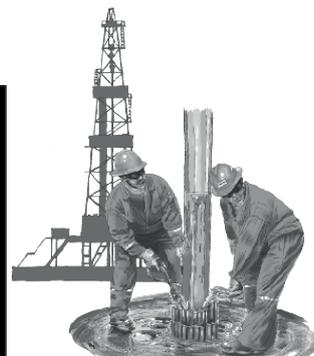


el suelo *y* *el* petróleo

Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México

Isabelle Barois, Silvia M. Contreras, Benito Hernández, Martín de los Santos, Froylán Martínez y David R. García

el suelo y el petróleo



Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México

Isabelle Barois, Silvia M. Contreras, Benito Hernández, Martín de los Santos, Froylán Martínez y David R. García

Título: **El suelo y el petróleo: Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México**

Autores: Isabelle Barois, Silvia M. Contreras Ramos, Benito Hernández Castellanos, Martín de los Santos, Froylán Martínez y David R. García.

Primera edición, 2018

D.R.© Instituto de Ecología A.C.

Carretera Antigua a Coatepec No. 351,

El Haya, C.P. 91070 Xalapa, Veracruz, México.

ISBN: 978-607-7579-80-9

Impreso en México

Formación editorial y corrección: Victoria Arcos

Ilustraciones: José Miguel Flores Morales

Diseño de portada: Gina Gallo Cadena

Forma sugerida de citar:

Barois, I., S.M. Contreras-Ramos, B. Hernández-Castellanos, M. de los Santos, F. Martínez y D. R. García. 2018. El suelo y el petróleo: Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México. Instituto de Ecología A.C. 30pp.

D.R.© Ninguna parte de esta publicación, incluyendo el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, traducida, almacenada o transmitida de forma alguna ningún medio, ya sea electrónico, químico, mecánico, óptico, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo del editor(es). Párrafos pequeños o figuras pueden reproducirse, dentro de lo estipulado en la Ley Federal del Derecho de Autor y el Convenio de Berna, o previa autorización por escrito de la editorial.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a CONACYT por haber financiado el proyecto **“Combinación de Tecnologías de Biorremediación de Suelos para la Remediación y Protección de Ecosistemas Contaminados con Hidrocarburos”** CLAVE 247619. Convocatoria Atención de Problemas Nacionales.

De igual manera, agradecemos a Pemex Poza Rica, al Biol. Marco Antonio Mendoza Núñez de Cáceres y a todo su equipo, por su colaboración y apoyo en el reconocimiento de los pozos con pasivos ambientales con alta contaminación de hidrocarburos en el suelo. Igualmente, agradecemos su interés en el desarrollo del proyecto.

A Alejandro Villanueva Juárez y su familia por su apoyo durante el desarrollo en la planta de biorremediación.

A los revisores, Graciela Sánchez y Pierre Masson, gracias por sus atinados comentarios.

Índice

¿Qué es el suelo?	4
Características físicas	4
Características químicas	5
Características biológicas	6
Biota del suelo	6
¿Qué es el petróleo? Características y origen	8
Composición química	8
Usos precolombinos	9
En México ¿dónde se encuentra?	10
Historia de la explotación petrolera en México	11
Métodos de extracción del petróleo	12
Derivados del petróleo y su uso en la vida cotidiana	12
Consecuencias de la contaminación	13
Remediación	17
Clasificación de tecnologías de remediación	18
Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla	19
Caracterización preliminar del sitio	20
Caracterización del suelo	21
Método de muestreo de la macrofauna	21
Método de muestreo de la mesofauna	21
Parámetros del suelo	21
Contaminación de hidrocarburos totales de petróleo (HTP)	21
Macrofauna	22
Mesofauna	23
Aplicación de las tecnologías de biorremediación (bioaumentación, fitorremediación y vermirremediación)	24
Dinámica de <i>Pontoscolex corethrurus</i> durante la biorremediación	25
Crecimiento de <i>Panicum maximun</i> durante la biorremediación	26
Remoción de los Hidrocarburos en las pilas	27
Conclusiones	27
Literatura consultada	29

¿Qué es el suelo?

El suelo es la delgada capa que se encuentra entre el aire y la roca madre de la tierra. Puede tener, desde unos pocos centímetros de profundidad, hasta 2 o 3 metros. Esta capa es como una piel que cubre a la tierra. Esa piel, como la nuestra, está viva, respira, y debemos cuidarla para mantenerla con buena salud.

De manera general, el suelo está integrado por tres componentes: el físico, el químico y el biológico; lo que lo hace un medio sumamente complejo y dinámico. Cada uno de esos componentes está integrado por varias características. Factores como el clima, la roca madre o subsuelo, el relieve y el tipo de vegetación dan lugar a suelos diferentes. Sin embargo, todos ellos tienen en común el estar conformados por capas o estratos.

El suelo es fundamental para la vida en nuestro planeta, es la base para cualquier proceso ecosistémico natural que se da en el medio terrestre. Además, proporciona múltiples servicios, varios de los cuales también son útiles para el bienestar del hombre. Éstos se pueden clasificar en cuatro categorías: apoyo, abastecimiento, regulación y cultural (Fig.1).

Apoyo, porque es por medio de sus raíces que la mayoría de las plantas se ancla al suelo; allí ocurre la producción primaria, sucede gran parte de los ciclos biogeoquímicos como el del agua, del carbono o del nitrógeno, y se origina el mismo suelo. Los servicios de abastecimiento se refieren a la producción de alimentos, obtención de madera para construcción y combustible, fibras para nuestro vestido, extracción de combustible y producción de agua dulce. Los servicios de regulación corresponden al almacenamiento de materia orgánica y agua, lo que regula el clima (emisión de gases, efecto invernadero) y las inundaciones. Asimismo, regula la calidad del agua, a través de la infiltración en sus capas.

