

Efectos tóxicos agudos y crónicos de hidrocarburos en mamíferos

Acute and chronic toxic effects of oil on mammals

Recibido: noviembre 16 de 2024 | Revisado: noviembre 29 de 2024 | Aceptado: diciembre 02 de 2024

GENESIS SALAZAR¹
MAYRA PISCONTE¹
EMELY CONDORI¹
MILAGROS HUAMANÍ¹
JIMENA MORALES¹
MARÍA FERNANDA BARDALES¹
KIMBERLY ÑAHUIN¹
LUCERO HUAMANÍ¹
JOSÉ IANNACONE²

RESUMEN

El crecimiento de las industrias globalizadas ha incrementado la demanda de petróleo, aumentando los accidentes en su explotación y transporte. Por ende, el objetivo de este trabajo es evaluar los efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo en mamíferos terrestres y acuáticos. Se realizó una búsqueda de información en bases de datos como Scopus, Science Direct, SciELO y de otras fuentes como Google Académico. Para ello se empleó el enfoque PRISMA para el análisis y selección de información, logrando seleccionar 54 artículos para la presente revisión sistemática. La revisión sobre la exposición de mamíferos a hidrocarburos reveló que los cetáceos son los más estudiados, con un enfoque en mamíferos marinos. Los contaminantes más mencionados fueron el petróleo y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), debido a derrames como Deepwater Horizon y Exxon Valdez. Estos hidrocarburos causan daño al ADN, inflamación y mutaciones genéticas, afectando la salud y reproducción de las especies, con impactos agudos y crónicos, subrayando la necesidad de estrategias de mitigación para proteger la fauna marina y la salud humana. Los estudios recientes muestran que los derrames de hidrocarburos causan efectos crónicos en mamíferos, como daños genéticos y fisiológicos, afectando su supervivencia y reproducción. Esto se da por la exposición mediante el contacto, inhalación e ingestión. Es por ello que se necesitan políticas estrictas y medidas de remediación efectivas debido a la bioacumulación y difícil degradación de los hidrocarburos.

Palabras clave: Efectos agudos, efectos crónicos, derrames de hidrocarburos, mamíferos, toxicidad

ABSTRACT

The growth of globalized industries has increased the demand for oil, increasing accidents in its exploitation and transport. Therefore, the aim of this work is to assess the acute and chronic toxic effects of oil on terrestrial and aquatic mammals. A search for information was carried out in databases such as Scopus, Science Direct, SciELO and other sources such as Google Scholar. The PRISMA approach was used for the analysis and selection of information, and 54 articles were selected for this systematic review. The review on mammalian exposure to hydrocarbons revealed that cetaceans are the most studied, with a focus on marine mammals. The most frequently mentioned

1 Universidad Científica del Sur,
Lima, Perú

2 Universidad Nacional Federico
Villarreal, Lima, Perú

Autor de correspondencia:
joseiannacone@gmail.com

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-Comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://doi.org/10.24265/campus.2024.v29n38.03>

contaminants were oil and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), due to spills such as Deepwater Horizon and Exxon Valdez. These hydrocarbons cause DNA damage, inflammation and genetic mutations, affecting the health and reproduction of species, with acute and chronic impacts, underlining the need for mitigation strategies to protect marine wildlife and human health. Recent studies show that oil spills cause chronic effects on mammals, such as genetic and physiological damage, affecting their survival and reproduction. This occurs through exposure by contact, inhalation, and ingestion. This is why strict policies and effective remediation measures are needed due to bioaccumulation and difficult oil degradation.

Keywords: Acute effects, chronic effects, oil spills, mammals, toxicity

Introducción

En los últimos años, con el rápido desarrollo de las industrias globalizadas, la demanda de petróleo y sus derivados ha aumentado anualmente. Además, la alta tasa de crecimiento en su explotación y transporte ha sido la causa de numerosos accidentes (Wang *et al.*, 2024). Se estima que entre el 0,4% y el 0,8% de la producción de petróleo se vierte en los océanos, siendo el 98% de estos vertidos procedentes del transporte marítimo de este hidrocarburo, el cual puede depositarse en columnas de agua y sedimentos (Liao *et al.*, 2024).

El 20 de abril de 2010, una explosión en una plataforma de perforación de British Petroleum (BP) en el Golfo de México provocó un derrame de al menos 20 a 44 millones de galones de petróleo crudo (Ramenzoni *et al.*, 2024). El 15 de enero de 2022, aproximadamente, 6000 barriles de petróleo fueron vertidos al mar desde un petrolero peruano en una refinería cerca de Lima durante el proceso de descarga, debido a los efectos de un tsunami, contaminando 174 has de aguas marinas, playas y reservas naturales (Mogollón *et al.*, 2023).

Los derivados del petróleo como los hidrocarburos aromáticos policíclicos

(PAHs) son tóxicos, cancerígenos, contaminantes ubicuos ambientales y demás, debido a su peso molecular, persistencia y lipofiliidad (Tian *et al.*, 2023), es por ello que los desastres de derrames de petróleo denominados “hiper derrames”, como el derrame de petróleo del Exxon Valdez (EVOS) de 1989 y el derrame de Deepwater Horizon (DWH) de 2010 (Murphy *et al.*, 2016), tuvieron impactos significativos sobre los mamíferos marinos; el EVOS resultó en la mortalidad de miles de nutrias marinas (*Enhydra lutris*) y afectó gravemente a una manada y a una población transitoria de orcas (*Orcinus orca*) (Esler *et al.*, 2018). Mientras que, el derrame de petróleo del DWH en el Golfo de México, provocó la muerte de al menos 160 mamíferos marinos y las tasas de reproducción del delfín mular (*Tursiops truncatus*), disminuyeron significativamente durante casi cuatro años (Lane *et al.*, 2015). Gran parte de esta mortalidad se registró en los días y semanas posteriores a estos acontecimientos; esto quiere decir que la vida silvestre ha estado en contacto directo con el petróleo recién derramado. Este período se llama etapa aguda. Mientras que, los efectos crónicos, pueden extenderse a lo largo de meses, años o décadas y, en algunos casos, ir más allá de la mortalidad aguda (Lindeberg *et al.*, 2018). Es por ello que el objetivo

del presente trabajo es evaluar los efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos, analizando los cambios en la salud y reproducción de los mamíferos afectados por el impacto del petróleo.

Método

La revisión sistemática se realizó mediante el enfoque metodológico PRISMA, para ello se hizo empleo de las bases de datos Scopus, Science Direct, SciELO y de otras fuentes como Google Académico. Se emplearon los siguientes términos en inglés: “Toxicity”, “Toxic effects”, “lethal effects”, “sublethal effects”, “acute”, “chronic”, “Oil”, “Petroleum”, “Mammals” y “Marine mammals”. Luego, se aplicaron operadores booleanos AND y OR para combinar los términos. Es importante destacar que en la base de datos de Scielo se llevó a cabo una búsqueda en español utilizando términos traducidos. Se desarrollaron las siguientes ecuaciones de búsqueda: para ScienceDirect, Scopus y Google Académico, “(toxic OR effects OR “lethal effect” OR “sublethal effect”

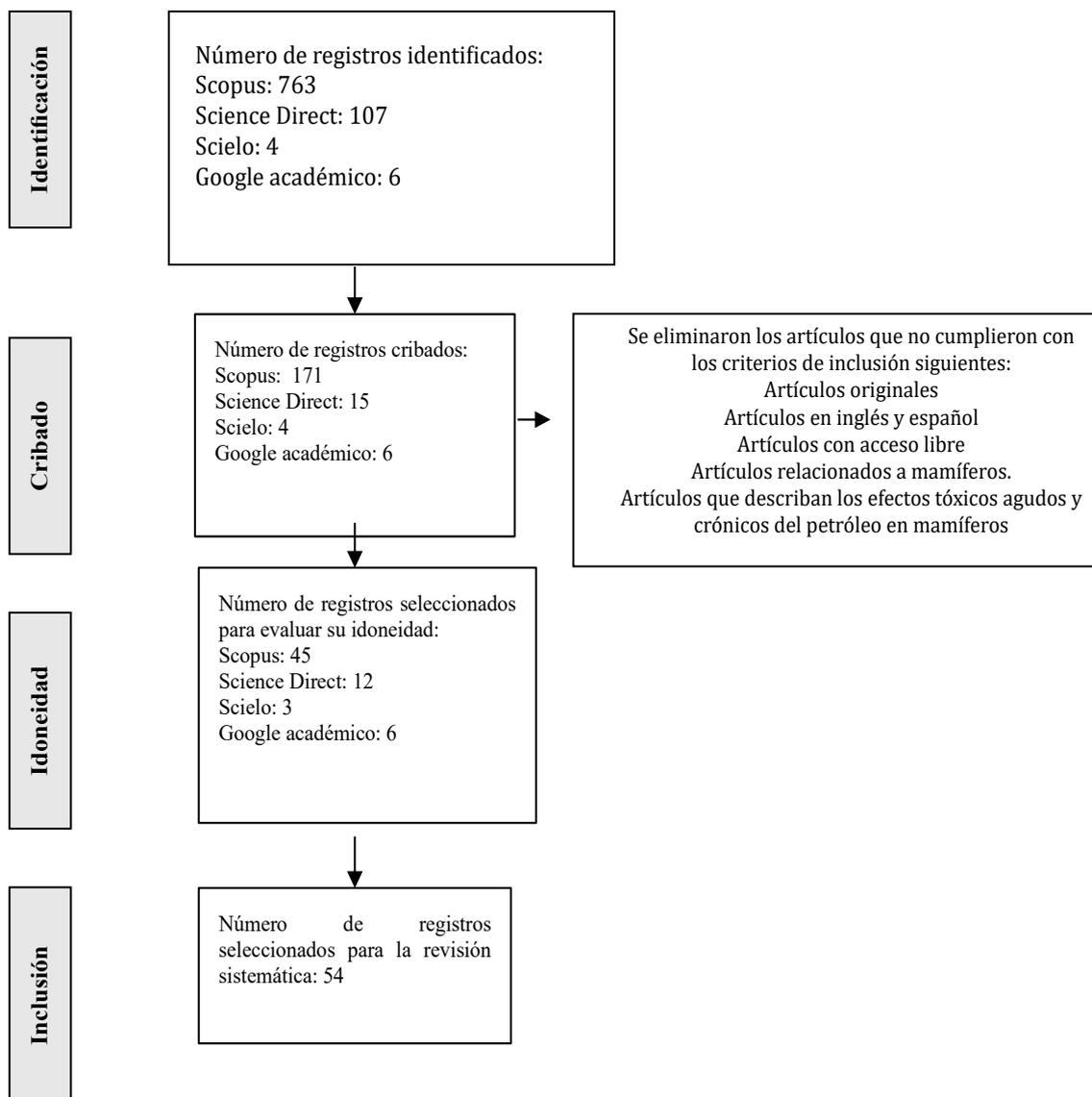
AND (petroleum OR Hydrocarbons) AND (mammal) y (toxic AND effects OR toxicity) AND (acute OR chronic) AND (Polycyclic aromatic hydrocarbons) AND mammals” y para SciELO “(Petróleo AND mamíferos)”.

