



KARLA SOFÍA MILLÁN LÓPEZ, LIBERTAD ADAYA GARCÍA Y LILIANA PARDO LÓPEZ

La M. en C. Millán López es candidata a Doctora del Posgrado en Ciencias Bioquímicas del Instituto de Biotecnología de la UNAM, bajo la dirección de la Dra. Liliana Pardo López. La Dra. Adaya García es posdoctorante SECIHTI, asociada al Laboratorio de Biotecnología Marina del Instituto de Biotecnología de la UNAM. La Dra. Pardo López es Líder Académica del Instituto de Biotecnología de la UNAM y responsable del Laboratorio de Biotecnología Marina.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Frente a los desastres ambientales provocados por los derrames de petróleo que amenazan constantemente las costas de Veracruz y Tabasco, la ciencia mexicana no busca inventar soluciones artificiales o químicas que puedan ser más dañinas. En su lugar, la investigación actual apuesta por entender y potenciar el armamento biológico que la naturaleza ha perfeccionado bajo el mar durante millones de años: bacterias capaces de transformar algo tan tóxico para la vida mediante la biorremediación marina.

Una tragedia visual con potencial biológico. Manchas negras flotan sobre la superficie del mar. Es una tragedia visual que impacta profundamente a cualquiera que observe nuestras costas. Sin embargo, los ojos de la ciencia ven mucho más allá de la contaminación superficial. No ven solo suciedad o una capa inerte de contaminación; ven una red compleja y densa de átomos de carbono e hidrógeno que las bacterias nativas están listas para desmantelar, pieza por pieza. Si nos acercamos a cada una de esas pequeñas microgotas de petróleo utilizando un lente con “super zoom” de

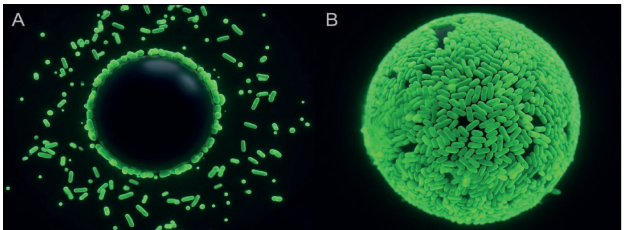


FIGURA 1. IMAGEN generada con IA basada en una imagen de microfotografía confocal del desarrollo de una biopelícula esférica sobre una gota de petróleo por *Alcanivorax borkumensis*. (A) Bacterias circundantes aproximándose e iniciando la colonización de la superficie de la gota. (B) Maduración de la biopelícula esférica cubriendo la totalidad de la gota de petróleo (Adaptado de la ref. 6).

Gotas negras sobre el mar: bacterias al rescate del Golfo

alta tecnología, lo que veríamos no es un desierto estéril, sino mucha actividad: millones de bacterias dándose un festín (Figura 1). Aunque el petróleo crudo es altamente tóxico para la inmensa mayoría de los organismos del planeta, para ciertas especies de bacterias marinas—las verdaderas estrellas de la biorremediación—el arribo de estos hidrocarburos no representa la muerte, sino un “shot” de energía extremadamente concentrada.

El laberinto químico detrás del petróleo

Para entender cómo una bacteria logra alimentarse de algo tan tóxico, primero debemos comprender qué es realmente el petróleo. Lejos de ser un líquido simple, el crudo es una mezcla increíblemente compleja en la que coexisten miles de moléculas distintas.

A simple vista, sus propiedades físicas revelan la complejidad de esta mezcla. El petróleo es siempre más liviano que el agua—por eso flota sobre ella—y su color viaja en un espectro que va de lo amarillo ámbar al negro profundo, oscureciéndose a medida que se vuelve más pesado y espeso. Si se observa bajo la luz directa, suele emitir destellos verdosos gracias a su fluorescencia, y aunque el crudo puro despidе un olor aromático, la presencia de azufre basta para otorgarle un aroma penetrante y desagradable (9). En el fondo, todo este comportamiento responde a la arquitectura de sus moléculas. La forma en que sus átomos se organizan da origen a cuatro grandes familias de hidrocarburos conocidas colectivamente como la fracción SARA: las *parafinas* (saturados), organizadas en cadenas lineales y sencillas que arden con facilidad; los *naftenos*, estructurados en anillos estables; los *aromáticos*, con anillos complejos que sirven de materia prima para la industria química; y los *asfaltenos*, gigantescas macroestructuras rodeadas de moléculas menores y resinas que le otorgan su viscosidad y terminan convertidas en el asfalto de nuestras calles (Figura 2). Acompañadas de pequeñas impurezas de agua salada, azufre y minerales, estas cuatro familias conviven en una suspensión perfecta, demostrando que el petróleo no es solo un combustible, sino una rica y diversa obra de arte de la química natural.