El suelo es un almacén de biodiversidad ya que en él habita una gran cantidad de seres; esta diversidad está relacionada con la regulación de algunas enfermedades; por ejemplo, bajo ciertas condiciones, una plaga estaría muy pronto en contacto con su enemigo natural. Es a partir de los microorganismos del suelo que se producen los antibióticos que curan nuestras infecciones.

El suelo también ofrece servicios culturales, es parte de nuestro patrimonio, y nos permite reconstruir nuestra historia a través de la arqueología, es el área de la mayoría de nuestros espacios recreacionales, espirituales y educativos.

Por otro lado, el suelo por ser un medio opaco y compacto es difícil de conocer y estudiar. Por ello aún nos falta mucho por entender de su funcionamiento. El suelo es considerado un recurso no renovable porque un centímetro de suelo se crea en más de cien años: mucho más que el tiempo de generación del hombre – aproximadamente 30 años–. El petróleo también es un recurso no renovable y se origina en el suelo, pero para formarse requiere de millones de años.

Características físicas

Las propiedades morfológicas del suelo son el color, la estructura y profundidad. El color puede ser, de blanco a negro, si es rico en calcio o en materia orgánica, respectivamente. De amarillo a rojo, si tiene buen drenaje y aireación; en cambio, si está en condiciones de poco drenaje y aireación (anaerobiosis), será de color gris a azulado con moteados, y mal olor. Su estructura la conforma la agrupación de las partículas del suelo que dan lugar a los terrones que pueden ser de formas diversas; de esféricos a prismáticos pasando por migajones o láminas. La textura del suelo está dada por la cantidad de partículas elementales, que son las arcillas (inferior a 0.002mm), limos (entre 0.002 y 0.02mm) y arena



Figura 1. Servicios ambientales del suelo (Modificado de: Atlas Global de Biodiversidad del Suelo, adaptado de Haygarth y Ritz, 2009)

(0.02 a 2mm). Entre más arcillas, el suelo es más compacto y tiene menos drenaje; a éste se lo denomina suelo tipo barrial. Los suelos arenosos, en cambio, tienen un buen drenaje y el agua se infiltra fácilmente en esos suelos. El suelo arenoso no retiene agua, mientras que el arcilloso sí. Un buen suelo es el que tiene una textura intermedia, conocido como franco arcilloso. La cantidad de estas partículas y los poros de aire en el suelo se caracterizan mediante la medida de densidad aparente, esto es el peso del suelo seco en un volumen determinado. Las arcillas están hechas de laminillas de aluminosilicatos que tienen cargas eléctricas que hacen que se adhieran sustancias que pueden inmovilizarse; estas sustancias pueden ser hidrocarburos, de tal suerte que queda desactivado su efecto tóxico.

Características químicas

El pH es una medida que permite caracterizar la acidez o la alcalinidad de un medio. El pH mide la cantidad de iones hidrógeno (H^+) en una solución. Un pH de 7 es neutro, debajo de 7 es ácido y arriba, es alcalino. Cuando el suelo es demasiado ácido (inferior a 4.5), el aluminio y el

magnesio de las arcillas se solubilizan, y pueden ser absorbidos por las plantas, lo cual es tóxico, o igualmente puede disminuir la actividad microbiana.

Los nutrientes del suelo son los minerales esenciales para el buen desarrollo de las plantas. Estos nutrientes pueden ser absorbidos por las plantas por medio de sus raíces cuando están en forma sencilla de iones, cationes o aniones. Los nutrientes pueden ser requeridos en forma importante y se les llama macronutrientes; cuando es en cantidad menor son micronutrientes. Cuando no son asimilables es que están combinados con las arcillas o la materia orgánica.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una medida de la cantidad de cationes del suelo que pueden ser absorbidos o retenidos por un suelo debido a sus arcillas y materia orgánica

que tiene cargas eléctricas negativas, y que atrae las cargas positivas de los cationes y los retiene.

Características biológicas

Proceso de descomposición y la materia orgánica

La materia orgánica del suelo o humus proviene de todas las plantas y animales que mueren, además de las raíces y todos los organismos que viven en él. En el suelo sucede un proceso muy importante para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: la descomposición de la materia orgánica que es llevada a cabo, principalmente, por los organismos del suelo. Durante la descomposición ocurren dos procesos importantes, la mineralización y la humificación (Fig.2). En la mineralización, los elementos de la materia orgánica son liberados en sus formas minerales sencillas, y pueden ser asimilados por las plantas; tal es el caso del amonio (NH_4^+), los nitratos (NO_3^-) o los fosfatos (PO_4^{3-}). En cambio, en la humificación, la materia orgánica se va condensando, estabilizando y ligando con alguna de origen reciente que proviene de las paredes celulares de los microorganismos. El humus es, por lo general, de color negro a café; se puede asemejar a las primeras etapas de formación del petróleo, aunque éste se forma en condiciones anaeróbicas, en tanto que el humus se forma en presencia de aire, por lo que está constituido, principalmente, de carbono y nitrógeno.

Cuando el humus se forma, se está capturando carbono en vez de que éste se libere a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO_2). Este proceso de descomposición es llevado a cabo por los organismos, desde los animales que fraccionan, trituran y digieren la materia orgánica fresca, hasta las bacterias y los hongos que la mineralizan y transforman en humus.

