

# Determinación de bacterias con potencial biodegradador de hidrocarburos totales en muelle El Waffe de Turbo, Antioquia y análisis de las políticas ambientales encaminadas a la biorremediación de zonas costeras

## Determination of bacteria with potential for hydrocarbon biodegradation at El Waffe Dock in Turbo, Antioquia, and analysis of environmental policies regarding the bioremediation of coastal areas

Luis Alberto Jiménez-Medina<sup>1</sup> , Aldair Banguera-González<sup>1</sup> , Luisa María Múnera-Porras<sup>1\*</sup> ,  
John Alexander García-Giraldo 

### Resumen

Los hidrocarburos derivados del petróleo son estructuras químicas contaminantes, tóxicas, mutagénicas y cancerígenas que afectan la cadena trófica del ecosistema; estos compuestos son generados, principalmente, a partir de actividades antropogénicas y cuyos vertimientos en zonas marino-costeras, son derivadas por los sectores económicos industriales y de transporte marítimo. Para el presente trabajo, se utilizó una técnica de biorremediación consistente en la bioprospección de bacterias con capacidad biodegradadora de hidrocarburos totales; luego, se generó una presión selectiva en condiciones de única fuente de carbono, logrando el exitoso aislamiento de 11 morfotipos en medios de cultivos puros suplementados con hidrocarburos, demostrándose la presencia de microorganismos con potencial biodegradador. En este trabajo, fueron analizados tres puntos de muestreo en forma de zigzag a lo largo del muelle El Waffe de Turbo, Antioquia, Colombia. Adicionalmente, se realizó una comparación de las características microscópicas y macroscópicas de las cepas aisladas con literatura relacionada para acercarse a una identificación del microorganismo. Finalmente, se efectuó una revisión de los ámbitos políticos o normativos que rodean la biorremediación de hidrocarburos y la generación de nuevos conocimientos en esta materia en Colombia.

**Palabras clave:** biorremediación, hidrocarburos, políticas ambientales, zonas costeras

### Abstract

Petroleum-derived hydrocarbons are chemical contaminants that are toxic, mutagenic, and carcinogenic, and that can impact an ecosystems trophic chain. These compounds are primarily generated through anthropogenic activities and are discharged into marine-coastal areas from industrial and maritime transportation sectors. For this study, a bioremediation technique involving the bioprospecting of bacteria with the capacity to degrade total hydrocarbons was employed. Subsequently, selective pressure was applied under conditions of a sole carbon source, successfully isolating 11 morphotypes in pure culture media supplemented with hydrocarbons,

<sup>1</sup> Grupo de Investigación Salud y Sostenibilidad, Escuela de Microbiología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

\* Autor de correspondencia: luisam.munera@udea.edu.co

Recibido: julio 31, 2023; aceptado: marzo 3, 2024; publicado: junio, 21, 2024.

thus demonstrating the presence of microorganisms with biodegradative potential. Three zigzag sampling points along El Waffe Dock in Turbo, Antioquia, Colombia were analyzed. Additionally, a comparison of the microscopic and macroscopic characteristics of the isolated strains with the relevant literature was conducted to approach microorganism identification. Finally, a review of the political or regulatory aspects surrounding hydrocarbon bioremediation and the generation of new knowledge in this field in Colombia was carried out.

**Keywords:** bioremediation, coastal zones, environmental policies, hydrocarbons

## INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos son compuestos derivados del petróleo y clasificados como recursos naturales, siendo ampliamente utilizados en el mundo por ser importantes en los distintos sectores industriales. Generalmente, los hidrocarburos sufren transformaciones para sostener la industria del transporte, de la energía o la fabricación de materiales plásticos; por lo tanto, éstos alimentan y son un pilar fundamental de la economía global, incluyendo la colombiana (Marín, 2014).

La forma química de los hidrocarburos les permite estar en estados saturados e insaturados, cuyos enlaces y otras estructuras anilladas determinará su nivel de reactividad o inestabilidad al contacto con el ambiente; los más comunes y tóxicos en el crudo o petróleo son el benceno, tolueno, etilbenceno y el xileno (Kotoky et al., 2022; Quiceno-Pérez & Ríos-Osorio, 2014; Rodríguez-Trigo et al., 2007). En consecuencia, la presencia de estos compuestos en los ecosistemas oceánicos y costeros debido a accidentes de buques o uso indiscriminado afecta a todos los organismos de la cadena trófica, comenzando por el fitoplancton y el zooplancton, donde las poblaciones de larvas de peces, bentos y crustáceos en estuarios y arrecifes se ven disminuidas por su presencia (Buskey et al., 2016; Pérez-Hernández et al., 2020).

Los ecosistemas contaminados tienen una capacidad intrínseca de degradar cantidades de sustancias orgánicas, proceso que se conoce como atenuación natural; así, de acuerdo con la aptitud de este medio para incentivar las reacciones oxidativas, principalmente, ligadas a procesos metabólicos en microorganismos, la concentración de estos se puede reducir (Gómez-Mellado et al., 2020).

A pesar del compromiso e iniciativas de los gobiernos a nivel mundial para explorar e

invertir en formas de seguridad marítima y en la protección del ambiente en pro de contrarrestar el uso excesivo de combustibles y otros productos derivados del petróleo, como la creación de la OMI (Organización Marítima Internacional), aún se libera un gran volumen de hidrocarburos, y en accidentes históricamente reportados, estos superan la cantidad de tres millones de barriles vertidos en aguas marinas, tan solo entre los años 2020 y 2023, con 27.000 toneladas de petróleo derramados (Hernández-Ruiz et al., 2021; ITOPF, 2024).

Por su parte, en Colombia, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, ente encargado de avalar estudios de intervención y recopilar las afectaciones generadas en accidentes con hidrocarburos en el país, señala que se ha presentado el derrame de 14.656.983,64 barriles de hidrocarburos en los últimos 22 años, solamente en el departamento de Antioquia.

A su vez, en el Golfo de Urabá se han presentado derrames de combustible, de los cuales no hay registro en la base de datos del ANLA (Cruz et al., 2022). Pese a lo anterior, el de mayor impacto en los últimos años y reportado por medios locales en abril del 2013, fue el derrame de 1000 a 1300 galones; es decir, entre 23,81 y 30,95 barriles de hidrocarburos que fueron vertidos al agua marina tras el choque entre un buque y una barcaza en jurisdicción marítima de Turbo, Antioquia (El Universal, 2013; Minuto 30, 2010; Red de Desarrollo Sostenible, 2013).

El Distrito de Turbo, Antioquia, cuenta con el muelle El Waffe, que ha sido desde hace muchos años una fuente de recursos económicos para la comunidad aledaña (Alcaldía Distrital de Turbo, 2020), ya que, a pesar de no considerarse como un puerto; este sitio, tradicionalmente, permite un tráfico diario de pasajeros y mercancías, entrantes y salientes para diferentes zonas del Caribe y Pacífico

colombiano, lo cual ha generado alteraciones en el ecosistema producto de vertimientos (Salas-Tovar & Murillo-Hinestroza, 2013). Los entes gubernamentales del distrito han emprendido acciones para la renovación urbanística de este muelle y sus alrededores con el fin de mejorar la movilidad, calidad de vida de los habitantes y la perspectiva positiva de los viajeros (Alcaldía Distrital de Turbo, 2020). No obstante, en Colombia, son pocas las investigaciones realizadas a nivel de biorremediación en ambientes marino-costeros y la mayoría se han centrado en la parte norte de la costa Caribe colombiana, especialmente en la Bahía de Cartagena (Echeverri-Jaramillo et al., 2010).