La verdadera barrera científica para degradar estos compuestos radica en la estabilidad de sus enlaces covalentes carbono-carbono (C–C) y carbono-hidrógeno (C–H), sumada a su elevada *hidrofobicidad*—su incapacidad para mezclarse con el agua—. Las bacterias viven en un entorno acuoso, por lo que acercarse a estas moléculas aceitosas e ingresar a su interior celular requiere un despliegue bioquímico extraordinario. Además, no todas las familias químicas se degradan a la misma velocidad: *Parafinas* (Fácil): Cadenas lineales sencillas que las enzimas bacterianas degradan rápidamente. *Naftenos* y *aromáticos simples* (intermedio): Estructuras en anillo cuya ruptura exige rutas metabólicas más costosas en energía.

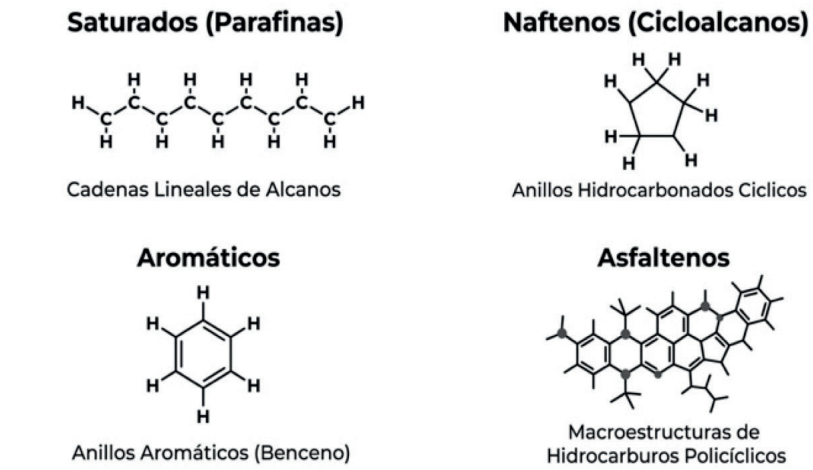


FIGURA 2. PRINCIPALES familias químicas del petróleo (clasificación SARA). La complejidad estructural va desde cadenas lineales de parafinas (fáciles de procesar) hasta macromoléculas condensadas de asfaltenos, que constituyen la mayor barrera para la biodegradación. (Diagrama esquemático basado en la ref. 9).

Asfaltenos y *Resinas* (Muy difícil/Recalcitrante): Redes gigantescas llenas de anillos condensados y metales que son casi inexpugnables para una sola especie bacteriana.



FIGURA 3. IMPACTO de los hidrocarburos en las costas del Golfo. Evidencia del encallamiento de la fracción pesada del petróleo (chapopote) en las playas. Se observan aglomerados de crudo espeso, mezclados con arena, y su impregnación directa en conchas y organismos del ecosistema intermareal. (Fotografías de campo).