La selección de artículos se dio mediante la aplicación de los siguientes criterios de inclusión: 1) solo artículos originales; 2) artículos escritos en inglés y español; 3) artículos con acceso libre; 4) artículos relacionados a mamíferos; y 5) artículos que describen los efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo en mamíferos.

Basándonos en estos criterios, se seleccionaron artículos de las tres bases de datos utilizando los criterios de inclusión 1, 2 y 3, lo que resultó en un total de 190 artículos, siendo 15 de ScienceDirect, 171 de Scopus, cuatro de SciELO, y seis de Google Académico. Luego, se verificó el cumplimiento de los criterios 4 y 5 revisando los títulos y resúmenes. Se seleccionaron los artículos más relevantes obteniéndose 54 artículos en total (Figura 1).

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA de la selección de artículos sobre los efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos



Resultados y Discusión

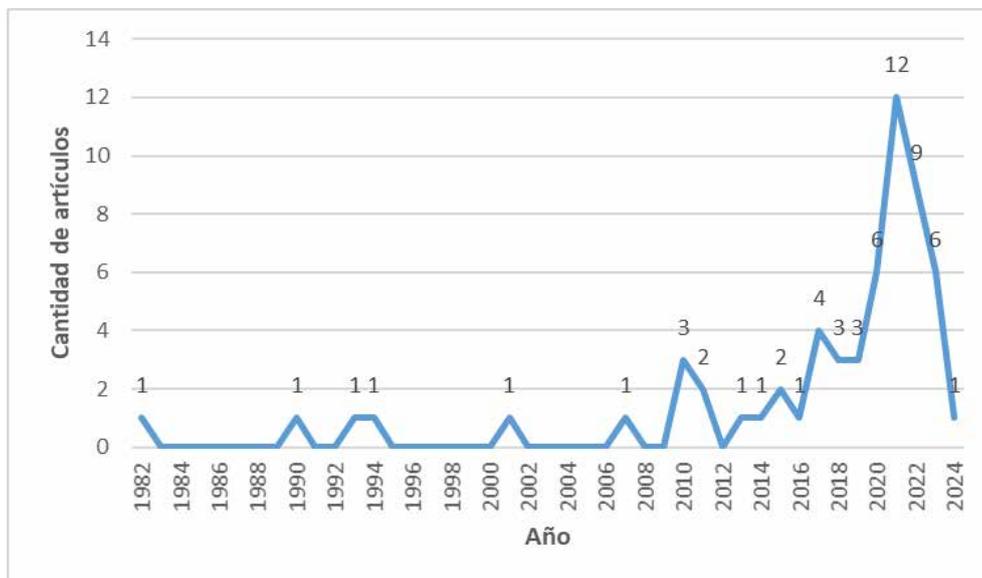
Artículos por año de publicación

La Figura 2 muestra la cantidad de artículos originales existentes en la base Scopus por año de publicación. Ello se realizó a partir de la fórmula “mammals AND (petroleum OR hydrocarbons)

AND effects”. Se encontraron 86 artículos con esta fórmula, desde el año 1982 hasta el 2024. Se observa que la mayor producción científica se da a partir del 2010 en adelante, teniendo como al 2022 con una máxima cantidad de artículos reportados sobre este tema. No obstante, esta producción decae después de este año, cabe resaltar que esta información es hasta el segundo trimestre del 2024.

Figura 2

Cantidad de artículos por año de publicación sobre los efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos



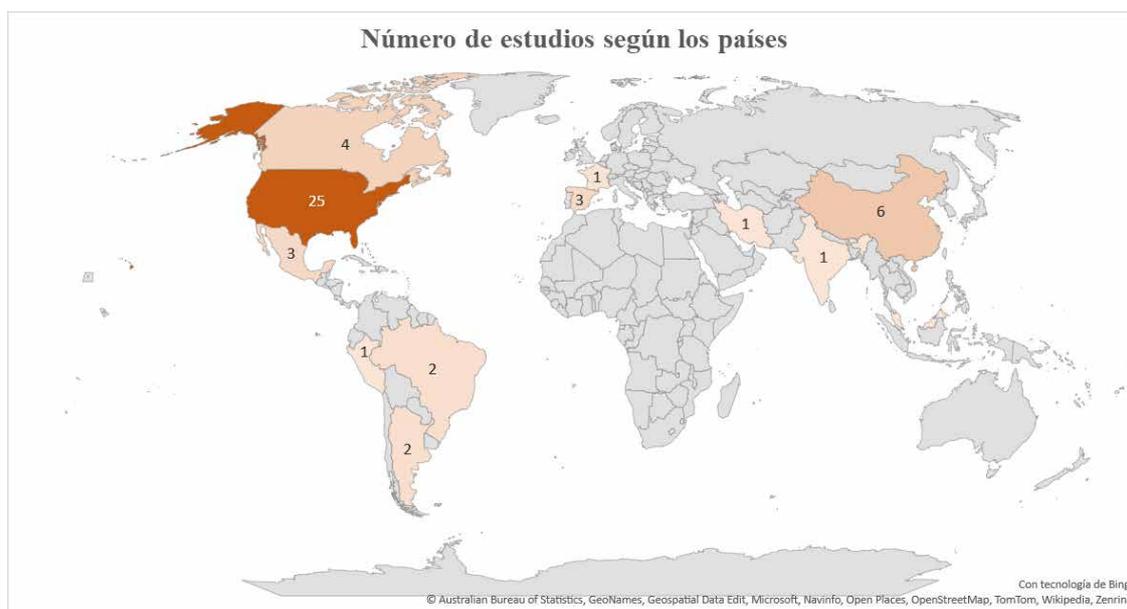
Artículos por país de publicación

Tras haberse realizado una búsqueda detallada, se identificó que Estados Unidos ha realizado más estudios

sobre el efecto de los mamíferos con respecto a los efectos de los hidrocarburos, y los países con menos registro exploratorio son Perú, India, Malasia, Irán y Francia (Figura 3).

Figura 3

Artículos por país de publicación sobre los efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos



Estudio de caso y mecanismo de acción

Se encontraron 54 artículos relacionados con el tema de la revisión. El más frecuentemente mencionado fue los cetáceos, entre ballenas y delfines, presentando 24 artículos. La mayoría de los estudios se centran en mamíferos marinos, mientras que solo 13 artículos abordan la relación entre mamíferos terrestres e hidrocarburos, entre ellos, las consecuencias de la exposición de los hidrocarburos en los ratones, principalmente, debido a su conveniencia experimental y a preocupaciones éticas (Parasuraman *et al.*, 2014). También se encontraron seis estudios que utilizan células humanas para evaluar la toxicidad de los hidrocarburos.

Los artículos destacan al petróleo como el hidrocarburo más mencionado, seguido de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs). El petróleo, una mezcla de hidrocarburos originada por la descomposición de materia orgánica, es esencial como fuente de energía y materia prima para productos como gasolina y diésel (Castello *et al.*, 2018). Aunque los HAPs pueden encontrarse en el petróleo y sus derivados, no son idénticos al petróleo en sí, sino una categoría específica de compuestos que pueden generarse como subproductos durante su quema y procesamiento (Lemos *et al.*, 2024).

En ecosistemas marinos, la presencia de estos hidrocarburos se debe a derrames accidentales, donde grandes cantidades son liberadas en cuerpos de agua. Los impactos generales de los vertidos de crudo dependen de variables como el volumen del vertido, la tasa o ritmo del derrame, el tipo de crudo, y la ubicación de la fuente del vertido

(Villamar, 2011). A partir de este, se marca la diferencia entre un incidente menor y una catástrofe medioambiental. Por ejemplo, el derrame de petróleo de Deepwater Horizon (DWH) donde liberó aproximadamente 4,9 millones de barriles de petróleo en el Golfo de México, lo que lo convierte en el peor derrame de petróleo marino en la historia de Estados Unidos, y el superpetrolero 'Exxon Valdez' derramando 42 millones de litros de petróleo crudo (Lane *et al.*, 2015). A raíz de la liberación de petróleo sin precedentes, se iniciaron múltiples estudios para evaluar los posibles efectos toxicológicos por derrame en la fauna marina con un total de 30 artículos, así como los estudios experimentales que demuestran los probables efectos tóxicos con un total de 21 artículos del total después de la exposición a hidrocarburos. Sin importar la dimensión, se reconoce que los efectos al medio ambiente se clasifican en dos categorías: agudos, que son efectos de corto plazo, y crónicos, de largo plazo (Smith *et al.*, 2017).

Con respecto al ingreso de los hidrocarburos a los organismos, los estudios han identificado diversas rutas de absorción dependiendo de la investigación y la especie investigada, siendo las principales vías identificadas la exposición directa, la inhalación, la ingestión, el contacto dérmico, la transferencia materna y la absorción específica en células reproductoras o trofoblásticas (Tabla 1). En mamíferos marinos la principal vía de absorción es la exposición directa, tal es el caso de los lobos marinos. Villamar (2011) y Zapata-Pérez *et al.* (2014) mencionan que esta exposición se da al tener un contacto directo con el petróleo en su hábitat, lo que ocurre generalmente a través de derrames. De manera similar,

Castelló *et al.* (2018) observaron que especies como ballenas, delfines, lobos marinos y elefantes marinos también absorben hidrocarburos del petróleo principalmente por exposición debido a derrames. Estos estudios subrayan que la exposición ambiental en el hábitat marino es una fuente significativa de absorción de hidrocarburos para estas especies. Además, Schwartz *et al.* (2004) encontraron que las nutrias marinas pueden absorber petróleo por exposición oral durante los experimentos.