Biota del suelo

El suelo alberga más del 25% de toda la biodiversidad del planeta, por lo que se constituye

como uno de los sitios más biodiversos. Por ello, los estudiosos del suelo han dividido la fauna del suelo en megafauna –que son los animales más grandes como las tuzas, víboras, ratones o lagartijas–, macrofauna –que va de 2mm a 20cm, y que pueden ser las lombrices de tierra, ciempiés, milpiés, hormigas, gallinas ciegas, escarabajos pequeños y caracoles–, mesofauna –organismos de entre 2mm y 0.2mm, en donde dominan los ácaros como las garrapatas, los colémbolos, conocidos como pulgas de tierra de color blanco que brincan; las hormigas y algunos nematodos– y los microorganismos –aquellos que sólo se pueden observar con microscopio; entre los cuales todavía puede haber algunos nematodos y protozoarios, los hongos y las bacterias que miden solo micras (1micra=0.001mm)–.

La materia orgánica del suelo es el alimento para todo lo que vive en él, además de tener otras propiedades como retener el agua, los nutrientes o regular la temperatura, promueve la estabilidad, la estructura del suelo, así como la porosidad e infiltración del agua. La materia orgánica del suelo es el componente fundamental para su fertilidad, por lo que se debe de cuidar y reponer en caso de que se pierda.

No hay ningún lugar de la naturaleza con una mayor concentración de especies que los suelos. Esta alta biodiversidad se debe, en particular, a los insectos, los nematodos, hongos y bacterias. La gran mayoría de los insectos vive en el suelo, o pasa al menos una parte de su vida en éste, ya sea en forma larvaria –como la gallina ciega que, en estado adulto, es el mayate–, de pupa o en etapa adulta.

En un metro cuadrado de suelo puede haber, aproximadamente, mil 200 animales del grupo de la macrofauna, más de 10 mil de la mesofauna y, a nivel de las bacterias y hongos, puede haber por encima de 10 mil y hasta 50 mil especies diferentes, en una cucharadita de suelo. No debemos olvidar que, en el suelo, también se encuentran las raíces de casi todas las plantas, lo cual incrementa notablemente su diversidad.

Esta diversidad varía dependiendo del tipo de suelo y su manejo.

El suelo es, asimismo, un medio difícil para vivir; por ser opaco, compacto y con materia orgánica difícil de digerir. Por ello, entre los organismos se establecen interacciones positivas y sinergias que favorecen la vida. Estas interacciones pueden ser entre las raíces y las bacterias fijadoras de

de carbohidratos. Las raíces de las plantas liberan al suelo exudados que son azúcares de fácil asimilación, para promover la actividad bacteriana alrededor de sus raíces, área que se conoce como rizósfera.

Existen organismos que son clave en la dinámica del suelo, tal es el caso de las lombrices de tierra. En un pastizal Veracruzano, una población de

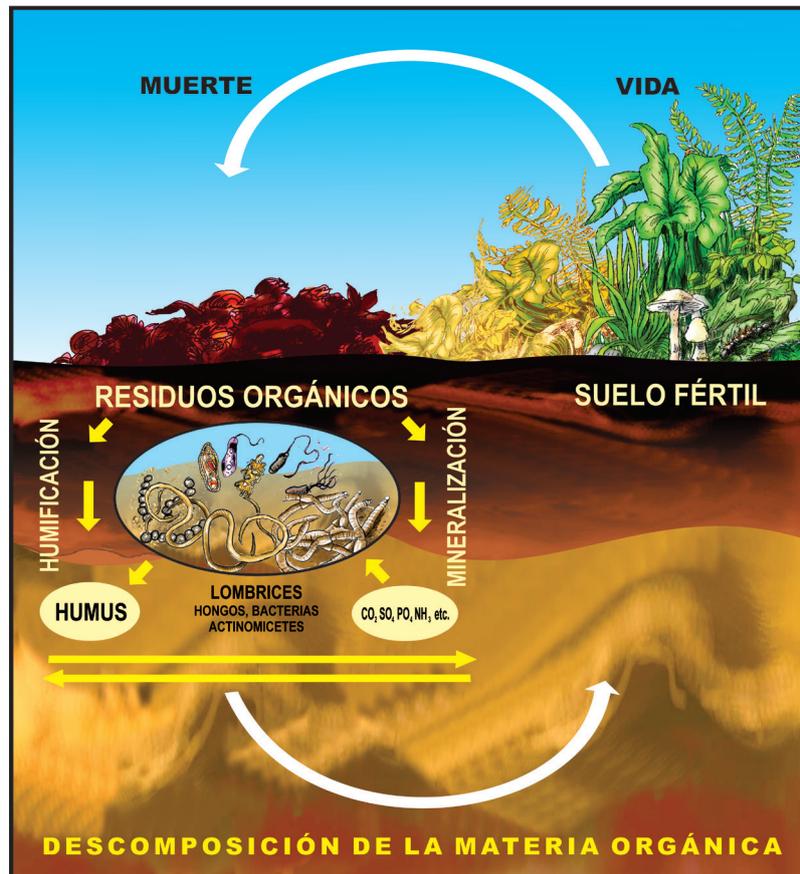


Figura 2. Descomposición y mineralización (Modificado de Duchaufour 1987 y Aranda 2001)

nitrógeno que lo toman del aire para volverlo asimilable para las plantas y, después, para todos los seres vivos. O los hongos que forman uniones con las raíces llamadas micorrizas, cuyos micelios –que son como raíces– aumentan la posibilidad de absorber los nutrientes que son utilizados por las plantas. De igual manera, favorecen la liberación de fósforo para que las plantas lo tomen y, a cambio, la planta les provee

lombrices de la especie *Pontoscolex corethrus* pueden tener más de 33 mil individuos que pueden ingerir hasta 400 toneladas de suelo por hectárea anualmente, lo cual puede tener un impacto muy importante, considerando las interacciones con los microorganismos para digerir la materia orgánica. En el suelo se dan cadenas de alimentación o tróficas muy complejas, a partir de los residuos en descomposición o de la misma

materia orgánica recalcitrante (que podría ser petróleo o chapopote). Los microorganismos, hongos y bacterias en interacción con el resto de la fauna, logran, poco a poco, la descomposición de la materia orgánica, que es un proceso natural, pero que también permite descontaminar el suelo. Por ello es importante mantener la biodiversidad del suelo para beneficiarse de todos los organismos, ya que cada especie juega un papel específico para descomponer ciertos productos o, incluso, para controlar algunos organismos oportunistas que pueden volverse en plagas. Este proceso toma su tiempo, pero el hombre a veces logra acelerarlo a su beneficio para solucionar problemas de contaminación, como veremos en la sección de remediación de este documento.