Cuando el petróleo se derrama en el mar, los compuestos más ligeros se evaporan rápidamente, dejando atrás una masa densa, viscosa y pesada rica en asfaltenos: el chapopote que comúnmente vemos encallado en las playas en donde forma aglomerados con la arena (Figura 3). Esta fracción pesada es la más peligrosa a largo plazo porque se adhiere a las raíces de los manglares, asfixia la biodiversidad de la arena y, en muchos casos, es responsable de la muerte de animales superiores. Para la mayoría de los seres vivos, romper estas cadenas químicas es una tarea imposible; sin embargo, las bacterias cuentan con herramientas que han desarrollado a lo largo de miles de años y que funcionan como verdaderas tijeras moleculares, capaces de cortar los enlaces de carbono más resistentes para nutrirse de ellas. Los derrames no son accidentes aislados en las plataformas marinas. La contaminación por hidrocarburos en México es un problema ambiental persistente. De acuerdo con datos oficiales del Centro de Coordinación y Apoyo a Emergen-

cias (CCAE) de Pemex, tan sólo entre diciembre de 2018 y julio de 2024 se registraron 270 derrames y fugas de impacto moderado y grave a nivel nacional, superando los 6,000 incidentes si se contabilizan aquellos de menor escala (7). Esta problemática afecta de manera evidente al litoral del Golfo: Tabasco y Veracruz, donde se concentra el 50,7% de estos eventos graves. Recientemente, en la comunidad de Ojital Viejo, en Papantla, Veracruz, la fuga de un ducto no atendida a tiempo fue arrastrada por las lluvias, afectando arroyos, la fauna y más de ocho kilómetros de cultivos de cítricos. En donde la maquinaria pesada y las jornadas de limpieza superficial no pueden retirar el petróleo impregnado en el lodo de los manglares, en los cauces de los arroyos ni en la matriz de la arena, sin destruir el ecosistema (7).

La amenaza en tierra: el impacto del huachicoleo

Si bien la atención pública suele centrarse en los grandes accidentes de plataformas petroleras en alta mar o en los fallos de buques tanque, las costas mexicanas enfrentan hoy en día una amenaza silenciosa, terrestre: los derrames derivados del mercado ilícito de combustible, popularmente conocido como “huachicoleo”. Las perforaciones clandestinas en los ductos que transportan el crudo y los refinados a lo largo de los estados del litoral del Golfo provocan fugas descontroladas que saturan rápidamente los suelos circundantes. A diferencia de un derrame en mar abierto, donde las corrientes oceánicas pueden diluir parcialmente el hidrocarburo, la contaminación por huachicoleo afecta ecosistemas terrestres frágiles, canales pluviales y zonas estuarinas. Cuando las lluvias tropicales arrastran estos combustibles robados y derramados hacia las desembocaduras de los ríos, el petróleo penetra en la intrincada matriz de la arena costera y se aloja en el lodo de los manglares, un entorno donde la limpieza mecánica tradicional es prácticamente imposible de realizar sin destruir el hábitat. Es aquí donde la intervención biológica se convierte en una alternativa viable y respetuosa con el entorno.

Millones de años de convivencia bajo el agua

El hecho de que las bacterias puedan utilizar el petróleo como fuente de energía no es una coincidencia ni una mutación reciente. Las bacterias, especialmente aquellas que habitan en las profundidades del Golfo de México, conocen el petróleo desde hace millones de años debido a las emanaciones naturales del subsuelo marino, conocidas como *chapopoter*as. Estos sitios son grietas en el fondo del océano por donde el petróleo crudo brota de manera constante hacia la columna de agua, mucho antes de que los seres humanos comenzáramos a extraerlo del mar (Figura 4).

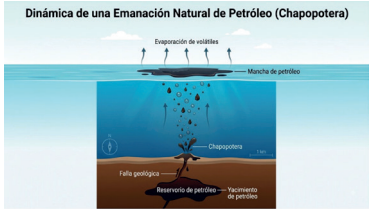


FIGURA 4. ESQUEMA de una chapopotera en el fondo marino. Muestra la migración de crudo desde reservorios profundos a través de fallas geológicas hacia la superficie del agua. Ilustración rediseñada e inspirada en la ref. 1.