Precisamente, algunos de los métodos y estrategias conocidas para la remoción de hidrocarburos reportadas por distintos autores como Gómez-Mellado et al. (2020), Quiceno-Pérez y Ríos-Osorio (2014), se han realizado a través de métodos físicos como la adsorción por carbón activado, o métodos químicos como la extracción con solventes y oxidación química; los métodos biológicos, aunque menos populares, se han aplicado con microorganismos aerobios y anaerobios (Ma et al., 2011; Orozco-Zárate, 2021). En la estrategia de remediación, se pueden utilizar diferentes técnicas por separado o en combinación para lograr una mayor eficiencia de remoción del contaminante. Entre las diversas técnicas físicas, químicas y biológicas, la biodegradación por agentes microbianos como bacterias u hongos es considerada actualmente la alternativa menos costosa para transformar los contaminantes (Barrios-San Martín, 2011). Se han reportado una gran variedad de microorganismos capaces de utilizar los hidrocarburos como única fuente de carbono, en las cuales se pueden encontrar: *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens* (Muthukumar et al., 2023), *Rhodococcus* spp. (Chirre-Flores et al., 2019), *Bacillus pumilus*, *Serratia marcescens* (Pardo-Castro et al., 2004), *Klebsiella* spp. (Rabelo-Florez & Márquez-Gómez, 2020) y *Enterobacter* spp. (Haritash & Kaushik, 2009).

La OMI ha publicado lineamientos para intervenir en un eventual derrame de hidrocarburos, aunque las organizaciones y/o instituciones estatales tienen la potestad de decidir cómo y a través de qué metodología subsanar, parcial o totalmente,

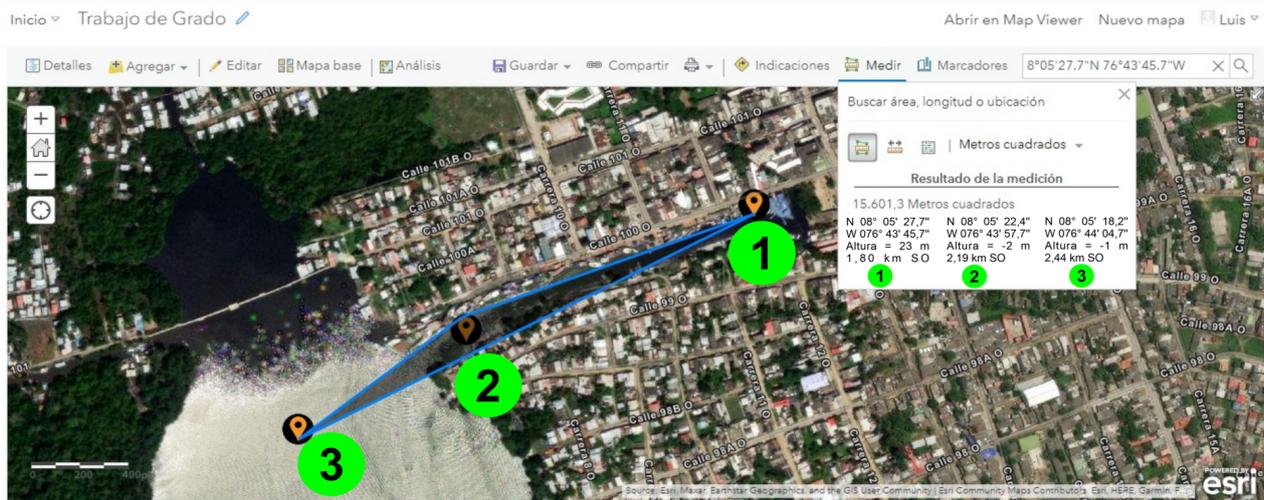
la contaminación de un ambiente natural. Así, es necesario analizar la relación de las políticas medioambientales de Colombia para identificar las posibles rutas que propicien el desarrollo de nuevos proyectos de investigación en aras de fortalecer el conocimiento técnico y la aplicación de la biorremediación en áreas afectadas por derrames de hidrocarburos en el territorio nacional, así como lo establece el Convenio sobre la Diversidad Biológica y el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) - Colombia Potencia Bioceánica Sostenible; los cuales, a través del diagnóstico, reconocen la falta de información de muchas bases de datos, estudios y aprovechamiento de las regiones asociadas y cercanas al canal de Panamá y las zonas costeras del Pacífico y Caribe colombiano. De igual manera, se reconocen los ambientes marinos y estuarinos como hábitats fundamentales en el desarrollo de gran variedad de especies, planteando múltiples estrategias y compromisos para su restauración y aprovechamiento sostenible (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 1992; Orozco-Zárate, 2021).

Pese a que existe literatura que describe los microorganismos con potencial biodegradador de hidrocarburos y políticas relacionadas al uso de técnicas de biorremediación en zonas costeras contaminadas, el Distrito de Turbo no cuenta con estudios o proyectos que confirmen su presencia y mitiguen su impacto en los sitios contaminados con este compuesto; y, en consecuencia, esta investigación tiene como objetivo determinar el potencial biodegradador de hidrocarburos por bacterias cultivables presentes en aguas del muelle El Waffe de Turbo, Antioquia, y el análisis de las políticas ambientales a nivel nacional encaminadas a la biorremediación en zonas costeras.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Proceso de muestreo

Para la toma de muestra, se seleccionaron tres puntos para la recolección de sedimento marino en la zona del Waffe del Distrito de Turbo, Antioquia, basándose en el Manual de Técnicas Analíticas para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos y Contaminantes Marinos (INVEMAR, 2003). Entre punto y punto, había alrededor de 100 m de diferencia en forma de zigzag (figura 1). Es



**Figura 1.** Mapa de coordenadas geográficas de los tres sitios de muestreo:  $8^{\circ}05'27.7''N$   $76^{\circ}43'45.7''W$ ;  $8^{\circ}05'22.4''N$   $76^{\circ}43'57.7''W$ ;  $8^{\circ}05'18.2''N$   $76^{\circ}44'04.7''W$ .

importante aclarar que, se hizo un único muestreo en horas de la mañana, donde generalmente se presenta marea baja.

Se utilizó una draga Van Veen SG para la toma de sedimento marino; esta fue lanzada tres veces con el fin de obtener porciones diferentes de la muestra que luego se compusieron. La anterior, se almacenó en bolsas resellables estériles dejando una capa de aire en su interior.

