



# Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante escenarios de derrames de gran escala en el golfo de México

COORDINACIÓN GENERAL

Paula Pérez Brunius y M. Leopoldina Aguirre Macedo

CONSORCIO DE INVESTIGACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO



# PRÓLOGO DE

Este trabajo representa una enorme contribución al conocimiento del ecosistema del golfo de México. La gran actividad relacionada a la producción y transporte del petróleo representa un riesgo considerable para este ecosistema. Al día de hoy ya han ocurrido dos grandes derrames de petróleo y la evaluación de su daño es imposible de hacer si no se tiene la información previa al derrame. Esta falta de información se evidenció clara y alarmantemente con el derrame de la petrolera British Petroleum en 2010. Ante esta contingencia nace el proyecto financiado por el entonces Instituto Nacional de Ecología cuyo objetivo fue el proporcionar una línea base de las características del golfo de México

que pueda ser comparada con las condiciones observadas después de un futuro derrame; ese trabajo fue el precursor del gran proyecto “Implementación de redes de observaciones oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México”. Una parte importante de los resultados de este proyecto se presenta en esta colección, la cual surge del objetivo de examinar de manera integral las posibles consecuencias de derrames petroleros en la región de aguas profundas del golfo de México. El esfuerzo en la implementación, desarrollo y compilación del trabajo realizado ha sido tremendo y





# LA COLECCIÓN

conjunta a una gran cantidad de personas (investigadores, técnicos, estudiantes, personal de apoyo) de varias instituciones nacionales e internacionales de diferentes disciplinas de investigación.

Esta colección incluye un resumen ejecutivo, donde se recapitula de forma bastante concisa el contenido de los tres tomos que componen la obra, desde el punto de vista de los logros obtenidos (desarrollo de herramientas y bases de datos generadas), resultados (qué fue lo que se encontró), y recomendaciones (cómo se puede usar la información, cuáles son los pasos a seguir en adelante o que áreas de oportunidad existen).

En el primer tomo se describe la generación de escenarios oceánicos y atmosféricos de un derrame de petróleo en aguas profundas del

golfo de México. Éste se compone de dos secciones donde se describen los modelos utilizados, la metodología estadística desarrollada para hacer los escenarios, y las regiones que pudieran verse afectadas según los distintos escenarios. Estos escenarios sirven de insumo para los siguientes dos tomos.

En el segundo tomo se muestra la vulnerabilidad ecológica del golfo de México ante derrames de gran escala, con el fin de hacer evaluaciones de los ecosistemas, así como identificar grupos o especies que pudieran verse mayormente afectadas ante los diferentes escenarios de derrame.

En el tercer tomo se estudia la conectividad biológica con énfasis en el área del plegado Perdido, para inferir los posibles efectos de de-









rrames petroleros de gran escala en esa región sobre las poblaciones de especies costeras y neríticas del golfo. El nivel de conectividad entre regiones se analizó modelando los patrones de dispersión de larvas, así como evaluando la estructura poblacional y el flujo génico de un grupo de especies modelo.

Con la información generada en esta obra se estará en posibilidad de sentar las bases científicas para la generación de estrategias de prevención, atención y mitigación de incidentes petroleros en aguas del golfo de México. También se identifican las regiones y algunas de las especies, familias y ecosistemas que pudieran sufrir daños en caso de ocurrir derrames en los pozos analizados. Claro está que en el caso de que ocurriera un derrame verdadero, su evolución y efectos dependerán de las condiciones ambientales del momento y de las particularidades de la explosión del pozo.

Es importante también recalcar que la obra se presenta de manera que sea útil tanto a la comunidad científica como los tomadores de decisiones. Hay detalles, sí, pero también conceptos claros en lo general, así como figuras y tablas verdaderamente ilustrativas. Los resultados de este enorme esfuerzo de investigación constituyen un valioso primer acercamiento interdisciplinario al problema ambiental generado por derrames. Sin embargo, es indispensable continuar hacia el establecimiento de esquemas de monitoreo que permitan el desarrollo de sistemas de diagnóstico y pronóstico ambiental para el golfo de México, para poder utilizarlos en caso de un derrame real, lo que repercutirá en beneficio de la sociedad que depende de los servicios ambientales que brinda este mar nacional.

**GUIDO MARINONE**

**Director General del CICESE**





# CREDITOS DE LA COLECCIÓN

## COORDINACIÓN GENERAL

Paula Pérez Brunius y M. Leopoldina Aguirre Macedo

## EDITORES

**Tomo I:** Paula Pérez Brunius, Cuauhtémoc Turrent Thompson,  
Paula García Carrillo

**Tomo II:** M. Leopoldina Aguirre Macedo, Paula Pérez Brunius,  
Luz E. Saldaña-Ruiz

**Tomo III:** Paula Pérez Brunius, Jesus Cano Compaire,  
Paula García Carrillo

## EQUIPO DE COORDINACIÓN Y SEGUIMIENTO EDITORIAL

Paula García Carrillo, Emma Alonzo Marrufo, Luz E. Saldaña-Ruiz,  
Mercedes Chi Chan, Selene Dinarzada Romero Álvarez

## RESPONSABLE TÉCNICO DEL PROYECTO

Juan Carlos Herguera

## COORDINADOR TÉCNICO DEL PROYECTO

Edward Peters Recagno

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en esta obra no hubiera sido posible sin el apoyo de un gran número de personas que forman parte del CIGoM. Agradecemos la participación de técnicos y estudiantes en el procesamiento y análisis de datos. También agradecemos al personal administrativo de las instituciones participantes que apoyó con la compra de equipo, en la contratación de servicios, y en la administración de los recursos humanos del proyecto.

## FOTOGRAFÍAS

Portada: Istockphoto.com. Flickr: pp. 1, 2-3, 4. Sena Garner-Greenpeace, p. 5. Patrick Kelly, p. 6. Kris Krüg, p. 17. Chris Graythen, pp. 10-11. Claudio Contreras Koob: pp. 8, 14-15, 23, 26-27, 29, 30, 31, 32-33. CIGoM, p. 31

**Consorcio de Investigación del Golfo de México**

ISBN 978-607-8811-13-7 (Obra completa)

Impreso y hecho en México



# RESUMEN EJECUTIVO

## PRESENTACIÓN

En este resumen se presentan los principales conclusiones, logros, recomendaciones y áreas de oportunidad del proyecto de investigación que compone la obra “Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante derrames de petróleo de gran escala en el golfo de México”. El contenido del escrito es producto de una reflexión colectiva e integradora que se generó a través de diferentes talleres virtuales de trabajo con los autores de los capítulos de los tres tomos que integran la colección.

## CRÉDITOS

### *Coordinación general*

Paula Pérez Brunius<sup>1</sup> y M. Leopoldina Aguirre Macedo.<sup>2</sup>

### *Conceptualización e integración del resumen ejecutivo*

Emma Alonzo Marrufo,<sup>2</sup> María C. García Aguilar,<sup>1</sup> M. Leopoldina Aguirre Macedo,<sup>2</sup> Paula Pérez Brunius,<sup>1</sup> Luz E. Saldaña-Ruiz,<sup>1</sup> Paula García Carrillo.<sup>1</sup>

### *Coordinación de los talleres de trabajo*

Emma Alonzo Marrufo,<sup>2</sup> Paula García Carrillo,<sup>1</sup> Luz E. Saldaña-Ruiz,<sup>1</sup> Eduardo Cuevas,<sup>3</sup> Selene Dinarzada Romero Álvarez,<sup>1</sup> Mercedes Chi Chan,<sup>1</sup> M. Leopoldina Aguirre Macedo,<sup>2</sup> Paula Pérez Brunius.<sup>1</sup>

### *Responsables del contenido*

*Escenarios de derrame oceánicos y atmosféricos de derrames de gran escala en el golfo de México* (tomo I): Cuauhtémoc Turrent Thompson,<sup>1</sup> Paula Pérez Brunius,<sup>1</sup> Julio Sheinbaum,<sup>1</sup> Jorge Zavala-Hidalgo,<sup>4</sup> Paula García Carrillo,<sup>1</sup> Víctor Almanza Veloz,<sup>4</sup> Josefina Olascoaga,<sup>5</sup> Javier Berón-Vera,<sup>1</sup> Rosario Romero-Centeno,<sup>4</sup> Julio A. Lara-Hernández,<sup>6</sup> Javier Rodríguez Outerelo,<sup>1</sup> Alejandro Domínguez Pérez,<sup>1</sup> Raúl Méndez Turrubiates,<sup>1</sup> Emma Alonzo Marrufo,<sup>2</sup> M. Leopoldina Aguirre Macedo.<sup>2</sup>

*Vulnerabilidad ecológica del golfo de México ante derrames de gran escala* (tomo II): Luz E. Saldaña-Ruiz,<sup>1</sup> Eduardo Cuevas,<sup>3</sup> Monica Améndola Pimenta,<sup>2</sup> Sébastien Putzeys,<sup>2</sup> Abigail Uribe-Martínez,<sup>3</sup> M. Leopoldina Aguirre Macedo,<sup>2</sup> Emma Alonzo Marrufo,<sup>2</sup> María de los Ángeles Liceaga-Correa,<sup>2</sup> Daniel Pech,<sup>7</sup> Oscar Sosa-Nishizaki,<sup>1</sup> María C. García Aguilar,<sup>1</sup> Gilberto Hernández Cárdenas,<sup>8</sup> Alfonsina E. Romo Curiel,<sup>1</sup> Margarita Gallegos Martínez,<sup>8</sup> Paula García Carrillo,<sup>1</sup> Paula Pérez Brunius.<sup>1</sup>



*Efectos de escenarios de derrame en Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México* (tomo III): Axayácatl Rocha-Olivares,<sup>1</sup> Sharon Herzka,<sup>1</sup> Jesus C. Compaire,<sup>1</sup> Paula Pérez Bruniús,<sup>1</sup> Javier Rodríguez Outerelo,<sup>1</sup> Paula García Carrillo,<sup>1</sup> Emma Alonzo Marrufo,<sup>2</sup> M. Leopoldina Aguirre Macedo.<sup>2</sup>

*Revisores externos*

Federico Graef. Primer responsable legal del proyecto CIGoM, Departamento de Oceanografía Física de CICESE.

Edward Peters Recagno. Coordinador general de CIGoM, CICESE.

Jorge Silva Ballesteros. Miembro del Comité Consultivo Científico de CIGoM, Servicio y Consultoría Especializados del Carmen.

Victor M. Vidal Martínez. Responsable del subproyecto “Línea base del Polígono Perdido” dentro de CIGoM, Departamento de Recursos del Mar, CINVESTAV-Mérida.

---

1. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

2. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida.

3. Universidad Autónoma del Carmen.

4. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

5. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami.

6. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

7. El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Campeche.

8. Universidad Autónoma Metropolitana.





# ÍNDICE

Prólogo de la colección

**3**

Créditos de la colección

**6**

Resumen ejecutivo

**7**

Introducción

**11**

Estructura de la colección

**14**

Logros y resultados relevantes

**17**

Alcances, recomendaciones y futuros desarrollos

**26**

Contribución ambiental, social y económica

**29**

Comentarios finales

**32**

Referencias

**34**





## INTRODUCCIÓN

**E**l golfo de México (GM) es un Gran Ecosistema Marino (UNESCO, 2020) donde convergen las Zonas Económicas Exclusivas de México, Estados Unidos y Cuba. Su biodiversidad marina es particularmente alta, con más de 15 400 especies reconocidas, de las cuales aproximadamente el 10% son endémicas (Felder y Camp, 2009), pero no solo es un reservorio de diversidad biológica: el GM proporciona servicios ecosistémicos de gran valor socio-económico fundamentales para el desarrollo de los tres países. Es por ello que las políticas públicas deben dirigirse a normar y regular las actividades económicas considerando la conservación de especies y regiones de alto valor ecológico, cultural y comercial. En el GM, la pesca, la acuicultura y el turismo generan billones de dólares anuales (Karnauskas *et al.*, 2013), y es una región crítica para el transporte marítimo internacional (Shepard *et al.*, 2013), además de tener el potencial para ser una fuente de energía limpia (SENER, 2020). Sin embargo, la producción de hidrocarburos es la principal actividad económica: la producción de petróleo en alta mar en el GM representa el 82% de la producción total de crudo de México (CNH, 2020), y el 17% de la producción total de Estados Unidos (EIA, 2020).