Para mapear estas emanaciones sin tener que recorrer cada rincón del océano, la ciencia recurre a la tecnología espacial. Utilizando imágenes de radar de apertura sintética (SAR) capturadas por satélites a lo largo de cuatro décadas, Carrie O'Reilly y su equipo (5) lograron identificar más de 1,618 zonas de emanación natural distribuidas por todo el Golfo de México. Haciendo evidente que el lecho marino del

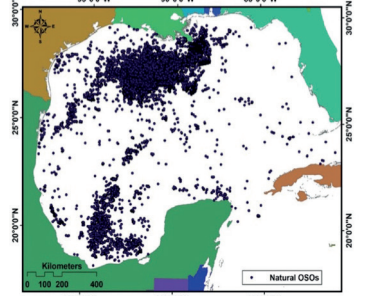


FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN de las emanaciones naturales de petróleo (*chapopoter*as) en el golfo de México. Cada punto representa un sitio de origen de manchas de petróleo (*Natural OSOs*) detectado mediante sensores de radar satelital. (Adaptado de la ref. 5).

Golfo es una fuente activa y constante de petróleo.

Debido a esto, las comunidades microbianas locales han sido compañeras de evolución del petróleo desde tiempos remotos. Es por eso que, cuando ocurre un derrame y el petróleo se vuelve abundante en el ambiente, estos microorganismos no se extinguen; al contrario, se activan de forma masiva (4). Utilizan los hidrocarburos como combustible para poner en marcha toda una maquinaria enzimática especializada con la que están genéticamente equipadas. Todos estos eones de convivencia y adaptación propicia-

ron que evolucionaran y desarrollaran estrategias bioquímicas increíblemente complejas para romper las uniones moleculares del crudo y convertirlo en una de sus comidas favoritas.

El “trabajo en equipo” de la comunidad microbiana

Hoy en día se conocen más de 1800 géneros bacterianos distribuidos a lo largo del suroeste del Golfo de México con capacidades metabólicas sorprendentes, de los cuales 450 están distribuidos en toda esta zona, evidenciando la presión de selección en este ecosistema tan especial (2). Sin embargo, la degradación del petróleo no es una tarea solitaria. En este sitio tan especial no solo existen bacterias degradadoras directas; hay muchas otras especies que funcionan como acompañantes o asistentes que ayudan a preparar el terreno para las bacterias especializadas en la degradación.

Este ecosistema microscópico realiza un verdadero trabajo en equipo. Mientras algunas bacterias se encargan de producir *biotensoactivos*—una especie de jabón natural que rompe la tensión del agua para que el petróleo se disperse en microgotas más fáciles de digerir—, otras rompen las estructuras de carbono más duras y lineales. Al mismo tiempo, un tercer grupo de bacterias se alimenta de los subproductos o desechos metabólicos que dejaron las primeras, limpiando el ambiente de compuestos secundarios. Este relevo metabólico crea las condiciones ideales para que toda la co-

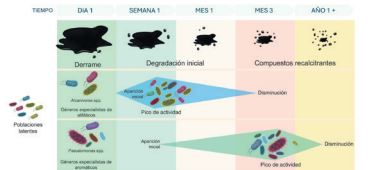


FIGURA 6. SUCESIÓN microbiana durante la degradación del petróleo.

munidad microbiana siga creciendo y consumiendo el contaminante de manera continua sin intoxicarse a sí misma (Figura 6).

La odisea en alta mar: las campañas oceanográficas

Para descubrir a estas grandes degradadoras, los equipos de investigación han tenido que adentrarse en las aguas del Golfo de México a bordo del buque oceanográfico *Justo Sierra* de la UNAM. A través de diversas campañas oceanográficas diseñadas bajo una estrategia de muestreo sistemático y regional, se han recolectado muestras biológicas en escenarios contrastantes: desde las expediciones SIGSBEE (2023 y 2024) en la Abisal de Sigsbee —la región más profunda del Golfo, alcanzando más de 3,000 metros—, hasta colaboraciones en las campañas COBERPES para explorar las bacterias en la Sonda de Campeche, así como exploraciones alrededor de plataformas petroleras activas. Estas expediciones no sólo implican el esfuerzo logístico de la navegación, sino un riguroso protocolo de análisis. Cada núcleo de sedimento recuperado del fondo abisal y cada