Asimismo, los estudios con cetáceos y delfines, como los de López-Berenguer *et al.* (2023) y Singh *et al.* (2023), indicaron que estos animales pueden absorber hidrocarburos tanto por vía dérmica como por ingestión e inhalación durante derrames. Esto es particularmente relevante en eventos de derrames de petróleo, donde múltiples vías de exposición pueden contribuir a la carga tóxica en los organismos marinos. En casos específicos, como en el estudio de Lemos *et al.* (2024) con manatíes, se observó transferencia materna del petróleo como vía de absorción. Este hallazgo es crucial para entender el impacto a largo plazo de los hidrocarburos en poblaciones animales, ya que la transferencia materna puede afectar a las crías y contribuir a la bioacumulación de toxinas.

En estudios con roedores, se han utilizado métodos experimentales controlados para investigar la absorción de hidrocarburos. Crépeaux *et al.* (2014) y Jin *et al.* (2014) expusieron a ratas a HAP y otros compuestos mediante inyecciones intraperitoneales y exposición directa. Estos métodos permiten estudiar los

efectos tóxicos de los hidrocarburos en un entorno controlado y proporcionan datos relevantes sobre la absorción y distribución de estos compuestos en el organismo. Por otro lado, Brzezinski *et al.* (2024) demostraron que los ratones pueden absorber antraceno mediante exposición cutánea, resaltando la diversidad de rutas de absorción de hidrocarburos según la especie y el tipo de hidrocarburo.

Además, en el contexto de células humanas, como se menciona en los estudios de Jamshed *et al.* (2022) y Boogaard *et al.* (2017), la exposición a hidrocarburos y ácidos nafténicos puede inducir inflamación y otras respuestas celulares, indicando que incluso a nivel celular, los hidrocarburos pueden causar efectos significativos mediante la exposición directa. Esto subraya la importancia de comprender los mecanismos de acción de los hidrocarburos en niveles celulares para evaluar sus riesgos para la salud humana.

Finalmente, estudios como los de Balmer *et al.* (2015) y de Schwacke *et al.* (2014) con delfines muestran que la exposición dérmica e inhalación son vías importantes de absorción de petróleo durante derrames, mientras que Pulido-Capurro *et al.* (2022) y otros estudios destacaron la combinación de vías dérmicas y alimentarias en animales como lobos y nutrias. Estos estudios contribuyen a una comprensión integral de cómo los hidrocarburos pueden afectar a diferentes especies a través de múltiples rutas de absorción, enfatizando la necesidad de estrategias de mitigación efectivas en casos de contaminación por petróleo.

Tabla 1

Artículos seleccionados para la revisión, mamífero e hidrocarburo estudiado, estudio de caso y principales vías de absorción

Autor	Mamífero	Hidrocarburo	Estudio de caso	Vía de absorción
Zapata-Pérez <i>et al.</i> (2014)	Lobo marino	Petróleo	Derrame	Exposición
Castello <i>et al.</i> (2018)	ballenas, delfines, lobos marinos, elefantes marino	Petróleo	Derrame	Exposición
Villamar (2011)	Lobo marino	Petróleo	Derrame	Exposición
Crépeaux <i>et al.</i> (2014)	Ratas	HAP	Experimento	Exposición
Schwartz <i>et al.</i> (2004)	Nutrias marinas	Petróleo	Experimento	Exposición oral
Brzezinski <i>et al.</i> (2024)	Ratones	Antraceno	Experimento	Exposición cutánea
López-Berenguer <i>et al.</i> (2023)	Cetáceos y delfines	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Derrame	Absorción
Lemos <i>et al.</i> (2024)	Manatí	Petróleo	Derrame	Transferencia materna
Tao <i>et al.</i> (2021)	Ratones	Criseno	Experimento	Exposición oral
Li <i>et al.</i> (2020)	Ratones	Benzo y Pireno	Experimento	Inhalación
Jin <i>et al.</i> (2014)	Ratones	Hidrocarburo aromático policíclico (3-metilcolantreno)	Experimento	Inyecciones intraperitoneales
Ackleh <i>et al.</i> (2017)	Ballenas (esperma analizado)	Petróleo	Experimento	Contacto
Hoseini <i>et al.</i> (2020)	La foca del Caspio (Fusa Caspica)	PAH's	Derrame	Alimentación
Miller <i>et al.</i> (2004)	Necropsia a 17 cetáceos	Hidrocarburos aromáticos halogenados	Derrame	Contacto
Wise <i>et al.</i> (2018)	Esperma de las ballenas	Petróleo crudo	Experimento	Células reproductoras
López-Berenguer <i>et al.</i> (2023)	Delfines	Naftaleno y fenantreno	Derrame	Respiración e ingesta
Sun <i>et al.</i> (2020)	Delfines (Sousa chinensis)	PAHs	Experimento	Contacto
Parasuraman <i>et al.</i> (2014)	Ratas	Éter de petróleo	Experimento	Ingesta
Flores-Serrano <i>et al.</i> (2014)	Murcielago, armadillo, zarigüeya, zorrillo	HAP	Derrame y experimento	Exposición
Santos-Neto <i>et al.</i> (2024)	Delfin	HAP	Derrame y experimento	Exposición
García-Alvarez <i>et al.</i> (2014)	Delfin	HAP	Derrame y experimento	Exposición

Lourenço <i>et al.</i> (2021)	Cetáceos	HAP	Derrame	Exposición
Propst <i>et al.</i> (1999)	Ratas	Éter de petróleo	Experimento	Ingesta
Hellou <i>et al.</i> (1990)	beluga, focas, cachalote, ballena, delfín y marsopa común.	HAP	Derrame	Exposición
Perono <i>et al.</i> (2022)	Ratones	compuestos aromáticos policíclicos (PAC)	Experimento	Ingestión
Jamshed <i>et al.</i> (2022)	Células humanas (trofoblastos)	Ácidos nafténicos (NAFC)	Experimento	Exposición a NAFC en células trofoblásticas placentarias
Schwacke <i>et al.</i> (2022)	Delfín	Petróleo	Derrame	Dérmica e ingestión
Singh <i>et al.</i> (2023)	Delfín	HAP	Derrame	Dérmico, ingestión e inhalación
Schwacke <i>et al.</i> (2014)	Delfín	Petróleo	Derrame	Dérmico, ingestión e inhalación
Baker <i>et al.</i> (1981)	Nutria	Petróleo	Derrame	Dérmico, ingestión e inhalación
Boogard <i>et al.</i> (2017)	Células humanas	Hidrocarburos sintéticos derivados del gas natural (GTL)	Experimento	Inflamación alveolar aguda e inflamación perivascular aguda de los pulmones
Smith <i>et al.</i> (2017)	Delfín	Petróleo	Experimento	Exposición, Inhalación y dérmico
Lane <i>et al.</i> (2015)	Delfín	Petróleo	Derrame	Exposición
Esler <i>et al.</i> (2018)	Orcas	Petróleo	Derrame	Exposición, Inhalación y dérmico
Lair <i>et al.</i> (2015)	Ballenas	Petróleo	Derrame	Exposición, Dérmico y digestión
Balmer <i>et al.</i> (2015)	Delfín	Petróleo	Derrame	Exposición, dérmico e inhalación
Venn-Watson <i>et al.</i> (2015)	Delfín	Petróleo	Derrame	Inhalación y dérmico

Harwell <i>et al.</i> (2013)	Nutria	HAP	Derrame	Inhalación y digestión
Castello <i>et al.</i> (1998)	Lobo marino	Diesel	Derrame	Dérmico
Zajda <i>et al.</i> (2017)	Células humanas	HAP	Experimento	Exposición
Pulido-Capurro <i>et al.</i> (2022)	Lobo y nutria	Petróleo	Derrame	Dérmico y alimentaria
Benedict <i>et al.</i> (2003)	Ratones	HAP	Experimento	Exposición
Einaudi <i>et al.</i> (2014)	Ratones	PAH, BaP	Experimento	Exposición al BaP
IPIECA & IOGP (2015)	Cetáceos (ballenas y delfines), focas, manatíes, nutrias, dugongos y osos polares	BTEX, HAP	Experimento	Dérmico
Gao <i>et al.</i> (2018)	Células humanas	HAP	Experimento	Exposición
Helm <i>et al.</i> (2015)	Nutrias marinas, focas, leones marinos y morsas	Petróleo	Derrame	Alimentación
Xie <i>et al.</i> (2021)	Delfines y marsopas	PCB	Derrame	Dérmico y alimentación
Otten <i>et al.</i> (2023)	Cetáceos	Petróleo	Derrame	Dérmico
Wang <i>et al.</i> (2023)	Células humanas	Petróleo	Derrame	Alimentación
Nevalainen <i>et al.</i> (2018)	Focas y ballenas	Petróleo	Derrame	Alimentación
Hellfeld <i>et al.</i> (2023)	Células humanas	Petróleo	Derrame	Alimentación
Hajji & Lucas (2024)	Lobos marinos	Petróleo	Derrame	Exposición
Venkatraman <i>et al.</i> (2024)	Células humanas	HAP	Derrame	Exposición
Kuroda <i>et al.</i> (2013)	Ratas	Ozoquerita	Experimento	Exposición