Las actividades relacionadas con la exploración, producción y transporte del petróleo son un riesgo potencial para el ecosistema dada la posibilidad de derrames accidentales menores, tales como los que se asocian a la operación regular en el trasiego del





Servicios ambientales del GM	Actividades socioeconómicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>De apoyo:</b> funciones que permiten el mantenimiento de los otros servicios (hábitat.)</li> <li>• <b>Reguladores:</b> regulación natural de los procesos que sustentan el funcionamiento del ecosistema y ciclos naturales (regulación del clima, ciclo de nutrientes, biodiversidad, etc).</li> <li>• <b>Culturales:</b> beneficios asociados a las experiencias recreativas de contacto con el medioambiente (avistamiento de aves y ballenas, buceo recreacional).</li> <li>• <b>De suministro:</b> materias primas, alimento, energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesquera (local y de altura).</li> <li>• Transporte (turístico y mercante).</li> <li>• Cultivo de peces y otros organismos marinos.</li> <li>• Industria petrolera (producción y transporte).</li> <li>• Extracción de arena.</li> <li>• Turística (playas, cruceros, actividades recreativas marinas).</li> <li>• Potencial fuente de energías renovables (eólica, mareomotriz, oleaje, entre otros).</li> </ul>

Fuente: UNEP-WCMC (2011).

petróleo a los buques y durante el transporte del producto, o de gran escala originados por siniestros durante la exploración y producción. Entre 1975 y 2017, en el GM hubo al menos 45 derrames de petróleo, de los cuales 10 fueron significativos (> 10 000 barriles). Entre estos, destacan los derrames del pozo IXTOC-I en la Sonda de Campeche en



1979 y del pozo Macondo tras la explosión en la plataforma Deepwater Horizon en el norte del golfo en 2010, los cuales vertieron 3.52 y 4.88 millones de barriles de petróleo al mar, respectivamente (NOAA, 2020). Si bien derrames de esta magnitud son poco frecuentes, sus consecuencias son catastróficas, causando severos daños ambientales (Campagna *et al.*, 2011; Soto *et al.*, 2014) y económicos (Restrepo, 1982; McCrea-Strub *et al.*, 2011) de largo plazo que han dejado lecciones sobre las consecuencias y las acciones que deberían de implementarse para proteger la salud del ecosistema.

El derrame de Deepwater Horizon dio lugar a una serie de acciones legales por parte de Estados Unidos en contra de la compañía British Petroleum, logrando una indemnización de billones de dólares (Lee *et al.*, 2018); sin embargo, la falta de pruebas del impacto en agua, sedimentos y organismos de la Zona Económica Exclusiva de México impidió al país sostener una demanda contra British Petroleum (Martín-Borregón, 2018).

Dada la importancia ecológica y económica del GM, claramente es necesario contar con información sólida sobre las regiones, hábitats y especies particularmente vulnerables ante derrames de gran escala, para que las autoridades responsables de la atención de estos siniestros tengan elementos científicos robustos y actuales para sustentar la toma de decisiones. Al mismo tiempo, esta información es indispensable para evidenciar el daño ante tribunales judiciales nacionales e internacionales en caso de otra tragedia ambiental.

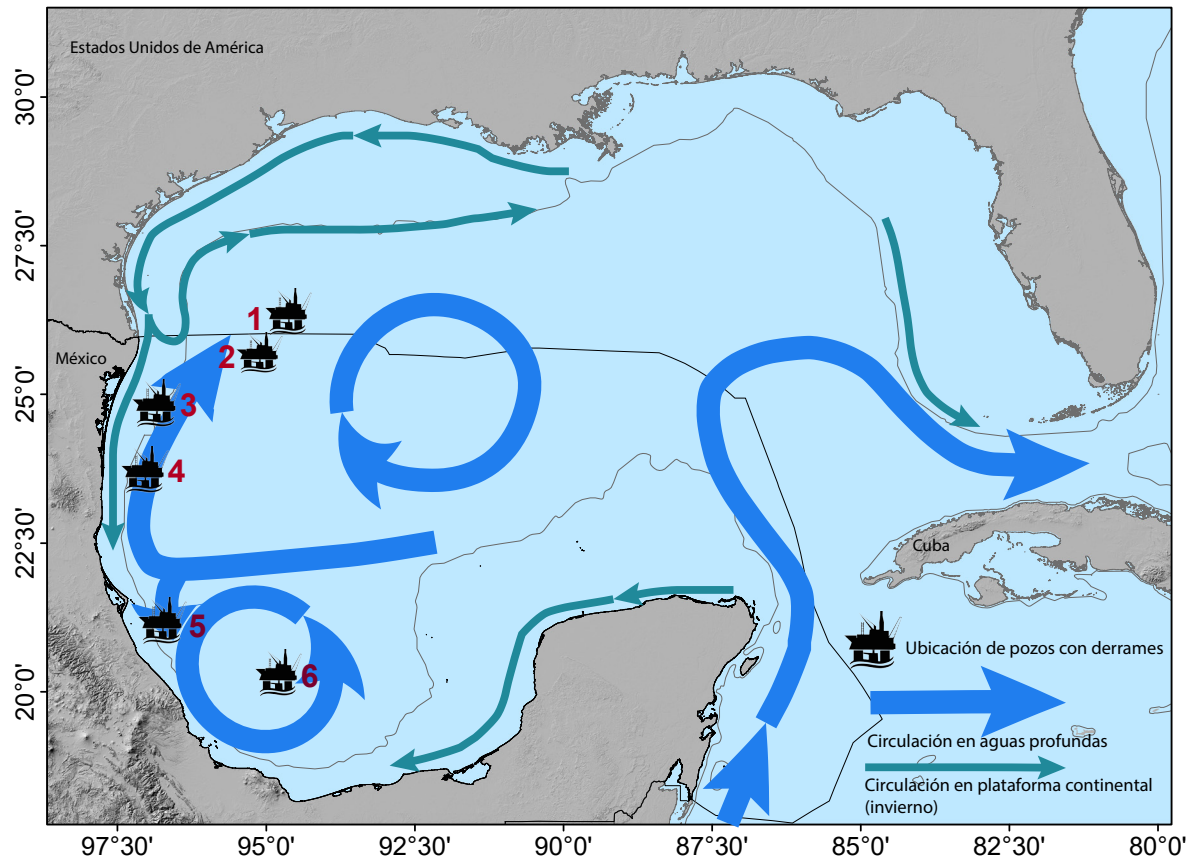
El reconocimiento a nivel federal de estas necesidades llevó a la realización de uno de los proyectos de investigación más ambiciosos, complejos, costosos e interdisciplinarios de la historia de México. El proyecto, denominado *Implementación de redes de observaciones oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México* (2015-2021), fue financiado por el Fondo Sectorial de la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología Hidrocarburos (SENER-CONACYT hidrocarburos) en respuesta a una demanda específica de Petróleos Mexicanos (PEMEX). PEMEX, como la empresa estatal a cargo de toda la producción petrolera nacional hasta la reforma energética del 2013, reconoció la importancia de contar con bases científicas para la toma de decisiones en casos de derrames de petróleo en el GM.

El proyecto fue ejecutado por el Consorcio de Investigación del golfo de México (CIGoM). El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) fungió como institución responsable y coordinadora del proyecto multi-institucional, en el cual participaron destacadas instituciones académicas nacionales, incluyendo el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV) unidad Mérida, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), entre otras. También colaboraron algunas instituciones internacionales ampliamente reconocidas, como por ejemplo Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science (RSMAS), Institute of Research for Development (LEGOS) y Texas A&M University Galveston (TAMUG), que se integraron al proyecto con el fin de complementar y desarrollar las capacidades nacionales.

Uno de los productos del esfuerzo ambicioso e integrativo de las instituciones involucradas derivó en la colección literaria “*Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante derrames de petróleo de gran escala en el golfo de México*”. Los resultados del excepcional esfuerzo de investigación que se plasman en esta colección están orientados



a evaluar las posibles consecuencias ambientales de derrames hipotéticos en seis pozos propuestos por PEMEX en aguas profundas del oeste del GM, ubicados entre la región oceánica frente a Tamaulipas y la bahía de Campeche. Considerando la continuidad geográfica del ecosistema, los escenarios y algunos de los resultados presentados en esta colección incluyen información e implicaciones para todo el GM, y no solo para la Zona Económica Exclusiva de México.



**Principales corrientes superficiales en el golfo de México, y ubicación de los seis pozos en aguas profundas para los que se realizaron los escenarios de derrame (Elaboraron: Paula Pérez Brunius y Luz E. Saldaña-Ruiz; adaptado de Hamilton *et al.*, 2018; Turner & Rabalais, 2019; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003).**

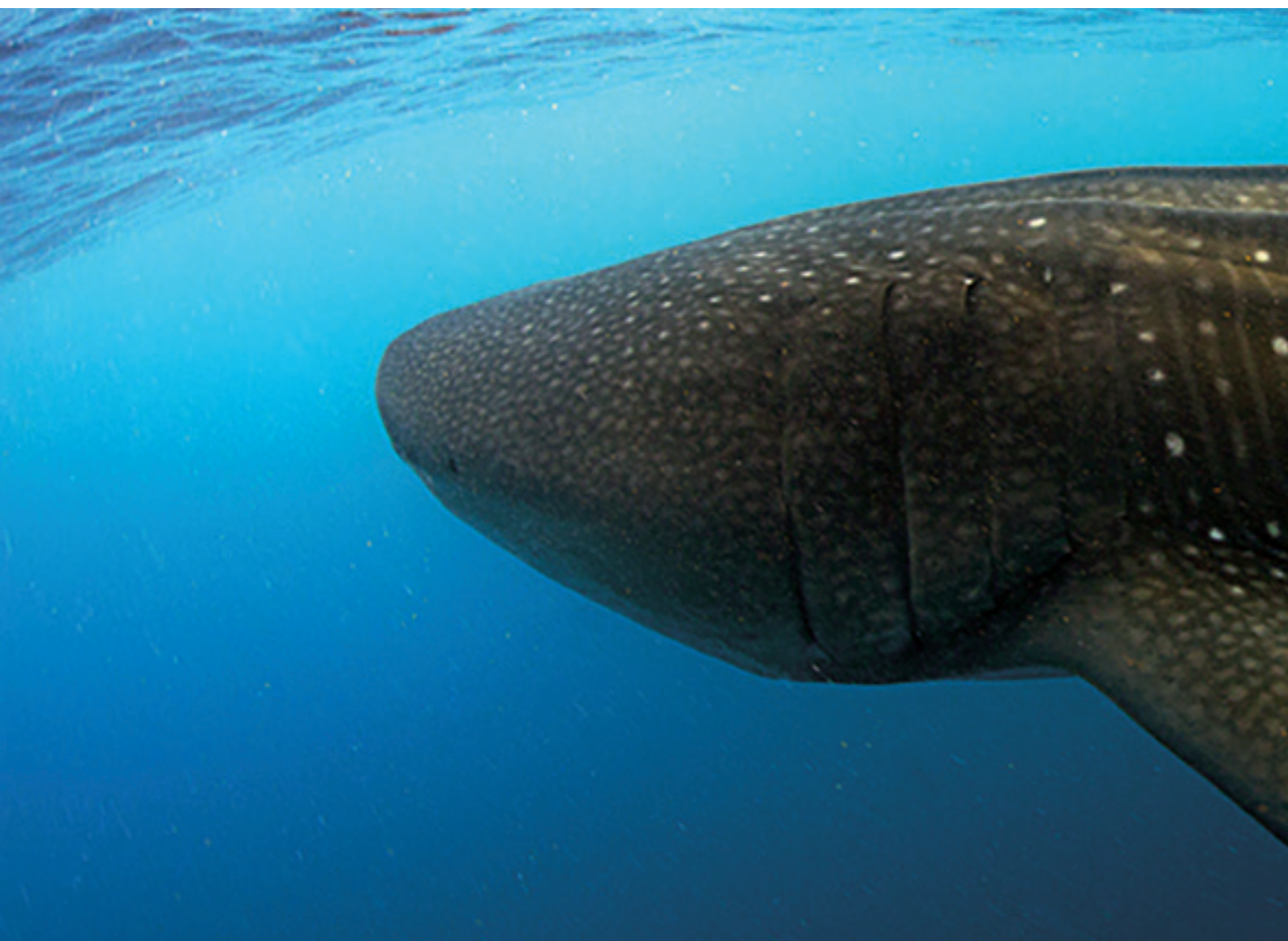
En este resumen ejecutivo se destacan los aspectos medulares de la colección literaria, brindando un panorama de los escenarios de derrame y sus efectos potenciales sobre diversos componentes biológicos y procesos ecológicos del ecosistema. Asimismo, se enfatiza el alcance de los resultados y las prioridades de atención en caso de derrames. Como producto natural del esfuerzo académico que sustenta la obra, se señalan áreas de investigación prioritarias a futuro, con el objetivo de construir sobre el conocimiento adquirido y seguir preparando al país ante la posibilidad real de un derrame de gran escala que impacte las aguas patrimoniales de México. Como el resto de la obra, esta síntesis no es prescriptiva: ofrece un importante y sólido sustento de información que pueden adoptar diferentes órdenes de gobierno como base para definir políticas públicas para progresar hacia la sustentabilidad, considerando la conservación del ecosistema del GM.