¿Qué es el petróleo? Características y origen

El petróleo es, actualmente, una de las principales fuentes de energía, y la materia prima más importante del mundo. Un tercio de la energía que mantiene en actividad a nuestra civilización proviene de esta fuente energética no renovable. En México, cerca del 88% de la energía primaria que se consume proviene del petróleo, pero ¿qué es el petróleo y de dónde proviene? La palabra petróleo deriva de los vocablos latinos *petro* (piedra) y *óleum* (aceite); es decir, “aceite de piedra” también conocido como aceite natural, aceite mineral, aceite noble y aceite negro. Se origina a partir de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica; es decir, en ausencia de oxígeno (Fig.3) que tuvo lugar desde la explosión de la vida en su forma pluricelular y más compleja hace, aproximadamente, 550 millones de años, durante la era Paleozoica, seguido de la era Mesozoica (época en la que habitaban los dinosaurios), hasta llegar a la era Cuaternaria (reciente). Esta materia orgánica provenía, principalmente, del plancton marino, que se fue acumulando en el fondo de plataformas costeras o en las cuencas poco profundas de estanques,

y que fueron sepultadas bajo sucesivas capas de sedimentos inorgánicos –arenas y arcillas–, a lo largo de la columna estratigráfica enterrándolos cada vez más, a casusa de procesos geológicos, donde la elevada presión de las capas de tierra, las altas temperaturas –debidas al gradiente geotérmico– y la acción de bacterias en un medio anaerobio, fueron transformando lentamente los restos orgánicos en una mezcla de hidrocarburos, y en lo que hoy conocemos como petróleo crudo.

Composición química

El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos líquidos, compuesto en mayor medida de carbono (C 83-87%) e hidrógeno (H 11-14%); además, contiene abundantes impurezas de compuestos orgánicos, entre los que encontramos componentes como azufre (S), oxígeno (O), nitrógeno (N), mercaptanos, dióxido de azufre, ácido sulfúrico, alcoholes mezclados también con agua salada –ya sea libre o emulsionada– en cantidad variable y diversas sales minerales como cloruros, sulfatos de calcio (CaSO_4), magnesio (Mg), hierro (Fe), níquel (Ni), vanadio (V) y plomo (Pb). La diversa cantidad de cada uno de los elementos químicos (orgánicos e inorgánicos) que componen el petróleo, determina sus características particulares como el color, densidad o viscosidad, lo cual produce líquidos viscosos de color verde, amarillo, marrón o negro. Los hidrocarburos se pueden clasificar en dos tipos: los alifáticos (alcanos, alquenos y alquinos), donde los carbonos conforman una cadena; y los aromáticos, que presentan al menos una estructura cíclica de carbono y que se caracterizan por tener un fuerte olor.

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se tienen diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes.

