

REGIONES, ESPECIES Y ECOSISTEMAS  
VULNERABLES ANTE DERRAMES  
DE PETRÓLEO DE GRAN ESCALA  
EN EL GOLFO DE MÉXICO

Paula Pérez Brunius y M. Leopoldina Aguirre Macedo  
COORDINACIÓN GENERAL

TOMO III

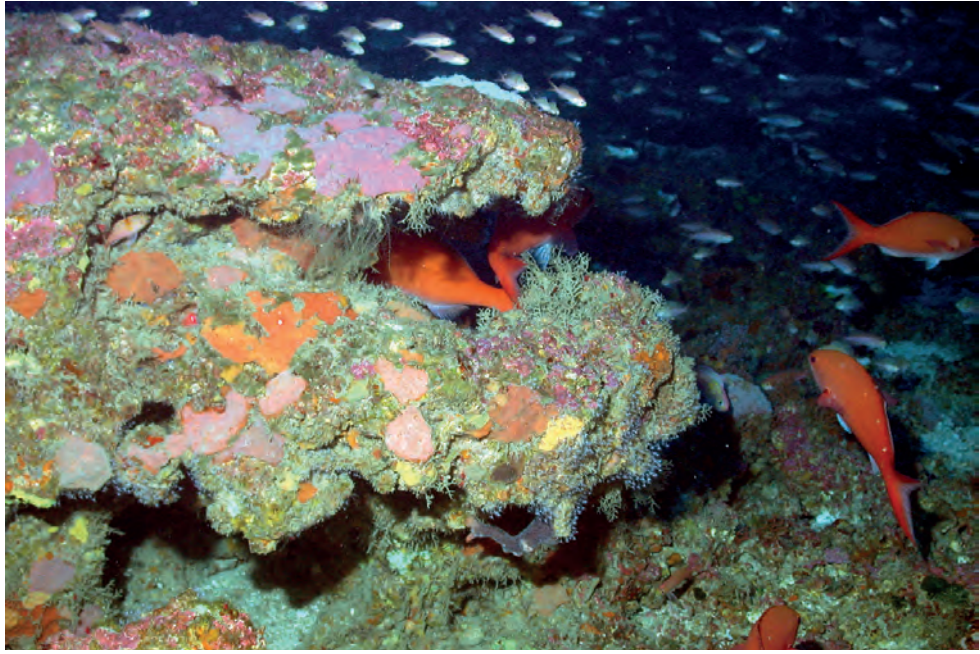
# EFECTOS DE DERRAMES DE PETRÓLEO EN LA REGIÓN DE PERDIDO SOBRE LA CONNECTIVIDAD BIOLÓGICA DEL GOLFO DE MÉXICO

PAULA PÉREZ BRUNIUS,  
JESUS C. COMPAIRE Y  
PAULA GARCÍA CARRILLO  
EDITORES

CONSORCIO DE INVESTIGACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO (CIGOM)









REGIONES, ESPECIES Y ECOSISTEMAS  
VULNERABLES ANTE DERRAMES DE PETRÓLEO  
DE GRAN ESCALA EN EL GOLFO DE MÉXICO

Paula Pérez Brunius y M. Leopoldina Aguirre Macedo

COORDINACIÓN GENERAL

TOMO III

EFFECTOS DE DERRAMES DE  
PETRÓLEO EN LA REGIÓN  
DE PERDIDO SOBRE LA  
CONECTIVIDAD BIOLÓGICA  
DEL GOLFO DE MÉXICO

PAULA PÉREZ BRUNIUS,  
JESUS C. COMPAIRE Y  
PAULA GARCÍA CARRILLO

EDITORES

CONSORCIO DE INVESTIGACIÓN DEL GOLFO DE MÉXICO (CIGOM)

Proyecto “Implementación de redes de observación 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”, financiado por el fondo sectorial SENER-CONACYT Hidrocarburos (201441) .

Esta obra ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT- SENER- Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Reconocemos a PEMEX por promover ante el Fondo la demanda específica sobre los derrames de hidrocarburos y el medio ambiente.



PRIMERA EDICIÓN: diciembre de 2020

*Regiones, especies y ecosistemas vulnerables  
ante derrames de petróleo de gran escala  
en el golfo de México  
Tomo III. Efectos de derrames de petróleo  
en la región de Perdido sobre la conectividad  
biológica del golfo de México*

D.R. © 2020 CICESE  
[www.cicese.edu.mx](http://www.cicese.edu.mx)

DISEÑO Y FORMACIÓN: Raúl Marcó del Pont Lalli  
FOTOGRAFÍAS: NOAA, portada y p. 50. NURC/UNCW y NOAA/FGBNMS, p. 1.  
Claudio Contreras Koob, pp. 2, 6, 70, 90. Sharon Herzka, p. 8.  
Fátima Ordóñez Guillén/María Isabel López Echeverri, p. 14.  
Green Fire Production, p. 72. Flickr, p. 84.

ISBN 978-607-8811-16-8

Impreso y hecho en México

# Coordinación, seguimiento y revisión de contenido

## COORDINACIÓN DE CONTENIDO Y SEGUIMIENTO

Paula García Carrillo (CICESE), Mercedes Chi Chan (CICESE), Emma Alonzo Marrufo (CINVESTAV), Selene Dinarzada Romero Álvarez (CICESE).

## CARTOGRAFÍA

Mercedes Chi Chan (CICESE).

## REVISORES DE CONTENIDO

**Tomo I.** Cecilia Enríquez Ortíz (SISAL-UNAM), Ismael Mariño Tapia (ENES-UNAM, CINVESTAV), María C. García Aguilar (CICESE), Tereza Cavazos (CICESE), Luz Erandi Saldaña-Ruiz (CICESE), Cuauhtémoc Turrent Thompson (CICESE), Rosario Romero-Centeno (UNAM).

**Tomo II.** Luz Erandi Saldaña-Ruiz (CICESE), Oscar Sosa-Nishizaki (CICESE), Daniel Pech (ECOSUR), M. Concepción García Aguilar (CICESE), M. Leopoldina Aguirre Macedo (CINVESTAV), Victor Vidal Martínez (CINVESTAV), Silvia Salas Márquez (CINVESTAV), Paula Pérez Brunius (CICESE).

**Tomo III.** Alfonsina E. Romo Curiel (CICESE), Jesus C. Compaire (CICESE), Axayácatl Rocha-Olivares (CICESE), M. Concepción García Aguilar (CICESE), Rossanna Rodríguez Canul (CINVESTAV).

Juan Carlos Herguera

Responsable Técnico del Proyecto

Edward Peters Recagno

Coordinador Técnico del Proyecto

## 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 las campañas de campo y en la adquisición, procesamiento y análisis de las muestras y datos recopilados. También agradecemos al personal administrativo de las instituciones participantes que apoyó con la compra de equipo e insumos de laboratorio, en la contratación de servicios, y en la administración de los recursos humanos del proyecto.