## ESTRUCTURA DE LA COLECCIÓN

Los resultados presentados en la colección sientan las bases científicas para la generación de estrategias de planeación, prevención, atención y mitigación de incidentes petroleros en aguas profundas mexicanas del GM, que fue la razón directa de esta obra. Además, aportan elementos para fortalecer las políticas públicas dirigidas a normar y regular las actividades de la industria petrolera en favor de la conservación de especies y regiones de alto valor ecológico y/o económico. Esto se logró gracias al aporte de tres de las cinco líneas de acción del proyecto del CIGoM:

Línea de acción 2: Línea base y monitoreo ambiental- En esta línea de acción se analizaron diversos parámetros ecológicos de los recursos biológicos del GM. Estos se presentan en el “Atlas de Línea Base Ambiental del Golfo de México” (Herzka *et al.*, 2021). En particular, se incluye información presentada en el tomo III: Hidrografía, biogeoquímica, ecología y biología, tomo VI: Ecosistemas de pastos marinos, tomo VII: Hábitats críticos y hotspots de tortugas marinas, tomo VIII: Zonas de alta agregación de cetáceos, y tomo IX: Hábitat potencial de peces pelágicos. Los análisis espaciales de algunos componentes claves del ecosistema que se presentan en el Atlas de Línea Base ambiental, sentaron las bases para la evaluación de la vulnerabilidad ecológica a derrames de petróleo en diferentes niveles de organización ecológica (especies, familias, ecosistemas).

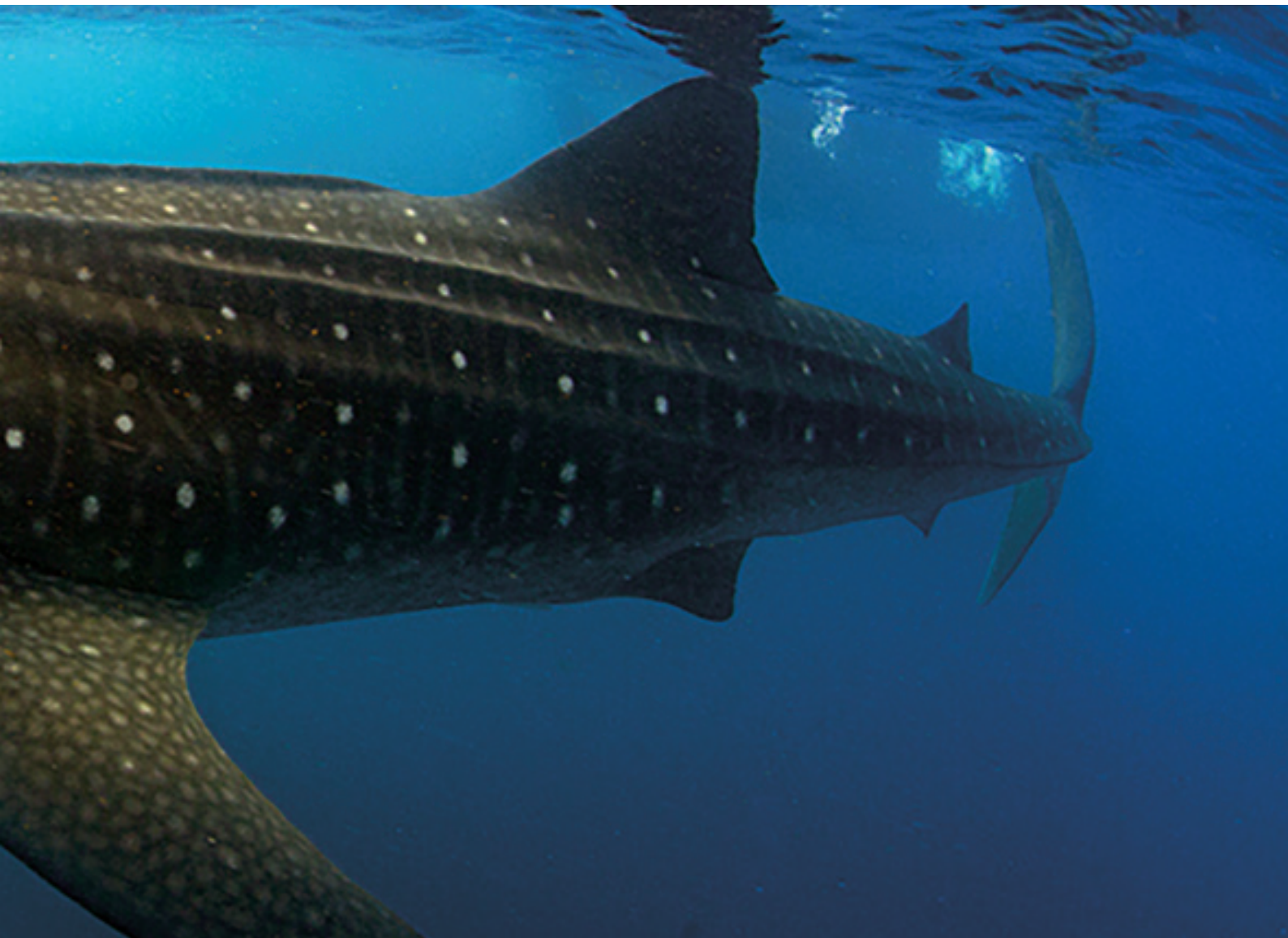




Línea de acción 3: Modelos numéricos de circulación biogeoquímica- Se adecuaron, mejoraron e implementaron tres modelos de circulación (HYCOM, ROMS y NEMO) y tres modelos derrame de petróleo (CIC-OIL, OilSpill y PetroTrans), y se desarrollaron las metodologías para generar escenarios por derrame de hidrocarburos tanto en el mar como en la atmósfera para la ubicación de los seis pozos proporcionados por PEMEX.

Línea de acción 5: Análisis de escenarios de derrame. Se desarrollaron modelos de vulnerabilidad ecológica que se aplicaron a especies de particular interés por su valor comercial o porque están sujetas a medidas de conservación, como los pelágicos mayores, cetáceos o tortugas marinas, así como a regiones y hábitats. También se llevaron a cabo los experimentos de bioensayos y mesocosmos para analizar los efectos de la exposición de petróleo en organismos marinos modelo. Otro aspecto muy importante fue la estimación de la conectividad biológica a través de modelos probabilísticos de los patrones de dispersión de larvas pelágicas y de estimaciones derivadas del análisis de marcadores moleculares en especies selectas de peces e invertebrados.

La colección literaria se compone de tres tomos. El tomo I (Pérez Brunius *et al.*, 2020) se centra en la generación de los escenarios de derrames de petróleo y el análisis de las regiones que pudieran ser afectadas por el arribo de petróleo. Considera también las emisiones a la atmósfera derivadas de la quema intencional de petróleo sobre la superficie del mar, práctica común como medida de mitigación. En el Tomo II (Aguirre Macedo *et al.*, 2020) se incluyen las evaluaciones de vulnerabilidad ecológica de poblaciones de especies amenazadas o de alto valor económico ante escenarios de derrame,

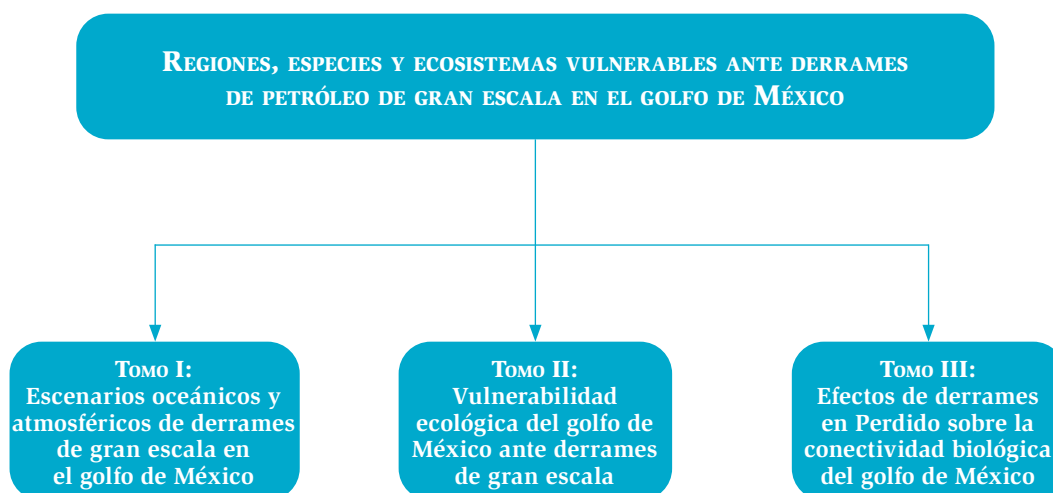






Elaboró: Paula García Carrillo.

así como de hábitats y regiones; también se incluye el análisis de la vulnerabilidad a partir de la respuesta a diferentes concentraciones de petróleo de organismos marinos modelo. En el Tomo III (Pérez Brunius *et al.*, 2020) se analiza el papel de la conectividad biológica (desde dos perspectivas complementarias, transporte larvario y flujo genético) sobre el potencial de recuperación de las poblaciones de especies costeras y de la plataforma continental que pudieran verse afectadas por un derrame en pozos profundos de la región del cinturón plegado Perdido. Al integrar los escenarios oceánicos con la información ecológica fue posible identificar regiones, especies y comunidades marinas de alta vulnerabilidad ante incidentes petroleros.