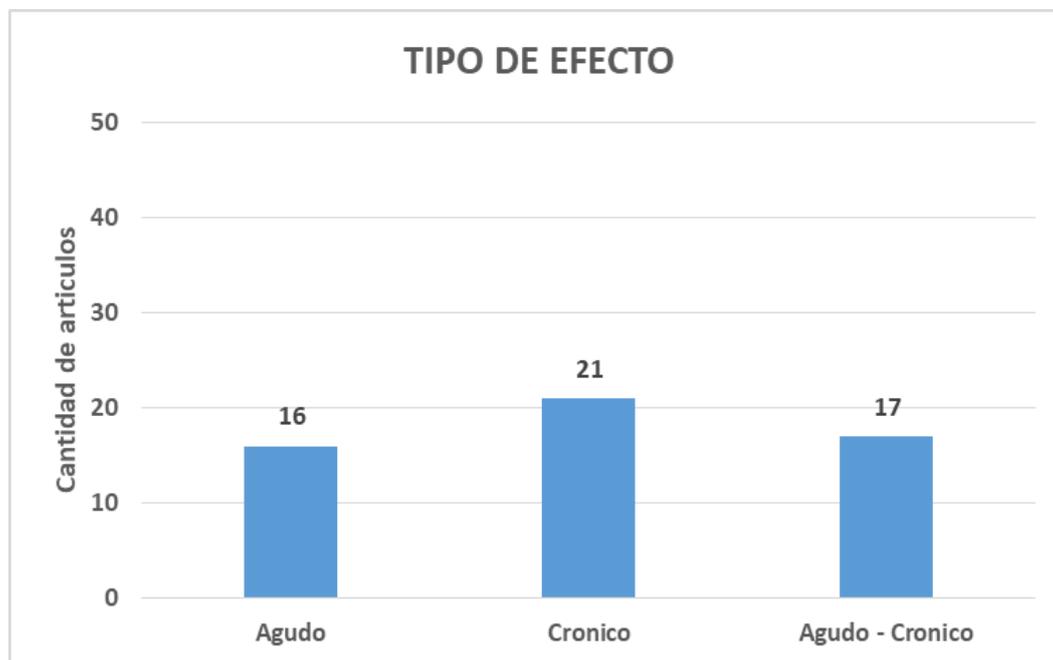
Efectos tóxicos agudos y crónicos

Se observó que la mayoría de los estudios se centran en investigar los efectos crónicos de los hidrocarburos en los mamíferos, sumando un total de 21 artículos. Mientras que 16 del total de los artículos analizados se centraron en los efectos agudos (Figura 4). Así mismo, es importante señalar que 17 artículos

abordan tanto los efectos agudos como crónicos. En la Figura 4, se observa el impacto de diversos hidrocarburos en mamíferos marinos, incluyendo efectos agudos, crónicos y agudo - crónicos, que resultan en daños significativos en la salud de estas especies, como alteraciones en el ADN, disminución de reproducción, enfermedades fisiológicas, etc.

Figura 4

Efectos agudo, crónico y agudo - crónico del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos



En la Tabla 2, se muestran los efectos nocivos del petróleo y sus derivados en diferentes especies marinas a través de varios estudios. Teniendo en cuenta el estudio de Zapata-Pérez *et al.* (2014), donde se analizó el impacto del petróleo en los lobos marinos de un pelo. Los resultados indicaron una disminución significativa en las tasas de supervivencia, reproducción y cambios en la edad de maduración. Además, se observó una alteración del ADN, que influye en la muerte celular y tumores, con efectos genotóxicos transmitidos a la descendencia. Estos hallazgos resaltan la gravedad de la contaminación por petróleo en la salud y ciclo de vida de los lobos marinos. Por otro lado, Castello *et al.* (2016) investigaron los efectos de los derrames de crudo, abarcando diversas especies marinas como ballenas, delfines, lobos marinos, elefantes marinos y tortugas. Los resultados mostraron una variedad de afecciones clínicas, incluyendo

estomatitis, gingivitis, conjuntivitis, lesiones pustulosas y rinitis.

Este estudio subraya que los derrames de crudo tienen consecuencias devastadoras para la salud de múltiples especies marinas, afectando tanto su integridad física como su capacidad para sobrevivir en su entorno natural. En un estudio anterior Castelló *et al.* (1998) analizaron el impacto del diésel en los lobos marinos, donde los hallazgos mostraron comportamientos anómalos, como persistencia de rascado, pelaje oleoso, cambios en el comportamiento, especialmente, en individuos previamente estresados o enfermos. Además, se reportaron efectos fisiológicos como pérdida de calor por el pelaje e irritación de las mucosas, que pueden causar daños en el sistema nervioso central, insuficiencia hepática, y renal. Estos resultados destacan los efectos adversos del diésel en la salud y el comportamiento de los lobos

marinos. Finalmente, Pulido-Capurro *et al.* (2022) realizaron una investigación sobre el impacto del petróleo en varias especies marinas; incluyendo a *Otaria byronia* (lobo chusco), *Arctocephalus australis* (lobo fino) y *Lontra felina* (nutria de mar). Los resultados mostraron una disminución en la depredación y una alta tasa de mortalidad en organismos jóvenes, además se observó la incorporación de elementos carcinogénicos en la cadena alimentaria y una reducción en el apareamiento y reproducción. Estos hallazgos indican que la exposición al petróleo no solo afecta la supervivencia directa de estas especies, sino que también tiene implicaciones a largo plazo para la salud del ecosistema.

López-Berenguer *et al.* (2023) examinaron los efectos de los HAP en cetáceos y delfines. Los resultados indicaron alteraciones en el desarrollo fetal y posnatal, subrayando la vulnerabilidad de estas especies a los contaminantes presentes en su hábitat. La exposición a HAP puede tener consecuencias a largo plazo de estos mamíferos marinos, lo cual es alarmante considerando su importancia ecológica. Por otro lado, López-Berenguer *et al.* (2023) estudiaron el impacto del naftaleno y fenantreno en delfines, que a comparación a otros estudios no se encontraron efectos visibles significativos, ya que las concentraciones de los hidrocarburos fueron bajas y se surge que los delfines podrían acondicionarse rápidamente al medio. Este hallazgo destaca la adaptación de algunas especies marinas a contaminantes específicos, aunque no descarta posibles efectos subclínicos o a largo plazo. Schwacke *et al.* (2022) investigaron los efectos del derrame de petróleo de Deepwater Horizon en delfines, utilizando modelos

poblacionales, donde los resultados mostraron un deterioro en la reproducción y una rápida mortalidad, lo cual resalta el impacto devastador de grandes derrames de petróleo en especies longevas, estos efectos son particularmente preocupantes debido a la dificultad de recuperación de poblaciones afectadas por eventos de contaminación masiva. IPIECA & IOGP (2015) abarcaron una amplia gama de mamíferos, incluyendo cetáceos, focas, manatíes, nutrias, dugongos y osos polares, evaluando el impacto de compuestos como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno), y HAP, lo cual se reportaron diversas afecciones, tales como reducción en la tasa de crecimiento, daño en los tejidos, afectación de la capacidad reproductiva y daño genéticos. Estos resultados subrayan la gravedad de la exposición a estos compuestos en múltiples especies marinas y la necesidad de regulaciones más estrictas para proteger los ecosistemas marinos. Finalmente, Xie *et al.* (2021) estudiaron los efectos de los PCB en delfines jorobados y marsopas sin aletas, los hallazgos indicaron varios efectos fisiológicos adversos, subrayando el impacto negativo de los PCB, que persisten en el ambiente y pueden acumularse en la cadena alimentaria, este estudio destaca la amenaza continua de los PCB para la salud de las especies marinas, a pesar de las restricciones de su uso.

Crepeaux *et al.* (2014) investigaron los efectos de los HAP en ratas, encontrando que la exposición a estos compuestos causaba efectos adversos a largo plazo en el comportamiento y el metabolismo energético cerebral, siendo preocupante, ya que los HAP son contaminantes comunes en el medio ambiente, y su impacto negativo en el cerebro puede tener implicaciones serias para la salud neurológica. En un

estudio paralelo, Parasuraman *et al.* (2014) analizaron los efectos del éter de petróleo en ratas, observando cambios significativos en el comportamiento con dosis de hasta 2000 mg/kg, además reportaron una reducción del peso corporal, cambios morfológicos y casos de canibalismo. Estos resultados subrayan la toxicidad del éter de petróleo y sus efectos detrimentales en la salud y el comportamiento de las ratas, lo cual podría extrapolarse a otras especies expuestas a este compuesto. Asimismo, Propst *et al.* (1999) también estudió el efecto del éter de petróleo en ratas, reportando daño en órganos y alteraciones morfológicas, estos efectos adversos resaltan la necesidad de evaluar y controlar la exposición a éter de petróleo, dado su potencial para causar daño significativo a la salud. Por otro lado, Kuroda *et al.* (2013) examinaron los efectos tóxicos de la ozoquerita, una mezcla de diversos hidrocarburos, en ratas, los resultados indicaron que la exposición prolongada provoca inflamación crónica sistémica y tenía un efecto levemente cancerígeno en el hígado de ratas macho. Estos resultados son alarmantes, ya que sugieren que la ozoquerita y compuestos similares pueden tener efectos crónicos y potenciales carcinogénicos, lo cual es relevante para la evaluación de riesgos en la salud ambiental.

Baker *et al.* (1981) y Helm *et al.* (2015), examinaron los efectos del petróleo en nutrias y otros mamíferos marinos, reportando una amplia gama de problemas en la salud, desde autólisis gástrica y problemas respiratorios hasta hipertrofia ventricular izquierda y quistes tiroideos, estos estudios demostraron que la exposición al petróleo puede causar daños sistémicos graves y afectar la viabilidad a largo plazo de estas especies. Asimismo, Lair *et al.* (2015) analizaron e informaron que la exposición al petróleo en

ballenas puede causar adenocarcinoma de la mucosa gastrointestinal, una condición grave que afecta la salud y longevidad de estos grandes mamíferos marinos.

Jamshed *et al.* (2022) investigaron los efectos de los componentes fraccionarios de ácidos nafténicos (NAFC) presentes en el agua afectada por procesos de arenas bituminosas en células trofoblásticas humanas, encontrando componentes que introducen estrés celular, aumentando la secreción de marcadores de estrés, inhibiendo la proliferación y migración de células trofoblásticas placentarias, esto podría tener implicaciones significativas para el desarrollo placentario y la salud fetal. Boogaard *et al.* (2017) evaluaron las propiedades toxicológicas de los productos de gas líquido (GTL), derivados de hidrocarburos sintéticos, en humanos, concluyendo que estos productos pueden afectar negativamente el desarrollo reproductivo y prenatal destacando la necesidad de evaluación rigurosa de estos compuestos antes de su uso generalizado.