# ÍNDICE

**5** COORDINACIÓN, SEGUIMIENTO Y REVISIÓN DE CONTENIDO

**9** INTRODUCCIÓN

Axayácatl Rocha-Olivares, Jesus C. Compaire, Sharon Z. Herzka, Paula Pérez Brunius

*Sección 1. Conectividad biológica del golfo de México*

**15** CAPÍTULO 1. POSIBLES RUTAS DE TRANSPORTE LARVAL ENTRE REGIONES DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL DEL GOLFO DE MÉXICO

Jesus C. Compaire, Paula Pérez Brunius, Javier Rodríguez Outerelo, Sharon Z. Herzka, M. Josefina Olascoaga, Phillippe Miron, F. Javier Berón-Vera

**37** CAPÍTULO 2 LARVAS DE PECES COMO TRAZADORES DE TRANSPORTE DESDE LA PLATAFORMA CONTINENTAL HACIA LA ZONA PROFUNDA

Jesus C. Compaire, Sharon Z. Herzka, Paula Pérez Brunius, Sylvia Patricia A. Jiménez-Rosenberg, Javier Rodríguez Outerelo, Laura del Pilar Echeverri-García

**51** CAPÍTULO 3. CONECTIVIDAD BIOLÓGICA INFERIDA A TRAVÉS DEL FLUJO GENÉTICO

Ana Yonory Castillo Páez, Evangelina Castro Olguín, Axayácatl Rocha-Olivares

**71** *Sección 2. Efectos de derrames en el cinturón plegado Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México*

Axayácatl Rocha-Olivares, Jesus C. Compaire, Paula Pérez Brunius, Sharon Z. Herzka

**85** CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Jesus C. Compaire, Paula Pérez Brunius, Sharon Z. Herzka, Axayácatl Rocha-Olivares

## SECCIÓN 2

# Efectos de derrames en el cinturón plegado Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México

Axayácatl Rocha-Olivares,\* Jesus C. Compaire,\*  
Paula Pérez Brunius,\*\* Sharon Z. Herzka\*

\* Departamento de Oceanografía Biológica. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México.

\*\* Departamento de Oceanografía Física. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México.





Los efectos biológicos y ecológicos de un derrame de hidrocarburos en el océano son múltiples y complejos. Dependen de una gran variedad de factores inherentes al derrame mismo, como por ejemplo la duración, cantidad, tipo y concentración del hidrocarburo derramado. También son importantes las características ambientales de la región afectada, incluyendo la temperatura, salinidad, concentración de oxígeno disuelto, el oleaje, las mareas y corrientes, y la profundidad a la cual ocurre el derrame. A su vez, el impacto sobre los ecosistemas y comunidades biológicas dependerá de las características de los ecosistemas; los hay frágiles e hiperdiversos como los arrecifes de coral someros o profundos, o más resilientes, como las comunidades pelágicas con alto potencial de recolonización. Si un derrame incide sobre áreas de reproducción o reclutamiento de especies de importancia comercial, o sobre zonas particularmente importantes para especies protegidas

con fines de conservación, este puede llevar a un fracaso en el reclutamiento o mortalidades masivas, resultando en un colapso poblacional. Los eventos de mortalidad masiva en las poblaciones marinas pueden llevar a cambios drásticos en nivel de ecosistema (Olsen *et al.*, 2019).

Los efectos de un derrame de hidrocarburos sobre las comunidades biológicas se pueden dar a través de diferentes mecanismos. Uno de ellos es a través del impacto directo que causa mortalidad de organismos incapaces de escapar del área afectada. Si la mortalidad es alta, se produce una disminución marcada en el tamaño poblacional y se reduce el potencial dispersivo de dichas poblaciones a través de la mortalidad de estadios de vida relevantes para la dispersión. Aun si los organismos sobreviven a la exposición, por ejemplo, en áreas con menor concentración de contaminantes o porque tengan mayor resiliencia y capacidad de adaptación a las nuevas condiciones de su hábitat, un derrame puede incidir reduciendo u obliteran-



do su capacidad reproductiva, ya sea por daños a nivel fisiológico-molecular o por disruptores endocrinos que reducen la fertilidad. Esto tendría un efecto directo sobre la producción de propágulos dispersivos, afectando negativamente la conectividad entre las poblaciones, particularmente en especies con poca movilidad o sésiles (Haapkyla *et al.*, 2007). Otro mecanismo es el impacto directo de los hidrocarburos sobre las rutas de dispersión, afectando ya sea a los propágulos dispersivos, o a los organismos juveniles o adultos en sus rutas migratorias (Ward, 2017).

La degradación de los hábitats consecuencia de un derrame de hidrocarburos también puede conllevar a un alto impacto en las subpoblaciones que los habitan, y en casos extremos incluso a una extinción local. Uno de los procesos que influye sobre la probabilidad de recuperación de una subpoblación afectada por un derrame de petróleo es si se altera su conectividad larvaria con otras poblaciones que no estén perturbadas (Gilarranz *et al.*, 2017). Por ejemplo, si la subpoblación afectada es principalmente retentiva, es decir, las larvas o reclutas provienen de adultos locales, tendrá una baja capacidad de recuperación ante perturbaciones. En contraste, si una subpoblación importa una cantidad suficiente de larvas provenientes de otras regiones, su capacidad de recuperación será más alta, siempre y cuando el hábitat se haya restaurado naturalmente o por acción humana tras el derrame. Cabe remarcar que la restauración de hábitats marinos no es sencillo de hacer ni de evaluar (Abelson *et al.*, 2016; Baldera *et al.*, 2018; Wallace *et al.*, 2019). Adicionalmente, si una subpoblación afectada por un derrame es una importante fuente de larvas para otras subpoblaciones, estas sufrirán efectos indirectos ya que tendrán menos reclutamiento. A largo plazo, se prevé que las siguientes generaciones disminuirán en número.

Una de las aproximaciones que se ha usado para inferir las consecuencias de los derrames de petróleo sobre las poblaciones marinas es el evaluar el nivel de traslape entre el área de distribución o desove de una especie y la extensión del derrame (Frías-Torres y Bostater Jr, 2011; Sosa-Nishizaki *et al.*, 2020). La región del norte del golfo de México (GM) es un área importante de desove para varias especies de túnidos, y se han hecho diferentes eva-

luaciones del efecto del petróleo sobre las áreas de desove o directamente el impacto en larvas y juveniles (Incardona *et al.*, 2014). Por ejemplo, Hazen *et al.* (2016) caracterizaron el hábitat de los adultos y las zonas de desove del atún aleta azul, *Thunnus thunnus*, en el GM durante el derrame del pozo Macondo en el año 2010. Aunque los atunes adultos tienen una mayor capacidad de tolerar los hidrocarburos y pueden desplazarse a zonas libres de contaminantes, las larvas y juveniles son altamente susceptibles. Estos autores encontraron que toda el área en la cual se dispersó el petróleo era parte del hábitat de esta especie, y que el derrame llegó a cubrir hasta un 5% del hábitat de desove. Aunque los autores consideraron que el nivel de traslape entre la presencia de hidrocarburos y el hábitat de desove era limitado, los impactos sobre la población podrían ser serios, dado que es una especie sobreexplotada. Además, se ha demostrado que la exposición de las larvas y juveniles de túnidos a los hidrocarburos lleva a mortalidad y malformaciones (p.ej., Incardona *et al.*, 2014). En el Tomo II de esta colección (Aguirre Macedo *et al.*, 2020) se analizó el traslape entre el área potencial de distribución de los adultos de varias especies de peces pelágicos y el área de posible impacto de escenarios de derrame en pozos de aguas profundas de la región de Perdido. Se encontró que los túnidos y picudos (etapa adulta) serían el grupo de peces pelágicos con mayor probabilidad de ser impactados por derrames en los pozos analizados (Sosa-Nishizaki *et al.*, 2020).