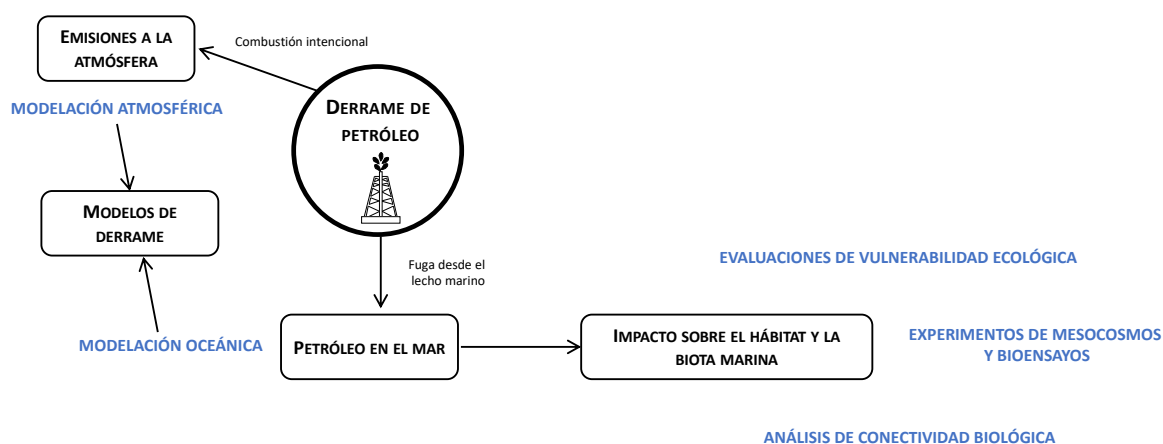
Elaboró: María C. García Aguilar.





## LOGROS Y RESULTADOS RELEVANTES

El mayor logro de la obra *Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante escenarios de derrames de gran escala en el golfo de México* fue generar los escenarios de derrame para estimar los posibles destinos de vertidos de hidrocarburos de gran escala en aguas profundas dentro de la Zona Económica Exclusiva mexicana, y combinarlos con los modelos de vulnerabilidad ecológica y evaluaciones de conectividad biológica para inferir los efectos potenciales sobre el hábitat y biota marinos del GM. Para lograrlo fue indispensable la conjunción de diferentes disciplinas científicas, obteniendo un mejor entendimiento de los efectos potenciales de derrames sobre distintos niveles de organización ecológica: individuos, poblaciones, comunidades, hábitats, y el ecosistema. Debido a la enorme extensión, diversidad y complejidad del GM, se abordaron una gran variedad de aproximaciones metodológicas que fueron aplicadas en diferentes escalas espaciales, temporales y de organización ecológica, cubriendo desde la respuesta molecular de organismos modelo ante la exposición al petróleo hasta el posible impacto sobre grandes regiones geográficas. Esta pluralidad de aproximaciones implicó el desarrollo e implementación de novedosos métodos y técnicas de laboratorio y campo, el avance en herramientas de modelación numérica y el uso de sistemas de información geográfica, entre otros. A su vez, fue indispensable formar equipos de trabajo interdisciplinarios altamente especializados, así como implementar estrategias de coordinación y comunicación entre personal de diferentes instituciones.



Elaboró: María C. García Aguilar.



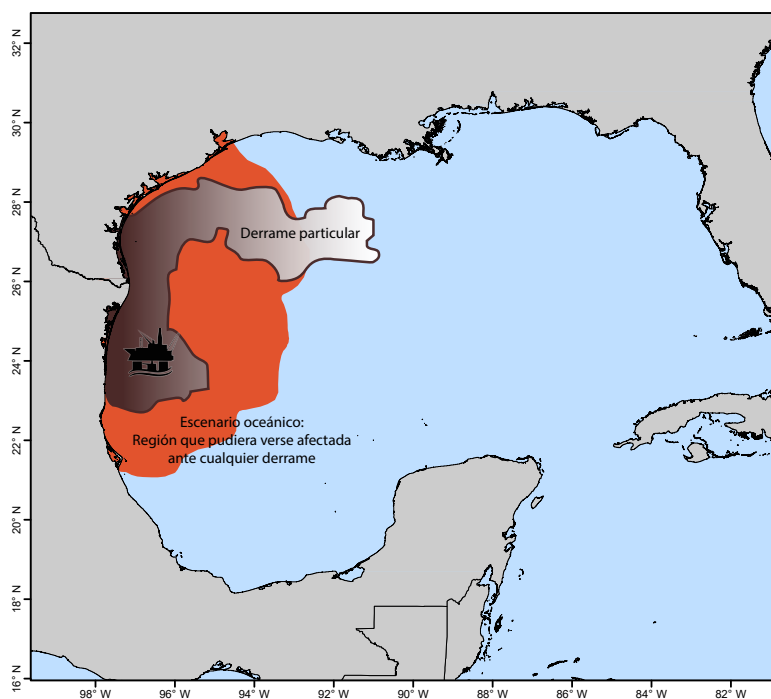
Entre las metodologías desarrolladas destacan las generadas utilizando modelación numérica para la construcción de los escenarios de derrame, tomando en cuenta la localización del pozo, la cantidad y tipo de hidrocarburo liberado al mar o a la atmósfera, la duración del derrame y la evolución de los contaminantes en el medio.

Los modelos de derrame oceánicos simulan los procesos de transporte, dispersión e intemperización del petróleo en el mar, y los modelos de derrame atmosféricos los procesos de transporte y dispersión de las emisiones a la atmósfera derivadas de la quema intencional del petróleo. Dada la alta variabilidad natural en las condiciones oceánicas y atmosféricas en el tiempo y el espacio, el destino de los hidrocarburos derramados depende de las condiciones hidrodinámicas bajo las que ocurre el accidente, las cuáles se desconocen hasta que no sucede el evento. Por ende, los escenarios de derrames se definieron como estadísticos calculados a partir de un conjunto de cientos de derrames individuales modelados numéricamente bajo la mayor cantidad de condiciones oceánicas y atmosféricas posibles, con el fin de incluir la mayor cantidad de desenlaces. Los derrames individuales iniciaron bajo condiciones idénticas de la explosión del pozo en el lecho marino y del incendio intencional del petróleo desde la superficie del mar, pero con condiciones oceánicas y atmosféricas distintas. Para el océano, los derrames individuales duraron 15 días liberando petróleo, con un flujo intermedio del ocurrido en los pozos IXTOC-I y Macondo, y para tres tipos genéricos de petróleo (ligero, mediano y pesado). Los escenarios muestran la evolución del petróleo hasta dos meses después de iniciado el siniestro en los primeros 20 metros de la columna de agua, ya que la simulación de la pluma mostró que la mayor parte del petróleo derramado se acumuló en la capa superficial del mar dadas las condiciones de la explosión del pozo elegidas. Para los escenarios atmosféricos, las emisiones fueron puntuales en la posición geográfica del pozo, con las partículas distribuidas aleatoriamente en la vertical sobre una columna de 900 m de altura, ya que los contaminantes en la capa planetaria son los que pueden llegar a afectar a las poblaciones humanas.

Los escenarios de derrames oceánicos y de emisiones a la atmósfera se presentan en mapas que muestran las áreas de posible afectación ante un eventual accidente en cualquiera de los seis pozos, así como los tiempos estimados de arribo de los contaminantes a las regiones posiblemente afectadas. Para los escenarios oceánicos se consideraron diferentes temporadas (lluvias, secas y nortes) y para los atmosféricos las condiciones meteorológicas (brisas, nortes, suradas y ciclones tropicales).

- Los escenarios oceánicos sugieren que derrames en los pozos ubicados en el área de Perdido y frente a Tamaulipas (pozos 1 a 4) podrían afectar a la zona noroeste del golfo y a las costas de los estados de Tamaulipas, México, y de Texas, Estados Unidos, mientras que los pozos que se encuentran en la bahía de Campeche (pozos 5 y 6) podrían afectar mayormente las regiones profundas de la bahía, así como a gran parte del talud continental occidental. Además, los escenarios en los pozos 5 y 6 son los que muestran una mayor extensión del litoral mexicano que podría verse impactado, principalmente la costa de los estados de Tamaulipas y Veracruz, aunque bajo ciertas condiciones los derrames podrían extenderse a la costa de Tabasco al sur, o llegar hasta la costa de Texas al norte.
- Los escenarios atmosféricos indican que los puntos de emisión del área de Perdido (pozos 1 y 2) están lo suficientemente alejados de la costa en el contexto de conta-

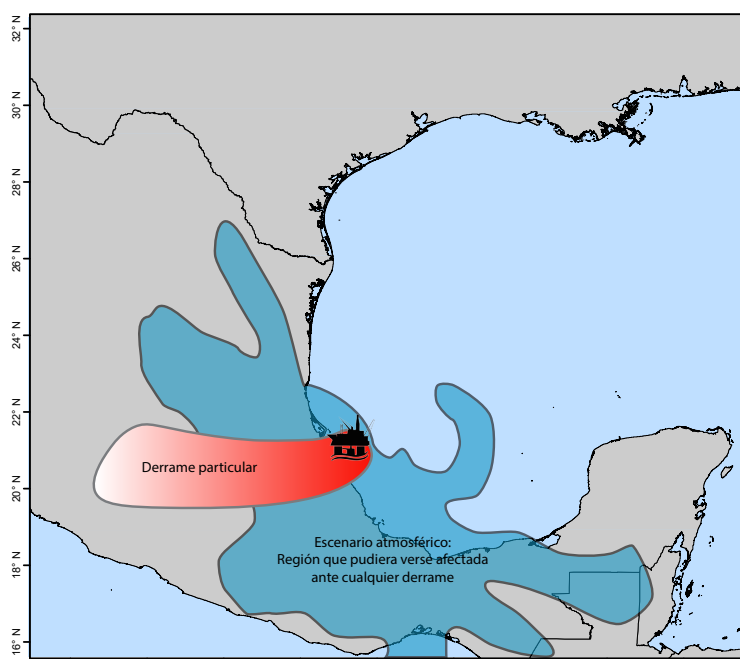




**Representación de un escenario de derrame oceánico comparado con un derrame individual que ocurrió bajo condiciones oceánicas y atmosféricas particulares, para el pozo 3. Véase Sección 1 del Tomo I de la colección. Elaboró: Paula García Carrillo.**

minación atmosférica, por lo que la afectación de la calidad del aire en las zonas con asentamientos humanos podría ser limitada. En cambio, los puntos de emisión ubicados al sur del área de Perdido y en la bahía de Campeche (pozos 3 a 6) pueden representar una amenaza para la calidad del aire de poblaciones costeras de los estados de Tamaulipas, Veracruz y Tabasco, particularmente para las ciudades de Tampico en Tamaulipas, y Tuxpan, Poza Rica y Veracruz en el estado de Veracruz. Además, se encontró que, de las condiciones meteorológicas analizadas, los días de brisa de primavera y verano tienden a aumentar la fracción de los

contaminantes que permanecen cerca de la superficie terrestre, incrementando la amenaza a la salud humana en las poblaciones posiblemente afectadas.



**Representación de un escenario de emisiones de contaminantes atmosféricos comparado con un evento particular, para el pozo 4. Ver Sección 2 del Tomo I de la colección. Elaboró: Paula García Carrillo.**



La vulnerabilidad se entiende como la medida en que un sistema es susceptible a daños, y está en función del grado de exposición al estresor (o estresores), así como de la sensibilidad del sistema y su capacidad de recuperación (De Lange *et al.*, 2005). Por lo tanto, para determinar la vulnerabilidad ecológica se necesita información sobre los efectos potenciales del estresor (p. ej., petróleo), de las condiciones (o factibilidad) de la exposición, y de las características intrínsecas (biológicas/ecológicas) del sistema (De Lange *et al.*, 2010).

