciones fisicoquímicas; además, se evalúan enfoques integrales que combinan la conservación de la biodiversidad con la gestión de riesgos ambientales, subrayando la

importancia de las políticas basadas en evidencia.

A nivel internacional, se han realizado estudios sobre la protección y mitigación de los cuerpos marino-costeros, enfocados en la calidad del agua. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos han sido puntuales o esporádicos, lo que ha generado vacíos en la implementación de estrategias que permiten establecer programas permanentes de monitoreo y protección. Según Vergara-Chen *et al.* (2022), “es indispensable conocer y cuidar la calidad del agua en las zonas costeras y el medio marino para su uso recreativo”, lo que evidencia la necesidad de una gestión más estructurada y continua. No obstante, la protección de la calidad del agua no solo es crucial para actividades recreativas y turísticas, sino también para sectores productivos como la pesca artesanal y la acuicultura, los cuales dependen de ecosistemas saludables para su sostenibilidad. En este sentido, estudios como el de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2020) destacan que la implementación de medidas de conservación y control de la contaminación en ecosistemas costeros beneficia directamente la productividad pesquera y acuícola, garantizando la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de las comunidades que dependen de estos recursos. Abordar este tema requiere desarrollar y promover prácticas urgentes de gestión ambiental que garanticen la sostenibilidad de los ecosistemas marinos costeros.

Estudios recientes han demostrado que la degradación de la calidad del agua en los golfos afecta no solo la biodiversidad marina, sino también la soberanía alimentaria y la economía de las comunidades que dependen de los recursos pesqueros y turísticos. Los cuerpos de agua costeros aledaños a las ciudades y poblados están sujetos a una elevada presión antrópica y por tanto se encuentran en

constante riesgo de contaminación debido, entre otras causas, al impacto del uso del suelo por incremento de la población y servicios que ésta demanda, así como a la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales (Cervantes Duarte *et al.*, 2020).

La calidad del agua marina es un factor clave para la sostenibilidad de los ecosistemas costeros y marinos, especialmente en golfos, que son áreas de alta productividad biológica y económica. A nivel regional, El Golfo de Fonseca (13°15'N 87°45'O), compartido por Honduras, El Salvador y Nicaragua, es un ecosistema de gran relevancia para las comunidades locales debido a sus recursos pesqueros, áreas de manglares y actividades portuarias. Sin embargo, enfrenta desafíos significativos derivados de la contaminación por descargas de aguas residuales, actividades agrícolas, y el impacto del cambio climático. A nivel local, estudios han identificado un deterioro progresivo de la calidad del agua, afectando la biodiversidad marina y la economía de las comunidades dependientes de este golfo (Osorto Nuñez *et al.*, 2023; Quintanilla, 2020).

En el Golfo de Fonseca, la calidad del agua se ve afectada por diversas amenazas locales que comprometen tanto la biodiversidad marina como la economía de las comunidades costeras. Entre los principales factores de deterioro ambiental se encuentra la camaronicultura, una actividad económica relevante en la zona, pero que genera impactos negativos debido al vertido de aguas con altos niveles de materia orgánica y química utilizada en el cultivo (Osorto Nuñez *et al.*, 2023). Además, los desechos locales, incluidos los residuos plásticos, representan un problema creciente, ya que muchos de estos materiales no son gestionados adecuadamente y terminan en los ecosistemas marinos. Los aparejos de pesca abandonados o desechados, como redes y líneas, también contribuyen a la contaminación y al daño de especies marinas, al provocar pesca

incidental y mortalidad accidental (Barberena Moncada, 2019). Estos factores, junto con la descarga de aguas residuales sin tratamiento y los residuos generados por la actividad agrícola, han intensificado la contaminación del golfo, afectando tanto la pesca artesanal como los servicios ecosistémicos que dependen de un equilibrio ambiental adecuado (Flores-Méndez *et al.*, 2007).

El objetivo de este artículo de revisión es analizar las investigaciones recientes sobre la calidad del agua marina en los golfos, con el fin de identificar los principales desafíos para la sostenibilidad de estos ecosistemas. Se busca proponer medidas de gestión y conservación que promuevan un equilibrio entre el desarrollo humano y la protección ambiental, garantizando un uso sostenible de los recursos marinos.

### **Materiales y Métodos**

En esta revisión bibliográfica, se consultaron múltiples fuentes de información para asegurar una cobertura integral y actualizada sobre la calidad del agua marina en golfos y su impacto en la sostenibilidad incluyendo bases de datos científicas académicas, como Web of Science, Scopus, y Google Académico, además de revistas indexadas. Estas plataformas proporcionan acceso a artículos revisados por pares, estudios de caso y revisiones previas. De la misma forma, se consultaron reportes técnicos de organizaciones internacionales y gubernamentales, incluyendo la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la Organización Marítima Internacional (OMI), los que brindan reportes sobre la gestión de aguas marinas y políticas ambientales.

Para asegurar la relevancia y calidad de los estudios revisados, se establecieron criterios de selección específicos, con los estudios

publicados en los últimos siete años para mantener una revisión actualizada, en el cual se incluyeron artículos revisados por expertos en el campo para garantizar la fiabilidad, investigaciones que se enfoquen en la calidad del agua marina, análisis de contaminantes (químicos, biológicos, y físicos) y estrategias de sostenibilidad en golfos. Estudios con metodologías explícitas sobre la medición y monitoreo de la calidad del agua de igual manera se consideraron publicaciones en inglés y español para abarcar un rango más amplio de literatura.

Algunos criterios para la exclusión que se utilizaron fueron los estudios que se presentaron en más de una fuente o que no aportaron datos nuevos, artículos y estudios cuyo contenido completo no estaba disponible o no podía ser accedido, trabajos que trataban sobre cuerpos de agua que no son golfos, como ríos o lagos, a menos que incluyeran una relación directa con golfos y artículos de opinión o reseñas que no proporcionaran datos cuantitativos o cualitativos relevantes.

El proceso de revisión se estructuró en etapas para garantizar un análisis sistemático y completo como búsquedas a través de las palabras clave como: “calidad de agua en golfos”, “sostenibilidad marina”, “contaminación en aguas costeras”, y “gestión ambiental de golfos”. Se revisaron textos completos utilizando un formato estandarizado para la recopilación de información de cada estudio, incluyendo autores, año de publicación, ubicación geográfica del golfo estudiado, parámetros de calidad de agua analizados (como niveles de oxígeno disuelto, pH, temperatura, presencia de metales pesados y contaminantes biológicos), y medidas de sostenibilidad propuestas.

## Resultados

La revisión bibliográfica sobre la calidad del agua marina en golfos reveló hallazgos significativos, destacando la evaluación de parámetros fisicoquímicos y el impacto de actividades humanas y el cambio climático en su alteración. A continuación, se profundiza en estos aspectos y en las estrategias adoptadas para mitigar sus efectos.

### *Parámetros Físicos y Químicos Claves*

Para evaluar la calidad del agua marina en golfos, es fundamental considerar parámetros como la temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, turbidez y la presencia de contaminantes químicos y biológicos. En este sentido, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [EPA] (2022) ha desarrollado estándares y directrices para la medición y monitoreo de estos indicadores, estableciendo criterios de calidad ambiental que sirven como referencia para determinar el estado de los ecosistemas acuáticos y su grado de contaminación

Varios estudios (Brandão *et al.*, 2023; Margarita *et al.*, 2018; Marina & Saravia, 2022) se enfocaron en parámetros como la temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, turbidez, y metales pesados, fundamentales para entender la calidad del agua y su dinámica. Las alteraciones en estos parámetros se correlacionan con cambios en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas marinos

Además, el calentamiento global influye en los patrones de circulación de las corrientes oceánicas, que desempeñan un papel crucial en la mezcla y oxigenación de las aguas profundas. Cambios en estas corrientes pueden limitar la renovación de oxígeno en las capas inferiores del océano, contribuyendo al crecimiento y expansión de zonas hipóxicas en mares y océanos de todo el mundo (Zitoun *et al.*, 2024). Este fenómeno tiene implicaciones significativas para la pesca y la economía de las

comunidades costeras, ya que las áreas afectadas suelen coincidir con zonas de alta productividad pesquera.