El parámetro de transparencia del agua, en cada uno de los puntos de muestreo, se determinó por triplicado utilizando un disco *secchi*. A partir del método de referencia SM 2550 B (APHA, 2012), la temperatura ambiente fue medida por triplicado con un termómetro de mercurio, con el fin de tener un promedio en el tiempo de dicha variable. Adicional, se tomaron muestra de agua marina a 20 cm de la superficie, a la cual se le determinó, *in situ*, pH (HATCH®). Para las muestras de sedimento, el pH se determinó en laboratorio siguiendo el método de referencia SM 4500 H+B (APHA, 2012). Todas las muestras fueron transportadas a una temperatura entre 4–8 °C hasta el laboratorio de la Universidad de Antioquia, sede Apartadó, donde fueron procesadas de forma inmediata.

### Presión selectiva

Con el fin de aislar las bacterias con capacidad de degradar los componentes derivados de los hidrocarburos, se realizó un ensayo de presión selectiva, adaptando la metodología del Protocolo

del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR, denominado “*Bacterias Marinas Nativas Degradadoras de Compuestos Orgánicos Persistentes en Colombia*” (Gómez et al., 2006). Así, las muestras de sedimento de cada punto se analizaron por triplicado, haciendo un enriquecimiento inicial con 450 mL de agua marina recolectada y 50 g de muestra. Luego, se transfirieron 5 mL de las muestras decantadas a 45 mL de caldo nutritivo que fueron sometidos a 150 rpm a 28 °C, durante siete días. Posteriormente, se transfirió 5 mL de la muestra a 45 mL de medio mínimo (2,4 g/mL NaCl, 0,07 g/mL KCl, 0,1 g/mL  $NH_4NO_3$ , 0,2 g/mL  $K_2HPO_4$ , 0,3 g/mL  $Na_2HPO_4$ , 0,1 g/mL  $MgSO_4$  en 1000 mL de  $H_2O$ ) suplementado con hidrocarburos al 1% constituido por una mezcla de 2,4% v/v de aceite de motor en gasolina corriente, siendo este componente la única fuente de carbono y que brinda un color rojizo al medio. Nuevamente, se llevó durante 7 días a 150 rpm y 28 °C. Este último paso se repitió una vez más.

Los tratamientos denominados T1, T2 y T3 corresponden a los microorganismos con potencial aislados del punto de muestreo 1, 2 o 3, respectivamente. Además, se utilizaron controles para comparar los resultados: T4 como control negativo con agua destilada estéril, T5 control con agua marina sin esterilizar, T6 control positivo con *Pseudomonas aeruginosa*, T7 control negativo del medio mínimo mineral salino, y T8 control negativo con medio mínimo mineral salino + 1% de hidrocarburo.

## Aislamiento de colonias en medio axénico

A partir de las muestras, se realizó una siembra en superficie, y los morfotipos con características macroscópicas diferentes fueron aislados en agar nutritivo, con el fin de obtener cultivos axénicos y caracterizarlos. A cada uno se le realizó tinción de Gram, descripción macroscópica de la colonia con relación a la forma, borde, superficie, textura y elevación, así como la descripción microscópica. Por su parte, se desarrolló una búsqueda de literatura referente a reportes de biodegradación de hidrocarburos en zonas costeras donde se describen los respectivos géneros bacterianos aislados, con el fin de hacer una posible identificación por comparación.

A la vez, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica enfocada en estudios o investigaciones realizadas entre 2010 y 2023, centradas en la bioprospección de zonas marino-costeras. El objetivo era identificar comunidades con potencial para la biodegradación de hidrocarburos. Se utilizaron las siguientes bases de datos bibliográficas y motores de búsqueda, como ScienceDirect, Scielo, Redalyc, PubMed, EBSCO y Scopus. Durante el proceso, se definieron palabras clave y combinaciones de estas para obtener el mayor número posible de publicaciones relacionadas, tales como: biorremediación, hidrocarburos, sedimentos en Colombia y biodegradación. Estas palabras clave se utilizaron al realizar las búsquedas en las bases de datos y revistas indexadas, seleccionando artículos originales, tesis y resúmenes que proporcionaran datos y estudios propios relacionados con técnicas de degradación microbiana, fitorremediación, degradación enzimática, biorremediación *in situ*, biorremediación *ex situ* y biorremediación en sedimentos. Se excluyeron aquellos registros que no brindaban información relevante sobre la biorremediación de hidrocarburos o no cumplían

con las condiciones y parámetros similares a los de esta investigación, como aquellas revisiones y artículos sobre biorremediación en suelos.

## Revisión de normatividad

Adicionalmente, se buscaron normatividades o políticas gubernamentales, así como planes de gobierno que involucren o relacionen la biorremediación, biodegradación o estudios sobre biodiversidad biológica enfocada a hidrocarburos en el territorio colombiano, segmentado al Distrito de Turbo, Antioquia.

La información anterior se organizó y caracterizó desde el ámbito nacional hasta el distrital, en una estructura jurídica escalonada basada en la Pirámide Kelseniana (Galindo-Soza, 2018).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Muestreo

Los parámetros físicos obtenidos en los tres puntos muestreados (tabla 1), fueron comparados con los valores de pH y de Oxígeno Disuelto (OD) del ICAM (Indicador de Calidad de Agua Marítima), sugiriendo que, las aguas estuarinas de la zona analizada al presentar valores de pH de 7 y OD menores a 5 mg/L, son consideradas como aguas inadecuadas para el desarrollo de la flora y fauna marina (Vivas-Aguas & Navarrete-Ramírez, 2014). Esto apunta a que, posiblemente el ecosistema está siendo afectado por contaminantes presentes en la zona muestreada, que pueden ser derivados de las actividades antrópicas de la zona costera, sea de fuentes domésticas o industriales. Esto concuerda con lo descrito y concluido por Salas-Tovar y Murillo-Hinestroza (2013) y Murillo-Hinestroza et al. (2017), cuyos análisis de los parámetros de calidad fisicoquímica de la Bahía de Turbo,

**Tabla 1.** Resultados de los puntos de muestreo 1, 2 y 3, ubicados de forma equidistante entre sí

Parámetro	Punto de muestreo 1	Punto de muestreo 2	Punto de muestreo 3	Promedio de la zona analizada
Turbidez (Disco Secchi)	0,70 m	0,70 m	0,75 m	0,72 m
Temperatura	28 °C	27 °C	27 °C	27 °C
pH	8	7	7	7

muestran que los indicadores de contaminantes aportados por el muelle dan lugar a un mayor aporte de contaminantes a la bahía turbeña (Salas-Tovar & Murillo-Hinestroza, 2013).

Los datos encontrados sugieren que, en la zona de El Waffe, la persistencia de aguas con bajo OD no favorece el desarrollo de las comunidades biológicas, situación que se daría por la presencia de gran cantidad de material orgánico en el agua y el constante depósito de residuos sólidos producto de las actividades antrópicas y a las características lénticas del mismo (Murillo-Hinestroza et al., 2017).