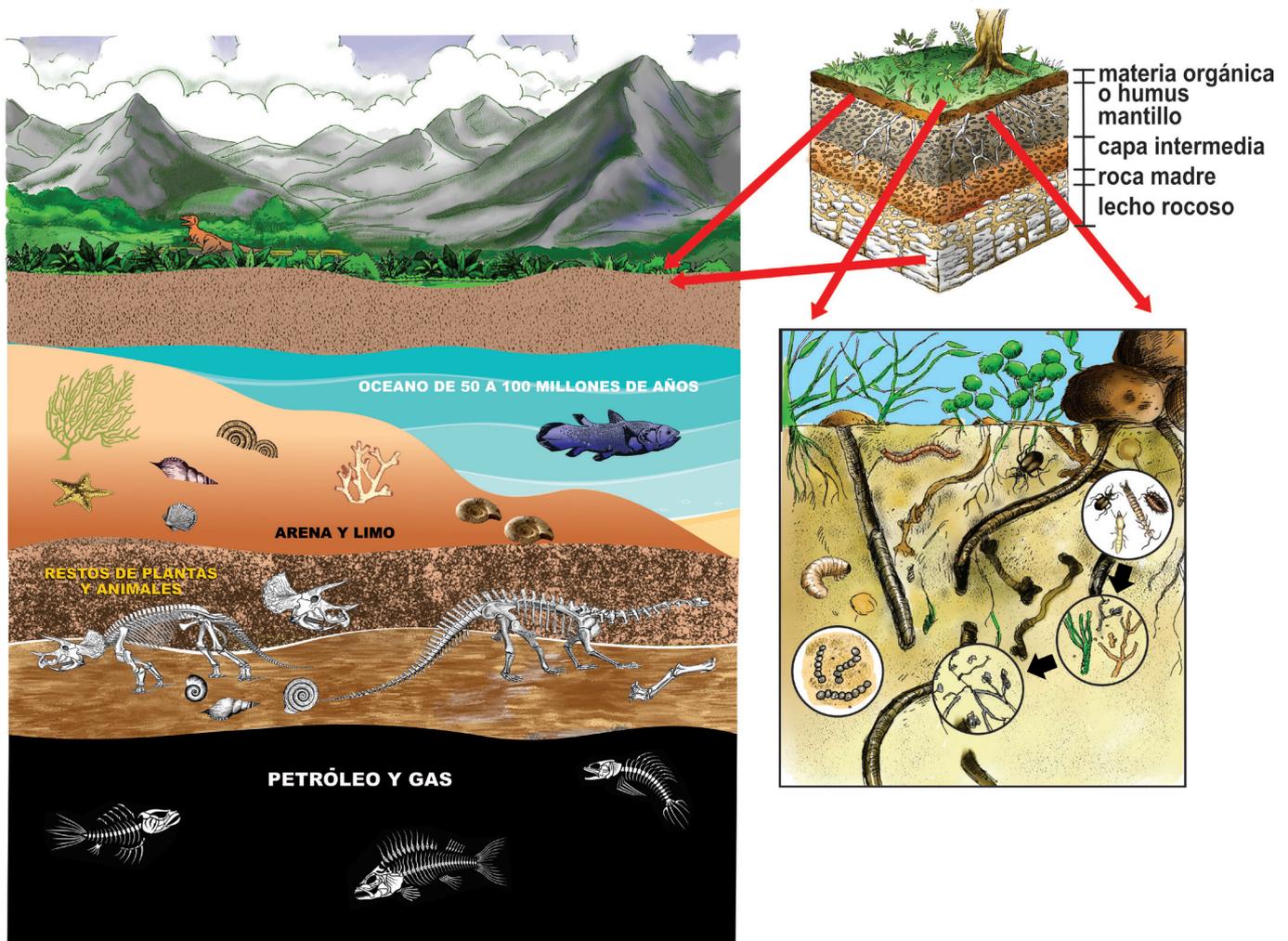


Figura 3. Formación del petróleo y del suelo
 (Tomado de <https://bioygeologia.weebly.com/la-formacioacuten-del-suelo.html>)

Usos precolombinos

En el México prehispánico, el chapopote –también llamado asfalto o betún–, ya era una sustancia conocida. Su uso se remonta, aproximadamente, a 2 mil años de antigüedad, por los primeros mesoamericanos, específicamente por la cultura Olmeca. Los registros arqueológicos de sus usos provienen de la zona del Golfo de México, región caracterizada por abundantes yacimientos naturales, donde los primeros habitantes mesoamericanos de San Lorenzo y El Manatí, Veracruz; y La Venta, Tabasco; se encargaban de recogerlo y procesarlo. Entre los olmecas, gran parte del comercio, comunicación y transporte regional se realizaba por vías acuáticas

y el chapopote era crucial para sellar y hacer más eficientes las embarcaciones (piraguas); además, era empleado para sellar acueductos. Se usaba como decoración de vasijas, figurillas fabricadas de barro y en mangos de cuchillos (Fig.4), así como material de construcción para cubrir los pisos de las habitaciones y las fachadas de los templos. Los olmecas comerciaban con el chapopote y, por medio de redes regionales de intercambio, abastecían hasta el altiplano central durante el preclásico, hasta el siglo XVI, los usos prácticos que se le daban al chapopote hablan de su importancia. Los mexicas lo utilizaban como ungüento medicinal, dentífrico, elemento ceremonial para acentuar detalles de la anatomía, o como sahumerio. Durante el

periodo colonial, los españoles no le dieron más usos del que ya venían dándole los antiguos mexicanos; de hecho, el petróleo en la superficie de la tierra era visto como un elemento nocivo para la agricultura o la ganadería. No obstante, con la intención de lograr una mayor recaudación fiscal, en 1783, la Nueva España incluyó en las regulaciones mineras que toda riqueza que pudiera extraerse del subsuelo –entre ellas,

Noroeste (Fig.5), donde se extraen los siguientes tipos de petróleo de acuerdo con su densidad (Cuadro 1): maya (pesado), istmo (ligero), y olmeca (superligero) que, en su conjunto, forman la mezcla mexicana. El hidrocarburo maya es el de mayor abundancia en nuestro territorio. En 2017, Petróleos Mexicanos (PEMEX) reportó una producción de 1,948.263 miles de barriles diarios, con una reserva probada de petróleo



Figura 4. Zona Olmeca donde se uso el chapopote desde hace 2 mil años en México (Modificado de: <https://www.culturasmexicanas.com/2015/02/cultura-olmeca.html>)

el petróleo– que favoreciera la explotación sistemática de los depósitos localizados en el subsuelo, debía pagar impuestos.

En México, ¿dónde se encuentra?

En México se encuentra distribuido en cuatro regiones de exploración y producción de petróleo: Norte, Sur, Marina Sureste y Marina

crudo en 2018 equivalente a 7,695 millones de barriles de petróleo, ubicándolo en decimoctavo lugar por sus reservas a nivel mundial. En 2017, el petróleo fue extraído, principalmente, de aguas territoriales (81%), de Tabasco (11.7%) y de Veracruz (4.7%), lo cual convierte a Veracruz en el segundo estado con mayor producción de petróleo.