Desde un punto de vista económico y social, las alteraciones en la salinidad también tienen consecuencias en actividades como la pesca y la acuicultura. Las especies comerciales pueden verse afectadas en su crecimiento y distribución, lo que impacta directamente en la captura y la rentabilidad de las industrias pesqueras (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2020). La acuicultura, que depende de condiciones ambientales estables, puede enfrentar desafíos adicionales, ya que los productores deben ajustar sus prácticas y tecnologías para mantener la salinidad adecuada en sus instalaciones.

Los cambios en los patrones de precipitación y el aumento de la escorrentía están generando variaciones significativas en la salinidad de los golfos y las zonas costeras, lo que representa un desafío crítico para la estabilidad de los ecosistemas marinos (Lizano Rodríguez, 2019). La reducción o el incremento abrupto de la salinidad puede afectar la distribución de especies marinas, alterando la composición de los hábitats y la cadena trófica en estos entornos. Asimismo, estas modificaciones impactan las actividades humanas que dependen de los recursos marinos, como la pesca y por ello, es fundamental implementar estrategias de monitoreo y predicción de estos cambios, permitiendo desarrollar planes de conservación y adaptación que protejan tanto a la biodiversidad como a las comunidades costeras que dependen de estos ecosistemas.

La acidificación oceánica, un fenómeno creciente impulsado por la absorción de dióxido de carbono atmosférico, ha emergido como uno de los principales desafíos ambientales para los ecosistemas marinos. Cuando el dióxido de carbono se disuelve en el agua de mar, reacciona con el agua para formar ácido carbónico, lo que reduce el pH

del agua. Este proceso no solo afecta la química del océano, sino que también tiene consecuencias profundas sobre la vida marina, especialmente en organismos que dependen de la formación de carbonato de calcio para su estructura esquelética, como los corales, moluscos, crustáceos y algunos tipos de plancton (Corena, 2020).

Cuando la materia orgánica se descompone, las bacterias encargadas de este proceso consumen el oxígeno presente en el agua, reduciendo así la cantidad de oxígeno disuelto (OD) disponible para los organismos acuáticos. Este fenómeno puede provocar la formación de zonas hipóxicas, donde los niveles de oxígeno disuelto caen por debajo de 2 mg/L, y en casos más extremos, zonas anóxicas, donde el oxígeno disuelto es prácticamente inexistente (<0.5 mg/L) (Wrightman, 2008). Estas condiciones representan un riesgo significativo para la vida marina, ya que muchas especies, especialmente peces, invertebrados y otros organismos que dependen de concentraciones adecuadas de oxígeno (generalmente superiores a 5 mg/L), pueden sufrir estrés fisiológico, una disminución en sus tasas de crecimiento y reproducción, o incluso eventos de mortalidad masiva. La proliferación de estas zonas afecta no solo la biodiversidad, sino también la pesca y la economía de las comunidades que dependen de los recursos marinos.

Por otro lado, la turbidez, o la cantidad de partículas suspendidas en el agua, afecta la calidad del hábitat acuático de manera directa. Las partículas suspendidas pueden provenir de la descomposición de materia orgánica, la erosión del suelo, las descargas de sedimentos y el crecimiento de microalgas. La alta turbidez limita la penetración de la luz solar en el agua, lo que afecta la fotosíntesis de los productores primarios, como el fitoplancton y las plantas acuáticas. Estos organismos son la base de la cadena alimentaria acuática, y su disminución puede

alterar gravemente la estructura de toda la red trófica. Sin una cantidad adecuada de luz, los productores primarios no pueden realizar la fotosíntesis de manera eficiente, lo que reduce su biomasa y, en consecuencia, la cantidad de oxígeno producido por estos organismos. Esto puede generar un ciclo negativo, donde la falta de oxígeno y la baja productividad primaria se refuerzan mutuamente.

Además de los efectos directos sobre los productores primarios, la turbidez también afecta a otros organismos acuáticos, como los herbívoros y los depredadores que dependen de la visibilidad para encontrar alimento (Capetillo Piñar *et al.*, 2022; Marina & Saravia, 2022). Las altas concentraciones de partículas en suspensión dificultan la capacidad de estos organismos para localizar su alimento, lo que puede llevar a una disminución en sus poblaciones y a una alteración en las relaciones predador-presa (Kournopoulou *et al.*, 2024).

En ecosistemas marinos y costeros, la turbidez también puede interferir con la supervivencia de especies que dependen de hábitats específicos, como los arrecifes de coral, las praderas marinas y los estuarios (Capetillo Piñar *et al.*, 2022). Los corales, por ejemplo, son muy sensibles a la turbidez, ya que los sedimentos suspendidos pueden dañar sus estructuras y bloquear la luz que necesitan para su fotosíntesis, realizada por las algas simbióticas que habitan en sus tejidos. Esto puede llevar al blanqueo de corales y, eventualmente, a su muerte si las condiciones persisten (Steiner *et al.*, 2018).

Las consecuencias de la baja concentración de oxígeno y la alta turbidez son particularmente graves en zonas costeras y de transición, como los estuarios y las bahías, que son cruciales para la vida marina (Cervantes Duarte *et al.*, 2020). Estas áreas son zonas de reproducción y crianza para muchas especies, y su degradación puede tener efectos en cascada a través de toda la

cadena alimentaria acuática. Los efectos acumulativos de la contaminación por nutrientes, la sedimentación excesiva y las descargas industriales contribuyen a la degradación de estos ecosistemas, lo que afecta la biodiversidad y las actividades humanas que dependen de los recursos marinos, como la pesca y el turismo (Hurtado García & Barberena Moncada, 2023; Fuentes *et al.*, 2019).

### ***Contaminantes Químicos y Biológicos***

El uso de fitoplancton y bacterias fecales como bioindicadores resultó ser una herramienta eficaz para monitorear la salud de los ecosistemas (Quiroz Rojas, 2024). Las floraciones algales nocivas (FAN) se observaron como una señal de eutrofización, afectando la biodiversidad y liberando toxinas que pueden ser perjudiciales para otras especies marinas y los seres humanos.

Además, existe un creciente interés en estudiar y mitigar el impacto que actividades como la captación de agua de mar por parte de plantas desaladoras y centrales termoeléctricas generan sobre la biodiversidad marina (Hernandez Miranda *et al.*, 2021; Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO [UNESCO-IOC], 2019). Este proceso, esencial para la generación de agua potable y energía, puede tener consecuencias significativas, como la alteración de los hábitats y la reducción de la diversidad de especies debido a la captura y mortalidad de organismos marinos durante el proceso de toma de agua. Por ello, se considera crucial el desarrollo de estrategias de manejo y medidas de mitigación que minimicen estos efectos y protejan los ecosistemas marinos, garantizando un equilibrio entre el desarrollo tecnológico y la conservación ambiental.