La identificación de especies y regiones que pudieran ser particularmente vulnerables ante eventuales derrames de petróleo se abordó desde tres enfoques. El primero consistió en evaluar la vulnerabilidad integral de las especies y comunidades de interés considerando las múltiples fuentes de presión (estresores) que actúan actualmente sobre ellas. Este enfoque se usó en las evaluaciones de cuatro especies de tortugas marinas y en comunidades de vegetación acuática sumergida y pastos marinos. En el caso de tortugas marinas, posteriormente se cuantificó la interacción de la vulnerabilidad con los escenarios de derrame presentados en el Tomo I de la colección. El segundo enfoque, aplicado en las evaluaciones de 10 especies de cetáceos y 24 de peces pelágicos mayores, consistió en cuantificar exclusivamente la vulnerabilidad de las especies al petróleo, así como en determinar el traslape de los escenarios de derrame con sus áreas potenciales de agregación. El tercer enfoque se usó para determinar la vulnerabilidad del ecosistema a través el análisis de la vulnerabilidad de 14 tipos de hábitats que lo componen y de 90 especies de diferentes grupos taxonómicos (invertebrados, peces, tortugas, aves y mamíferos). Adicionalmente se diseñó un modelo para evaluar la vulnerabilidad del hábitat a través de la suma de la vulnerabilidad de diferentes componentes; en este caso se eligieron tres componentes: tortugas, pastos marinos y fauna macrobentónica.

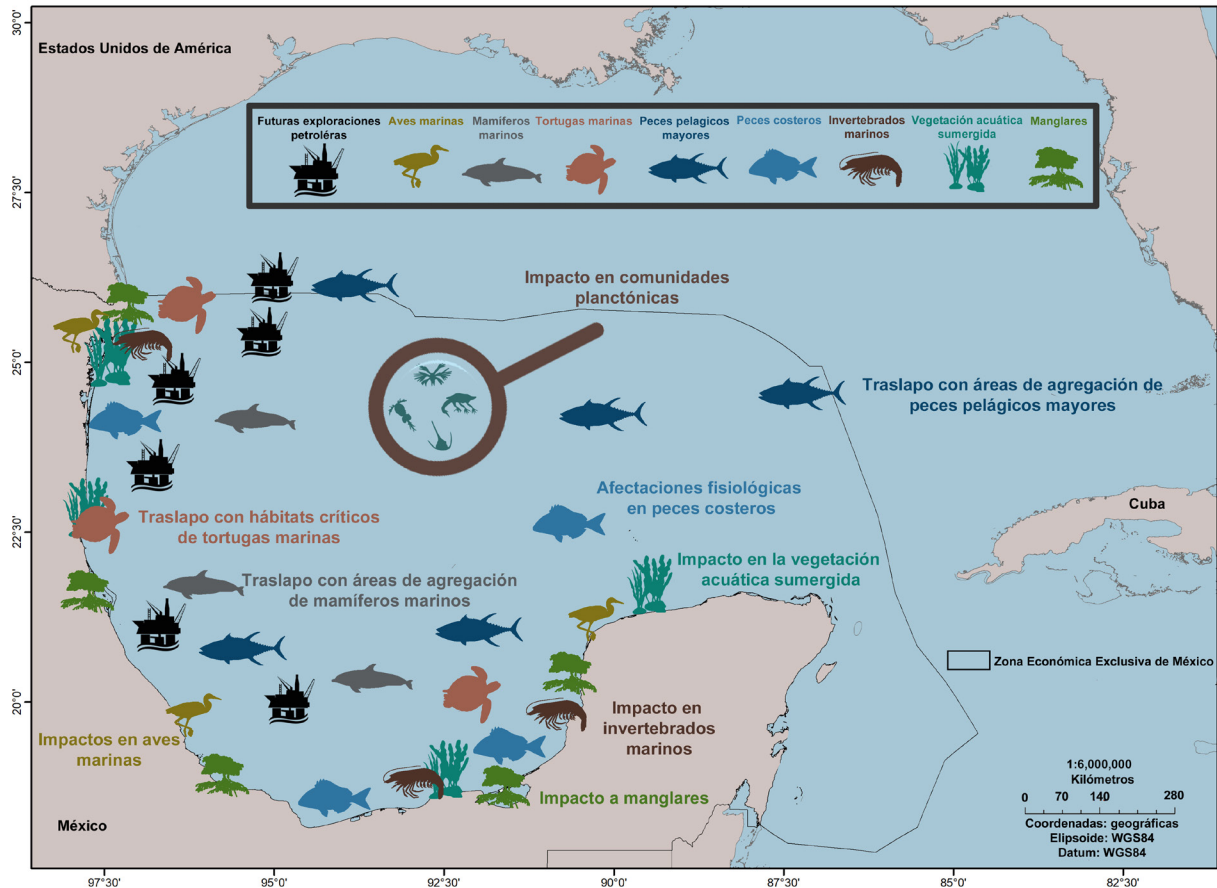
Cabe mencionar que 29 de las especies evaluadas están incluidas en alguna categoría de riesgo en la NOM-059-SEMARTAT-2010 y/o en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.<sup>1</sup> Asimismo, en las evaluaciones se incluyeron 51 especies de importancia comercial.

Además de las evaluaciones previamente descritas, se realizaron protocolos experimentales para determinar cambios en la vulnerabilidad en organismos modelo ante diferentes concentraciones de petróleo y tiempo de exposición. Se diseñó un mesocosmos<sup>2</sup> para evaluar la vulnerabilidad de comunidades fitoplanctónicas y bacterianas. El diseño demostró ser funcional y de bajo costo, pero al mismo tiempo es un avance tecnológico novedoso que cumple con los más altos estándares de calidad a nivel internacional. Los experimentos se realizaron en tres temporadas (lluvias, secas y nortes) y se utilizaron tres concentraciones de petróleo crudo ligero. Por otra parte, se realizaron bioensayos para identificar indicadores que permitan evaluar la vulnerabilidad con base en la respuesta celular, histológica e inmunológica individual (biomarcadores) en organismos de dos especies de peces costeros expuestos a petróleo.

1 En el Anexo 1 (disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4526315>) se incluye la lista de especies evaluadas.

2 Recreación de un sistema natural a menor escala y cerrado, por lo que no hay intercambio de materia con el exterior, solo de energía.

## Efectos potenciales de derrames de petróleo sobre la biota marina del oeste del golfo de México



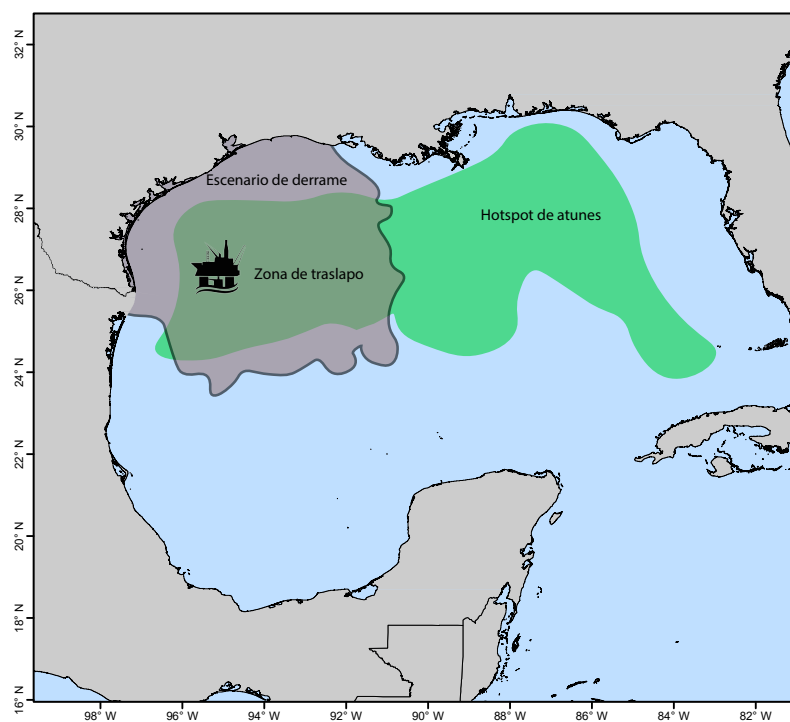
Esquema de especies, ecosistemas y hábitats analizados en el Tomo II de la colección. Elaboró: Luz E. Saldaña.



Infraestructura de experimentos de mesocosmos. Foto: Sébastien Putzeys.



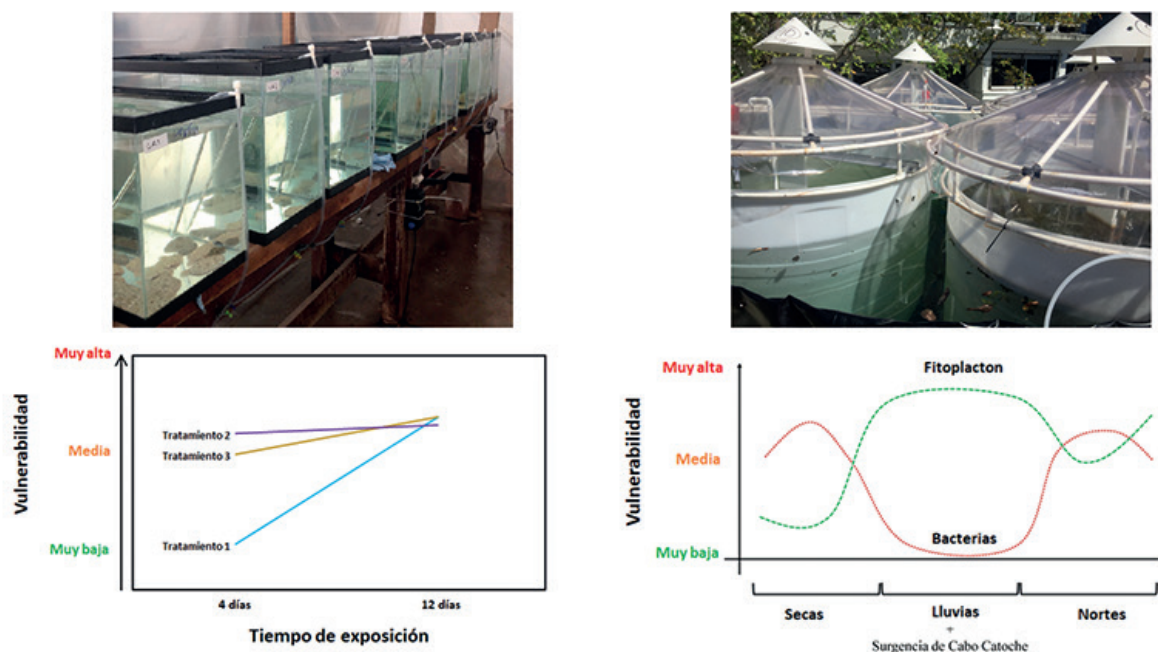
- Las zonas de mayor vulnerabilidad ecológica de las tortugas marinas se ubicaron en el sureste y suroeste del GM, mientras que para las comunidades de vegetación acuática sumergida y pastos marinos fueron Laguna de Términos (Campeche) y Dzilam (Yucatán). La integración con los escenarios sugiere que derrames de los pozos 1, 2, 5 y 6 podrían converger con los hábitats oceánicos de las tortugas. Sin embargo, un derrame del pozo 5 podría ser el que causara mayor impacto al afectar áreas de interanidación de al menos dos especies (una de ellas en peligro crítico de extinción), así como al corredor migratorio del oeste del GM.
- Entre los cetáceos, el delfín clymene fue la especie más vulnerable ante la exposición a petróleo, y entre los peces pelágicos mayores fue el tiburón ballena. A nivel de grupo, es más factible que un mayor número de especies de cetáceos queden expuestas al petróleo en derrames de los pozos 1, 2 y 3. El área de posible afectación de derrame en los pozos 1 a 4 podría converger con zonas importantes para peces óseos (p. ej., atunes y peces picudos), y derrames en los pozos 5 y 6 podrían impactar mayormente a especies de elasmobranquios de hábitos más costeros (p. ej., tiburones y mantas).
- Los hábitats más vulnerables se ubicaron en la zona costera debido a la presencia de bosques de mangles, praderas de pastos marinos y lagunas salinas. La vulnerabilidad de las especies fue alta prácticamente a lo largo de toda la zona costera. Al combinar la vulnerabilidad de hábitats con la de especies, se identificó a la Laguna Madre (Tamaulipas), la plataforma continental de Tamaulipas y el área nerítica de Tabasco como regiones particularmente vulnerables. En caso de derrame de cualquiera de los seis pozos, la región de Laguna Madre y la plataforma de Tamaulipas podría ser severamente afectada.