Historia de la explotación petrolera en México

La historia de la explotación petrolera en México se encuentra dividida en tres periodos: el primero (1863 a 1938), durante el Imperio

de Maximiliano, quien intentó promover las actividades petroleras a través de concesiones, principalmente, a empresas privadas extranjeras en Tabasco, norte de Veracruz, sur de Tamaulipas, Estado de México, Istmo de Tehuantepec y Puebla; sin embargo, su poca capacidad financiera impedía instalar la infraestructura



Figura 5. Regiones petroleras en México

(Modificado de: <http://www.pemex.com/nuestro-negocio/infraestructura/Paginas/default.aspx>)

Cuadro 1. Características de los hidrocarburos en México

Características	Tipo de crudo		
	Maya (Pesado)	Istmo (Ligero)	Olmeca (Superligero)
Gravedad°API	21.0-22.0	32.0-33.0	38.0-39.0
Viscosidad (SSU 100°F)	320	60	38
Agua (100% Volumen)	0.5	0.5	0.5
Azufre (% peso)	3.4	1.8	0.73-0.95
PVR (libras/pulg ²)	6	6	6.2
Punto de escurrimiento (°F)	-25	-35	-55
Sal (Lbs/1000Bls)	50	50	50

*La gravedad API es una medida de densidad que describe cuán pesado o ligero es el petróleo. Si los valores son altos, se trata de un petróleo ligero, y si son bajos, de un petróleo pesado.

necesaria. La baja producción, los rudimentarios sistemas de transporte y las escasas vías de comunicación hacían imposible competir en el mercado internacional, por lo tanto, ninguna de ellas prosperó. Si bien la explotación del crudo en estos años no fue exitosa, su mayor contribución consistió en la localización de las zonas más importantes de yacimientos, la denominada “Faja de oro”, en el norte veracruzano, y los campos de Reforma en Tabasco. El segundo periodo ocurrió luego de una serie de conflictos laborales entre trabajadores y compañías petroleras, por lo que el presidente Lázaro Cárdenas decretó la expropiación de la industria petrolera el 18 de marzo de 1938. Esto dio al Estado el control directo de este recurso estratégico para la economía y el futuro de la nación, adjudicando a Petróleos Mexicanos (PEMEX) el manejo de la industria, mediante un marco legal de empresa pública. Durante el sexenio del presidente José López Portillo (1976-1982), se logró el mayor auge petrolero de México cuando llegó a ocupar el sexto lugar en cuanto a reservas y el quinto en producción. El tercer periodo corresponde a la Reforma Energética decretada en 2013 durante el sexenio de Enrique Peña Nieto, que entre otras cosas, buscó mantener como propiedad de la nación los hidrocarburos que se encuentran en el territorio; modernizar y fortalecer, sin privatizar a Petróleos Mexicanos (PEMEX). Además de buscar reducir los riesgos financieros, geológicos y ambientales en sus distintas actividades, y alcanzar una producción de petróleo de 3.3 millones de barriles diarios en 2025.

Métodos de extracción del petróleo

Los métodos de extracción del petróleo dependerán de las características propias de cada yacimiento. Por lo general, se perfora hasta la altura del yacimiento y se introduce una tubería de revestimiento y una de extracción, en cuya punta se hacen perforaciones (Fig.6). El petróleo fluye por esos orificios hacia el pozo. Si

el yacimiento tiene energía propia, generada por la presión subterránea, éste saldrá por sí solo y se instala en la cabeza del pozo un equipo llamado “árbol de navidad”, que consta de un conjunto de válvulas para regular el paso del petróleo. Si no existe esa presión, se emplean otros métodos de extracción con sistemas de bombeo mecánico. El más común ha sido el del “balancín”, el cual, mediante un permanente balanceo, acciona una bomba en el fondo del pozo que succiona el petróleo hacia la superficie. Para la extracción del crudo en yacimientos marinos, tradicionalmente se han empleado sistemas que se fijan firmemente en el fondo del mar mediante diferentes dispositivos (plataformas convencionales). Sin embargo, en aguas profundas se emplean plataformas flotantes que, al no estar ancladas de manera permanente al lecho marino, pueden desplazarse de un yacimiento a otro. La fractura hidráulica, más conocida como *fracking*, es un método de extracción de gas y petróleo del subsuelo fracturando la roca a cientos de metros de profundidad inyectando entre sus grietas agua y otros productos químicos a alta presión que permite liberar el hidrocarburo hacia el exterior.

Derivados del petróleo y su uso en la vida cotidiana

El petróleo crudo no posee un uso práctico, por eso se somete a una serie de procesos físicos y químicos (refinación) para obtener de él, por destilación y transformación química – fundamentalmente – dos grupos de productos, (Fig.7) por un lado, aquellos que se utilizan para obtener energía: gasolinas, turbosina, diesel, combustóleo, keroseno, gasavión, gas nafta, gasolvente, citronila y propano; por otro lado, productos derivados que se utilizan para producir lubricantes, parafinas, asfaltos, materias primas para la industria petroquímica básica como el tolueno, que se utiliza en la fabricación de explosivos (dinamita), colorantes, preservativos de alimentos, desinfectantes, etcétera. El

benceno se utiliza en la fabricación de pinturas, barnices, caucho, tintes, impermeabilizantes, insecticidas, detergentes sintéticos, medicinas, entre otros; o xilenos, usados como disolventes en insecticidas y en algunos combustibles. Los policarbonatos, cloruro de polivinilo, polipropileno, polietileno, polimetacrilato, poliestireno, acrilonitrilo-butadieno-estireno, resinas, elastómeros y fibras, son la materia prima de todos los tipos de plásticos y telas sintéticas. En la vida cotidiana, más del 50% de los productos que nos rodean tienen algo que ver con el petróleo y sus derivados, esto nos muestra la importancia que tiene en nuestras vidas; de hecho, el petróleo es posiblemente la materia prima de la que hoy en día obtenemos más productos.