### ***Fuentes de Contaminación***

La revisión bibliográfica identificó las principales fuentes de contaminación que

impactan la calidad del agua y la sostenibilidad de los golfos:

La situación se agrava con la acumulación de desechos sólidos, como plásticos, metales y otros materiales no biodegradables, que se vierten de forma directa o indirecta en el golfo. Estos residuos no solo deterioran la calidad del agua, sino que también afectan la fauna y flora marina al provocar enredos, ingestión y otras interacciones negativas (Tekman *et al.*, 2022; Valle *et al.*, 2018). Otras fuentes importantes de contaminación son las descargas de ríos y cursos de agua que desembocan en el golfo, las cuales pueden transportar sedimentos contaminados con pesticidas, fertilizantes y otros productos químicos usados en la agricultura y la industria en las zonas aledañas (Cervantes Duarte *et al.*, 2020; Parada *et al.*, 2023).

La escorrentía agrícola, a través del uso intensivo de fertilizantes y prácticas agrícolas no sostenibles, contribuye de manera importante a la carga de nutrientes en cuerpos de agua cercanos, especialmente en forma de compuestos de nitrógeno y fósforo (Parada *et al.*, 2023; Quiroz Rojas, 2024). Estos nutrientes, cuando son arrastrados por la escorrentía superficial o filtrados a través del suelo hacia ríos, lagos y costas, promueven un crecimiento descontrolado de algas y plantas acuáticas, un proceso conocido como eutrofización (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [EPA], 2022).

Además, la presencia persistente de nutrientes en exceso altera el equilibrio natural del ecosistema, favoreciendo la proliferación de especies invasoras o resistentes al ambiente eutrofizado, mientras que las especies más sensibles disminuyen o desaparecen (Capetillo Piñar *et al.*, 2022; Marina & Saravia, 2022). Esto impacta no solo la diversidad ecológica, sino también la cadena alimentaria y las actividades humanas dependientes de estos recursos, como la pesca y el turismo. Por lo tanto, la gestión de la

escorrentía agrícola y la implementación de prácticas sostenibles, como la rotación de cultivos, la reducción en el uso de fertilizantes y la creación de barreras vegetativas, son esenciales para mitigar estos efectos y proteger los ecosistemas acuáticos.

El transporte marítimo es una de las actividades humanas con un impacto significativo en la salud de los ecosistemas marinos, especialmente en golfos y zonas costeras con alto tráfico de embarcaciones (Zitoun *et al.*, 2024). Los derrames de hidrocarburos, tanto accidentales como crónicos, representan una amenaza crítica para estos entornos. Estos derrames pueden ocurrir por accidentes en grandes buques petroleros, fallos en operaciones de carga y descarga, o por el lavado ilegal de tanques de combustible en alta mar. Cuando el petróleo y otros hidrocarburos se vierten al mar, forman una película que bloquea el intercambio de oxígeno y afecta a la fauna marina de múltiples maneras.

Además de los hidrocarburos, la liberación de contaminantes relacionados con el tráfico marítimo, como metales pesados (por ejemplo, plomo y mercurio), productos químicos utilizados en pinturas antiincrustantes y aguas de lastre contaminadas, también contribuyen de manera significativa a la degradación ambiental (Valle *et al.*, 2018; Zitoun *et al.*, 2024). Las pinturas antiincrustantes, que se utilizan para prevenir el crecimiento de organismos en el casco de los barcos, contienen compuestos tóxicos que pueden desprenderse y acumularse en los sedimentos marinos, afectando a las especies bentónicas y a la cadena alimentaria.

La Organización Marítima Internacional [OMI] (2019) ha establecido el Convenio MARPOL, un tratado internacional que regula la contaminación generada por los buques, incluyendo disposiciones sobre la reducción de descargas de petróleo, la limitación de residuos plásticos en el mar y la

implementación de tecnologías más limpias en la navegación comercial. Estas regulaciones han sido clave para mitigar los impactos ambientales del transporte marítimo y proteger los ecosistemas marinos (Zitoun *et al.*, 2024).

### ***Impactos en la Sostenibilidad de los Ecosistemas***

El deterioro de la biodiversidad también tiene implicaciones para los servicios ecosistémicos de los que dependen las comunidades humanas, tales como la pesca, la filtración de agua y la regulación del clima. Por lo tanto, mitigar la contaminación, gestionar el uso de fertilizantes y controlar la introducción de especies invasoras son pasos esenciales para proteger la biodiversidad y mantener la estabilidad y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos.

La degradación de la calidad del agua tiene un impacto profundo en los servicios ecosistémicos que los ecosistemas acuáticos proporcionan, los cuales son fundamentales para el bienestar humano y el desarrollo económico. Entre los servicios más afectados se encuentran la pesca, el turismo, la provisión de agua y la regulación del clima (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2019). La pesca, que es una fuente crucial de alimentos y sustento para millones de personas en las comunidades costeras, puede verse severamente afectada por la contaminación y la eutrofización. Estas condiciones provocan una disminución de las poblaciones de peces debido a la hipoxia, la acumulación de toxinas en las especies marinas y la pérdida de hábitats críticos como arrecifes y praderas marinas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2020; Gómez Duque, 2021).

La reducción de la cantidad y calidad de las capturas no solo tiene implicaciones directas para la seguridad alimentaria, sino que también impacta la economía local y global.

Las comunidades costeras, especialmente aquellas en regiones en desarrollo que dependen de la pesca como fuente primaria de ingresos, enfrentan serias dificultades cuando los ecosistemas marinos se ven comprometidos (Gómez Duque, 2021; Zornoza Bonilla, 2022). La pesca sostenible se vuelve más difícil de lograr, lo que lleva a una mayor presión sobre los recursos y, en algunos casos, a la migración de poblaciones en busca de mejores condiciones de vida.

El turismo, otra fuente esencial de ingresos para muchas zonas costeras, también se ve perjudicado por la degradación de la calidad del agua. Las playas contaminadas, los malos olores producidos por la proliferación de algas y la pérdida de la biodiversidad marina afectan la experiencia de los visitantes y disuaden a los turistas, reduciendo el flujo económico hacia la región (Brandão *et al.*, 2023). Además, actividades recreativas como el buceo y el esnórquel, que dependen de la belleza y la salud de los ecosistemas marinos, sufren una disminución en su popularidad cuando los corales se blanquean o mueren, y cuando la vida marina escasea.

### ***Estrategias de Sostenibilidad y Medidas Implementadas***

Se han documentado diversas estrategias utilizadas para mitigar los efectos de la contaminación y mejorar la calidad del agua en los ecosistemas marino-costeros. Estos incluyen enfoques normativos, restauración ecológica y el uso de tecnologías de monitoreo:

**Regulación y control de emisiones:** Las políticas ambientales en la Unión Europea (UE) y América del Norte han logrado avances significativos en la reducción de la contaminación marina mediante regulaciones estrictas y la aplicación de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas residuales. La Directiva Marco sobre la Estrategia Marina (2008/56/CE) de la UE establece directrices para la protección de los

ecosistemas marinos y la gestión sostenible del agua (Unión Europea, 2020). Asimismo, la Ley de Agua Limpia de Estados Unidos, implementada por la EPA (2022), ha sido fundamental en la reducción de contaminantes en cuerpos de agua.

En América Latina, algunos países han desarrollado estrategias similares. Por ejemplo, en Brasil, el Programa de Descontaminación de Aguas Residuales en la Cuenca del Río Tietê ha reducido significativamente la contaminación en aguas urbanas (Agencia Nacional de Aguas [ANA], 2021). En México, la implementación de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que regula los límites permisibles de contaminantes en aguas residuales descargadas en cuerpos receptores, ha sido clave en la mitigación de la contaminación en zonas costeras (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México [SEMARNAT], 2021).