litro de agua filtrada en zonas de plataformas y chapopoter

Del laboratorio a la crisis de los litorales

Frente a una crisis tan evidente como la que se vive de manera recurrente en las costas de Veracruz y Tabasco—donde recientemente los hidrocarburos han impactado más de 630 kilómetros de litoral, afectando gravemente los ecosistemas de manglar, contaminando playas turísticas y provocando la mortandad de tortugas marinas, delfines y aves—, la biotecnología marina ofrece una ventana de esperanza real. El secreto químico no radica en sintetizar un químico nuevo en el laboratorio, sino en aprender a escuchar, aislar y utilizar lo que la naturaleza lleva millones de años perfeccionando bajo la superficie marina. En el Laboratorio de Biotecnología Marina, nuestra labor diaria consiste precisamente en descifrar las reglas de este “trabajo en equipo” bacteriano. No basta con encontrar a la bacteria más rápida de forma aislada; el verdadero reto es diseñar “consorcios bacterianos”, es decir, combinaciones perfectas de diferentes especies que sean capaces de cooperar entre sí para limpiar los mares y playas de manera mucho más eficiente.

El tiempo de descomposición: ¿Por qué la atenuación natural no es suficiente?

Si estas bacterias llevan millones de años consumiendo petróleo, surge una pregunta inevitable: ¿por qué no dejamos simplemente que la naturaleza haga su trabajo? La respuesta está en la velocidad de degradación. En condiciones naturales no intervenidas (proceso conocido como *atenuación natural*), la degradación del petróleo en el mar o en la arena costera es un proceso sumamente lento que puede tomar meses, años o incluso décadas. Aunque las bacterias nativas tienen el potencial metabólico, en el medio marino enfrentan serias limitaciones: baja disponibilidad de nutrientes clave como nitrógeno y fósforo, temperaturas cambiantes, y el hecho de que las fracciones más pesadas del crudo (como los asfaltenos) son extremadamente resistentes a la degradación. La degradación lenta resulta ser un gran problema ante una emergencia ambiental de tal magnitud, donde el crudo asfixia todo a su paso en cuestión de horas: no podemos esperar a que la naturaleza actúe a su propio ritmo.

Es aquí donde nosotras vemos un gran potencial, en donde en lugar de depender de la lenta actividad natural, la investigación actual busca aislar, seleccionar y combinar a las mejores especies degradadoras para el esfuerzo logístico de la navegación, sino un riguroso protocolo de análisis. Cada núcleo de sedimento recuperado del fondo abisal y cada

primero es necesario entender las redes de cooperación entre las bacterias, las cuales suelen ser complejas. Estudios recientes de nuestro laboratorio han utilizado análisis del ADN de las bacterias para descifrar exactamente qué genes aporta cada bacteria dentro de un consorcio degradador, permitiendo diseñar combinaciones donde una especie rompe las cadenas pesadas de hidrocarburos mientras otra produce biotensoactivos naturales para solubilizar el crudo (8). Asimismo, hemos encontrado que es posible “despertar” y enriquecer comunidades bacterianas altamente eficientes a partir de sedimentos marinos conservados durante largos periodos de tiempo, recuperando su capacidad degradadora para aplicarla frente a nuevos eventos de contaminación (3).

De esta manera, al pasar de la atenuación natural pasiva al uso de consorcios diseñados y aplicados a través de herramientas como nuestro laboratorio móvil, transformamos una respuesta ecológica lenta en una solución biotecnológica rápida, eficiente y respetuosa con el entorno.

Laboratorios móviles: ciencia sobre ruedas

Llevar la ciencia del laboratorio al mundo real siempre ha sido uno de los mayores desafíos de la investigación científica. Las bacterias que son exitosas dentro de un matraz de vidrio controlado en un laboratorio, a menudo fallan cuando se enfrentan a las corrientes marinas, los cambios de temperatura o la radiación solar directa de las playas del Golfo. Para solucionar este vacío, en nuestro laboratorio actualmente contamos con avances significativos e innovadores: hemos logrado establecer un laboratorio móvil diseñado específicamente para probar estas soluciones biológicas directamente en el campo. Este proyecto, que es el resultado de más de 10 años de investigación, nos ha permitido trasladar equipos de alta tecnología a las zonas afectadas para realizar experimentos en condiciones lo más cercanas posible a las reales. Este esfuerzo en conjunto ha sido posible gracias al impulso de la vinculación tecnológica y el financiamiento de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Esta inversión estratégica demuestra cómo los recursos enfocados en la ciencia pueden cruzar fronteras geográficas para resolver problemáticas ambientales de impacto nacional.