Wang *et al.* (2023) y Hellfeld *et al.* (2023) ambos documentaron los efectos del petróleo en el desarrollo humano, donde ambos observaron que la exposición al petróleo puede interferir con el desarrollo normal, lo que subraya la importancia de regular la exposición a estos contaminantes para proteger la salud pública. Finalmente, Venkatram *et al.* (2024) exploraron los efectos de los HAP en humanos y encontraron que estos compuestos están asociados con trastornos cardiopulmonares y una mayor susceptibilidad a cánceres, lo cual demuestra la necesidad de controlar y reducir las emisiones de HAP para prevenir enfermedades graves en la población.

Tabla 2
Efectos tóxicos agudos y crónicos del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos

Mamífero analizado	Tipo de efecto			
	Autores	Agudo	Autores	Crónico
Hidrocarburo Petróleo	Zapata <i>et al.</i> (2014) Pulido-Capurro <i>et al.</i> (2022)	Decrementos en tasas de supervivencia. Disminución de la degradación, alta tasa de mortalidad en organismos jóvenes.	Zapata <i>et al.</i> (2014) Pulido-Capurro <i>et al.</i> (2022)	Alteración del ADN (muerte celular, tumores). Efectos genotóxicos transmitidos a la descendencia, incorporación de elementos carcinogénicos en la cadena alimentaria, reducción de apareamiento y reproducción
	Castello <i>et al.</i> (1998)	Comportamientos anómalos como persistencia de rascado, pelaje oleoso y cambios en el comportamiento, especialmente en individuos previamente estresados o enfermos.	Castello <i>et al.</i> (1998)	Pérdida de calor por el pelaje e irritación de las mucosas, pudiendo causar daños en el sistema nervioso central, insuficiencia hepática y renal.
Derrames de crudo	-	-	Castello <i>et al.</i> (2016)	Estomatitis, gingivitis, conjuntivitis, lesiones pustulosas, rinitis, alteraciones de las uñas
	HIPECA & IOGP (2015)	Tasa de crecimiento, daño en el tejido, la capacidad de reproducción, la actividad fisiológica, los daños en los tejidos y el daño genético	López-Berenguer <i>et al.</i> (2024)	Alteraciones en el desarrollo fetal y posnatal
Delfines de crudo	-	-	Castello <i>et al.</i> (2016)	Estomatitis, gingivitis, conjuntivitis, lesiones pustulosas, rinitis, alteraciones de las uñas

		No se registraron efectos visibles, las concentraciones de los hidrocarburos fueron bajas y posiblemente los delfines se acondicionaron rápidamente al medio.	-	-
Naftaleno y fenantreno	López-Berenguer <i>et al.</i> (2023)			
Petróleo	Santos-Neto <i>et al.</i> (2024)	Reproducción deteriorada, mortalidad	Rápida	
Ratas				
Hidrocarburo aromático policíclico (HAP)				Crépeaux <i>et al.</i> (2014). Efectos adversos sobre el comportamiento a largo plazo y el metabolismo energético cerebral en ratas.
Éter de petróleo	Parasuraman <i>et al.</i> (2014)	Cambios en comportamiento de hasta 2000 mg/kg		Parasuraman <i>et al.</i> (2014). Reducción del peso corporal, cambios morfológicos y canibalismo. Propst <i>et al.</i> (1999). Daño de órganos y alteraciones morfológicas.
Ozoquerita (mezcla de diversos hidrocarburos)				Kuroda <i>et al.</i> (2013). La exposición prolongada provoca inflamación crónica sistémica, además de ser levemente cancerígeno en el hígado de ratas macho.
Fueloil				Schwartz <i>et al.</i> (2004). Alteraciones metabólicas, enfermedades gastrointestinales, aumento en el número de leucocitos anemia crónica
Nutrias	Helm <i>et al.</i> (2015)	Autolisis gástrica, presencia de sangre, mucosidad y aceite en el lumen gástrico, hematomas subcutáneos y hemorragias de la mucosa, hiperemia, traqueítis. Ojos y sistema respiratorio		Helm <i>et al.</i> (2015). Hiperplasia del conducto biliar, fibrosis e inflamación de las triadas portales, dilatación de túbulos renales y formación de cilindros hialinos, hipertrofia ventricular izquierda, quistes tiroideos. Problemas de salud y reproducción
BTEX, HAP	IPECA & IOGP (2015)	Tasa de crecimiento, daño en el tejido, la capacidad de reproducción, la actividad fisiológica, los daños en los tejidos y el daño genético		-

	-	Castello <i>et al.</i> (2016) Wise <i>et al.</i> (2018)	Estomatitis, gingivitis, conjuntivitis, lesiones pustulosas, rinitis, alteraciones de las uñas. Alteración de las células reproductoras (esperma). Se vuelven infértiles ante la exposición y por ende, reducción poblacional de las ballenas. Muerte prenatal
Ballenas			
	Petróleo	Wise <i>et al.</i> (2018)	Adenocarcinoma de la mucosa gastrointestinal
	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Hellou <i>et al.</i> (1990)	Presencia de tumores, tasa de crecimiento, daño en el tejido, la capacidad de reproducción, la actividad fisiológica, los daños en los tejidos y el daño genético
Humanos	Ácidos nafténicos (NAFC)	Jamshed <i>et al.</i> (2022)	Estrés celular, aumento en la secreción de marcadores de estrés en trofoblastos placentarios, inhibición de la proliferación y migración de células trofoblástica
	Hidrocarburos sintéticos derivados del gas natural (GTL)		
	Petróleo	Wang <i>et al.</i> (2023)	Desarrollo
	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)		
		Boogaard <i>et al.</i> (2017)	Desarrollo reproductivo y prenatal
		Venkatraman <i>et al.</i> (2024)	Trastornos cardiopulmonares, susceptibilidad cancerígena

Efectos reproductivos y del desarrollo

En la Figura 5 se muestra que el impacto de los diferentes hidrocarburos sobre la fertilidad es el efecto más estudiado, con un total de 22 artículos que lo analizan. Seguido por el efecto en el desarrollo fetal, postnatal y óvulos, con 20 estudios que lo analizan. Por último, el efecto teratogénico es el menos estudiado, con solo ocho artículos que lo abordan.

En cuanto a los impactos de los hidrocarburos en la fertilidad (ya sea inducido o por derrame), según Villamar (2011), son debilitantes porque reducen la reproducción de los mamíferos al alterar su desarrollo normal, además de afectar los mecanismos de alimentación y disminuir la capacidad de defensa contra enfermedades. Asimismo, tipos de hidrocarburos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAC) pueden provocar afección en los ovarios o los óvulos de los mamíferos, ya que las alteraciones en las vías de señalización que regulan la foliculogénesis, la esteroidogénesis y la angiogénesis ovárica pueden resultar en problemas reproductivos adversos, como el síndrome de ovario poliquístico, la insuficiencia ovárica prematura y la infertilidad (Perono *et al.*, 2022).

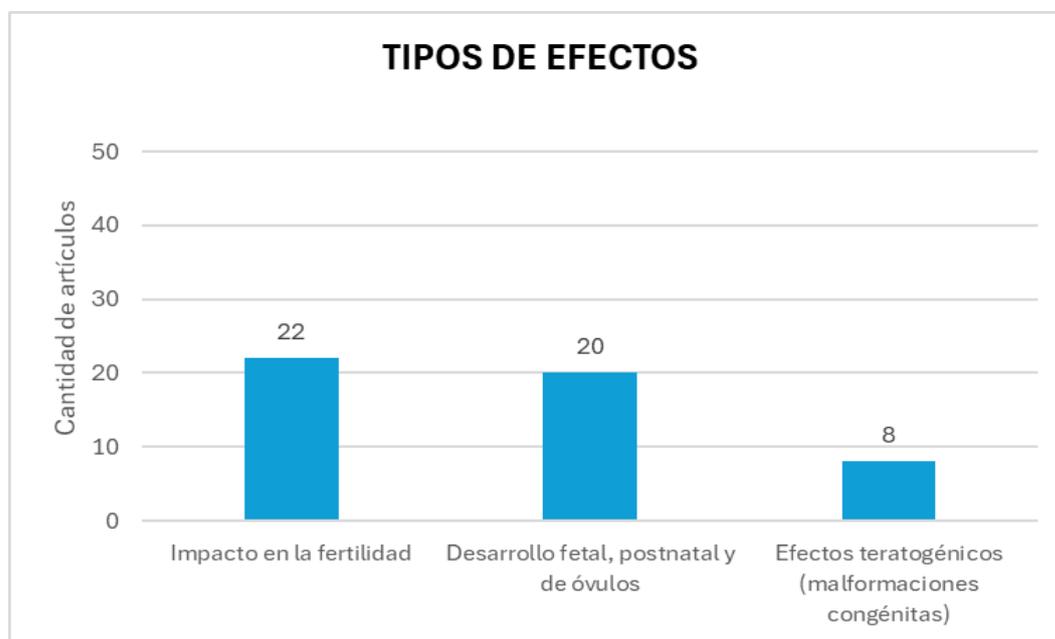
En animales acuáticos como los cachalotes, la exposición a los hidrocarburos puede impedirles reproducirse con éxito. Esto podría deberse a la afectación de sus células reproductivas, y, si logran reproducirse, estas sustancias químicas podrían provocar anomalías en el desarrollo o retraso en el crecimiento de sus crías, generando así preocupación hacia las poblaciones a largo plazo (Wise *et al.*,

2018). Asimismo, los hidrocarburos como PCB generan efectos negativos a mamíferos como los delfines jorobados machos ya que luego de la exposición, el PCB se transporta hacia sus testículos generando una disminución en las hormonas reproductivas, generando bajas tasas de reproducción de esta especie (Sun *et al.*, 2020). Además, según Lane *et al.* (2015) esta exposición puede provocar pérdidas fetales o neonatales de los delfines hembra, pero no pudieron determinar el momento exacto. Por otro lado, en mamíferos terrestres o aéreos como los murciélagos, los armadillos, zorrillo mapache, ratas y conejo, los hidrocarburos también generan efectos adversos en su reproducción, ya que se producen alteraciones en el sistema endocrino, generalmente en el reproductivo masculino (Chung *et al.*, 2011; Flores-Serrano *et al.*, 2014).