**Restauración Ecológica:** Los proyectos de restauración de humedales, manglares y arrecifes de coral han demostrado ser estrategias efectivas para mejorar la calidad del agua y la biodiversidad marina. La creación de áreas marinas protegidas en países como Costa Rica y Colombia ha permitido reducir la presión sobre los ecosistemas costeros y mejorar los servicios ecosistémicos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2019). En el caso de Brasil, la recuperación de manglares degradados en el Estado de Maranhão ha favorecido la filtración de contaminantes y el aumento de la biodiversidad local (FAO, 2020).

**Monitoreo y gestión adaptativa:** La implementación de tecnologías de monitoreo ha permitido una gestión más efectiva de la calidad del agua en ecosistemas marino-costeros. El uso de sensores remotos y boyas de medición en países como Canadá y Alemania ha facilitado la detección temprana de variaciones en los niveles de oxígeno

disuelto y otros contaminantes (Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO [UNESCO-IOC], 2019). En América Latina, iniciativas como el Sistema de Información del Agua de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en México han promovido el uso de tecnologías para el monitoreo continuo de cuerpos de agua costeros (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2021).

Las estrategias de sostenibilidad en la gestión de los golfos deben estar alineadas con marcos internacionales que garanticen su efectividad a largo plazo. En este contexto, los ODS, particularmente el ODS 14, establecen metas concretas para reducir la contaminación marina, minimizar los impactos de la pesca no sostenible y mejorar la gestión de los recursos marinos (ONU, 2022). La implementación de políticas ambientales basadas en estos objetivos permite avances en la regulación del uso de fertilizantes, el monitoreo de descargas industriales y la creación de áreas marinas protegidas en distintas partes del mundo

### ***Tendencias y Desafíos***

Los estudios revelaron tendencias significativas y desafíos persistentes:

El cambio climático es un fenómeno global que afecta a una variedad de sistemas naturales, incluidos los ecosistemas marinos y costeros, con impactos particularmente agudos en los golfos y otras zonas de transición entre el mar y la tierra. Las variaciones en la temperatura y el nivel del mar, resultantes del cambio climático, están intensificando los problemas de calidad del agua y haciendo que los ecosistemas de los golfos sean cada vez más vulnerables a la contaminación y otras presiones ambientales.

En las regiones desarrolladas, las economías más fuertes, la infraestructura avanzada y los sistemas políticos estables proporcionan los recursos y las herramientas necesarias para aplicar políticas ambientales más robustas y

eficaces. Estas regiones tienen la capacidad de invertir en tecnologías verdes, desarrollar sistemas de gestión ambiental más eficaces y cumplir con los acuerdos internacionales relacionados con el medio ambiente. Sin embargo, incluso en estos contextos, la implementación de políticas de sostenibilidad puede verse afectada por intereses económicos que priorizan el crecimiento a corto plazo o la dependencia de industrias contaminantes, como los combustibles fósiles, lo que dificulta la acción completa y coherente.

Por otro lado, en las regiones menos desarrolladas, como América Latina, los desafíos ambientales se agravan por limitaciones económicas, institucionales y sociales. Aunque hay avances en políticas ambientales, su implementación se dificulta por falta de financiamiento, corrupción y debilidad en la fiscalización. La dependencia de sectores extractivos genera conflictos entre desarrollo económico y conservación ambiental. Además, la escasez de infraestructura para tratamiento de aguas, la urbanización descontrolada y la mala gestión de residuos agravan la contaminación. La vulnerabilidad al cambio climático afecta la calidad del agua, la seguridad alimentaria y la resiliencia de los ecosistemas. Fortalecer la cooperación internacional, la educación ambiental y estrategias adaptadas es clave para enfrentar estos retos (Zornoza Bonilla, 2022).

La falta de estándares de medición y recopilación de datos homogéneos es una de las principales barreras para la evaluación precisa y eficaz de los problemas ambientales a nivel global (Kournopoulou *et al.*, 2024). Esta inconsistencia en los métodos de medición dificulta la capacidad de comparar datos entre diferentes regiones y contextos, lo que complica la formulación de políticas, la toma de decisiones y el seguimiento de los avances hacia los objetivos globales de sostenibilidad, como los establecidos en los

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Además, la falta de protocolos unificados genera incertidumbre sobre la calidad y la fiabilidad de los datos disponibles, lo que puede llevar a la adopción de decisiones mal informadas o a la subestimación de los riesgos ambientales.

### Discusión

Como señala Margarita *et al.*, (2018) “el calentamiento global ha provocado un aumento en la temperatura del agua, lo que disminuye la capacidad de solubilidad del oxígeno en los cuerpos de agua, un fenómeno conocido como desoxigenación”. La disminución de los niveles de oxígeno disuelto puede llevar a la formación de zonas hipóxicas o "zonas muertas", que son áreas donde las condiciones son insuficientes para soportar la vida de la mayoría de los organismos marinos. Esta desoxigenación impacta de manera significativa en la salud de los ecosistemas acuáticos y tiene efectos negativos a gran escala en la biodiversidad y la estabilidad ecológica.

“El aumento de la temperatura del agua no solo reduce la solubilidad del oxígeno, sino que también acelera el metabolismo de los organismos marinos” (Brandão *et al.*, 2023). Esto significa que las especies requieren más oxígeno para mantener sus funciones vitales, pero en un entorno con menor disponibilidad de este recurso, se produce un estrés fisiológico. Como resultado, muchas especies marinas se ven obligadas a migrar hacia aguas más frías y oxigenadas para sobrevivir, lo que altera las pautas de distribución y provoca cambios significativos en las dinámicas de los ecosistemas.

Este cambio en la distribución de las especies puede desestabilizar las interacciones tróficas y la estructura de las comunidades marinas, ya que las especies desplazadas pueden entrar en competencia con las comunidades autóctonas de otras regiones, alterando las

cadena alimentarias y los ecosistemas locales (Marina & Saravia, 2022).

Por otro lado, las especies que no pueden migrar o adaptarse, como algunos tipos de invertebrados y peces de hábitos más sedentarios, pueden experimentar una disminución en sus poblaciones o incluso la extinción local.

La disminución de oxígeno, junto con factores secundarios como el incremento del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares, las alteraciones en la circulación y mezcla oceánica, la salinización y la intensificación de eventos extremos (Zitoun *et al.*, 2024) hacen que sea favorable la proliferación de organismos que toleran bajas concentraciones de oxígeno, como ciertas medusas, bacterias anaerobias y algunos tipos de algas. Estas especies oportunistas pueden dominar los ecosistemas afectados, creando un entorno menos diverso y funcionalmente limitado. Por ejemplo, el aumento de bacterias anaerobias puede resultar en la producción de compuestos tóxicos como el sulfuro de hidrógeno, que exacerban la condición de las zonas hipóxicas y presentan riesgos adicionales para la fauna marina.

“Los cambios en los patrones de precipitación y la escorrentía provocados por el cambio climático y otras actividades humanas pueden alterar significativamente los niveles de salinidad en los golfos y otras áreas costeras” (Capetillo Piñar *et al.*, 2022). Estas variaciones impactan la habitabilidad de los ecosistemas marinos, obligando a muchas especies a adaptarse, migrar o enfrentar una disminución de sus poblaciones.