De manera análoga, aquí se examinan los posibles efectos de un derrame en alguno de tres pozos situados en la región del cinturón plegado Perdido en el noroeste del GM a partir del traslape espacial entre el área geográfica en donde es más probable encontrar petróleo y tres aproximaciones complementarias al estudio de la conectividad: (1) matrices de conectividad generadas a través del análisis de salidas de modelos de circulación y herramientas matemáticas probabilísticas, (2) el grado de conectividad larvaria entre la costa y plataforma continental y la región de aguas profundas evaluado para especies de peces nerítico-costeras, y (3) estimaciones del nivel de flujo genético entre regiones del GM para especies selectas. En conjunto, estas tres aproximaciones al

estudio de la conectividad biológica permiten inferir a grandes rasgos el posible grado de afectación a las comunidades que habitan la plataforma continental del GM ante derrames de petróleo.

Es importante considerar que las medidas de respuesta y mitigación ante un derrame, que incluyen los esfuerzos de contención del derrame, recuperación de hidrocarburos derramados, el uso de dispersantes, la limpieza de playas y organismos contaminados, y la bio-remediación, deben implementarse con base en información científica sólida que permita canalizar esfuerzos y recursos a regiones o hábitats de particular importancia. En esta sección no trataremos dichos temas sobre los cuales existe una vasta literatura derivada principalmente del estudio de los efectos de derrames reales (Beyer *et al.*, 2016; Husseneder *et al.*, 2016; Ward, 2017; Armstrong *et al.*, 2019; Khursigara *et al.*, 2019; McClain *et al.*, 2019; Mearns *et al.*, 2019; Barron *et al.*, 2020; Guzman *et al.*, 2020; Lewis *et al.*, 2020). Más bien, la discusión presentada en esta sección pretende integrar información científica para hacer un diagnóstico tentativo de los posibles impactos y la capacidad de recuperación de poblaciones de organismos marinos que se verían afectados por un derrame de petróleo de gran escala en la región de Perdido. El objetivo es informar a los tomadores de decisiones con base en los resultados más robustos existentes.

En el Tomo I se describen escenarios de derrames para tres pozos localizados en la región de aguas profundas de Perdido (Pérez Brunius *et al.*, 2020). Estos escenarios mostraron que la región con mayor probabilidad de presencia de hidrocarburos tras un derrame en uno de los pozos es la región de la costa y plataforma continental de Texas, y en menor medida la correspondiente al norte de Tamaulipas, frente a laguna Madre (Figura 1). Por ende, el diagnóstico de los posibles efectos de un derrame en la zona de Perdido sobre la conectividad biológica se centra en estas regiones, o provincias según la nomenclatura usada en el Capítulo 1 de este tomo (Compaire *et al.*, 2020a). Es importante remarcar que los efectos negativos sobre las poblaciones dependerían de la cantidad y del tipo de petróleo que arribe, así como la duración y concentración de la exposición, lo cual estos escenarios no proveen dado que ello depende de las condiciones particulares en que ocurrió el sinies-

tro y la fisiología de los organismos expuestos. Los resultados estadísticos que representan los escenarios de la Figura 1 indican la posibilidad no nula de que el petróleo arribe a esas regiones durante un evento particular. La discusión que se presenta a continuación se basa en la premisa de que un daño ambiental por exposición a hidrocarburos ocurra en el área que abarcan los escenarios de derrame analizados.

### *Afectación potencial con base en matrices de conectividad*

Las matrices de conectividad para provincias costero-neríticas del GM se consideran como una primera aproximación a la conectividad larvaria (Compaire *et al.*, 2020a). Este acercamiento permite evaluar las rutas posibles de la conectividad biológica, dado que las corrientes imponen restricciones de primer orden en el transporte larval (Olascoaga *et al.*, 2018; Paris *et al.*, 2020).

Los resultados de las matrices de conectividad indicaron que el 70% de las partículas o larvas virtuales originarias de la provincia de Texas permanecieron o regresaron al hábitat costero nerítico luego de un lapso de 30 días, por lo que son consideradas larvas viables (ver Compaire *et al.*, 2020a en este tomo). El 80% de esas larvas viables permanecieron en la provincia de origen (Figura 2a), por lo que la provincia de Texas parece exhibir un alto potencial retentivo. El análisis también indicó que Tamaulipas Norte y Tamaulipas Sur son las principales fuentes de larvas para la provincia de Texas, las cuales aportan el 70% y 40% de sus larvas viables, respectivamente. Luisiana aporta un 20% de larvas viables, y hay una probabilidad muy baja (< 5%) de que Veracruz Norte aporte larvas a la provincia de Texas.

Si la provincia de Texas se viera afectada por un derrame de gran escala, se prevé que las poblaciones locales sufrirían un alto nivel de impacto, dado su alto grado de retención. Sin embargo, la conectividad con las provincias de Tamaulipas Sur y Norte, y en menor grado con Luisiana y Veracruz Norte, implicaría que hay un cierto potencial de recolonización de propágulos (larvas virtuales) a través del tiempo. Este sería el caso siempre y cuando las provincias de Tamaulipas Norte y Sur