Con respecto a los efectos teratogénicos, la exposición prolongada a hidrocarburos aromáticos o hidrocarburos en mamíferos, como las ratas, puede ocasionar malformaciones craneofaciales y defectos cardíacos, incluyendo la elongación del corazón (Parasuraman *et al.*, 2014). Asimismo, en el caso del hidrocarburo antraceno, debido a que es una de las sustancias que alteran el sistema endocrino, puede interferir con la regulación hormonal durante etapas críticas del desarrollo (Venkatraman *et al.*, 2024). Otros estudios realizados como el de Freije *et al.* (2022) han demostrado que la acumulación de benzo y antraceno pueden reducir el peso al nacer y causar irregularidades genéticas en ratones, destacando la vulnerabilidad del embrión en desarrollo.

Figura 5

Efectos reproductivos y del desarrollo del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos.



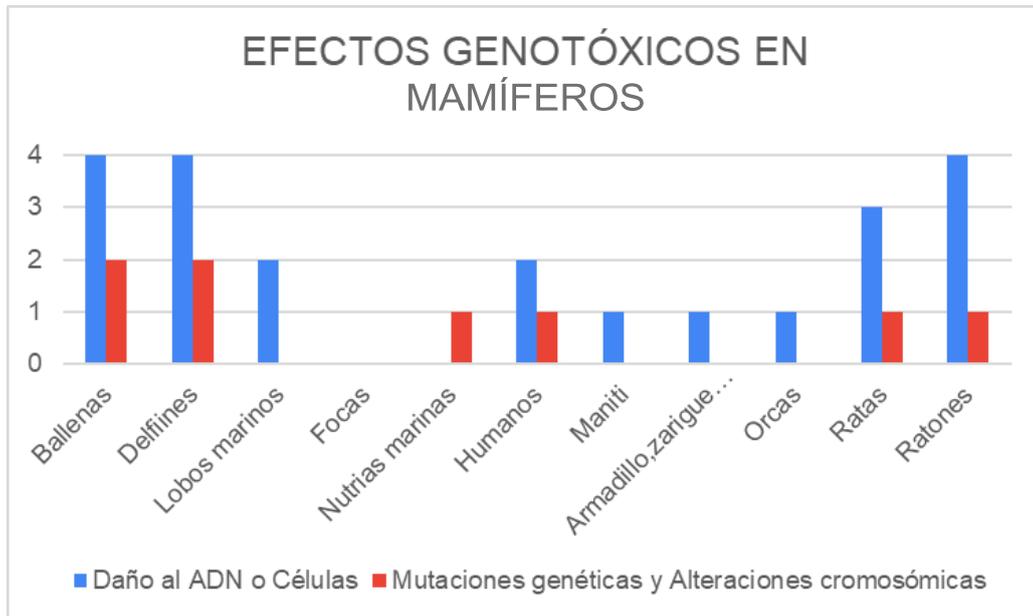
Tipo de efectos genotóxicos y bioquímicos

Los artículos encontrados coinciden que la exposición e ingesta del contaminante en mamíferos marinos y terrestres provoca efectos genotóxicos, como daño al ADN o células del animal, mutaciones genéticas y alteraciones cromosómicas, asimismo, los mamíferos más analizados para el conocimiento de sus efectos negativos son los cetáceos y roedores.

La exposición a hidrocarburos puede llevar a la formación de metabolitos reactivos que se unen al ADN, provocando mutaciones y daño cromosómico. Este daño genético puede resultar en una disfunción celular y contribuir al desarrollo de enfermedades como el cáncer. (Venkatraman *et al.*, 2024). La exposición de compuestos químicos como BaP PAH en roedores va tener efectos agudos, como roturas del ADN en los

ovocitos y las CC, así como un aumento de los aductos de ADN inducidos por BaP en las CC (Einaudi *et al.*, 2014).

Además, la ingesta de contaminantes derivados de hidrocarburos causa alteraciones del ADN y alteraciones cromosómicas en cetáceos, delfines, lobos marinos, orcas, estos contaminantes persisten en el medio marino causando efectos a corto y largo plazo en muchos procesos y sistemas biológicos, incluidos los genéticos, moleculares, neurológicos. Si bien los animales jóvenes pueden ser más vulnerables a la exposición directa a los contaminantes, los efectos en los adultos pueden limitar efectivamente la población reproductora; ambos iniciarán efectos poblacionales (Hajji & Lucas, 2024). Por otro lado, los humanos pueden sufrir efectos adversos al exponerse a una fracción de ácido nafténico (NAFC) puede afectar adversamente la función de las células trofoblásticas placentarias en mamíferos (Jamshed *et al.*, 2022).

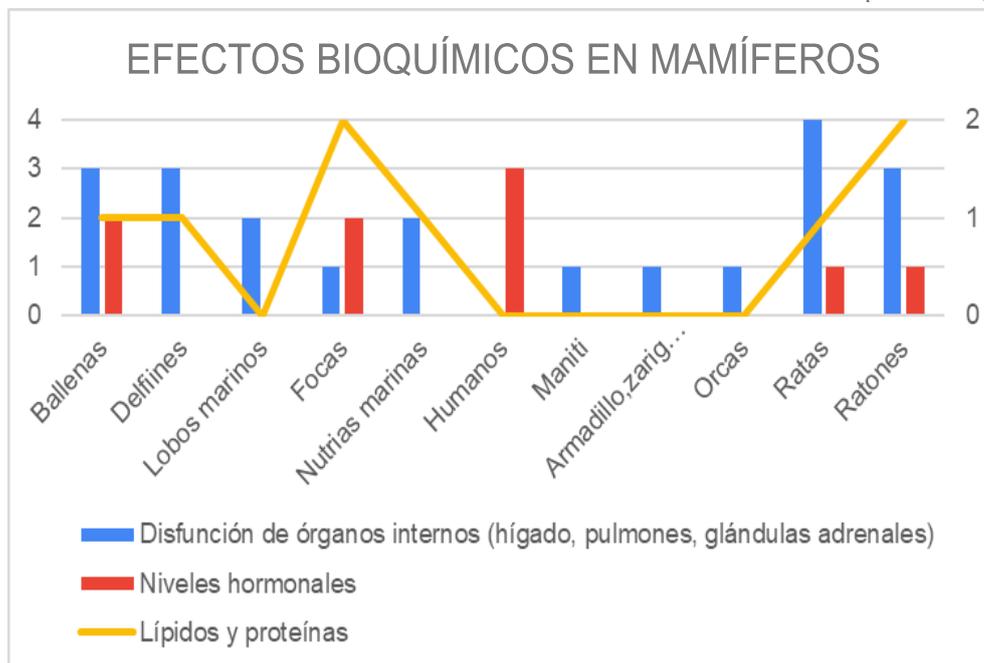
Figura 6*Efectos genotóxicos del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos*

Los hidrocarburos, al ser metabolizados en los organismos de mamíferos, pueden inducir una serie de efectos bioquímicos adversos. Por ejemplo, en el hígado, los hidrocarburos pueden causar daño celular y disfunción hepática al generar metabolitos tóxicos que interfieren con las funciones hepáticas esenciales, como la detoxificación y la síntesis de proteínas. En los pulmones, la inhalación de hidrocarburos puede llevar a inflamación y daño del tejido pulmonar, afectando la capacidad respiratoria y contribuyendo al desarrollo de enfermedades como la fibrosis pulmonar. Las glándulas adrenales, que son cruciales para la producción de hormonas, también pueden ser afectadas, resultando en alteraciones hormonales que impactan el equilibrio endocrino del organismo. Además, los hidrocarburos pueden modificar los niveles de lípidos y proteínas en el cuerpo, induciendo peroxidación lipídica y daño proteico que comprometen la integridad y función de las membranas

celulares y las rutas metabólicas. Estos efectos combinados pueden provocar disfunción multiorgánica y aumentar el riesgo de enfermedades crónicas en los mamíferos expuestos (Zapata-Pérez *et al.*, 2014)

Las ballenas, delfines, lobos marinos, focas, nutrias marinas, manatíes y orcas sufren disfunción de órganos internos debido a la exposición a hidrocarburos. Los niveles hormonales alterados afectan a ballenas, focas y humanos. Los efectos negativos en los lípidos y proteínas varían entre diferentes mamíferos, siendo más severos en algunos que en otros (Castello *et al.*, 2016). La comprensión de los efectos bioquímicos de los hidrocarburos en mamíferos es crucial tanto para la conservación ambiental como para la salud pública. Estos compuestos pueden alterar significativamente las funciones metabólicas y los sistemas enzimáticos, afectando tanto a mamíferos salvajes como a humanos expuestos.

Figura 7
Efectos bioquímicos del petróleo en los mamíferos terrestres y acuáticos



Conclusiones

A partir del análisis de los artículos seleccionados podemos decir que hubo un avance creciente en los últimos años en cuanto a los artículos publicados y estudios realizados sobre efectos tóxicos agudos y crónicos de hidrocarburos en mamíferos. Además, se identificó que la mayoría de las investigaciones se realizaron después de un evento de gran magnitud de derrame, es decir que se evaluaron los efectos años después de dichos eventos, lo cual va relacionado con los efectos crónicos; siendo la mayor parte de los estudios encontrados con un total de 21 artículos del total.

Así mismo, existe diversidad de rutas de absorción de hidrocarburos en diferentes especies de mamíferos, siendo la exposición directa, la inhalación y la ingestión las principales vías de

absorción. En cuanto a los efectos adversos observados incluyen daños fisiológicos, genéticos y disfunción de órganos internos, los cuales afectan la supervivencia, reproducción y calidad de vida de estos animales.

En resumen, las contaminaciones acuáticas por los hidrocarburos generan efectos tóxicos como crónicos en los seres vivos, debido a las propiedades como características de estos, por ejemplo, su bioacumulación, su dificultad para ser degradados mediante el metabolismo de los seres vivos, así como la complejidad de la estructura de los hidrocarburos, entre otros. Del mismo modo, influyen las características fisiológicas de cada especie, así como el grupo etario, sexo, entre otros. Ante esta problemática, es necesario estrictas políticas frente a accidentes por derrame, y herramientas de remediación eficaces como eficientes.