Los impactos en el ecosistema también se reflejan en los estudios de parámetros fisicoquímicos realizados en las zonas cercanas al muelle El Waffe (tabla 2). Estos estudios revelan cambios en los resultados al comparar las épocas de mareas altas y bajas. Es importante destacar que, esta característica léntica del ecosistema ha llevado a valores de OD por debajo de 3 mg/L (Salas-Tovar & Murillo-Hinestroza, 2013). A la par, estos estudios informan sobre valores de OD, conductividad y sólidos disueltos en diversas condiciones de marea, mostrando variaciones en la calidad del agua. Estos resultados resaltan la importancia de abordar los

**Tabla 2.** Parámetros físicos reportados en diversos estudios realizados en la Bahía de Turbo, Antioquia

Parámetro	Marea	Resultado	Referencia
OD (mg/L)	No aplica	0,6	Gómez-Cataño et al. (2007)
OD (mg/L)	Baja	3,8	Salas-Tovar y Murillo-Hinestroza (2013)
	Alta	2,4	
Conductividad (µs/cm)	Baja	15.749,0	
	Alta	26.752,0	
Sólidos Disueltos (mg/L)	Baja	8892,0	
	Alta	16.256,6	
	No aplica	37,0	Gómez-Cataño et al. (2007)

impactos ambientales en el área, y evidencia la necesidad de implementar medidas para el manejo y conservación del ecosistema marino-costero.

Es importante aclarar que, al relacionar los datos físicos encontrados (tabla 1), evidencian unas condiciones del ecosistema que son complementadas con los parámetros fisicoquímicos (tabla 2), los cuales sugieren unas características del medio que afectan el crecimiento y el desarrollo de la diversidad biológica (Gao et al., 2015). Asimismo, al llevar a cabo un muestreo compuesto de sedimento en cada punto o tratamiento, se pudo eliminar la variable de las condiciones de mareas altas y bajas; adicionalmente, el ecosistema estudiado no presentó las mismas profundidades que han sido documentadas por otros investigadores (tabla 2), lo que facilita una perspectiva más amplia del comportamiento biológico en este ecosistema objeto de estudio.

Entre tanto, los sedimentos en ambientes acuáticos son cruciales en la gestión de la contaminación por hidrocarburos derivados del petróleo, debido

a que funcionan como un sumidero significativo de compuestos orgánicos; es decir, tienen la capacidad de absorber y retener los compuestos contaminantes, alterando los parámetros fisicoquímicos de los ecosistemas afectados (Buskey et al., 2016; Echeverri-Jaramillo et al., 2010).

### Aislamientos

En cuanto a los tratamientos, T1, T2 y T3, presentaron cambio de color en el medio de cultivo líquido, siendo comparados con los controles negativos con agua estéril, medio mínimo salino e hidrocarburos. Para T1 se observaron partículas suspendidas de un color café, así como de un color rojizo; para T2 y, el T3 se detectó un flóculo de colores blanco y rojizo en el sobrenadante, cambios en las tonalidades que sugieren actividad biológica en los tres puntos de muestreos. Sin embargo, para confirmarse una degradación de hidrocarburos, se requiere aplicar metodologías de cuantificación como la efectuada por Chen et al. (2023b). No obstante, el crecimiento bacteriano detectado allí, sugiere una transformación del hidrocarburo.

Por su parte, el T5 viró levemente de color, evidenciando la presencia del anillo de hidrocarburo; partiendo que, la naturaleza del medio es un color rojizo en la parte superior, el tratamiento tendió a una formación de anillo de color fucsia, sugiriendo que el agua marina no esterilizada puede contener algún componente biológico que interactuó con el hidrocarburo, así como la presencia de biosurfactantes descritos por Bilen-Ozyurek (2023), Rabelo-Florez y Márquez-Gómez (2020). Para el caso del T6 con *Pseudomonas aeruginosa*, como control positivo, se registró un cambio de tonalidad con presencia de partículas suspendidas que apunta a una actividad por parte de la biomasa y que se relacionaría a la degradación del anillo de hidrocarburo, comportamiento similar que se evidenció en los tratamientos T1, T2 y T3, lo cual sugiere degradación parcial del hidrocarburo por parte de microorganismos presentes en los tres primeros tratamientos (Chen et al., 2023a;

Galindo-Soza, 2018).

Por su parte, T4 no presentó cambio de color en el medio, no hay presencia de partículas suspendidas. De la misma manera, T7 y T8 tampoco presentaron cambios en el medio, ni se deformó el anillo de hidrocarburos, se mantuvo de un color fucsia y sin adherencia a las paredes del recipiente. Este resultado confirma la actividad biológica en los demás tratamientos que presentan alteraciones en el medio, conllevando a un posible potencial o tolerancia por parte de estos microorganismos ante dicho contaminante (Chen et al., 2023a; Galindo-Soza, 2018; Echeverri-Jaramillo et al., 2010).

En consecuencia, a partir del proceso de presión selectiva, se logró el aislamiento exitoso de 11 morfotipos con características macro o microscópicamente diferentes a partir de los tres tratamientos (tabla 3).

**Tabla 3.** Descripción micro y macroscópica de morfotipos aislados con su respectiva codificación según el tratamiento

N.º	Codificación	Descripción Microscópica	Descripción Macroscópica
1	T1 -3,1 morfo 1	Bacilos Gram negativos	UFC grandes (extensa en la caja de petri) de color blanco con una textura seca
2	T1 -3,1 morfo 2	Cocos Gram positivos, agrupados	Colonias con borde definido blanco de textura cremosa
3	T1 -4,2 morfo 3	Cocos Gram positivos	Colonias elevadas blanco cremoso en el borde y rojizo en el centro
4	T1 -4,3	Bacilos Gram negativos	Se observa crecimiento de diferentes colonias de forma convexa blancas y cremosas
5	T1 -5,1	Bacilos cortos Gram negativos	Presenta colonias blanco cremoso en el borde y rojizo en el centro
6	T2 -4,1	Cocos Gram negativos	Colonias color blanco, con crecimiento rizoide
7	T2 -4,2	Bacilos en cadena con esporas blancas en el interior Gram negativos	Colonias cremosas de color blanco en su alrededor y café claro en el centro
8	T2 -5,1	Bacilos cortos Gram negativos	Colonia grande beige con crecimiento rizoide
9	T2 -5,3	Cocos Gram negativos	Crecimiento de colonias aisladas blanco cremoso en el borde y rojizo en el centro
10	T3 -3,2	Bacilos en cadena Gram negativos, colonias aparentan ser secas	Colonias grandes transparentes con producción de exopolisacáridos
11	T3 -3,2	Bacilos filamentosos Gram negativos	Colonias de tamaño medio, de color blanco con textura seca y borde definido

De los 11 morfotipos, nueve corresponden a una tinción Gram negativa y con una estructura de bacilos y cocos, siendo congruente con lo encontrado en la literatura investigada e ilustrada (tabla 4). Entre tanto, los cocos Gram negativos hallados (tabla 3), se describen comúnmente como patógenos, coincidiendo con el ecosistema que está contaminado por compuestos orgánicos y aguas residuales domésticas y no domésticas, resultando en una alta diversidad de microorganismos patógenos interviniendo en el medio (Chirre-Flores et al., 2019; Gómez-Mellado et al., 2020; Narváez-Flórez et al., 2008).