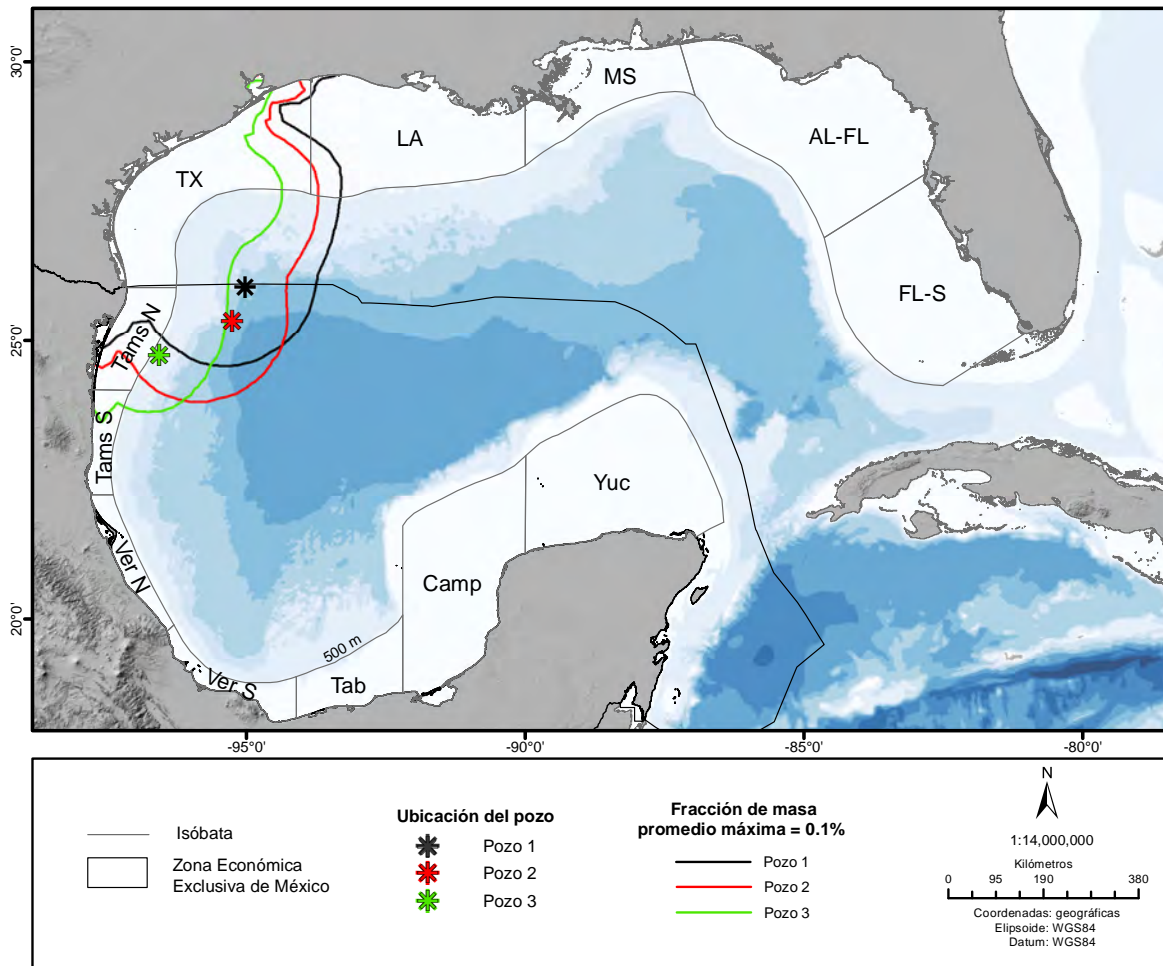


Figura 1. Provincias en las que se dividió a la zona nerítico-costera para el análisis de conectividad larvaria. Los contornos alrededor de cada uno de los tres pozos para los cuales se simuló un derrame representan el 0.1% de la fracción de masa promedio máxima del petróleo derramado, lo cual es indicativo del área que pudiese verse afectada por un derrame en la zona del cinturón plegado Perdido. Se usaron los escenarios de derrames presentados en Pérez Brunius *et al.*, (2020) generados con el modelo PetroTrans.

y Luisiana no se vieran también fuertemente afectadas por el derrame.

Por otro lado, debido a la alta capacidad retentiva de la provincia de Texas se esperaría que un derrame que impacte negativamente sus comunidades no afectaría el reclutamiento de individuos a las provincias aledañas. Solo Luisiana podría sufrir un descenso en la cantidad de larvas viables, ya que la matriz de conectividad indicó que el 20 % de las larvas viables fueron exportadas desde Texas a Luisiana (Figura 2b).

El mapa de conectividad de la provincia de Tamaulipas Norte (Figura 3), indica que, tras 30 días

de liberación, esta provincia presenta una menor retención de larvas viables que la provincia de Texas, ya que solo el 20% permanece en esta provincia y la mayoría (~80%) se exportan a otras provincias (Figura 3b). Es de notar que esas larvas viables representan menos del 60% de las larvas liberadas, ya que el resto se exportó a aguas profundas (Compaire *et al.*, 2020a). Lo cual implica que una parte importante de los reclutas deben de provenir de otras provincias.

Las principales provincias de las cuáles Tamaulipas Norte recibe larvas son Tamaulipas Sur (con el 20% de contribución de larvas viables), Veracruz Norte (con el 10%), y en menor grado

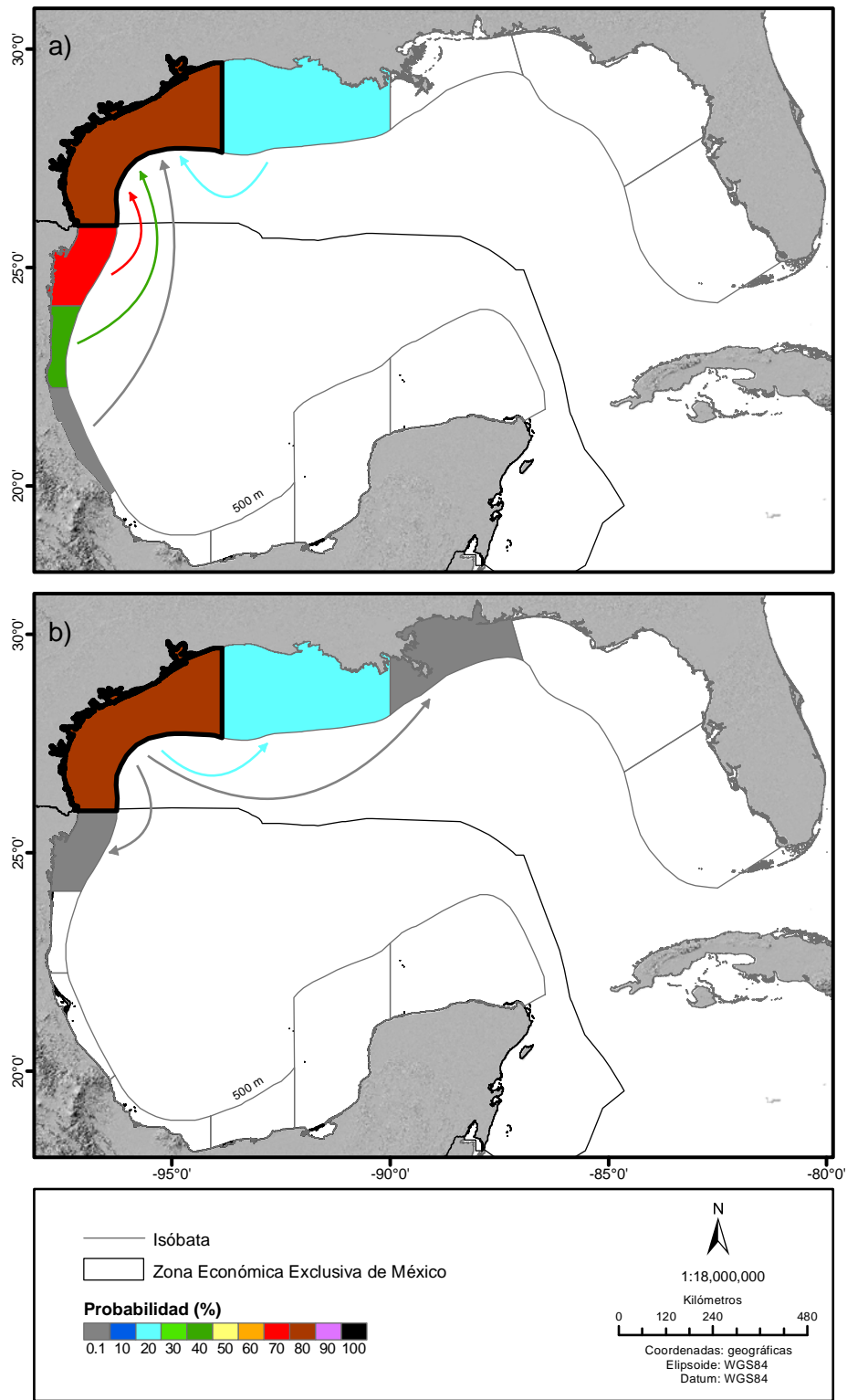


Figura 2. Conectividad de la provincia de Texas. a) Proporción de larvas viables que son importadas a Texas desde otras provincias. b) Proporción de larvas viables que son exportadas desde Texas hacia otras provincias. Las flechas indican la dirección de la conectividad.