Cuando la precipitación aumenta, la entrada de agua dulce reduce la salinidad, lo que puede afectar a especies adaptadas a condiciones más salinas, estas especies pueden experimentar estrés fisiológico, problemas de reproducción y una disminución en su capacidad de competir con otras especies. Por otro lado, en períodos de

sequía o en regiones donde la escorrentía se reduce, la salinidad puede aumentar debido a la mayor evaporación y la disminución de la entrada de agua dulce. Estos cambios pueden ser perjudiciales para especies que no están adaptadas a niveles de salinidad más altos.

Las fluctuaciones en la salinidad favorecen la aparición y establecimiento de especies invasoras, más resistentes y adaptables a las condiciones cambiantes. Estas especies pueden desplazar a las nativas al competir por recursos, alterando las dinámicas ecológicas y reduciendo la biodiversidad. Por ejemplo, ciertos tipos de medusas y algas invasoras prosperan en salinidades variables, reproduciéndose rápidamente, lo que les permite dominar el ecosistema y generar cambios significativos en las redes alimentarias y la estructura del hábitat.

Los cambios en la salinidad también afectan la fisiología y el comportamiento de los organismos marinos, muchos invertebrados, como los crustáceos y los moluscos, son especialmente sensibles a las variaciones de salinidad, y las alteraciones en este factor pueden interferir en procesos biológicos esenciales como el crecimiento y la osmorregulación. Además, las condiciones de salinidad influyen en el desarrollo de larvas de muchas especies marinas, y los cambios drásticos pueden provocar tasas de supervivencia más bajas, afectando la renovación de las poblaciones y la sostenibilidad de los ecosistemas.

“En los océanos, la salinidad del agua es típicamente conservadora con respecto al mar, y varía principalmente debido a la evaporación y/o las precipitaciones” (Steiner *et al.*, 2018). Una disminución del pH impacta la calcificación de estos organismos marinos, un proceso fundamental para la construcción de sus esqueletos y conchas. Los corales, por ejemplo, dependen de la disponibilidad de carbonato para formar sus estructuras calcáreas que, a su vez, son

esenciales para el mantenimiento de los arrecifes coralinos.

El impacto de la acidificación representa un desafío del futuro cercano. El cambio impactará la disponibilidad de nutrientes en las aguas de los arrecifes, afectando no solo a los organismos calcificadores, sino también a moluscos y crustáceos. Sus conchas y exoesqueletos de carbonato de calcio se debilitan, volviéndose más vulnerables a la depredación y al desgaste. Esta fragilidad puede incrementar la mortalidad de larvas y juveniles, comprometiendo la reproducción y el reclutamiento de nuevas generaciones, lo que a su vez reduce las poblaciones de especies marinas esenciales en la cadena alimentaria.

Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto y la alta turbidez son dos factores ambientales interrelacionados que tienen impactos negativos en la salud de los ecosistemas acuáticos. Estos fenómenos suelen estar vinculados con la presencia de grandes cantidades de materia orgánica en descomposición y con la proliferación de microalgas, un proceso comúnmente asociado con la eutrofización de cuerpos de agua, y esto ocurre cuando hay un exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, en el agua, lo que favorece el crecimiento desmesurado de algas y otras plantas acuáticas. Las descargas urbanas e industriales, que a menudo incluyen aguas residuales no tratadas adecuadamente, son fuentes clave de estos nutrientes, y su presencia en los ecosistemas acuáticos exacerba tanto la turbidez como la falta de oxígeno disuelto.

Se identificaron diversos tipos de contaminantes que afectan la calidad del agua y la salud de los ecosistemas:

Desde el punto de vista de Valle *et al.* (2018) “la presencia de metales pesados, como plomo, mercurio y cadmio, en golfos caracterizados por una intensa actividad

industrial”. Estos metales, conocidos por su alta toxicidad, tienen la capacidad de bioacumularse en los tejidos de los organismos marinos, afectando gravemente a la fauna y alterando la cadena alimentaria. La bioacumulación no solo repercute en la salud de las especies marinas, sino que también presenta serios riesgos para la salud humana.

Este riesgo es particularmente preocupante en comunidades costeras y dependientes de la pesca, donde la exposición prolongada a productos del mar contaminados puede provocar efectos adversos significativos, como trastornos neurológicos, problemas renales y otras enfermedades crónicas.

“Aunque en los ambientes marino-costeros, los metales pesados suelen estar presentes en concentraciones bajas, éstas pueden aumentar por las entradas terrígenas y los aportes antrópicos, más que por el enriquecimiento natural del sedimento, derivado de la meteorización geológica” (Fuentes *et al.*, 2019). Por otro lado, los contaminantes orgánicos persistentes y pesticidas: sustancias como los pesticidas organoclorados y otros compuestos químicos persistentes fueron comunes en áreas con agricultura intensiva, entrando a los golfos a través de la escorrentía.

Empleando las palabras de Hernández Miranda *et al.* (2021) “destaca que en la actualidad hay un interés cada vez mayor en el uso de organismos marinos como bio-indicadores para evaluar los niveles de contaminación en las zonas costeras”. Este enfoque es crucial, ya que permite una comprensión más detallada del estado ecológico de los ecosistemas marinos. Sin embargo, mejorar la precisión y la relevancia de la información obtenida de la macrofauna bentónica se presenta como un desafío importante para la ciencia, ya que es esencial para la creación de índices de calidad ambiental más robustos y fiables. Estos índices permiten una mejor interpretación de los efectos de la contaminación en la

estructura y la función de las comunidades marinas.

Corena (2020) señala que el Golfo de Fonseca enfrenta un complejo panorama de contaminación debido a la confluencia de diversas fuentes de desechos y vertidos. Este golfo, compartido por Honduras, El Salvador y Nicaragua, recibe de manera constante descargas de aguas residuales tanto de tipo especial (provenientes de actividades industriales y procesos específicos) como de tipo ordinario (aguas domésticas y urbanas). Además, el golfo se ve impactado por los descartes de pesca, que incluyen desechos orgánicos y restos de fauna no deseada que se devuelven al agua, contribuyendo a la alteración de su equilibrio ecológico.

La combinación de estos factores convierte a los Golfos marinos en un ecosistema altamente vulnerable, donde la presencia de contaminantes de múltiples orígenes genera un riesgo significativo para la biodiversidad marina y la salud de las comunidades humanas que dependen de sus recursos. “La gestión y monitoreo de estas fuentes de contaminación se presentan como tareas cruciales para mitigar los impactos y proteger este importante cuerpo de agua” (Tekman *et al.*, 2022)

El tráfico marítimo constante también contribuye al ruido subacuático, que interfiere en las actividades de comunicación y navegación de diversas especies marinas, como cetáceos, que dependen del sonido para orientarse y encontrar alimento (Zitoun *et al.*, 2024). Este tipo de contaminación acústica puede causar estrés, desorientación e incluso varamientos.

En golfos y bahías con un tráfico marítimo intenso, la combinación de estos factores puede resultar en un deterioro significativo de la calidad del agua y la pérdida de biodiversidad. Por tanto, la implementación de medidas estrictas de regulación y control, como el uso de combustibles más limpios,

protocolos de emergencia para derrames, tecnologías de gestión de aguas de lastre y el desarrollo de rutas marítimas sostenibles, es fundamental para reducir el impacto ambiental y proteger los ecosistemas marinos de estas áreas vulnerables.

El deterioro de la calidad del agua tiene repercusiones importantes sobre la sostenibilidad de los ecosistemas marinos en los golfos:

La pérdida de biodiversidad es una de las consecuencias más graves de la contaminación y la eutrofización en los ecosistemas acuáticos. Estos fenómenos desencadenan una serie de cambios en las condiciones ambientales que favorecen la proliferación de especies invasoras, las cuales suelen ser más resistentes y adaptables a los cambios extremos que las especies nativas. Las especies invasoras pueden desplazar a las nativas al competir por los mismos recursos, como alimento y espacio, lo que reduce la diversidad biológica y empobrece la estructura del ecosistema (Hurtado García & Barberena Moncada, 2023).