**Traslapo entre las áreas esperadas de agregación de atún aleta amarilla con el de derrame el pozo 1. Elaboró: Paula García Carrillo.**



- Los resultados de los protocolos experimentales sugieren que la vulnerabilidad de las comunidades fitoplanctónicas y bacterianas a la exposición de petróleo es menor durante la época de lluvias. Por otra parte, tanto la exposición crónica como la aguda produjeron efectos nocivos, que incluyen desde feminización (producción anormal de hormonas femeninas en machos), daños irreversibles en los tejidos (tumores cancerígenos) e inclusive la muerte. Los indicadores identificados pueden ser utilizados en estimaciones de vulnerabilidad ante la amenaza de un derrame de petróleo en los ambientes marinos del GM, o como línea base para la evaluación de impactos en casos de derrames.



Experimentos de mesocosmos y bioensayos, y ejemplo de una curva de vulnerabilidad como función del tiempo de exposición. Capítulos 7 a 9 del Tomo II de la colección: Elaboró: M. Concepción Aguilar. Fotos: Sébastien Putzeys.



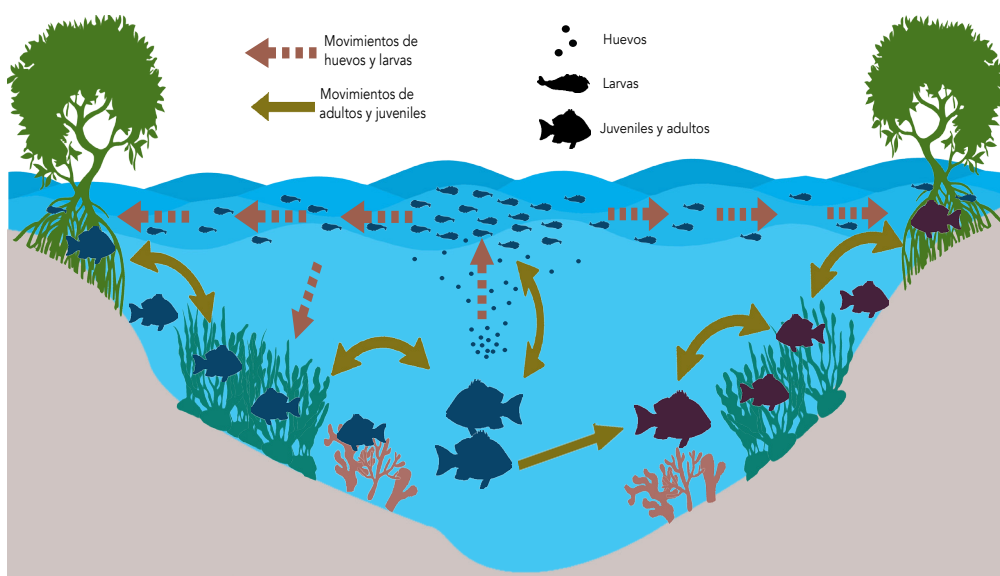
La conectividad biológica evalúa el nivel de intercambio de organismos entre poblaciones, comunidades e incluso ecosistemas que se encuentran en regiones geográficas distintas. El diagnóstico de la conectividad biológica permitió la discusión sobre la resiliencia de poblaciones marinas ante derrames de petróleo, con particular énfasis en los posibles efectos por derrames en la región del cinturón plegado de Perdido, al noroeste del GM. Para analizar la conectividad biológica se emplearon dos aproximaciones complementarias: estimaciones numéricas del grado de conectividad con base en la caracterización del transporte larvario entre provincias geográficas, utilizando métodos probabilísticos basados en salidas de modelos de circulación oceánica, y por medio de estimaciones de conectividad poblacional derivada del análisis de marcadores moleculares de especies selectas de peces e invertebrados.

En la primera aproximación se utilizaron modelos probabilísticos de dispersión pasiva de larvas virtuales a partir de corrientes simuladas con modelos de circulación oceánica para analizar la conectividad entre grandes regiones (provincias) que abarcan la plataforma continental y el talud superior. Aunque en el contexto del proyecto se eligió enfocar las estimaciones de la conectividad en provincias costero-neríticas, que se delimitaron con base en divisiones políticas y consideraciones oceanográficas, esta aproximación es altamente adaptable a un esquema diferente de regionalización, y a la evaluación del transporte larvario desde cualquier localidad de interés.

En la segunda aproximación se caracterizó el flujo genético de cinco especies de peces y un molusco, lo cual sentó las bases para un análisis comparativo para inferir patrones generales de conectividad poblacional e identificar regiones con baja conectividad. La estimación de conectividad vía transporte larvario se combinó con la estimación genética para dilucidar patrones espaciales de conectividad a escala regional. Además, se hizo un meta-análisis basado en una revisión bibliográfica exhaustiva de la conectividad genética de 48 especies de siete grupos taxonómicos (moluscos, elasmobranquios, teleósteos, crustáceos, cnidarios, equinodermos y mamíferos), para obtener mapas indicativos de regiones de alto y

bajo flujo genético.

La información generada permite hacer inferencias sobre la capacidad de recuperación de una región afectada por un disturbio, sea un derrame de petróleo u otros impactos na-



**Conectividad biológica entre dos poblaciones de peces vía transporte larvario y movimiento de juveniles y adultos. Elaboró: Luz E. Saldaña.**

turales o antropogénicos, ya que esta depende del potencial de recolonización y del nivel de diferenciación genética entre poblaciones.

La regionalización derivada del análisis de conectividad permitió identificar las zonas con mayor afectación potencial ante escenarios de derrame en el área de Perdido (pozos 1 a 3). Los resultados indican que la región entre la plataforma continental del sur de Tamaulipas y del este de Texas es altamente vulnerable debido a la baja conectividad, lo cual se refleja en la existencia de poblaciones de especies costeras genéticamente diferenciadas, por lo que tardarían más en recuperarse si se vieran afectadas por un derrame. Además, siendo que tienen el potencial de ser fuente de propágulos (huevos o larvas) para las regiones aledañas, su afectación podría inclusive repercutir en poblaciones fuera de la zona afectada por el derrame.

### Resumen de logros<sup>3</sup>

Logros	Herramienta	Principales productos generados
Desarrollo de metodologías	Modelación numérica	Generación de escenarios de derrames de petróleo de gran escala en seis pozos ubicados en el oeste del golfo de México para examinar la evolución y posibles destinos de los hidrocarburos vertidos en el mar, así como de las emisiones a la atmósfera producto de la combustión intencional del petróleo derramado en esos pozos.
		Generación de matrices de conectividad biológica vía transporte larvario para la zona costera y de plataforma continental del GM, para identificar las regiones geográficas con alto o bajo potencial de recolonización de las poblaciones marinas ante disturbios de gran escala.
	Protocolos experimentales	Diseño de un mesocosmos para evaluar la vulnerabilidad de organismos modelo (comunidades fitoplanctónica y bacteriana) a la exposición a hidrocarburos
Evaluación de vulnerabilidad	Modelos de vulnerabilidad ecológica	Estimaciones de la vulnerabilidad en diferentes niveles de organización ecológica (poblaciones, comunidades, regiones) ante escenarios de derrame de gran escala en el oeste del golfo de México.
Curvas de vulnerabilidad	Bioensayos y mesocosmos	Evaluación de la vulnerabilidad a partir de la respuesta molecular, celular, fisiológica e inmunológica de organismos modelo (microorganismos y peces selectos) a la exposición de hidrocarburos en condiciones de laboratorio de acuerdo al tiempo de exposición.
Caracterización genética	Técnicas moleculares	Caracterización de la diversidad genética y de los patrones de flujo genético de especies costeras seleccionadas del golfo de México. Mapas de patrones espaciales de diferenciación genética para varios grupos taxonómicos de especies marinas del golfo de México.

<sup>3</sup> Las fichas técnicas de los logros para cada tomo y las posibilidades de uso de cada herramienta pueden consultarse en los anexos 2 a 4, disponibles en línea en <https://doi.org/10.5281/zenodo.4526315>





## ALCANCES, RECOMENDACIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Este esfuerzo de investigación contribuyó en gran medida para comprender los procesos físicos y biológicos que suceden en el GM, y los resultados son robustos en la medida que se sustentan en la información disponible, utilizando herramientas y metodologías que representan el estado del arte a la fecha. El objetivo del proyecto que dio lugar a la investigación presentada en esta colección fue evaluar los posibles efectos adversos en caso de ocurrir un derrame de gran escala en aguas profundas del oeste del GM. Es decir, el objetivo original no fue el desarrollo de herramientas de pronóstico y diagnóstico a utilizarse durante una contingencia real, ni la evaluación del impacto en ecosistemas costeros. Por lo anterior, es importante acotar los alcances de los resultados actuales y señalar aquellas áreas de oportunidad sobre las cuales será necesario construir a futuro, permitiendo ampliar la información con datos y mediciones continuas que sustenten el desarrollo de una estructura o sistema operacional que sirva para atender una contingencia en tiempo real.

- Los escenarios de derrame representan, mediante un criterio estadístico, el área que pudiera verse afectada, así como el tiempo aproximado de arribo de los contaminantes. Esto es, no indican exactamente a dónde ni cuándo arribará el contaminante en caso de un evento particular, ya que no se conocen *a priori* las características de la explosión del pozo y del incendio generado en superficie, ni las condiciones atmosféricas y oceánicas al momento de la contingencia. Aunado a esto, hay incertidumbre asociada a las simulaciones numéricas a partir de las cuales se generan los escenarios. En el caso eventual de una contingencia real, si se contase con información sobre las condiciones durante el evento, los modelos que se implementaron para la generación de escenarios pueden ser modificados y adecuados para ser utilizados en modo pronóstico.
- Debido a que el enfoque principal del proyecto CIGoM fue en aguas profundas, la resolución espacial de los modelos numéricos y de los estadísticos utilizados para



generar los escenarios, no estimó el flujo de contaminantes hacia el interior de estuarios y lagunas costeras. Por la misma razón, la mayoría de las evaluaciones de vulnerabilidad ecológica no consideraron la distribución de las especies en estos cuerpos de agua, que son altamente productivos y fungen como zonas de reproducción y crianza de muchas especies de importancia comercial o para la conservación. Extender la generación de escenarios y evaluación de vulnerabilidad a aguas más someras y cuerpos de agua costeros es muy recomendable y factible a partir de la infraestructura y capacidades generadas dentro del contexto del proyecto.

- Las aproximaciones de la vulnerabilidad utilizadas sientan las bases para en el futuro ir ajustando los modelos conforme se genere información adicional a la actualmente disponible. Tal es el caso de las variaciones temporales en la distribución de las especies, que no fue tomada en cuenta en estos estudios debido a la falta de datos estacionales y/o tamaños de muestra reducidos.
- De la misma manera, los modelos de vulnerabilidad ecológica sólo consideraron la etapa adulta de las especies, ya que se cuenta con un mayor nivel de información sobre su distribución y abundancia, y de las condiciones ambientales con las cuales se asocian. Diferentes etapas del desarrollo, como larvas y juveniles que no se incluyeron, podrán ser integradas en los modelos conforme se cuente con la información.
- En el caso particular de los peces pelágicos mayores y cetáceos, debido a la escasez de información sobre sus poblaciones, se modeló la idoneidad ambiental; es decir, aquellas zonas con las condiciones ambientales favorables para su subsistencia a largo plazo. Por lo tanto, los mapas generados señalan aquellas áreas en donde se esperaría que las especies estén presentes, pero no son indicativos de su distribución. Aun así, estos mapas permitieron obtener una buena aproximación de la vulnerabilidad ecológica de estas especies ante el petróleo. La generación de información sobre el estado y distribución de las poblaciones permitirá mejorar estos resultados e incluso incorporar otros estresores (p. ej., cambio climático, tráfico marítimo, contaminación acústica y/o pérdida de hábitat) en evaluaciones futuras.
- El conocimiento actual sobre el acervo genético y los niveles de conectividad entre las poblaciones de organismos marinos del GM es aún muy limitado. Por ello, las



estimaciones de regionalización y conectividad genética que se obtuvieron son a gran escala, e incluyen solo una fracción de las especies y comunidades del ecosistema. Además, la falta de información para algunas áreas geográficas no permite establecer con certeza la continuidad en la conectividad en las zonas sin muestreos. Esto sin duda muestra la necesidad de extender el muestreo para ampliar el acervo genético que permita refinar los resultados.