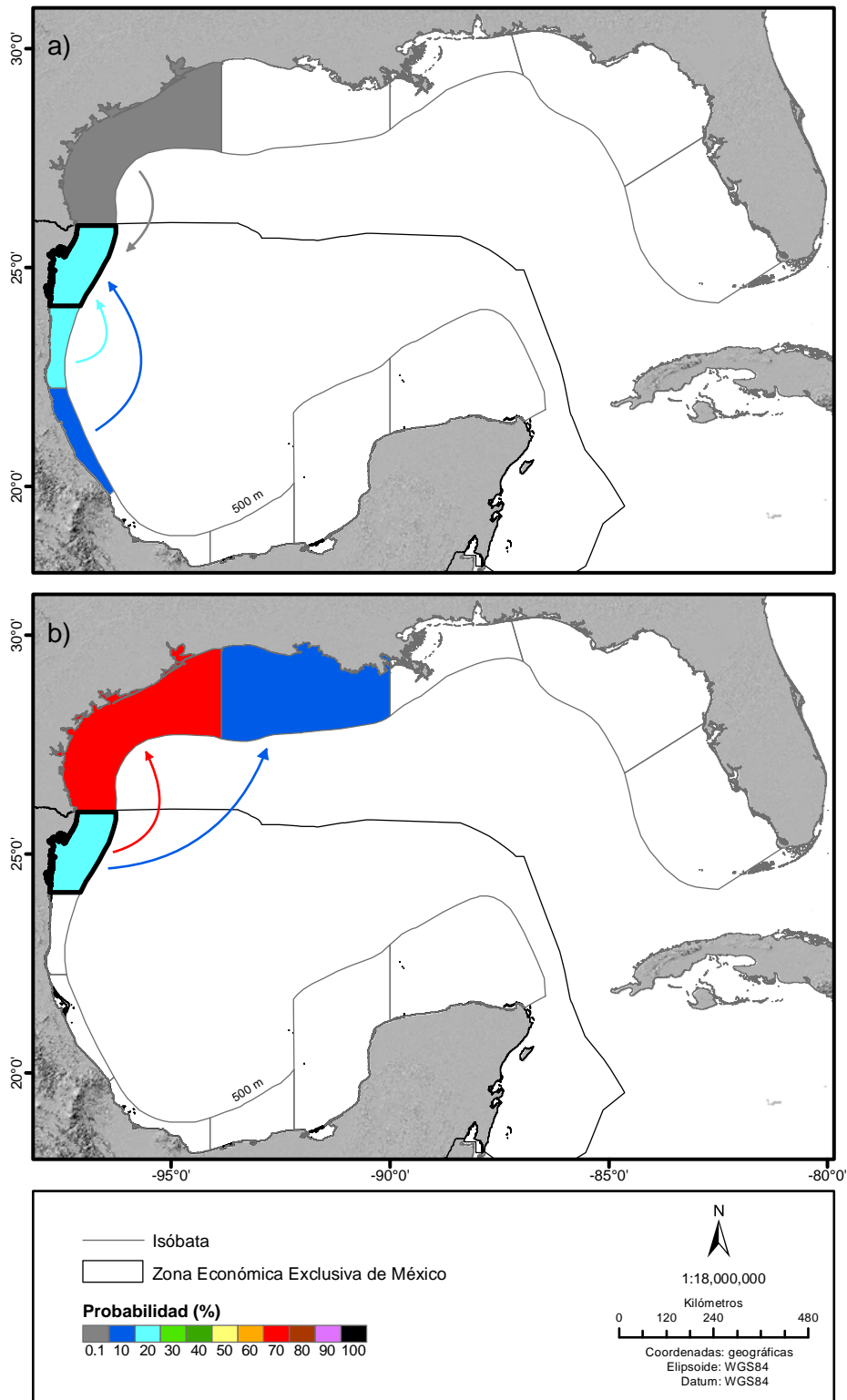


Figura 3. Conectividad de la provincia de Tamaulipas Norte. a) Proporción de larvas viables en Tamaulipas Norte que son importadas desde otras provincias. b) Proporción de larvas viables de Tamaulipas Norte que son exportadas a otras provincias. Las flechas indican la dirección de la conectividad.

Texas (<5%) (Figura 3a). Estos porcentajes relativamente bajos sugieren que el potencial de recu-peración es bajo, o que tomaría más tiempo que en el caso de la provincia de Texas. Por otro lado, Tamaulipas Norte es una fuente importante de larvas para la provincia de Texas, a la que exporta el 70% de sus larvas viables (Figura 3b). Por ende, las poblaciones de Texas pudieran verse afectadas al recibir una menor cantidad de reclutas, aunque un derrame no las afecte directamente.

Los resultados de conectividad biológica vía transporte larvario reflejan la probabilidad de que larvas virtuales pasivas que se originen en una provincia sean retenidas o exportadas, así como el potencial de recolonización entre provincias. Además, reflejan los patrones de transporte más probables, derivados de un esfuerzo intensivo de modelación numérica (Compaire *et al.*, 2020a). Cabe señalar que la conectividad larval se infirió a partir de partículas pasivas, aunque en realidad las larvas de diferentes especies pueden migrar verticalmente y responder activamente a diferentes estímulos alterando su trayectoria para eventualmente reclutarse en un hábitat de crianza adecuado para el crecimiento de los juveniles. El potencial de recolonización también depende de las poblaciones de adultos en cada región, que podrían verse afectados negativamente en caso de derrames de petróleo. Otro aspecto a considerar es la resolución espacial con que se analizó la evolución temporal de la distribución de las larvas virtuales, ya que la regionalización del GM que se usó para analizar la conectividad entre provincias consiste de áreas geográficas grandes (Figura 1), que no considera la distribución particular de los hábitats en diferentes etapas de vida de los organismos, ni sus áreas de desove, ya que estas dependen de la especie particular, y la información al respecto es escasa. Por lo mismo, tampoco se considera el potencial de recolonización al interior de una provincia. Por último, no se resuelve la complejidad del transporte larvario una vez que se llega a la zona costera, ya que en el modelo las larvas virtuales son retenidas en los cuadros de malla costeros a donde llegan (véanse detalles metodológicos en Compaire *et al.*, 2020a).