La reducción de las poblaciones de especies nativas, a menudo más especializadas y vulnerables a cambios bruscos en su entorno, tiene un efecto en cascada sobre las dinámicas ecológicas. Esto afecta a todos los niveles de la cadena alimentaria, desde productores primarios hasta consumidores secundarios y terciarios. Por ejemplo, la desaparición de ciertas especies de peces puede alterar las poblaciones de depredadores y presas, generando desequilibrios que se extienden a lo largo del ecosistema.

La eutrofización es causada por el aumento de los compuestos nitrogenados y fosforados en un cuerpo de agua, es una de las principales consecuencias de las actividades humanas observadas desde el inicio de los procesos de urbanización e industrialización y, es ahora un problema generalizado en todo el mundo,

ya que produce graves problemas ecológicos (Márquez *et al.*, 2024).

La eutrofización, al provocar el crecimiento excesivo de algas y cianobacterias, también genera condiciones de baja disponibilidad de oxígeno (hipoxia) en el agua. Las zonas hipóxicas limitan la supervivencia de muchas especies de peces, crustáceos y otros organismos que necesitan altos niveles de oxígeno disuelto. Esto provoca un desplazamiento de la fauna más sensible y una disminución de la riqueza de especies. Las áreas marinas afectadas por la hipoxia suelen quedar dominadas por unos pocos organismos capaces de tolerar estas condiciones, como ciertos tipos de medusas y gusanos marinos, lo que empobrece aún más la biodiversidad.

Además, la pérdida de biodiversidad disminuye la resiliencia de los ecosistemas, es decir, su capacidad para resistir y recuperarse de perturbaciones como el cambio climático y otros impactos antropogénicos. Un ecosistema con menor diversidad es más propenso a colapsar ante alteraciones, ya que tiene menos especies funcionalmente redundantes que puedan asumir los roles ecológicos de aquellas que desaparecen (Cervantes Duarte *et al.*, 2020).

Otros servicios ecosistémicos que se ven comprometidos incluyen la capacidad de los ecosistemas acuáticos para filtrar y purificar el agua. Las plantas acuáticas, los humedales y las zonas costeras actúan como filtros naturales que retienen sedimentos y contaminantes (Vergara Chen *et al.*, 2023). Cuando estos sistemas se degradan, la calidad del agua se deteriora, lo que incrementa la necesidad de un tratamiento más costoso del agua para el consumo humano y reduce la disponibilidad de agua potable segura.

La degradación de la calidad del agua afecta la regulación del clima, ya que los ecosistemas marinos, como los manglares y las praderas marinas, juegan un papel esencial

en la captura y almacenamiento de carbono. La pérdida de estos ecosistemas debido a la contaminación y otros factores contribuye al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, exacerbando el cambio climático y sus impactos en las comunidades costeras y en todo el mundo.

Las zonas muertas, son áreas en cuerpos de agua donde la concentración de oxígeno disuelto es tan baja que la mayoría de la vida marina no puede sobrevivir. Estas zonas son un fenómeno alarmante y se forman generalmente como resultado de la eutrofización, un proceso impulsado por el exceso de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que provienen principalmente de la escorrentía agrícola, descargas de aguas residuales y otras fuentes de contaminación antropogénica. “Es importante señalar la problemática de la contaminación por agroquímicos provenientes de las grandes industrias meloneras y arroceras, cuyas prácticas representan una seria amenaza” (Leal Díaz, 2023)

El crecimiento excesivo de algas es una consecuencia directa de la eutrofización. Cuando estas algas mueren, se descomponen por la acción de bacterias que consumen grandes cantidades de oxígeno disuelto en el agua durante el proceso. Este consumo de oxígeno genera condiciones hipóxicas o anóxicas, en las que la vida marina se ve forzada a migrar, adaptarse a condiciones adversas o morir. Las especies más afectadas suelen ser peces, crustáceos y otras formas de vida que dependen de niveles adecuados de oxígeno para su supervivencia y reproducción.

La presencia de zonas muertas no solo representa una pérdida significativa de biodiversidad, sino que también tiene consecuencias económicas y sociales importantes. La pesca, por ejemplo, se ve gravemente afectada cuando los recursos pesqueros disminuyen o se desplazan a otras áreas en busca de condiciones más habitables.

Esto afecta directamente a las comunidades costeras que dependen de la pesca como fuente de sustento, reduciendo los ingresos y generando inseguridad alimentaria. La disminución de la captura de peces comerciales obliga a los pescadores a buscar nuevas zonas de pesca, lo cual puede aumentar los costos de operación y ejercer presión sobre otras áreas marinas que podrían no estar preparadas para soportar dicha explotación.

Además de la pesca, otras actividades económicas, como el turismo y los deportes acuáticos, pueden verse perjudicadas. Las aguas costeras que presentan signos de deterioro, como malos olores, decoloración por la proliferación de algas y pérdida de fauna marina visible, son menos atractivas para los visitantes (Quintanilla, 2020). Esto disminuye el atractivo de las zonas costeras y, por ende, reduce los ingresos generados por el turismo y la recreación.

Las zonas hipóxicas también tienen un efecto en cascada sobre la estructura y función de los ecosistemas marinos. La pérdida de especies clave en estos entornos puede alterar las redes alimentarias, afectando a los depredadores y presas en diferentes niveles tróficos. La falta de oxígeno, al crear condiciones adversas para la vida marina, permite que ciertas especies más resistentes, como las medusas y algunos tipos de bacterias, proliferen y dominen el ecosistema, lo que contribuye aún más a la pérdida de biodiversidad y al deterioro del equilibrio ecológico.

Enfrentar el problema de las zonas hipóxicas requiere un enfoque multifacético que incluya la reducción de la carga de nutrientes a través de mejores prácticas agrícolas, un tratamiento más eficiente de las aguas residuales y la implementación de políticas ambientales más estrictas. Solo mediante la adopción de medidas sostenibles se podrá reducir la extensión de estas zonas muertas y preservar la salud de los ecosistemas

acuáticos y los servicios que proporcionan a las comunidades humanas.

“El cambio climático detona indicadores ecológicos, como la abundancia y fenología del fitoplancton (momento de los eventos periódicos de crecimiento), se puede utilizar para monitorear la dinámica estacional del fitoplancton, describir su respuesta al medio ambiente y clima” (Kournopoulou *et al.*, 2024). Las lluvias más intensas y frecuentes, combinadas con períodos de sequía, afectan la cantidad y la calidad del agua que fluye hacia los golfos. Las lluvias excesivas pueden aumentar la escorrentía de nutrientes y contaminantes desde la tierra hacia los cuerpos de agua, exacerbando problemas como la eutrofización, la turbidez y la contaminación por metales pesados.

La desigualdad en la implementación de políticas ambientales y de sostenibilidad es una barrera significativa para abordar de manera efectiva los desafíos globales relacionados con la protección del medio ambiente y la gestión de los recursos naturales. Esta disparidad se manifiesta principalmente en las diferencias de capacidad entre las regiones desarrolladas y en desarrollo, lo que crea una brecha en la capacidad para implementar medidas de sostenibilidad y adaptación ante el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación.