De igual manera, en los morfotipos seis y nueve, al ser microorganismos descritos en la literatura como patógenos, se puede inferir que las condiciones del ecosistema favorecen el crecimiento de estas especies; y, se han adaptado para sobrevivir bajo el contaminante. Así, estudios de biodegradación de hidrocarburos como el de Guzmán y Miluska (2002), sugieren que podría encontrarse en condiciones favorables para viabilizarse en forma de consorcio microbiano. A la vez, Carrasco-Cabrera (2007) reportó en su investigación la presencia de cocos Gram negativos, identificados mediante el sistema BIOLOG®. En los dos casos mencionados, coinciden con la presente investigación, donde también primó la presencia de bacilos Gram negativos y en menor proporción la presencia de cocos Gram negativos. Sin embargo, sugerimos efectuar en siguientes investigaciones, monitoreos en distintas épocas del año para reconfirmar este hallazgo.

Al ser los hidrocarburos una amplia gama de compuestos tóxicos, que presentan diversas estructuras complejas, es probable que en los espacios contaminados con éstos, se hallen poblaciones microbianas al momento de hacer un análisis filogenético o el aislamiento de cepas cultivables, obteniéndose una gran variedad de géneros bacterianos que actúan en consorcio para la degradación y aprovechamiento del contaminante como sustrato (Wang & Tam, 2011).

De acuerdo con lo anterior, los morfotipos encontrados según su relación macro y microscópica, obedecen a las descripciones de los microorganismos cultivables encontrados y aislados en sedimentos del Caribe y Pacífico de Colombia, reportados por Narváez-Flórez et al. (2008). De igual manera, usando una metodología similar a la desarrollada

en la presente investigación (Abubakar et al., 2024; Varjani, S., 2017), han encontrado géneros microbianos con capacidad biodegradadora de hidrocarburos como *Klebsiella* sp., *Flavimonas* sp., *Ralstonia* sp., *Brevibacillus* sp., *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Kluyvera* sp., *Acinetobacter* sp., *Rahnella* sp. y *Stenotrophomonas* sp. *Rhodococcus* spp. (Braibant-Wayens, 2004; Chen et al., 2023a; Cui et al., 2016).

Estas bacterias y su actividad en la degradación de compuestos orgánicos se han descrito con anterioridad en estado de consorcios, por lo cual se recomienda el uso de cultivos mixtos para realizar procesos de biodegradación, ya que el presente trabajo se limitó a la determinación del potencial o tolerancia que presentan los microorganismos ante los hidrocarburos (Gao et al., 2015). En los artículos referentes a degradación de este componente, el grupo taxonómico dominante tanto en análisis filogenéticos como en bacterias cultivables es el de Proteobacterias, hallándose también otros taxones tales como Firmicutes, Actinomycetota y Bacillota. En consecuencia, los diferentes trabajos muestran géneros como *Pseudomonas* sp., *Erythrobacter* sp., *Glaciecola* sp., o *Alteromonas* sp., así como la clase de Gammaproteobacterias y con tinción Gram negativa, sugiriendo ser lo más común en los aislamientos realizados y encontrados en la presente investigación (Ramírez et al., 2020).

Por otro lado, la búsqueda de literatura relacionada con la presente investigación (tabla 4), apuntan a que, en general las condiciones fisicoquímicas naturales del territorio colombiano favorecen la proliferación de microorganismos con un potencial biodegradador de hidrocarburos; sugiriendo de esta manera que, es altamente probable que estas especies reportadas por los diferentes autores también se encuentren presentes en los tres sitios analizados, partiendo de que, las condiciones naturales y actividad antrópica son similares a lo largo de la zona costera del Caribe. Sin embargo, se hace necesario evaluar las condiciones climáticas en el momento de un futuro muestreo, pues puede conllevar a cambios en densidad poblacional o tipo de microorganismos potenciales degradadores (Gómez et al., 2006; Wang & Tam, 2011).

## Normatividad

La normativa analizada y descrita en la presente investigación (tabla 5), muestra que, Colombia

**Tabla 4.** Artículos de investigación relacionados con la búsqueda de microorganismos con potencial de biodegradación de hidrocarburos

Autores	Año	Ciudad / Lugar	Tipo de metodología aplicada	Microorganismos reportados
Gómez et al.	2006	Caribe y Pacífico colombiano	Aislamiento, recuento y conservación	<i>Klebsiella</i> sp., <i>Ralstonia</i> sp., <i>Brevibacillus</i> sp., <i>Bacillus</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.
Wang y Tam	2011	Flotante N.º 3 de Yiu Lian en Hong Kong	Aislamiento en Medio Mínimo Salino (MSM) y electroforesis	Bacterias Gram negativas
Dell'Anno et al.	2012	Puerto de Ancon	Bioestimulación	<i>Chloroflexi</i> , <i>Firmicutes</i> , <i>Gammaproteobacteria</i> , <i>Alphaproteobacteria</i> , <i>Verrucomicrobia</i>
Ganesh-Kumar et al.	2014	Bahía de Bengala	Aislamiento en MSM	<i>Pseudoalteromonas</i> sp., <i>Rugeria</i> sp., <i>Exiguobacterium</i> sp. y <i>Acinetobacter</i>
Gao et al.	2015	South Mid-Atlantic Ridge	Bioestimulación	Filos, Proteobacteria, Actinobacteria y Firmicutes
Sukhdhane et al.	2019	Thane Creek, Mumbai	Aislamiento en MSM	<i>Bacillus mojavensis</i> , <i>Bacillus firmus</i> , <i>Bacillus flexus</i> , <i>Bacillus vietnamensis</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>
Hamdan et al.	2019	Costa de Beirut, Líbano	Bioestimulación	Proteobacterias, Géneros: <i>Arthrobacter</i> sp., <i>Glaciecola</i> sp., <i>Psychrosphaera</i> sp., <i>Alteromonas</i> sp. y <i>Pseudomonas</i> sp.
Ramírez et al.	2020	Golfo de México	Aislamiento y Identificación genética	Filo proteobacteria siendo <i>Gammaproteobacteria</i> el género dominante otros <i>Firmicutes</i>

cuenta con legislación que regula y protege los ecosistemas marino-costeros, previniendo factores como los vertimientos desmesurados que afectan integralmente a la biodiversidad; y también, se establecen mecanismos para su conservación. Por su parte, a nivel Distrital y acogiéndose a la normatividad nacional, se encuentra con que Turbo busca recuperar sus zonas costeras implementando acciones físicas como el retiro de sedimento marino y trabajos de infraestructura en zonas aledañas, a la vez que se está apuntando al embellecimiento paisajístico y sensibilización o pedagogía ciudadana para la preservación del ecosistema, según lo descrito en el Plan Desarrollo denominado Turbo

Ciudad Puerto. Paralelamente, la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá, quienes en alianza con el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), establecen el programa denominado RedCAM, siendo una herramienta para el monitoreo y seguimiento de los parámetros fisicoquímicos de las aguas marinas del Golfo de Urabá (INVEMAR, 2023a). Allí, hay datos que confirman que las zonas costeras del Urabá antioqueño cuentan con presencia de hidrocarburos (Vivas-Aguas & Navarrete-Ramírez, 2014); sin embargo, pese a que hay argumento técnico validado para generar investigaciones, no se encontró a nivel local políticas específicas