### *Afectación potencial con base en la conectividad genética*

Los patrones de conectividad inferidos a partir de análisis moleculares en seis especies costeras (cinco especies de peces y el ostión del golfo) revelaron que algunas de sus poblaciones poseen altos niveles de flujo genético y pueden ser genéticamente indiferenciables en escalas espaciales de cientos de kilómetros a lo largo de las costas de Campeche y Yucatán en el sureste del GM, hasta más de mil kilómetros entre las costas de Tamaulipas y Yucatán (Castillo Paez *et al.*, 2020). Adicionalmente, en la revisión de 67 trabajos de genética poblacional de organismos marinos del GM se observó que el 52% de las 48 especies analizadas de vertebrados e invertebrados presentó niveles de flujo genético lo suficientemente altos para homogeneizar las pozas genéticas de sus poblaciones a escalas espaciales que varían de los 70 a los 1644 km. Para estas especies, el efecto de un derrame de hidrocarburos puntual en el área de Perdido sería de bajo impacto en la medida en que existan suficientes poblaciones fuera del área afectada para permitir el repoblamiento post-derrame.

Para el resto de las especies que sí presentan heterogeneidad genética a lo largo de su distribución dentro del GM (tres de las especies analizadas genéticamente en este tomo y 48% de las especies estudiadas previamente), la integración de los patrones de discontinuidad genética permite identificar cuatro regiones costeras dentro de las cuales las poblaciones presentan altos niveles de conectividad y entre las cuales la conectividad es limitada (Figura 4). Dichas regiones muestran un cierto grado de coincidencia con subregiones pobremente interconectadas derivadas de un análisis de la geografía dinámica lagrangiana (Paris *et al.*, 2020).

El área de posible afectación de un derrame de hidrocarburos en alguno de los pozos profundos del área de Perdido, se traslapa con la totalidad de una de estas regiones que se extiende desde Galveston, Texas, hasta el extremo norte de la laguna Madre en territorio mexicano (provincia verde en la Figura 4). En la región de Texas-Tamaulipas ocurren poblaciones genéticamente diferenciadas de vertebrados e inver-

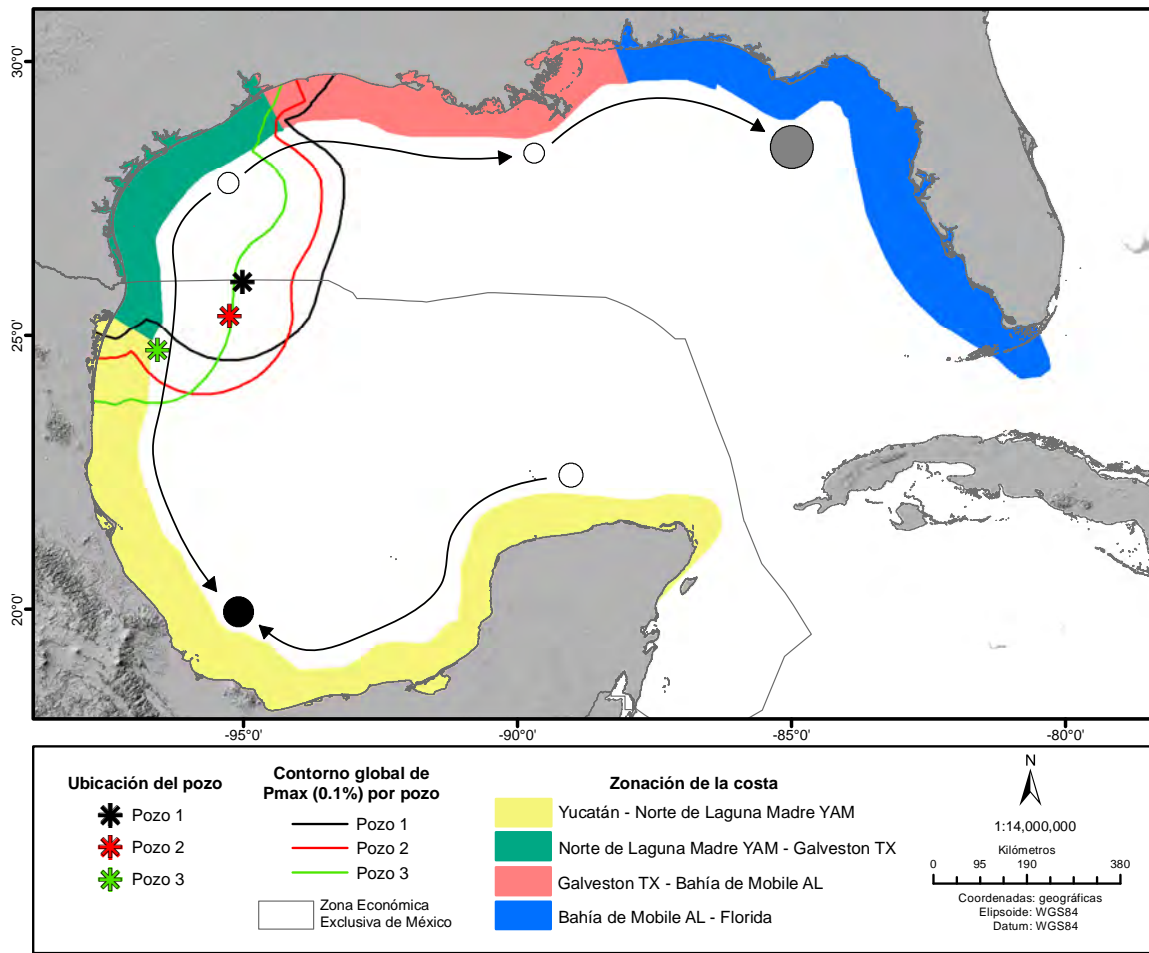


Figura 4. Zonación de la costa en 4 regiones en función de los patrones de diferenciación genética de 48 especies marinas (Castillo Paez *et al.*, 2020). Los contornos al noroeste del golfo representan el área de afectación de un derrame de petróleo en tres pozos localizados en Perdido (asteriscos de color) utilizando los escenarios de derrame del modelo PetroTrans presentado en Pérez Brunius *et al.* (2020). Las flechas representan los vectores de transporte larvario con mayor significancia demográfica entre cinco subregiones representadas por círculos y definidas en función de capturas por palangre de peces demersales (modificado de Murawski *et al.*, 2018). El tamaño de los círculos es proporcional al nivel de auto-reclutamiento y su opacidad al de centralidad de intermediación (los puntos más oscuros poseen más interconexiones en la red de conectividad -no mostradas-) (modificado de Paris *et al.*, 2020).

tebrados costeros cuya supervivencia y viabilidad podrían verse comprometidas por los contaminantes. Desde la perspectiva de la conectividad, un análisis espacial de redes de conectividad basada en deriva larvaria de peces demersales revela que el nodo asociado a dicha región se encuentra pobremente interconectado con el resto de los nodos (Paris *et al.*, 2020). Sin embargo, a pesar de poseer una baja centralidad de intermediación, las rutas de deriva larvaria de peces costeros más

probables involucran a dicha región como una fuente de propágulos dispersados por corrientes tanto hacia la región adyacente al este (norte de Texas-Louisiana, provincia rosa) como al sur (costas mexicanas de Tamaulipas a Yucatán, provincia amarilla) (Figura 4). Por lo tanto, los efectos demográficos de un derrame de petróleo en la zona nerítico-costera frente a Tamaulipas, no solamente podrían ser de lenta recuperación, sino que podrían repercutir en las poblaciones aleda-

ñas no contaminadas afectando la conectividad biológica en la región.