Referencias

- Ackleh, A. S., Chiquet, R. A., Ma, B., Tang, T., Caswell, H., Veprauskas, A., & Sidorovskaia, N. (2017). Analysis of lethal and sublethal impacts of environmental disasters on sperm whales using stochastic modeling. *Ecotoxicology*, *26*, 820-830.
- Baker, J. R., Jones, A. M., Jones, T. P., & Watson, H. C. (1981). Otter *Lutra lutra* L. mortality and marine oil pollution. *Biological Conservation*, *20*(4), 311-321. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(81\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0006-3207(81)90017-3)
- Balmer, B. C., Ylitalo, G. M., McGeorge, L. E., Baugh, K. A., Boyd, D., Mullin, K. D., Rosel, P. E., Sinclair, C., Wells, R. S., Zolman, E. S., & Schwacke, L. H. (2015). Persistent organic pollutants (POPs) in blubber of common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) along the northern Gulf of Mexico coast, USA. *Science Of The Total Environment*, *527-528*, 306-312. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.016>
- Benedict, J. C., Miller, K. P., Lin, T. M., Greenfeld, C., Babus, J. K., Peterson, R. E., & Flaws, J. A. (2003). Aryl Hydrocarbon Receptor Regulates Growth, But Not Atresia, of Mouse Preantral and Antral Follicles. *Biology of Reproduction*, *68*(5), 1511-1517. <https://doi.org/10.1095/BIOLREPROD.102.007492>
- Boogaard, P. J., Carrillo, J. C., Roberts, L. G., & Whale, G. F. (2017). Toxicological and ecotoxicological properties of gas-to-liquid (GTL) products. 1. Mammalian toxicology. *Critical reviews in toxicology*, *47*(2), 121-144. <https://doi.org/10.1080/10408444.2016.1214676>
- Brzezinski, M., Martin, L., Simpson, K., Lu, K., Gan, N., Huang, C. & Xu, W. (2024). Photodegradation enhances the toxic effect of anthracene on skin. *Journal of Hazardous Materials*, *471*, 134386. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134386>
- Castello, H., Junin, M., & Lorenzani, J. (2016). *El impacto del tráfico marítimo, pesca artesanal, hidrocarburos, plásticos y contaminantes sobre la fauna marina en la región costera bonaerense*. Univ. Maimónides.
- Castello, H., Junín, M., Lorenzani, J., & Lorenzani, J. (2018). El Impacto Del Tráfico Marítimo, Pesca Artesanal, Hidrocarburos, Plásticos Y Contaminantes Sobre La Fauna Marina En La Región Costera Bonaerense. *Fundación de Historia Natural*, *1*, 1-12.
- Castellon, H., Hollmann, P., & Junín M. (1998). Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el puerto de mar del Plata (Argentina), sobre una colonia de lobo marino de un pelo, *Otaria*

- Flavescens*. https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas_oceanograficas/acta9/OCE901_7.pdf
- Chung, JY, Kim, YJ, Kim, JY, Lee, SG, Park, JE, Kim, WR, y Kim, JM (2011). El benzo [a] pireno reduce la producción de testosterona en células de Leydig de rata mediante una alteración directa de la maquinaria esteroidogénica testicular. *Perspectivas de salud ambiental*, 119 (11), 1569-1574. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/abs/10.1289/ehp.1003391>
- Crépeaux, G., Grova, N., Bouillaud-Kremarik, P., Sikhayeva, N., Salquèbre, G., Rychen, G., Soulimani, R., Appenzeller, B., & Schroeder, H. (2014). Short-term effects of a perinatal exposure to a 16 polycyclic aromatic hydrocarbon mixture in rats: Assessment of early motor and sensorial development and cerebral cytochrome oxidase activity in pups. *NeuroToxicology*, 43, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2014.03.012>.
- Einaudi, L., Courbiere, B., Tassistro, V., Prevot, C., Sari-Minodier, I., Orsiere, T., & Perrin, J. (2014). *In vivo* exposure to benzo (a)pyrene induces significant DNA damage in mouse oocytes and cumulus cells. *Human Reproduction*, 29(3), 548-554. <https://doi.org/10.1093/HUMREP/DET439>
- Esler, D., Ballachey, B. E., Matkin, C., Cushing, D., Kaler, R., Bodkin, J., Monson, D., Esslinger, G., & Kloecker, K. (2018). Timelines and mechanisms of wildlife population recovery following the Exxon Valdez oil spill. *Deep-sea Research. Part 2. Topical Studies In Oceanography/Deep Sea Research. Part II, Topical Studies In Oceanography*, 147, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.04.007>
- Flores-Serrano, R. M., Iturbe-Argüelles, R., Pérez-Casimiro, G., Ramírez-González, A., Flores-Guido, J. S., & Kantún-Balam, J. M. (2014). Ecological risk assessment for small omnivorous mammals exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons: A case study in northeastern Mexico. *Science of the Total Environment*, 476, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.092>
- Freije, S. L., Enquobahrie, D. A., Day, D. B., Loftus, C., Szpiro, A. A., Karr, C. J., ... & Sathyanarayana, S. (2022). Prenatal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and gestational age at birth. *Environment international*, 164, 107246. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412022001726>
- Gao, P., da Silva, E., Hou, L., Denslow, N. D., Xiang, P., & Ma, L. Q. (2018). Human exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Metabolomics perspective. *Environment International*, 119, 466-477. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2018.07.017>
- García-Álvarez, N., Boada, L. D.,

- Fernández, A., Zumbado, M., Arbelo, M., Sierra, E., & Luzardo, O. P. (2014). Assessment of the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine contaminants in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) from the Eastern Atlantic Ocean. *Marine Environmental Research*, 100, 48-56. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.03.010>
- Hajji, A. L., & Lucas, K. N. (2024). Anthropogenic stressors and the marine environment: From sources and impacts to solutions and mitigation. *Marine Pollution Bulletin*, 205, 116557. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116557>
- Harwell, M. A., & Gentile, J. H. (2013). Assessing Risks to Sea Otters and the Exxon Valdez Oil Spill: New Scenarios, Attributable Risk, and Recovery. *Human And Ecological Risk Assessment*, 20(4), 889-916. <https://doi.org/10.1080/10807039.2013.828513>
- Hellfeld, R., Gade, C., Koppel, D.J., Walters, W.J., Kho, F., & Hastings, A. (2023). An approach to assess potential environmental mercury release, food web bioaccumulation, and human dietary methylmercury uptake from decommissioning offshore oil and gas infrastructure. *Journal of Hazardous Materials*, 452, 131298. <https://doi-org.cientifica.remotexs.co/10.1016/j.jhazmat.2023.131298>
- Hellou, J., Stenson, G., Ni, I. H., & Payne, J. F. (1990). Polycyclic aromatic hydrocarbons in muscle tissue of marine mammals from the Northwest Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 21(10), 469-473. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(90\)90065-G](https://doi.org/10.1016/0025-326X(90)90065-G)
- Helm, R., Costa, D.P., DeBruyn, T.D., O'Shea, T.J., Wells, R.S., & Williams, T.M. (2015). Overview of Effects of Oil Spills on Marine Mammals. Chapter 18. Fingas, M. (ed.). *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. Pp.455-475. <https://doi.org/10.1002/9781118989982.ch18>
- Hoseini, S. M., Namroodi, S., Zaccaroni, A., Sayad-Shirazi, A., Pérez-López, M., & Soler-Rodríguez, F. (2020). Detection of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in stranded caspian seals (*Pusa caspica*). *Aquatic Mammals*, 46(1), 58-66. <https://dx.doi.org/10.1578/AM.46.1.2020.58>
- IPIECA, & IOGP. (2015). *Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la ecología marina*. <https://biblioteca.dgmm.gob.hn/wp-content/uploads/2024/04/IPIECA-IOGP-2015-Impactos-de-los-derrames-de-hidrocarburos-sobre-la-ecologia-marina.pdf>
- Kuroda, K., Kijima, A., Jin, M., Ishii, Y., Takasu, S., Matsushita, K., & Umemura, T. (2013). The effects of long-term exposure to ozokerite mainly consisting of an aliphatic series of hydrocarbons using F344 rats. *Food and chemical toxicology*, 55, 476-483. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.01.034>

- Jamshed, L., Perono, G. A., Yacoub, L. R., Gutgesell, R. M., Frank, R. A., Hewitt, L. M., ... & Holloway, A. C. (2022). The effects of oil sands process-affected water naphthenic acid fraction components on GDF15 secretion in extravillous trophoblast cells. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 441, 115970. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2022.115970>
- Jin, Y., Miao, W., Lin, X., Wu, T., Shen, H., Chen, S. & Fu, Z. (2014). Sub-chronically exposing mice to a polycyclic aromatic hydrocarbon increases lipid accumulation in their livers. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 38(2), 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.07.014>
- Lair, S., Measures, L. N., & Martineau, D. (2015). Pathologic Findings and Trends in Mortality in the Beluga (*Delphinapterus leucas*) Population of the St Lawrence Estuary, Quebec, Canada, From 1983 to 2012. *Veterinary Pathology*, 53(1), 22-36. <https://doi.org/10.1177/0300985815604726>
- Lane, S. M., Smith, C. R., Mitchell, J., Balmer, B. C., Barry, K. P., McDonald, T., Mori, C. S., Rosel, P. E., Rowles, T. K., Speakman, T. R., Townsend, F. I., Tumlin, M. C., Wells, R. S., Zolman, E. S., & Schwacke, L. H. (2015). Reproductive outcome and survival of common bottlenose dolphins sampled in Barataria Bay, Louisiana, USA, following the Deepwater Horizon oil spill. *Proceedings - Royal Society. Biological Sciences/Proceedings - Royal Society. Biological Sciences*, 282(1818), 20151944. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1944>
- Lemos, L. S., Attademo, F. L., de Paiva Jr, L. H., Costa, A. F., Reis, L. M., de Oliveira Luna, F., & Siciliano, S. (2024). Metal and metalloid maternal transfer in a newborn West Indian manatee (*Trichechus manatus*) two years after the northeastern oil spill disaster of 2019 in Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 200, 116147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116147>
- Li, G., Xiong, H., Saeed, K., Ma, R., Xing, Y., Bi, Y., Li, C., Huang, J., & Zhang, Y. (2020). Comparative toxicity analysis of corannulene and benzo[a]pyrene in mice. *Toxicology Letters*, 331, 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.05.002>
- Liao, Z., Cui, X., Luo, X., Ma, Q., Wei, Y., Liang, M. y Xu, H. (2024). Exposure of farmed fish to petroleum hydrocarbon pollution and the recovery process: A simulation experiment with tiger puffer *Takifugu rubripes*. *Science of the total Environment*, 913, 169743.
- Lindeberg, M.R., Maselko, J., Heintz, R.A., Carls, M.G., Fugate, C., & Holland, L. (2018). Conditions of persistent oil on beaches in Prince William Sound 26 years after the Exxon Valdez spill. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 147,