**Tabla 5.** Normatividades o políticas relacionadas a los hidrocarburos vigentes en Colombia

Nombre del documento	Vigencia	Autores	Línea o Enfoque de Interés
Plan Nacional de Desarrollo Colombia, Potencia Mundial de la Vida	2022-2026	Departamento Nacional de Planeación (2022)	Capítulo 4, catalizador A, literal b. Conservación de del patrimonio natural mediante el fortalecimiento de estrategias para evitar la alteración y destrucción de sus áreas protegidas y ecosistemas estratégicos y avanzará en su restauración
Ley 99 de 1993	1993-Presente	Congreso de Colombia	Establece el marco legal para la gestión ambiental en Colombia y establece la protección y recuperación de los ecosistemas costeros como una prioridad para el país.
Decreto 1076 de 2015	26 de mayo de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Artículo 2.2.3.3.4.14. Plan de Contingencia para el Manejo de Derrames Hidrocarburos o Sustancias Nocivas.
Resolución 1207 de 2014	25 de julio de 2014	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Establece los valores máximos permisibles para el vertimiento de aguas tratadas y residuales
CONPES 3990 - Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia	2020-2030	Departamento Nacional de Planeación - DNP (2020)	Colombia Potencia Bioceánica Sostenible 2030. Conocimiento, investigación y cultura marítima Línea 3
Primera Actualización Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres 2022	2015-2030	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD]	Fenómeno: Origen tecnológico. Evento asociado: Derrames de hidrocarburos
Plan de Acción Institucional Corpouraba	2020-2023	Corpouraba	Línea estratégica 2. Conservación de la Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos
Resolución 0704 del 2020	2020-2030	Dirección General Marítima - DIMAR	Organiza los Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe y el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico
Plan de Desarrollo Turbo Ciudad Puerto	2020-2023	Alcaldía Distrital de Turbo	Pilar 2 - Turbo ciudad Puerto - Zona 1 Ciudad Futuro
PICIA Plan Institucional Cuatrienal de Investigación Ambiental	2023-2026	INVEVAR (2023b)	Diagnóstico de las necesidades de investigación e información ambiental

relacionadas a la promoción de la biorremediación de estos ecosistemas.

Dado los resultados de la presente investigación, que conlleva a un aislamiento de especies con un potencial biodegradador, y siguiendo las nuevas líneas políticas de Colombia referidas en el Plan de Desarrollo Colombia Potencial

de Vida, este trabajo aporta a la generación de nuevo conocimiento que servirá como base sólida para futuras intervenciones centradas en la biorremediación de ecosistemas marino-costeros afectados por derivados de los hidrocarburos.

Es importante resaltar, que durante la investigación se encontraron dificultades por los cambios de clima durante el mismo día de muestreo; por lo

tanto, se puede sugerir para futuras investigaciones considerar estaciones de monitoreos para analizar el comportamiento de las especies en el tiempo. Sin embargo, los hallazgos reportados pueden ser usados en estrategias de salud ambiental para mitigar el impacto que se genera ante un eventual derrame, además de contribuir en la promoción de la protección, recuperación y conservación de los ecosistemas marino-costeros, dando cuenta de la presencia de especies o consorcios microbianos que habitan en las costas colombianas con este particular potencial fisiológico.

## CONCLUSIONES

El presente estudio sugiere que en el muelle El Waffe ubicado en el Distrito de Turbo, Antioquia, existen bacterias que cuentan con una tolerancia para crecer en medios con hidrocarburos compuestos por una mezcla entre gasolina comercial y aceite para motor. Esta tolerancia de las bacterias cultivables se convierte en un área de interés para evaluar un potencial biodegradador de compuestos derivados del petróleo, generando una posible aplicación para procesos de biorremediación del ambiente marino-costero del Caribe y Pacífico colombiano contaminado por petróleo.

A nivel nacional, existen lineamientos con enfoques ambientales donde se pretende apoyar proyectos de investigación, incluyendo los de generación de nuevo conocimiento, con miras a la preservación de los ecosistemas o hábitats, la bioprospección y la bioeconomía para la recopilación de información y el uso de éstas como herramienta para generar productos biológicos en la remediación de ambientes contaminados. Así como también, medidas para la mitigación de impactos ambientales negativos y la conservación de la biodiversidad.

Por su parte, a nivel distrital, no existen proyectos ligados directamente a la reparación del ecosistema contaminado por métodos biológicos, sólo se tiene en cuenta intervenciones físicas y de alivio temporal como el retiro de sedimento marino a lo largo de la zona costera afectada y transformación paisajística para favorecer al tránsito marítimo. Debido a esto, se han presentado pocos cambios en los parámetros fisicoquímicos de estudio en las aguas del muelle El Waffe de Turbo.

Finalmente, derivado de la escasa información biológica existente de un sitio como el muelle El

Waffe, este trabajo puede ser la base para futuras investigaciones relacionadas con la composición microbiológica de las zonas marino-costeras del Urabá antioqueño y su posible aplicabilidad en procesos de biorremediación de compuestos derivados de los hidrocarburos, así como la puesta en marcha de técnicas con consorcios microbianos que sirvan en la recuperación de estos ecosistemas de gran valor biológico.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de Antioquia por apoyarnos como jóvenes estudiantes en todo el grado. A nuestros asesores por su orientación y paciencia. Al grupo de investigación de la Escuela de Microbiología Salud y Sostenibilidad por respaldar la presente investigación.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Luisa María Múnera-Porras y John Alexander García-Giraldo participaron en la orientación metodológica y asesoría en el proceso de investigación. Además, Múnera-Porras contribuyó en la redacción y corrección del escrito. Aldair Banguera-González y Luis Alberto Jiménez-Medina propusieron el tema de investigación, así como llevaron a cabo la implementación, realización de los experimentos, toma de muestras, análisis in situ y procesamiento en laboratorio. Asimismo, se encargaron de redactar y corregir el texto. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del artículo.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto alguno de interés.