### **Recomendaciones para Futuras Investigaciones**

Los estudios sugieren áreas de investigación adicionales:

Combinación de monitoreo científico, participación comunitaria y gobernanza ambiental para abordar los desafíos complejos que enfrentan estos ecosistemas. La integración de estos tres elementos es esencial para garantizar una gestión sostenible y equilibrada de los recursos, promover la resiliencia de los ecosistemas y

mejorar la calidad de vida de las comunidades locales.

Estudios a largo plazo son fundamentales para comprender los impactos acumulativos y a largo plazo de las actividades humanas y los cambios naturales en los golfos y ecosistemas, especialmente en contextos de sostenibilidad ambiental. Si bien los estudios transitorios o de corta duración son útiles para observar fenómenos inmediatos, los estudios longitudinales, aquellos que se extienden por varios años o incluso décadas, permiten capturar los efectos de las acciones humanas a medida que se desarrollan a lo largo del tiempo. Este enfoque es esencial para evaluar los impactos que no se manifiestan de manera inmediata y para prever tendencias futuras que podrían afectar a la biodiversidad, los recursos naturales y las comunidades humanas.

La innovación tecnológica juega un papel fundamental en la gestión ambiental moderna, especialmente en la lucha contra la contaminación y la protección de los ecosistemas. A medida que los problemas ambientales se vuelven más complejos y extensos, se hace urgente el desarrollo de tecnologías avanzadas que no solo ayuden a detectar la contaminación de manera más precisa, sino que también permitan mitigar sus efectos y prevenir daños a largo plazo.

### **Conclusiones**

Una revisión de la literatura sobre sostenibilidad y calidad del agua marina de Golfos revela hallazgos importantes y tendencias clave que subrayan la urgencia de abordar este problema ambiental. Los estudios revisados destacan que los parámetros físicos y químicos como el pH, la salinidad, el oxígeno disuelto y la temperatura son importantes para evaluar la salud del agua de mar, y que los cambios en estos parámetros están directamente relacionados con actividades humanas como

el cambio climático y las descargas de aguas residuales.

Las principales fuentes de contaminación identificadas, incluidas las emisiones urbanas e industriales, la agricultura y el transporte marítimo, tienen un impacto significativo en el deterioro de la calidad del agua. Esto conlleva consecuencias negativas como la pérdida de biodiversidad, el impacto en los servicios ecosistémicos y la creación de zonas anóxicas. La eutrofización ha demostrado ser un problema persistente en bahías ubicadas cerca de áreas de agricultura intensiva.

La implementación de medidas de desarrollo sostenible como control de emisiones y proyectos de restauración ecológica muestra el potencial para mitigar estos impactos, aunque la revisión también destaca que la efectividad de estas medidas varía según la región. Los países desarrollados tienden a adoptar políticas y tecnologías más avanzadas, mientras que los países en desarrollo enfrentan obstáculos importantes, como la falta de recursos y de infraestructura adecuada. Entre estas tendencias, el cambio climático y la desigualdad en la implementación de políticas son factores destacados que exacerban el problema.

La falta de métodos de medición armonizados dificulta el análisis comparativo global y resalta la necesidad de un enfoque más coordinado para la recopilación y estandarización de datos.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 14, ofrecen un marco integral para la implementación de estrategias de mitigación y conservación en los ecosistemas marino-costeros. Para lograr avances significativos, es crucial que las políticas ambientales nacionales e internacionales incorporen estos lineamientos y fomenten la colaboración entre gobiernos, instituciones científicas y comunidades locales

Con base en estos resultados, se concluyó que proteger y mejorar la calidad del agua de los golfos requiere un enfoque integral, y colaborativos que involucran ciencia, gobernanza y participación comunitaria. Se recomienda priorizar los estudios longitudinales para lograr una comprensión más completa de los efectos acumulativos de la contaminación y fomentar la innovación tecnológica en el monitoreo y tratamiento del agua. La protección de los ecosistemas marinos y los servicios que brindan a las comunidades costeras solo puede garantizarse mediante la implementación de estrategias sostenibles y adaptativas.

### Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua), y al Centro Universitario Regional de Estelí (CUR-Estelí), por el apoyo institucional brindado en el marco del Programa de Doctorado de la III Cohorte en Gestión y Calidad de la Investigación Científica. Asimismo, se reconoce el valor del curso de Redacción Científica, donde se desarrolló este artículo de revisión como parte del proceso de investigación doctoral. Se destaca especialmente la contribución del Dr. Clifford Jerry Herrera Castrillo, quien facilitó el taller con enfoque académico y metodológico, permitiendo fortalecer la calidad de este trabajo.

### Referencias

- A Syukri Raihan, c., Atmadipoera, A., Naulita, Y., Balbeid, N., & Noviyanti, R. (2024). Assessment of Oceanographic Trend and Ocean Health Index in The Gulf of Madura [Evaluación de la tendencia oceanográfica y del índice de salud oceánica en el golfo de Madura]. *E3S Web Conf.*, 483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448301012>

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [EPA]. (2022). Normas y directrices sobre la calidad del agua. <https://www.epa.gov/wqs-tech>
- Agencia Nacional de Agua y Saneamiento [ANA]. (2021). Relatório de Segurança de Barragens. Brasil. <https://www.gov.br/ana/pt-br>
- Barberena Moncada, J. A. (2019). Modelamiento del origen de las precipitaciones en la ciudad de Managua mediante simulaciones con HYSPLIT. *Revista Científica Agua y Conocimiento*, 5, 15–25. <https://revistas.unan.edu.ni/index.php/RevAgua/article/view/3756>
- Brandão, J., Valério, E., Weiskerger, C., Veríssimo, C., Sarioglou, K., Novak Babi, M., Rebelo, M. (2023). Strategies for Monitoring Microbial Life in Beach Sand for Protection of Public Health. *Environmental Research*, 20(5710). <https://doi.org/10.3390/ijerph20095710>
- Capetillo Piñar, N., Lopeztegui Castillo, A., Betanzos Vega, A., Quezada, r., Zetina Rejón, M., & Hernández Padilla, J. (2022). Congruencia y respuesta a factores ambientales de diferentes métricas de biodiversidad en el golfo de Batabanó, Cuba. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 57(1), 1-11. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2022.57.1.3322>
- Cervantes Duarte,, R., Echeandía,, S., Rodríguez Herrera, J., & Marmolejo Rodríguez, J. (2020). Estudio integral de la calidad del agua en el litoral del puerto san Carlos, baja california sur. México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(4), 927-943. <https://doi.org/10.20937/RICA.53776>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2021). Estadísticas del Agua en México, Edición 2021. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO [UNESCO-IOC]. (2019). La Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO. <https://www.unep.org/explore-topics/oceans-seas/what-we-do/working-regional-seas/partners/intergovernmental>
- Corena, A. Q. (2020). *Diagnóstico de la calidad físico química y biológica del agua en el golfo de Fonseca, la unión el salvador. propuestas para el desarrollo sostenible*. Icta Editores.
- Flores-Méndez, J. I., Martínez-González, J. E., & Dávila-Prado, P. (2007). Puntos críticos en la evaluación de impacto ambiental de la Camaronicultura en el Pacífico de Nicaragua, durante su proceso productivo: Producción de larvas, operación y abandono de Granjas. *Universitas*, 1(1), 33-38. <https://doi.org/10.5377/universitas.v1i1.1631>
- Fuentes, M. V., Sangunetti Gamboa, O. A., & Rojas de Astudillio, L. L. (2019). Evaluación del riesgo ambiental de metales pesados en los sedimentos superficiales del saco del golfo de Cariaco. *Contaminacion y Ambiente*, 1(35). <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.01.07>
- Gómez Duque, Á. M. (2021). ODS 14 Vida Submarina: ¿porqué cuidar los océanos? *Universidad del Rosario*.