- Los resultados presentados tienen por objetivo obtener un panorama del posible impacto de un derrame a nivel regional. Es importante notar que la información presentada no es suficiente para definir impactos ambientales de una actividad de extracción o producción de una plataforma petrolera particular, ya que esto requiere de estudios específicos con mayor resolución espacial que pueden validarse usando las bases de datos nacionales y regionales existentes.

En síntesis, los resultados reportados en esta colección representan la primera evaluación global del destino de la contaminación que sería emitida al ambiente por un derrame de petróleo de gran magnitud, y de los posibles efectos adversos que esto tendría sobre el ecosistema del GM. El alcance de los resultados se encuentra acotado principalmente por: (i) la falta de información atribuida a las limitaciones de las actuales redes de monitoreo del estado del mar y atmósfera, (ii) la carencia de un programa de monitoreo ecológico integral y permanente, (iii) los objetivos planteados para el proyecto del cual se deriva la investigación realizada, y (iv) la incertidumbre inherente a las metodologías y herramientas utilizadas. Sin embargo, gracias a este esfuerzo, hoy en día contamos con información y bases científicas sólidas, infraestructura, organización interinstitucional y personal especializado para ahondar en el complejo problema del diagnóstico y eventual pronóstico de derrames y sus impactos en los ecosistemas marinos, que puede expandirse para abordar otras amenazas ambientales, como las arribazones masivas de sargazo, los efectos del cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos, o a actividades antropogénicas de otras industrias además de la petrolera.

La importancia económica, social y ambiental del GM, y la continuidad que se prevé en las actividades de exploración y producción petrolera, requieren seguir fomentando y apoyando la generación de infraestructura y capacidad técnica que permita continuar desarrollando el conocimiento y las herramientas para la evaluación de problemas ambientales en el medio marino. Además, resulta indispensable fortalecer y ampliar las redes de monitoreo existentes para (i) impulsar el desarrollo de sistemas integrales de pronóstico operativo del océano y la atmósfera que permitan predecir el destino de contaminantes en tiempo real durante una contingencia, y (ii) fomentar la implementación de un programa de monitoreo continuo de especies, comunidades y hábitats clave, que permita mejorar las evaluaciones de vulnerabilidad ante derrames de petróleo en el mar, o ante otras amenazas ambientales. Es por ello que se requiere incrementar el esfuerzo de coordinación de las actividades de investigación y monitoreo de ecosistemas marinos a nivel gubernamental, apoyándose en las instituciones académicas para definir las características adecuadas que las actividades de recolección de datos y los estudios ambientales deben cumplir. Todo lo anterior apunta a un esfuerzo continuo de investigación y de gestión para cubrir las necesidades de la sociedad y la industria, al tiempo que se garantice el aprovechamiento responsable y equitativo de los recursos.



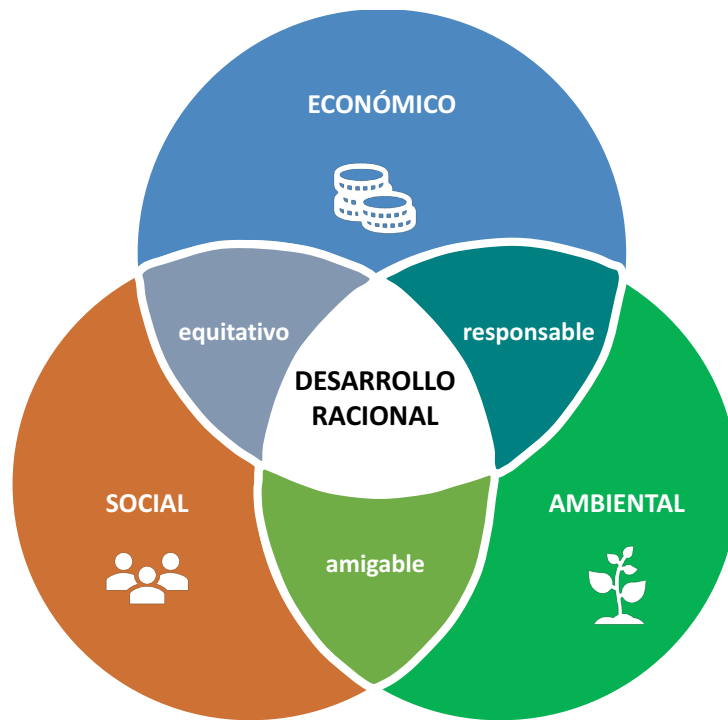
## CONTRIBUCIÓN AMBIENTAL, SOCIAL Y ECONÓMICA

El conocimiento científico que se presenta en los tres tomos de la obra, si bien es de utilidad para la industria petrolera en nuestro país (PEMEX), ofrece a tomadores de decisiones información con miras a establecer el estado y condición de vulnerabilidad del ecosistema, abriendo paso a una comprensión integral del GM. Esta información aporta bases sólidas que permitirán fortalecer las políticas públicas existentes dirigidas a normar y regular la conservación de los recursos naturales, así como los procesos gubernamentales e interdisciplinarios para la planeación, prevención, atención y mitigación de desastres por derrames de petróleo.

En particular, los resultados obtenidos y los mapas generados, tanto de los escenarios de derrames como del posible impacto sobre el hábitat y la biota marina del GM, son una herramienta de apoyo para identificar prioridades en la distribución de recursos materiales, tecnológicos y humanos de manera óptima ante un eventual accidente. Un ejemplo de ello es el “Plan de atención a tortugas marinas y sus hábitats ante contingencias por derrames de hidrocarburos en el golfo de México” (Liceaga-Correa *et al.*, 2020) que se sustenta en los resultados presentados en esta colección literaria. En ese sentido, la información permite a los operadores petroleros ubicar estratégicamente en el territorio nacional los recursos de seguridad y protección al medio ambiente. Además, puede ser de utilidad en las etapas de planeación de perforación de pozos, aunque no se prescinde de ampliar la información con estudios ambientales dirigidos a la zona de interés.

Los resultados presentados en esta colección son de interés para los actores directamente involucrados con la producción de hidrocarburos en el medio marino, entre ellos



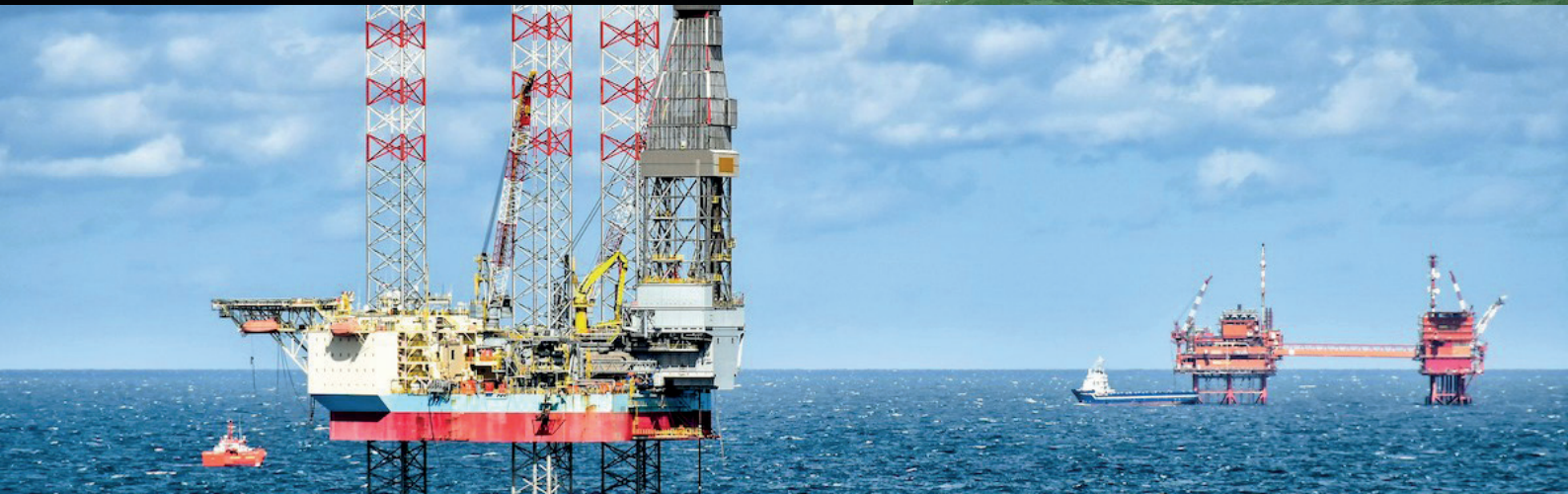
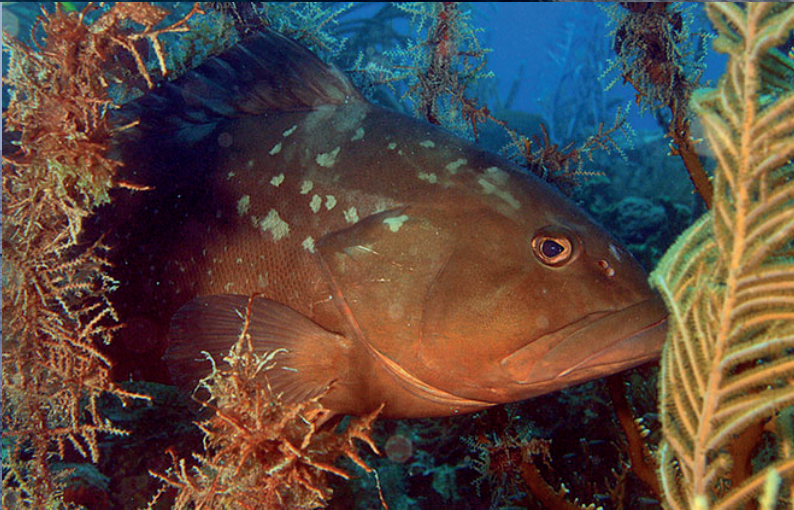


Elaboró: María C. García Aguilar.

la empresa PEMEX y los prestadores de servicios especializados costa fuera, así como las agencias reguladoras tales como la Secretaría de Energía (SENER), la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA), y la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Adicionalmente, otras agencias también pueden encontrar valor en la información generada, tales como las secretarías de Salud (SSA), de Marina (SEMAR), de turismo (SECTUR) y de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Protección Civil, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Economía, y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), entre otros.