## REFERENCIAS

- Abubakar, A., Abioye, O. P., Aransiola, S. A., Maddela, N. R., & Prasad, R. (2024). Crude oil biodegradation potential of lipase produced by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from hydrocarbon contaminated soil. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 6, 26-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.12.001>
- Alcaldía Distrital de Turbo (2020). *Plan de Desarrollo Turbo Ciudad Puerto 2020 - 2023*. <https://www.turbo-antioquia.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/Plan-de-Desarrollo-Turbo-Ciudad->

- Puerto-2020-2023.aspx
- APHA (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water* (22nd Ed.). American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Barrios-San Martín, Y. (2011). Bioremediation: A tool for the management of oil pollution in marine ecosystems. *Biotecnología Aplicada*, 28(2), 69-76.
- Bilen-Ozyurek, S. (2023). Enhanced petroleum removal with a novel biosurfactant producer consortium isolated from drilling cuttings of offshore Akçakoca-5 in the Black Sea. *Geoenergy Science and Engineering*, 231, 212348. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212348>
- Braibant-Wayens, C. (2004). *Estudio del potencial de degradación de los hidrocarburos por Acinetobacter sp. y Pseudomonas putida para su aplicación en la biorremediación de suelos contaminados* [Tesis de especialización, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/2238/206>
- Buskey, E. J., White, H. K., & Esbaugh, A. J. (2016). Impact of oil spills on marine life in the Gulf of Mexico: Effects on plankton, nekton, and deep-sea benthos. *Oceanography*, 29(3), 174-181. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2016.81>
- Carrasco-Cabrera, D. G. (2007). *Aislamiento e identificación de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos, comprobando su actividad enzimática* [Tesis de pregrado, Universidad San Francisco de Quito]. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/569>
- Chen, C., Zhang, Z., Xu, P., Hu, H., & Tang, H. (2023a). Anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Research*, 223, 115472. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115472>
- Chen, S.-C., Musat, F., Richnow, H.-H., & Krüger, M. (2023b). Microbial diversity and oil biodegradation potential of northern Barents Sea sediments. *Journal of Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.12.010>
- Chirre-Flores, J., Patiño-Gabriel, A., & Erazo-Erazo, R. (2019). Estudio de la biodegradación de residuos de aceite lubricante retenidos en bentonita usando el consorcio bacteriano oil eating microbes (*Rodhococcus*, *Pseudomonas* y *Bacillus*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(2), 163-174. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v85i2.75>
- Corpouraba. (2020). Plan de Acción Institucional (PAI) 2020 – 2023. *Desde el páramo hasta el mar, construimos el desarrollo sostenible regional*. <https://corpouraba.gov.co/wp-content/uploads/2023/11/PLAN-DE-ACCION-2020-2023.pdf>
- Cruz F., Sergio A., & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (3 de mayo de 2022). Respuesta a su oficio radicado ANLA 2022071653-1-000 del 17 de abril de 2022, Solicitud información derrames de hidrocarburos y acceso a la aplicación RedCam. En A\_1804529\_2022428A1. Radicado ANLA: 2022084326-2-000.
- Cui, Z., Gao, W., Xu, G., Luan, X., Li, Q., Yin, X., Huang, D., & Zheng, L. (2016). *Marinobacter aromaticivorans* sp. nov., a polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium isolated from sea sediment. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66(1), 353-359. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.000722>
- Decreto 1076 de 2015 [Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo de 2015.
- Dell'Anno, A., Beolchini, F., Rocchetti, L., Luna, G. M., & Danovaro, R. (2012). High bacterial biodiversity increases degradation performance of hydrocarbons during bioremediation of contaminated harbor marine sediments. *Environmental Pollution*, 167, 85-92. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2012.03.043>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo Colombia, Potencia Mundial de la Vida 2022 - 2026*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2020). *CONPES 3990 – Colombia Potencia Bioceánica Sostenible 2030*. <http://www.cco.gov.co/83-publicaciones/794-conpes-colombia-potencia-bioceanica-sostenible.htm>
- Echeverri-Jaramillo, G. E., Manjarrez-Paba, G., & Cabrera-Ospino, M. (2010). Aislamiento de bacterias potencialmente degradadoras de petróleo en hábitats de ecosistemas costeros en la Bahía de Cartagena, Colombia. *Nova*, 8(13), 76-86. <https://doi.org/10.22490/24629448.441>
- El Universal. (2013). *1.100 galones de combustible cayeron al Golfo de Urabá*. <https://www.eluniversal.com.co/ambiente/1100-galones-de-combustible-cayeron-al-golfo-de-uraba-115560-BSEU202605>
- Galindo-Soza, M. (2018). La pirámide de Kelsen o jerarquía normativa en la nueva CPE y el nuevo derecho autonómico. *Revista Jurídica Derecho*, 7(9), 126-148.
- Ganesh Kumar, A., Vijayakumar, L., Joshi, G., Magesh Peter, D., Dharani, G., & Kirubakaran, R. (2014). Biodegradation of complex hydrocarbons in spent engine oil by novel bacterial consortium isolated from deep sea sediment. *Bioresource Technology*, 170, 556-564. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.08.008>
- Gao, X., Gao, W., Cui, Z., Han, B., Yang, P., Sun, C., & Zheng, L. (2015). Biodiversity and degradation potential of oil-degrading bacteria isolated from deep-sea sediments of South Mid-Atlantic Ridge. *Marine Pollution Bulletin*, 97(1-2), 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.011>

- org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.065
- Gómez, M., Vivas, L., Ruiz, R., Reyes, V., & Hurtado, C. (2006). *Bacterias marinas nativas degradadoras de compuestos orgánicos persistentes en Colombia. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR - Santa Marta. 32 p. (Serie de publicaciones generales No. 19)* [Archivo PDF]. <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2018/12/0019-BacteriasMarinasNativas.pdf>
- Gómez-Cataño, J. F., Ortiz-Baquero, E., & Correa-Rendón, J. D. (2007). *Establecimiento de los objetivos de calidad requerimiento de los planes de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV) a las entidades prestadoras del servicio de alcantarillado de la jurisdicción de Corpouraba* [Archivo PDF]. [http://www.corpouraba.gov.co/sites/default/files/objetivoscalidadgua\\_turbo\\_currulao\\_y\\_grande.pdf](http://www.corpouraba.gov.co/sites/default/files/objetivoscalidadgua_turbo_currulao_y_grande.pdf)
- Gómez-Mellado, A. Y., Morales-Bautista, C. M., De la Garza-Rodríguez, I. M., Torres-Sánchez, S. A., & Sánchez-Lombardo, I. (2020). Evaluation of two remediation techniques applied to a site impacted by petroleum production waters. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 77-89. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.564>
- Guzmán, E., & Miluska, R. (2002). *Biodegradación de crudo de petróleo en terrarios*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2578/Escalante\\_gr.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/2578/Escalante_gr.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Hamdan, H. Z., Salam, D. A., & Saikaly, P. E. (2019). Characterization of the microbial community diversity and composition of the coast of Lebanon: Potential for petroleum oil biodegradation. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110508. <https://doi.org/10.1016/j.MARPOLBUL.2019.110508>
- Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>
- Hernández-Ruiz, L., Ekumah, B., Asiedu, D. A., Albani, G., Acheampong, E., Jónasdóttir, S. H., Koski, M., & Nielsen, T. G. (2021). Climate change and oil pollution: A dangerous cocktail for tropical zooplankton. *Aquatic Toxicology*, 231, 105718. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105718>
- INVEMAR. (2003). *Manual de Técnicas Analíticas para la Determinación de Parámetros Físicoquímicos y Contaminantes Marinos (aguas, sedimentos y organismos). Instituto de investigaciones marinas y costeras José Benito Vives De Andrés* [Archivo PDF]. <https://acortar.link/yOdaMF>
- INVEMAR. (2023a). *Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras del Caribe y Pacífico colombiano, 2022. Informe Técnico. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM* [Archivo PDF]. <https://www.invemar.org.co/documents/37438/102725/Informe+REDCAM+2022.pdf/9ea74f54-64bb-cd70-4896-4faeddec18e6?t=1701704009120>
- INVEMAR. (2023b). *PICIA Plan Institucional Cuatrienal de Investigación Ambiental 2023 – 2026. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés – INVEMAR* [Archivo PDF]. <https://www.invemar.org.co/documents/37438/112976/PICIA+INVEMAR+2023++2026.pdf/a71dea13-cbe0-f406-8924-50fb9d35c48e?t=1709558126918>
- ITOPF (2024). *Oil Tanker Spill Statistics 2023*. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>
- Kotoky, R., Ogawa, N., & Pandey, P. (2022). The structure-function relationship of bacterial transcriptional regulators as a target for enhanced biodegradation of aromatic hydrocarbons. *Microbiological Research*, (262), 127087. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127087>
- Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre de 1993. D.O. No. 41146.
- Ma, C., Wang, Y., Zhuang, L., Huang, D., Zhou, S., & Li, F. (2011). Anaerobic degradation of phenanthrene by a newly isolated humus-reducing bacterium, *Pseudomonas aeruginosa* strain PAH-1. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 923-929. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0368-x>
- Marín, R. (2014). Principios para el desarrollo de una industria petrolera nacional con proyección internacional. *Revista De Ingeniería*, 0(40), 40-49. <http://dx.doi.org/10.16924/Friua.v0i40.659>
- Minuto 30. (7 de junio de 2010). *El costo de contener el derrame de petróleo ya va en 1.600 millones de dólares*. <https://www.minuto30.com/el-costo-de-contener-el-derrame-de-petroleo-ya-va-en-1-600-millones-de-dolares/5899/>
- Murillo-Hinestroza, Y., Quesada-Martínez, Z., & Vargas-Porras, L. (2017). Evaluación de la calidad físicoquímica del agua de la bahía de Turbo teniendo en cuenta dos temporalidades. *Revista Bioetnia*, 14(1), 65-79. <https://doi.org/10.51641/bioetnia.v14i1.180>
- Muthukumar, B., Surya, S., Sivakumar, K., AlSalhi, M. S., Rao, T. N., Devanesan, S., Arunkumar, P., & Rajasekar, A. (2023). Influence of bioaugmentation in crude oil contaminated soil by *Pseudomonas* species on the removal of total petroleum hydrocarbon. *Chemosphere*, 310, 136826. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136826>
- Narváez-Flórez, S., Gómez, M. L., & Martínez, M. M. (2008).