Consecuencias de la contaminación

Es preciso mencionar que el petróleo crudo no es en sí un contaminante pues, debido a su naturaleza líquida, enormes cantidades de petróleo y gas se fugan de manera natural de las deformaciones de las placas o de las fallas geológicas y atraen plancton y bacterias que se nutren de estas fuentes. Sin embargo, la razón principal de la actual contaminación petrolera del planeta se debe a la extracción industrial y al consumo excesivo de esta materia prima en un corto periodo, empezando por los trabajos de exploración y explotación del petróleo crudo o refinado, junto con los siniestros accidentes o



Figura 6. Métodos de extracción del petróleo en tierra y mar (Modificado de R. Cruz Figueroa <http://www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/198/fracking-beneficios-fugaces-danos-permanentes>)

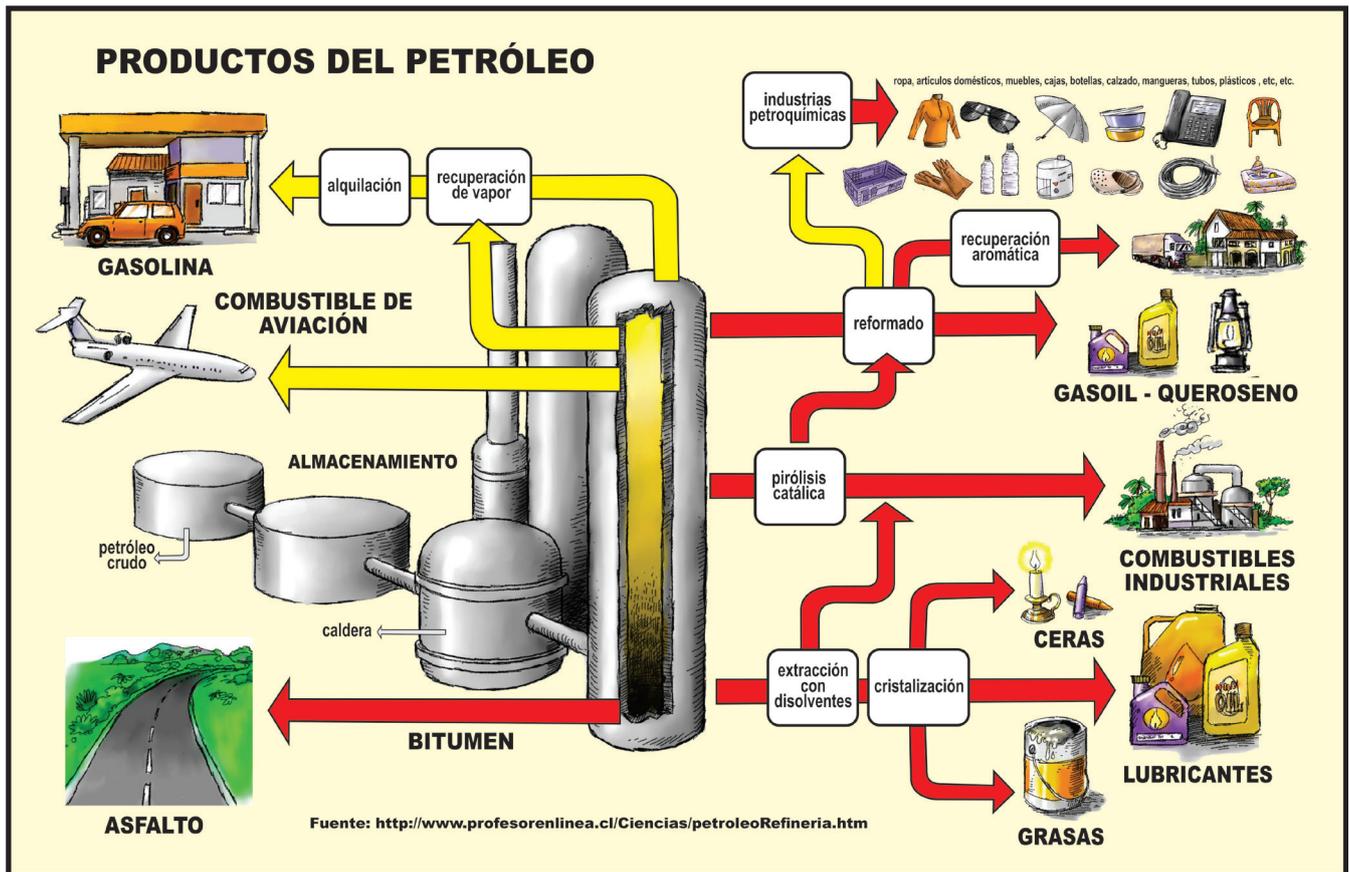


Figura 7. Productos derivados del petróleo

deliberados derrames que ocurren en cualquier parte del ecosistema terrestre o acuático, que conducen inevitablemente al deterioro gradual o repentino del ambiente, y a su contaminación (Fig.8) lo cual afecta de manera directa o indirectamente el suelo, el agua, el aire, la fauna y la flora. Los derrames de petróleo más grandes ocurren generalmente en los océanos, donde se estima que ingresan 600 mil toneladas métricas cada año, con una variación de 0.2 y 2 millones de toneladas métricas, además es difícil predecir sus consecuencias por su rápida expansión desde su fuente, y los cambios que sufre de acuerdo con su composición. Por otro lado, en México existen extensas áreas de suelos contaminados por hidrocarburos, debido a las tareas de exploración, extracción, refinación, falta de mantenimiento y robo de combustible. Tan solo en 2017, el Centro de Orientación para la Atención de Emergencias Ambientales (COATEA) de la PROFEPA junto con

la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA), atendieron 258 notificaciones sobre derrames de hidrocarburos. Por otro lado, en 2016 PEMEX reportó 213 derrames de hidrocarburos en tierra, lo que representa mil 284 hectáreas contaminadas.

Los ecosistemas afectados por derrames de hidrocarburos son alterados en sus características fisicoquímicas, en su flora, fauna y microorganismos. Entre los principales procesos que se ven afectados se encuentran:

- Alteración del hábitat.
- Cambios en las relaciones entre depredadores y presas, y entre competidores.
- Alteraciones en los niveles de productividad.
- Cambios en las redes tróficas, probablemente una de las claves para

comprender los impactos en el ecosistema a mediano y largo plazos.