# COMENTARIOS FINALES

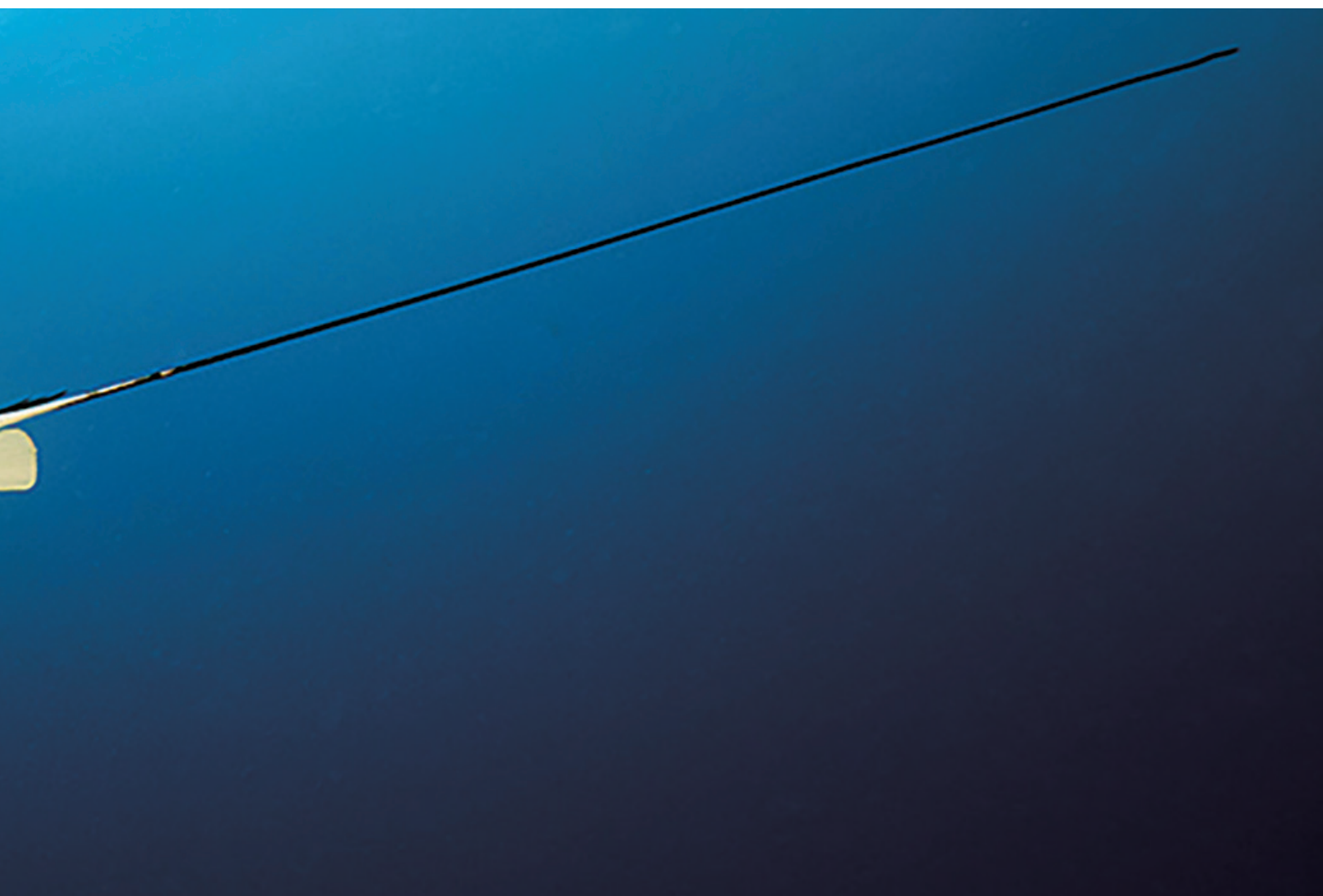
A lo largo de 6 años nuestro grupo de trabajo realizó un esfuerzo constante para la integración y análisis de toda la información generada, así como para establecer los mecanismos de comunicación, organización y coordinación como equipo de investigación. El resultado ha sido enormemente satisfactorio para todos: contamos con un abordaje multi e interdisciplinario, que considera la gran variabilidad de las condiciones oceánicas y atmosféricas, así como la riqueza y complejidad del ecosistema del GM. Tanto las metodologías originales desarrolladas como las

modificaciones a aquellas preexistentes están detalladamente descritas en la colección literaria, por lo que pueden ser reproducibles y aplicables a otras regiones y/o especies. Adicionalmente, la generación de bases de datos y el material cartográfico elaborado (más de 600 mapas) representan un acervo científico invaluable para México al sentar las bases para profundizar en el estudio integral del estado de salud actual del ecosistema del GM. Este compendio de conocimiento es fundamental para los tomadores de decisiones ante la expansión de la industria de los hidrocarburos hacia aguas profundas.



La importancia económica y social de los recursos naturales y la salud de los ecosistemas del golfo, la continuidad que se prevé en las actividades de exploración y producción petrolera, los efectos del cambio climático, y la enorme necesidad del uso sustentable de los recursos pesqueros, del turismo y de la industria minera y petrolera, justifican ampliamente la necesidad de fortalecer y ampliar el monitoreo de variables clave en aguas someras y profundas del GM. Por todo esto consideramos que es de interés del país el continuar apoyando la investigación científica multi e interdisciplinaria en estas áreas, y establecer me-

canismos para la comunicación entre las distintas instituciones que generan o demandan la información. Dónde, cuánto, cuándo y qué continuar midiendo en el GM para conocer mejor el estado de salud del ecosistema y los procesos oceánicos y atmosféricos que lo mantienen, así como el impacto potencial de siniestros petroleros u otras amenazas ambientales no son hoy preguntas triviales, y deberán responderse de manera coordinada considerando las necesidades e intereses de instancias gubernamentales, industria y de la sociedad civil, bajo el asesoramiento de las instituciones académicas expertas en el tema con que cuenta el país.





## REFERENCIAS

- Aguirre Macedo, M. L., Pérez Brunius, P. y Saldaña-Ruiz, L.E. (2020). Vulnerabilidad ecológica del golfo de México ante derrames de gran escala. En P. Pérez Brunius y M. L. Aguirre Macedo (Eds). *Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante derrames de petróleo de gran escala en el golfo de México*. Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527457>
- Campagna, C., Short, F. T., Polidoro, B. A., McManus, R., Collette, B. B., Pilcher, N. J., Sadovy de Mitcheson, Y., Stuart, S. N., Carpenter, K. E. (2011). Gulf of Mexico oil blowout increases risks to globally threatened species. *BioScience*, 61, 393-397. <https://doi.org/10.125/bio.2011.61.5.8>
- Comisión Nacional de Hidrocarburos [CNH] (2020). Sistema de información de hidrocarburos. Recuperado en noviembre de 2020 de <https://portal.cnih.cnh.gob.mx/dashboard-sih.php>
- De Lange, H. J., Lahr, J., Van der Pol, J. J. C., Wessels, Y., Faber, J. H. (2005). Ecological vulnerability in wildlife. A conceptual approach to assess impact of environmental stressors. Alterra Report 1305.
- De Lange, H. J., Sala, S., Vighi, M., Faber, J. H. (2010). Ecological vulnerability in risk assessment: A review. *Science of the Total Environment*, 408, 3871-3879. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.009>
- Felder, D. L., Camp, D. K. (2009). *Gulf of Mexico origin, waters, and biota. Volumen I Biodiversity*. Texas A&M University Press.
- Hamilton, P., Leben, R., Bower, A., Furey, H., & Pérez-Brunius, P. (2018). Hydrography of the Gulf of Mexico using autonomous floats. *Journal of Physical Oceanography*, 48(4), 773-794. Recuperado el 12 de febrero de 2021 de <https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/48/4/jpo-d-17-0205.1.xml>
- Herzka, S. Z., Zaragoza Álvarez, R. A., Peters, E. M. y Hernández Cárdenas, G. (Coords. Gral). (2021). *Atlas de línea base ambiental del golfo de México* (11 tomos). México: CIGoM.
- Karnauskas, M., Schirripa, M. J., Kelble, C. R., Cook, G. S., Craig, J. K. (2013). Ecosystem status report for the Gulf of Mexico. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-653.
- Lee, Y.-G., Garza-Gómez, X., Lee, R. M. 2018. Ultimate costs of the disaster: seven years after the Deepwater Horizon oil spill. *Journal of Corporate Accounting & Finance*, 29, 69-79. <https://doi.org/10.100/jcaf.22306>
- Liceaga-Correa, M. A. *et al.* (2020). Plan de atención a tortugas marinas y sus hábitats ante contingencias por derrames de hidrocarburos en el Golfo de México. México: CIGoM, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida.
- Liceaga-Correa, M. A. (Ed.). (2020). *Hábitats críticos y hotspots de tortugas marinas*. México: CIGoM.
- Martín-Borrego, E. (2018, 28 de septiembre). Gobierno y BP olvidan a pescadores en su acuerdo sobre el derrame. *Poder*. Recuperado de <https://poderlatam.org/2018/09/petroleo-en-el-golfo/#fn-2086-6>

- McCrea-Strub, A., Kleisner, K., Sumaila, U. R., Swartz, W., Watson, R., Zeller, D., Pauly, D. (2011). Potential impact of the Deepwater Horizon oil spill on commercial fisheries in the Gulf of Mexico. *Fisheries*, 36, 332-336. <https://doi.org/10.1080/03632415.2011.589334>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA] (2020). *Incident News*. Recuperado en noviembre de 2020 de <https://incidentnews.noaa.gov>
- Pérez Brunius, P., Turrent Thompson, C. y García Carrillo, P. (2020). Escenarios oceánicos y atmosféricos de un derrame de petróleo en aguas profundas del golfo de México. En P. Pérez Brunius y M. L. Aguirre Macedo (Eds). *Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante derrames de petróleo de gran escala en el golfo de México*. Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4526638>
- Pérez Brunius, P., Compaire, J. C. y García Carrillo, P. (2020). Efectos de derrames de petróleo en la región de Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México. En P. Pérez Brunius y M. L. Aguirre Macedo (Eds). *Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante derrames de petróleo de gran escala en el golfo de México*. Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527474>
- Restrepo, C. E., Lamphear, F. C., Gunn, C. A., Ditton, R. B., Nichols, J. P., Restrepo, L. S. (1982). Ixtoc-I oil spill economy impact study. Report prepared for the Bureau of Land Management, contract AA-851-CTO-65.
- Secretaría de Energía [SENER] (2020). Mapas de ruta tecnológica de energías renovables. Recuperado en noviembre de 2020 de <https://www.gob.mx/sener/documentos/mapas-de-ruta-tecnologica-de-energias-renovables>.
- Shepard, A. N., Valentine, J. F., D'Elia, C. F., Yoskowitz, D. W., Dismukes, D. E. (2013). Economic impact of Gulf of Mexico ecosystem goods and services and integration into restoration decision-making. *Gulf of Mexico Science*, 31, 10-27. <https://doi.org/10.18798/goms.3101.02>
- Soto, L. A., Botello, AV, Licea-Durán, S., Lizárraga-Partida, M. L., Yáñez-Arancibia, A. (2014). The environmental legacy of the Ixtoc-I oil spill in Campeche Sound, southwestern Gulf of Mexico. *Frontiers in Science*, 1, 57. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00057>
- Turner, R. E. y Rabalais, N. N. (2019). Chapter 18 - The Gulf of Mexico. En C. Sheppard (ed.), *World Seas: an Environmental Evaluation* (2a ed.) (pp. 445-464). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805068-2.00022-X>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO] (2020). *Large Marine Ecosystems*. Recuperado en noviembre de 2020 de <https://ioc.unesco.org/topics/large-marine-ecosystems>
- Uribe-Martínez, A., Liceaga-Correa, M. A., Cuevas, E. (2019). Hábitats críticos de tortugas marinas: La incidencia de derrames de petróleo bajo distintos escenarios. Cuarta reunión anual del Consorcio de Investigación del Golfo de México, del 1 al 5 de abril. Mérida, Yucatán.
- U.S. Energy Information Administration [EIA] (2020). Gulf of Mexico fact sheet. Recuperado de noviembre de 2020 de [https://www.eia.gov/special/gulf\\_of\\_mexico/data.php](https://www.eia.gov/special/gulf_of_mexico/data.php).
- Zavala-Hidalgo, J., Morey, S. L. y O'Brien, J. J. (2003). Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high resolution numerical model. *Journal of Geophysical Research*, 108(C2), 3389. <https://doi.org/10.1029/2003JC001879>