### *Afectación potencial con base en patrones de dispersión de larvas costero-neríticas*

El resultado del análisis de los patrones de distribución espacio-temporal de larvas de peces de taxones costero-neríticos capturadas en aguas oceánicas en la región de Perdido, durante cuatro cruceros oceanográficos, indicaron que la principal conexión de la región oceánica de Perdido con la zona de plataforma se da con las provincias del noroeste del GM (Texas y Tamaulipas Norte y Sur; Figura 1, Compaire *et al.*, 2020b). Aunque estos resultados fueron obtenidos bajo las condiciones particulares de cada crucero, coinciden con los resultados de las matrices de conectividad obtenida con herramientas probabilísticas (Compaire *et al.*, 2020a) al indicar que la principal conexión de la región oceánica de Perdido es con las provincias neríticas de Texas y Tamaulipas.

No obstante, los muestreos en campo indican que la presencia de estructuras de mesoescala, como el frente de talud del oeste del GM o la presencia de ciclones y anticiclones en el borde de la plataforma, influyen sobre el transporte de larvas de peces entre provincias y entre la región costero-nerítica y la región de aguas profundas (Compaire *et al.*, 2020b). Esto demuestra que, aunque las probabilidades obtenidas en las matrices de conectividad representan una robustez estadística indudable, pueden existir fenómenos particulares asociados a condiciones hidrodinámicas puntuales que generen un patrón de dispersión distinto al esperado a partir del tratamiento de grandes conjuntos de datos que abarcan largas escalas temporales. Esto implica que es necesario analizar las condiciones hidrodinámicas particulares de la región y de cada sub-región en el momento de un derrame para poder inferir con la mayor certeza posible cuáles serán las comunidades que presentarán mayor posibilidad de verse impactadas ante eventuales derrames de petróleo.

## CONCLUSIONES

Con base en el análisis expuesto en esta sección, consideramos que la región geográfica que abarca desde Galveston, Texas, Estados Unidos, hasta la costa de laguna Madre, Tamaulipas, México, debe considerarse como de alta prioridad para su conservación durante las operaciones de exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas. Esto se sustenta en que es la zona más cercana a los tres pozos petroleros para los cuales se modelaron los derrames y los resultados de los escenarios de derrames para el área del cinturón plegado Perdido. Estos pozos se encuentran en la zona en la que se prevé se desarrolle la extracción en aguas profundas a mediano plazo. La región geográfica desde Galveston hasta laguna Madre posee una conectividad limitada que se refleja en la existencia de poblaciones de organismos costeros genéticamente diferenciados, y las matrices de conectividad indican que tienen el potencial de ser una región fuente de propágulos para regiones aledañas, además es una de las dos regiones del GM con mayor grado de vulnerabilidad ambiental ante derrames de petróleo (Saldaña-Ruiz *et al.*, 2020, en el Tomo II de esta colección).

En las regiones afectadas directa e indirectamente por un derrame de gran escala, las especies sésiles o con baja movilidad serán las más vulnerables; algunas de estas especies, como los ostiones y otros moluscos, poseen importancia económica y abastecen el consumo nacional. En contraparte, aquellas especies con capacidad de locomoción tendrán oportunidad de evadir la zona afectada y serán más resilientes al impacto.

Si bien los acercamientos adoptados en este trabajo son complementarios y poderosos, también tienen algunas limitaciones, como las suposiciones detrás de los modelos evaluados, el número de especies analizadas en los análisis genéticos, y la disponibilidad limitada de muestras para los análisis genéticos, por mencionar algunas. Estas limitaciones marcan la pauta para seguir avanzando y mejorando los insumos científicos necesarios para la toma de decisiones en torno a la problemática del impacto ambiental de un derrame de hidrocarburos en el GM.



## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM). Reconocemos a PEMEX por promover ante el Fondo la demanda específica sobre los derrames de hidrocarburos y el medio ambiente.

## REFERENCIAS

- Abelson, A., Halpern, B. S., Reed, D. C., Orth, R. J., Kendrick, G. A., Beck, M. W., Belmaker, J., Krause, G., Edgar, G. J., Airoidi, L., Brokovich, E., France, R., Shashar, N., de Blaeij, A., Stambler, N., Salameh, P., Shechter, M., Nelson, P. A. (2016). Upgrading Marine Ecosystem Restoration Using Ecological-Social Concepts. *BioScience*, 66, 156–163, <https://doi.org/10.1093/biosci/biv171>
- Aguirre Macedo, M. L., Pérez Brunius, P., 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 gran escala en el golfo de México*. Ensenada, CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527457>
- Armstrong, T., Khursigara, A. J., Killen, S. S., Fearnley, H., Parsons, K. J. y Esbaugh, A. J. (2019). Oil exposure alters social group cohesion in fish. *Scientific Reports*, 9.
- Baldera, A., Hanson, A. D., Kraft, B. (2018). Selecting indicators to monitor outcomes across projects and multiple restoration programs in the Gulf of Mexico. *Ecological Indicators*, 89, 559-571. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.025>
- Barron, M. G., Vivian, D. N., Heintz, R. A. y Yim, U. H. 2020. Long-term ecological impacts from oil spills: comparison of Exxon Valdez, Hebei Spirit, and Deepwater Horizon. *Environmental Science & Technology*, 54(11), 6456-6467.
- Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V. y Collier, T. K. 2016. Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 28-51.
- Boeckner, M. J., Sharma, J. y Proctor, H. C. 2009. Revisiting the meiofauna paradox: dispersal and colonization of nematodes and other meiofaunal organisms in low- and high-energy environments. *Hydrobiologia*, 624(1), 91-106.
- Castillo Páez, A. Y., Castro Olguín, E. y Rocha-Olivares, A. (2020). Conectividad biológica inferida a través del flujo genético. En P. Pérez Brunius, J.C. Compaire y P. García Carrillo (Eds.), *Efectos de derrames de petróleo en la región de Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México* (pp 51-68). Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527474>
- Compaire, J. C., Pérez Brunius, P., Rodríguez Outerelo, J., Herzka, S. Z., Olascoaga, M. J., Miron, P., Berón-Vera, F. J. (2020a). Posibles rutas de transporte larval entre regiones de la plataforma continental del golfo de México. En P. Pérez Brunius, J. C. Compaire, P. García Carrillo (Eds.), *Efectos de derrames de petróleo en la región de Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México* (pp. 15-36). Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527474>
- Compaire, J. C., Herzka, S. Z., Pérez Brunius, P., Jiménez-Rosenberg, S. P., Rodríguez Outerelo, J., Echeverri-García, L. del P. (2020b). Larvas de peces como trazadores de transporte desde la plataforma continental hacia la zona profunda. En P. Pérez Brunius, J. C. Compaire, P. García Carrillo (Eds.), *Efectos de derrames de petróleo en la región de Perdido sobre la conectividad biológica del golfo de México* (pp. 37-49). Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527474>
- Frías-Torres, S., y Bostater Jr., C. R. (2011). Potential impacts of the Deepwater Horizon oil spill on large pelagic fishes. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8175, 81750F-81750F-7. <https://doi.org/10.1117/12.903759>
- Gilarranz L.J., Rayfield B., Liñán-Cembrano G., Bascompte J., Gonzalez A. (2017). Effects of network modularity on the spread of perturbation impact in experimental metapopulations. *Science*, 357, 199–201.
- Guzman, H. M., Kaiser, S. y Weil, E. (2020). Assessing the long-term effects of a catastrophic oil spill on subtidal coral reef communities off the Caribbean coast of Panama (1985-2017). *Marine Biodiversity*, 50(3).
- Haapkyla, J., Ramade, F. y Salvat, B. 2007. Oil pollution on coral reefs: a review of the state of knowledge and management needs. *Vie Et Milieu-Life and Environment*, 57(1-2), 95-111.
- Hazen, E., Carlisle, A., Wilson, S. et al. (2016). Quantifying overlap between the Deepwater Horizon oil spill and predicted bluefin tuna spaw-