- Selección de bacterias con capacidad degradadora de hidrocarburos aisladas a partir de sedimentos del Caribe colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37(1), 63-77. <https://doi.org/10.25268/bimc.invenmar.2008.37.1.182>
- Organización de las Naciones Unidas. (1992). *Convenio sobre la Diversidad Biológica* [Archivo PDF]. <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>
- Orozco-Zárate, J. J. (2021). Instrumentos de Política y la Cultura Marítima (PNOEC – CONPES Bioceánico 3990). *Boletín Científico CIOH*, 40(1), 91-98. DOI: 10.26640/22159045.2021.567
- Pardo-Castro, J. L., Perdomo-Rojas, M. C., & Benavides-López de Mesa, J. L. (2004). Efecto de la adición de fertilizantes inorgánicos compuestos en la degradación de hidrocarburos en suelos contaminados con petróleo. *Nova*, 2(2), 40-49. <https://doi.org/10.22490/24629448.6>
- Pérez-Hernández, V., Ventura-Canseco, L. M. C., Gutiérrez-Miceli, F. A., Pérez-Hernández, I., Hernández-Guzmán, M., & Enciso-Sáenz, S. (2020). The potential of *Mimosa pigra* to restore contaminated soil with anthracene and phenanthrene. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 755-769. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.603>
- Quiceno-Pérez, E., & Ríos-Osorio, L. A. (2014). Potenciadores en el proceso de remoción biológica de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PHAS). *Hechos Microbiológicos*, 5(1), 36-50. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.323248>
- Rabelo-Florez, R. A., & Márquez-Gómez, M. A. (2020). Bacterias Gram negativas biodegradadoras de hidrocarburos. *Revista De Ciencias*, 24(2), e9935. <https://doi.org/10.25100/rc.v24i2.9935>
- Ramírez, D., Vega-Alvarado, L., Taboada, B., Estradas-Romero, A., Soto, L., & Juárez, K. (2020). Bacterial diversity in surface sediments from the continental shelf and slope of the North West Gulf of Mexico and the presence of hydrocarbon degrading bacteria. *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110590. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110590>
- Red de Desarrollo Sostenible. (12 de abril de 2013). *Se supera en 85 %. Emergencia en Golfo de Urabá por Derrame de Combustible*. <https://www.rds.org.co/es/novedades/se-supera-en-85-emergencia-en-golfo-de-uraba-por-derrame-de-combustible>
- Resolución 0704 de 2020 [Dirección General Marítima]. Por medio de la cual se adiciona el Título 8 a la Parte 5 del REMAC 4: “Actividades Marítimas”, en lo concerniente a la organización del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (CECOLDO).
- Resolución 1207 de 2014 [Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. 25 de julio de 2014.
- Rodríguez-Trigo, G., Zock, J. P., & Montes, I. I. (2007). Health effects of exposure to oil spills. *Archivos de Bronconeumología*, 43(11), 628-635. [https://doi.org/10.1016/S1579-2129\(07\)60141-4](https://doi.org/10.1016/S1579-2129(07)60141-4)
- Salas-Tovar, Y., & Murillo-Hinestroza, Y. (2013). *Evaluación fisicoquímica y ecológica de aguas costeras en la bahía de Turbo, como instrumento de análisis de los aportes contaminantes del Caño Waffe. Municipio de Turbo-Antioquia*. <https://docplayer.es/34455025-Evaluacion-fisicoquimica-y-ecologica-de-aguas-costeras-en-la-bahia-de-turbo-como-instrumento-de-analisis-de-los-aportes-contaminantes-del-cano.html>
- Sukhdhane, K. S., Pandey, P. K., Ajima, M. N. O., Jayakumar, T., Vennila, A., & Raut, S. M. (2019). Isolation and characterization of phenanthrene-degrading bacteria from PAHs contaminated mangrove sediment of thane creek in Mumbai, India. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 39(1), 73-83. <https://doi.org/10.1080/10406638.2016.1261911>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2022). *Primera Actualización Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres “Una estrategia de desarrollo” 2015 – 2030* [Archivo PDF]. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/PNGRD/PNGRD-2022-Actualizacion-VF.pdf>
- Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277-286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Vivas-Aguas, L. J., & Navarrete-Ramírez, S. M. (2014). *Protocolo Indicador Calidad de Agua (ICAMPFF). Indicadores de monitoreo biológico del Subsistema de Áreas Marinas Protegidas (SAMP). Invenmar, GEF y PNUD. Serie de Publicaciones Generales del Invenmar No. 69, Santa Marta, 32 p.* [Archivo PDF] <https://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/protocoloindicadorcalidadambientaldeaguaicampff.pdf>
- Wang, Y. F., & Tam, N. F. Y. (2011). Microbial community dynamics and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in polluted marine sediments in Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 63(5-12), 424-430. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.04.046>