- <https://repository.urosario.edu.co/items/3eb70c90-ffab-49bd-a050-66fbdbf1553d>
- Hernandez Miranda, E., Vegas, R., Krauts, M., Hidalgo, N., San Martin, F., & Kinones, R. (2021). Bio-indicadores de contaminación marina costera y filtros de exclusión de organismos bentónicos y nectónicos en sistemas de captación de agua de mar. *Researchgate*.
- Hurtado García, I., & Barberena Moncada, J. (2023). Calidad de aguas marino-costeras en bahías de San Juan del sur, Escameca, La Flor y El Ostional, Costas del Océano Pacífico nicaragüense. *Revista Científica Estelí, Nicaragua*. <https://doi.org/10.5377/farem.v12i45.16047>
- Kournopoulou, A., Kikaki, K., Varkitzi, I., & Stella Psarra, S. (2024). Atlas of phytoplankton phenology indices in selected Eastern Mediterranean marine ecosystems [Atlas de índices fenológicos del fitoplancton en ecosistemas marinos seleccionados del Mediterráneo oriental]. *NATURE*, *14*(9975). <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-024-60792-2>
- Leal Díaz, N. (2023). Manejo de residuos sólidos por parte de comunidades costeras del Golfo de Nicoya. *Biocenosis*, *34*(2). <https://doi.org/10.22458/rb.v34i2.5085>
- Liu, H., Xinfei, J., Wu, W., & Shen, C. (2019). Evaluation and Research Analysis of Marine Ecological [Evaluación y análisis de la investigación sobre ecología marina] Suitability. *Journal of Marine Science*.
- Lizano Rodríguez, O. (2019). El calentamiento global y su relación con el impacto en la pesquería en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. *InterSedes*, *20*(41), 191-208. <https://doi.org/10.15517/isucr.v20i41.38837>
- Loza Álvarez, S., Benavides-Morera, R., Brenes Rodríguez, C., & Ballesteros Saxon, D. (2018). REVMAR. *Estructura del fitoplancton en las épocas seca y lluviosa en el golfo de Papagayo, Costa Rica*, *10*(2). <https://doi.org/10.15359/revmar.10-2.1>
- Margarita, L. G., González, D., & Garcia, E. (2018). Evaluación de la calidad del agua de los arrecifes del golfo de Cazones, sur de Cuba, a partir de algunos indicadores microbiológicos y químicos. *Revmar*, *12*(1), 9-26. <https://doi.org/10.15359/revmar.12-1.1>
- Marina, T., & Saravia, L. (2022). Una revisión de los efectos de los cambios ambientales interacciones tróficas de cuatro ecosistemas marinos entre los 45° y 62° S. *Research Gate*, *50*, 1-16. <https://doi.org/10.22352/AIP2022>
- Márquez, A., Troccoli Ghinaglia, L., & Romero, J. (2024). Evaluación del estado trófico de las aguas en la ensenada de turpialito, Golfo de Cariaco, Venezuela. *Boletín de información*, *39*(2). <https://doi.org/10.53554/boletin.v39i2.419>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2022). Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). ONU. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Organización Marítima Internacional [OMI]. (2019). Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques. MARPOL. [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- Osorto Núñez, M. H., Martínez Rodríguez, D., & Merlo Rodríguez, V. (2023). Evaluación de la calidad de agua mediante un análisis multivariante en los esteros del Golfo de Fonseca, Honduras.: Calidad de agua en los esteros del Golfo de Fonseca. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 52(1), 65-92. <https://boletin.invemar.org.co/ojs/index.php/boletin/article/view/1181>
- Parada, M., Manobanda, P., & Tapia González, V. (2023). *Gestión Ambiental de la Contaminación Atmosférica*. CIDE Editorial. <https://repositorio.cidecuador.org/bitstream/123456789/2381/3/Libro%20Gestion%20Ambiental.pdf>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA]. (2019). <https://www.unep.org/es/resources/perspectivas-del-medio-ambiente-mundial-6>. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Quintanilla, L. A. (2020). *Diagnóstico de la calidad físico química y biológica del agua en el golfo de Fonseca*.
- Quiroz Rojas, S. C. (2024). Determinación de parámetros ambientales en la calidad del agua superficial de la cuenca del río Mantaro para la gestión del recurso hídrico aplicando el software RapidMiner. [Tesis de Grado]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/684350>
- Riegl, B., Johnston, M., Glyn, p., Keith,, I., Rivera, F., Vera Zambrano, M., Glynn, p. (2019). Some environmental and biological determinants of coral richness, resilience and reef building in Galápagos (Ecuador) [algunos determinantes ambientales y biológicos de la riqueza coralina, la resiliencia y la formación de arrecifes en Galápagos (ecuador)]. *NATURE*, 9(10332). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46607-9>
- Sandí, J., Piedra Marín, G., Saravia-Arguedas, A., & Castro, L. (2020). Evaluación de los parámetros físicos y químicos del agua de mar en los alrededores de isla Uvita Limon, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 34(2), 88-95.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México [SEMARNAT]. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. <https://www.gob.mx/semarnat>
- Steiner, Z., V. Turchyn, A., Harpaz, E., & Silverman, J. (2018). Water chemistry reveals a significant decline in coral calcification rates in the southern Red Sea [La química del agua revela una disminución significativa en las tasas de calcificación de los corales en el sur del Mar Rojo]. *Nature Comunicatios*. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06030-6>

- Tekman, M., Walther, B., Peter, C., Gutow, L., & Bergmann, M. (2022). *Impacto por la contaminación de plásticos sobre las especies, la biodiversidad y los ecosistemas marinos*. WWF Alemania, Reinhardstraße 18, D-10117 Berlin.
- Unión Europea. (2020). Directiva Marco sobre la Estrategia Marina (2008/56/CE). <https://eur-lex.europa.eu/>
- Valle, S., Olivero, J., Nirchio, M., Lesly, T., Juan, V., Pesantes, F., & Gonzales, K. (2018). Evaluación del riesgo de contaminación por metales pesados en sedimentos marinos del estero huayla Puerto Bolivar, Ecuador. *ResearchGate*, 21(41), 7582.
- Vergara Chen, C., Guevara, B., Zuniga, M., & Gonzales, Y. (2023). Calidad de agua de una playa en el pacífico de Panama condiciones físico químicas y bacterias fecales. *UTP Panama*, 19(2), 94-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.33412/idt.v19.2.3826>.
- Wrightman, S. (2008). Calidad Química y Microbiológica del Agua y Acceso al Recurso Agua en la Comunidad de Solöng, Territorio Naso-Teribe, Bocas del Toro. La Universidad George Washington. [https://digitalcollections.sit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1038&context=isp\\_collection](https://digitalcollections.sit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1038&context=isp_collection)
- Zitoun, R., Saša, M., Hatje, V., Sander, S., Völker, C., Sarin, M., & Omanovi, D. (2024). Climate change driven effects on transport, fate and biogeochemistry of trace element contaminants in coastal marine ecosystems [Efectos del cambio climático en el transporte, el destino y la biogeoquímica de los contaminantes de oligoelementos en los ecosistemas marinos costeros]. *earth & environment*, 5(560). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01679-y>
- Zornoza Bonilla, J. A. (2022). Debilidad institucional y políticas extractivistas en América Latina en el siglo XXI. Análisis de la deforestación y los conflictos medioambientales en Bolivia, Brasil y Colombia. *Estudios De Derecho*, 79(174), 13-38. <https://doi.org/10.17533/udea.esde.v79n174a01>.