- 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.07.011>
- López-Berenguer, G., Acosta-Dacal, A., Luzardo, O. P., Peñalver, J., & Martínez-López, E. (2023). Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mediterranean top marine predators stranded in SE Spain. *Chemosphere*, *336*, 139306. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139306>
- Lourenço, R. A., Taniguchi, S., da Silva, J., Gallotta, F. D. C., & Bicego, M. C. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbons in marine mammals: A review and synthesis. *Marine pollution bulletin*, *171*, 112699. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112699>
- Miller, A.C., Wilson, J.Y., Moore, M. J., & Stegeman, J. J. (2004). Cytochrome p450 1a1 expression in cetacean integument: implications for detecting contaminant exposure and effects. *Marine Mammal Science*, *20*(3), 554–566. <https://doi.org/10.1111/J.1748-7692.2004.TB01179.X>
- Mogollón, R., Arellano, C., Villegas, P., Espinoza-Morriberón, D., & Tam, J. (2023). REPSOL oil spill off Central Perú in January 2022: A modeling case study. *Marine Pollution Bulletin*, *194*, 115282. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115282>
- Murphy, D., Gemmell, B., Vaccari, L., Li, C., Bacosa, H., Evans, M., Gemmell, C., Harvey, T., Jalali, M., & Niepa, T.H.R. (2016). An in-depth survey of the oil spill literature since 1968: Long term trends and changes since Deepwater Horizon. *Marine Pollution Bulletin*, *113*, 371–379. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.10.028>
- Nevalainen, M., Helle, I., & Vanhatalo, J. (2018). Estimating the acute impacts of Arctic marine oil spills using expert elicitation. *Marine pollution bulletin*, *131*, 782–792. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.076>
- Otten, J., Williams, L., & Refsnider, J.M. (2023). Freshwater turtle populations as bioindicators following an oil spill: Delayed demographic changes reveal long-term impacts. *Ecological Indicators*, *154*, 110519. <https://doi-org.cientifica.remotexs.co/10.1016/j.ecolind.2023.110519>
- Parasuraman, S., Sujithra, J., Syamittra, B., Yeng, W. Y., Ping, W. Y., Muralidharan, S., ... & Dhanaraj, S. A. (2014). Evaluation of sub-chronic toxic effects of petroleum ether, a laboratory solvent in Sprague-Dawley rats. *Journal of basic and clinical pharmacy*, *5*(4), 89.
- Perono, G. A., Petrik, J. J., Thomas, P. J., & Holloway, A. C. (2022). The effects of polycyclic aromatic compounds (PACs) on mammalian ovarian function. *Current Research in Toxicology*, *3*, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.crtox.2022.100070>

- Propst, T. L., Lochmiller, R. L., Qualls, C. W., & McBee, K. (1999). In situ (mesocosm) assessment of immunotoxicity risks to small mammals inhabiting petrochemical waste sites. *Chemosphere*, 38(5), 1049–1067. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00349-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00349-X)
- Pulido-Capurro, V., Arana Bustamante, C., Olivera Carhuaz, E., & Riveros, J. C. (2022). El derrame de petróleo en el Terminal 2 de la Refinería la Pampilla y sus efectos en la biodiversidad de las costas del litoral marino, Perú. *Arnaldoa*, 29(1), 71–88. <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.291.29104>
- Ramenzoni, V. C., Comparini, L., Houlihan, A., Meyer, P., & Brouillard, P. (2024). Compounding disaster: Perceptions of coastal risk, extreme events, and oil and gas energy production in the Gulf of Mexico. *Energy Research & Social Science*, 117, 103735. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103735>
- Santos-Neto, E. B., Manhães, B. M. R., Oliveira-Ferreira, N., Cordeiro, C. V. S., Corrêa, C. A. C., Brião, J. A., & Lailson-Brito, J. (2024). PAHs in Franciscan dolphins from the Southwestern Atlantic Ocean: Concentration and maternal transfer assessments. *Marine Pollution Bulletin*, 203, 116455. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116455>
- Schwartz, J. A., Aldridge, B. M., Lasley, B. L., Snyder, P. W., Stott, J. L., & Mohr, F. C. (2004). Chronic fuel oil toxicity in American mink (*Mustela vison*): systemic and hematological effects of ingestion of a low-concentration of bunker C fuel oil. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 200(2), 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2004.04.004>
- Schwacke, L. H., Marques, T. A., Thomas, L., Booth, C. G., Balmer, B. C., Barratclough, A., & Smith, C. R. (2022). Modeling population effects of the Deepwater Horizon oil spill on a long-lived species. *Conservation Biology*, 36(4), e13878. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/cobi.13878>
- Schwacke, L. H., Smith, C. R., Townsend, F. I., Wells, R. S., Hart, L. B., Balmer, B. C., ... & Rowles, T. K. (2014). Health of common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in Barataria Bay, Louisiana, following the Deepwater Horizon oil spill. *Environmental science & technology*, 48(1), 93–103.
- Singh, V., Negi, R., Jacob, M., Gayathri, A., Rokade, A., Sarma, H., & Qureshi, Q. (2023). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in aquatic ecosystem exposed to the 2020 Baghjan oil spill in upper Assam, India: Short-term toxicity and ecological risk assessment. *Plos one*, 18(11), e0293601. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es403610f?src=getftr>

- Smith, C., Rowles, T., Hart, L., Townsend, F., Wells, R., Zolman, E., Balmer, B., Quigley, B., Ivancić, M., McKercher, W., Tumlin, M., Mullin, K., Adams, J., Wu, Q., McFee, W., Collier, T. K., & Schwacke, L. (2017). Slow recovery of Barataria Bay dolphin health following the Deepwater Horizon oil spill (2013-2014), with evidence of persistent lung disease and impaired stress response. *Endangered Species Research*, *33*, 127-142. <https://doi.org/10.3354/esr00778>
- Sun, X., Zhan, F., Yu, R. Q., Chen, L., & Wu, Y. (2020). Bio-accumulation of organic contaminants in Indo-Pacific humpback dolphins: Preliminary unique features of the brain and testes. *Environmental Pollution*, *267*, 115511. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115511>
- Tao, L.P., Li, X., Zhao, M.Z., Shi, J.R., Ji, S.Q., Jiang, W.Y., Liang, Q.L., Lei, Y.H., Zhou, Y.Y., Cheng, R., Shi, Z., Deng, W., Zhu, J., & Zhang, S.Y. (2021). Chrysene, a four-ring polycyclic aromatic hydrocarbon, induces hepatotoxicity in mice by activation of the aryl hydrocarbon receptor (AhR). *Chemosphere*, *276*, 130108. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130108>
- Tian, J., Lu, Z., Sanganyado, E., Wang, Z., Du, J., Gao, X. Gan, Z. y Wu, J. (2023). Trophic transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine mammals based on isotopic determination. *Science of Total Environment*, *875*, 162531.
- Venkatraman, G., Giribabu, N., Sakthi, P., Muttiah, B., Govindarajan, V., Alagiri, M., & Karsani, S. (2024). Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: A detailed review. *Chemosphere*, *351*, 141227. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141227>.
- Venn-Watson, S., Colegrove, K. M., Litz, J., Kinsel, M., Terio, K., Saliki, J., Fire, S., Carmichael, R., Chevis, C., Hatchett, W., Pitchford, J., Tumlin, M., Field, C., Smith, S., Ewing, R., Fauquier, D., Lovewell, G., Whitehead, H., Rotstein, D., & Rowles, T. (2015). Adrenal gland and lung lesions in Gulf of Mexico Common Bottlenose Dolphins (*Tursiops truncatus*) found dead following the deepwater horizon oil spill. *PloS One*, *10*(5), e0126538. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126538>
- Villamar, Z. (2011). ¿Cuál fue la visión oficial estadounidense del daño ambiental producido por el derrame de crudo del pozo Macondo? *Norteamérica*, *6*(1), 205-218
- Wang, J., Smit, M.G.D., Verhaegen, Y., Nolte, T.M., Redman, A.D., Hendriks, J., & Hjort, M. (2023). Petroleum refinery effluent contribution to chemical mixture toxic pressure in the environment. *Chemosphere*,

- 311, 137127. <https://doi-org.cientifica.remotexs.co/10.1016/j.chemosphere.2022.137127>
- Wang, L., Lu, Y., Wang, M., Zhao, W., Lv, H., Song, S. & Ju, W. (2024). Mapping of oil spills in China Seas using optical satellite data and deep learning. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135809. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135809>
- Wise, C. F., Wise, J. T. F., Wise, S. S., & Wise, J. P. (2018). Chemically dispersed oil is cytotoxic and genotoxic to sperm whale skin cells. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 208, 64–70. <https://doi.org/10.1016/J.CBPC.2017.10.009>
- Xie, Q., Yu, R. Q., Yu, R., Wang, Z., Zhang, X., & Wu, Y. (2021). Historic changes of polychlorinated biphenyls (PCBs) in juvenile and adult cetaceans from the Pearl River estuary from 2003 to 2020. *Science of The Total Environment*, 800, 149512. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149512>
- Zajda, K., Ptak, A., Rak, A., Fiedor, E., Grochowalski, A., Milewicz, T., & Gregoraszczyk, E. L. (2017). Effects of human blood levels of two PAH mixtures on the AHR signalling activation pathway and CYP1A 1 and COMT target genes in granulosa non-tumor and granulosa tumor cell lines. *Toxicology*, 389, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.TOX.2017.07.003>
- Zapata-Pérez, O., Rubio-Piña, J. A., & Patiño-Suárez, M. V. (2014). Evaluación y monitoreo de los efectos biológicos por derrames de petróleo en el medio marino. *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. Uac, Unamicmyl, Cinvestav-Unidad Mérida*, 461-480