- ning habitat in the Gulf of Mexico. *Sci Rep*, 6, 33824. <https://doi.org/10.1038/srep33824>
- Husseneder, C., Donaldson, J. R. y Foil, L. D. (2016). Impact of the 2010 Deepwater Horizon oil spill on population size and genetic structure of horse flies in Louisiana marshes. *Scientific Reports*, 6, 18968.
- Incardona, J. P., Gardner, L. D., Linbo, T. L., Brown, T. L., Esbaugh, A. J., Mager, E. M., Stieglitz, J. D., French, B. L., Labenia, J. S., Laetz, C. A., Tagal, M., Sloan, C. A., Elizur, A., Benetti, D. D., Grosell, M., Block, B. A., y Scholz, N. L. (2014). Deepwater Horizon crude oil impacts the developing hearts of large predatory pelagic fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(15), E1510-8. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320950111>
- Khursigara, A. J., Ackerly, K. L. y Esbaugh, A. J. (2019). Oil toxicity and implications for environmental tolerance in fish. *Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology & Pharmacology*, 220, 52-61.
- Lewis, J. P., Tarnecki, J. H., Garner, S. B., Chagaris, D. D. y Patterson, W. F. (2020). Changes in reef fish community structure following the Deepwater Horizon oil spill. *Scientific Reports*, 10(1).
- McClain, C. R., Nunnally, C. y Benfield, M. C. 2019. Persistent and substantial impacts of the Deepwater Horizon oil spill on deep-sea megafauna. *Royal Society Open Science*, 6(8).
- Mearns, A. J., Bissell, M., Morrison, A. M., Rempel-Hester, M. A., Arthur, C. y Rutherford, N. (2019). Effects of pollution on marine organisms. *Water Environment Research*, 91(10), 1229-1252.
- Murawski, S. A., Peebles, E. B., Gracia, A., Tunnell, J. W. y Armenteros, M. (2018). Comparative abundance, species composition, and demographics of continental shelf fish assemblages throughout the Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries*, 10 (3), 325-346.
- Olascoaga, M. J., Miron, P., Paris, C., Perez-Brunius, P., Pérez-Portela, R., Smith, R. H., & Vaz, A. (2018). Connectivity of Pulley Ridge With Remote Locations as Inferred From Satellite-Tracked Drifter Trajectories. *Journal of Geophysical Research*, 88(4), 305-9. <http://doi.org/10.1029/2018JC014057>
- Olsen, E., Hansen, C., Nilsen, I., Perryman, H. y Vikebo, F. (2019). Ecological effects and ecosystem shifts caused by mass mortality events on early life stages of fish. *Frontiers in Marine Science*, 6.
- Paris, C. B., Murawski, S. A., Olascoaga, M. J., Vaz, A. C., Berenshtein, I., Miron, P. y Beron-Vera, F. J. (2020). Connectivity of the Gulf of Mexico continental shelf fish populations and implications of simulated oil spills. En S. A. Murawski, C. H. Ainsworth, S. Gilbert, D. J. Hollander, C. B. Paris, M. Schlüter y D. L. Wetzel (Eds.), *Scenarios and Responses to Future Deep Oil Spills. Fighting the Next War* (pp. 369-389). Springer Nature, Suiza.
- Pérez Brunius, P., Beron-Vera, F. J., Kotzakoulakis, K., Lara-Hernández, J. A., Miron, P., Olascoaga, M. J., Zavala-Romero, O., Rodríguez Outerelo, J., García Carrillo, P., Medrano, F., Zavala-Hidalgo, J., Sheinbaum, J. (2020). Regiones posiblemente afectadas bajo escenarios de derrames de petróleo en las aguas profundas del golfo de México. En P. Pérez Brunius, C. Turrent Thompson y P. García Carrillo (Eds.), *Escenarios oceánicos y atmosféricos de un derrame de petróleo en aguas profundas del golfo de México* (pp. 15-23). Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4526638>
- Saldaña-Ruiz, L. E., Pérez Brunius, P., Sosa-Nishizaki, O., Romo Curiel, A. E., Ramírez-Mendoza, Z., Fajardo-Yamamoto, A., García Aguilar, M. C., Ramírez-León, M. R. (2020). Vulnerabilidad del golfo de México ante derrames de gran escala. En Ma. L. Aguirre Macedo, P. Pérez Brunius, y L. E. Saldaña-Ruiz (Eds.), *Vulnerabilidad ecológica del golfo de México ante derrames de gran escala* (pp. 185-209). Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527457>
- Sosa-Nishizaki, O., Romo-Curiel, A. E., Ramírez-Mendoza, Z., Fajardo-Yamamoto, A., García-Aguilar, M. C., Ramírez-León, M. R. (2020). Evaluación de la vulnerabilidad de los peces pelágicos ante escenarios de derrame de petróleo profundos en el golfo de México. En Ma. L. Aguirre Macedo, P. Pérez Brunius, y L. E. Saldaña-Ruiz (Eds.), *Vulnerabilidad ecológica del golfo de México ante derrames de gran escala* (pp. 75-117). Ensenada: CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527457>
- Wallace, R. L., Gilbert, S., Reynolds, J. E. (2019). Improving the Integration of Restoration and Conservation in Marine and Coastal Ecosystems: Lessons from the Deepwater Horizon Disaster. *BioScience*, 69, 920-927, <https://doi.org/10.1093/biosci/biz103>
- Ward, C. H. (Ed.). (2017). *Habitats and Biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon Oil Spill*. N.Y., Springer Nature.