Con este respaldo, el proyecto ha dado un salto operativo clave al instalar un centro de experimentación en la Coordinación de Operaciones de Buques Oceanográficos (COPO) de la UNAM en Tuxpan, Veracruz. Al operar un laboratorio en este punto estratégico, la ciencia desarrollada en Morelos finalmente puede evaluar los consorcios sintéticos en condiciones ambientales reales utilizando agua de mar y arena contaminadas. La próxima inauguración de este espacio marca el inicio de una nueva etapa operativa. El objetivo final es acercarnos lo más posible al ecosistema impactado y obtener resultados

tangibles en tiempo real, sentando las bases sólidas para una tecnología mexicana nacida de la investigación pública que, a partir de este hito, pasa del aislamiento experimental al rescate y restauración directa de nuestras costas.

Referencias

1. Cook, J. Schematic diagram showing the route traveled by oil and gas released into the ocean by natural seeps. Redrawn and inspired by WHOI Natural Oil Seeps project. Woods Hole Oceanographic Institution. Recuperado de: <http://www.whoi.edu/oil/natural-oil-seeps>
2. Godoy-Lozano EE, Escobar-Zepeda A, Raggi L, Merino E, Gutierrez-Rios RM, Juarez K, Segovia L, Licea-Navarro AF, Gracia A, Sanchez-Flores A and Pardo-Lopez L (2018). Bacterial Diversity and the Geochemical Landscape in the Southwestern Gulf of Mexico. *Front. Microbiol.* 9:2528. doi: 10.3389/fmicb.2018.02528
3. Godoy-Lozano, E. E., Raggi, L., Escobar-Zepeda, A., Adaya, L., Cuervo-Amaya, D. H., Gracia, A., Sanchez-Flores, A., Diaz-Camino, C., & Pardo-López, L. (2026). Enrichment hydrocarbon-degrading bacterial communities from the southern Gulf of Mexico in long-term stored sediments. *Biodegradation*, 37(2), 45. <https://doi.org/10.1007/s10532-026-10260-7>
4. Kostka JE, Prakash O, Overholt WA, Green SJ, Freyer G, Canion A, Delgadillo J, Norton N, Hazen TC, Huettel M. (2011). Hydrocarbon-degrading bacteria and the bacterial community response in gulf of Mexico beach sands impacted by the deepwater horizon oil spill. *Appl Environ Microbiol.* 77(22):7962-7974. doi: 10.1128/AEM.05402-11.
5. O'Reilly, C., Silva, M., Daneshgar Asl, S., Meurer, W. P., & MacDonald, I. R. (2022). Distribution, Magnitude, and Variability of Natural Oil Seeps in the Gulf of Mexico. *Remote Sensing*, 14(13), 3150. <https://doi.org/10.3390/rs14133150>.
6. Prasad, M. et al., (2023). *Alcanivorax borkumensis* biofilms enhance oil degradation by interfacial tubulation. *Science* 381,748-753.DOI:10.1126/science.adf3345.
7. Ramírez, P. (2025). Pemex registra 270 derrames y fugas de alto impacto ambiental de 2018 a 2024. Causa Natura Media, 21 de marzo de 2025. <https://causanaturamedia.com/es/notas/pemex-registra-270-derrames-y-fugas-de-alto-impacto-ambiental-de-2018-a-2024>
8. Rojas-Vargas, J., Rebollar, E. A., Sanchez-Flores, A., & Pardo-López, L. (2024). A comparative genomic study of a hydrocarbon-degrading marine bacterial consortium. *PLoS ONE*, 19(8), e0303363. <https://doi.org/10.3711/journal.pone.0303363>
9. Servicio Geológico Mexicano (SGM). *Características del petróleo*. Museo Virtual de Geología, Aplicaciones Geológicas. Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/AplicacionesGeologicas/Caracteristicas-del-petroleo.html>