Los derrames de hidrocarburos pueden tener efectos directos letales (mortales) o subletales, y efectos indirectos que son a largo plazo.

Estos efectos obedecen a las características propias de los diferentes hidrocarburos que constituyen el petróleo, tales como su:

2) Solubilidad: Los hidrocarburos de alto peso molecular son insolubles en agua; por lo tanto, cuando hay derrames causan problemas porque se adhieren a los organismos y les causan asfixia. En cambio, los derivados del benceno y los naftalenos pueden solubilizarse en agua. Dicha solubilidad influirá en su toxicidad en el ecosistema.



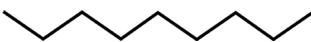
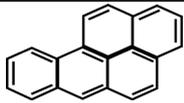
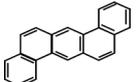
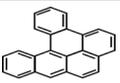
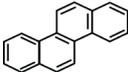
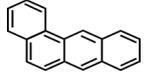
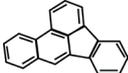
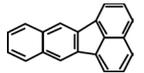
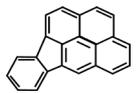
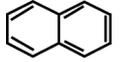
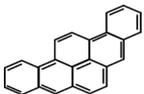
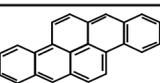
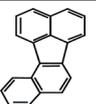
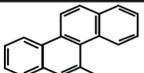
Figura 8. Impacto de los derrames en el suelo, ríos y mar.

1) Toxicidad: Los hidrocarburos aromáticos de bajo punto de ebullición son letales para casi todos los organismos terrestres y marinos. Algunos de los hidrocarburos parafínicos son menos tóxicos y hasta no tóxicos para los seres vivos.

3) Biodegradación: está en función de las características y peso molecular de sus componentes. En aquellos de peso molecular alto, su tiempo de descomposición es muy largo.

4) Volatilidad, densidad y actividad superficial: definen cómo cada componente del petróleo se evaporará, hundirá o dispersará.

Cuadro 2. Hidrocarburos alifáticos contra hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's) considerados cancerígenos para el humano. Fuente: IARC (International Agency for Research on Cancer)

Hidrocarburos alifáticos	Estructura	Riesgo
Alcanos Decano		Depresor del sistema nervioso central, asfixiante, acumulables en tejido adiposo (graso)
Alquenos Etano		Extremadamente inflamable, riesgo de asfixia por inhalación o congelación en contacto con liquido
Alquinos Propino		No representa ningún riesgo ecológico
Cicloalcanos Ciclohexano		Es muy tóxico para los organismos acuáticos y puede causar efectos prolongados en el medio acuático.
Cicloalquenos Ciclopentano		Es tóxico para los organismos acuáticos.
Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Estructura	Clasificación de la IARC
Benzo[a]pireno		Grupo 1 Cancerígeno para humanos (Probado)
Dibenzo[a,h]antraceno		Grupo 2A Probablemente cancerígeno para humanos
Ciclopenta[cd]pireno		(Existe evidencia limitada de una asociación con el cáncer en seres humanos, pero pruebas suficientes de asociación con el cáncer en animales de experimentación)
Dibenzo[a,i]pireno		Grupo 2B Posiblemente cancerígeno para los humanos (Existe evidencia limitada de una asociación con el cáncer en seres humanos, pero pruebas insuficientes asociadas con el cáncer en animales de experimentación)
Criseno		
Benzo[a]antraceno		
Benzo[b]fluoranteno		
Benzo[k]fluoranteno		
Indeno[123-cd]pireno		
Naftaleno		
Dibenzo[a,i]pireno		
Dibenzo[a,h]pireno		
Benzo[j]fluoranteno		
5-Metilcriseno		

5) Carcinogenicidad. No todos los hidrocarburos son peligrosos, si comparamos los alifáticos contra los aromáticos, de acuerdo con la IARC, 2015 (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer), se ha clasificado a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en grupos, de acuerdo con su potencial cancerígeno para los humanos (Cuadro 2).

Al comparar estos dos grupos observamos que los aromáticos son los más peligrosos. Los HAPs se clasifican según su origen en: biogénico, pirogénico y petrogénico, los dos últimos, derivados del petróleo o de su combustión incompleta. Generalmente ingresan al ambiente en fase líquida (derrames de crudo) y en fase gaseosa (por evaporación-depositación). Una vez expuestos, sufrirán procesos de transformación que dependerán de las características químicas de los compuestos y de las variables ambientales.

En Tabasco se han diagnosticado diferentes niveles de contaminación en las zonas petroleras del estado y se han relacionado a los continuos derrames, fugas, y emisiones de las instalaciones petroleras. El suelo contaminado es una fuente importante de HAPs, de gran preocupación para la salud humana, pues las tasas de absorción de los HAPs son altas debido a su potencial de biomagnificación en la cadena trófica, y por su fuerte solubilidad y acumulación en los lípidos. Los HAPs se absorben rápidamente por el tracto digestivo de los seres humanos, y la piel puede absorber hasta un 75% del total. Por ejemplo, el efecto del HAP Benzo[a]pireno se ha asociado con la no replicación cromosómica y errores del ADN (Ácido desoxirribonucleico), lo que aumenta el riesgo de cáncer, durante el embarazo aumenta la incidencia de muerte fetal por anomalías como exencefalia y toracosquisis. En estudios experimentales con animales, durante el embarazo resultó en una mayor incidencia de tumores en pulmón, hígado, ovarios y otros órganos. En general, cuanto mayor sea el número de anillos de benceno, mayor será la toxicidad de los HAPs.

Remediación

Una vez conocidos los daños ecológicos y sus efectos en las cadenas tróficas, generados por la exploración y explotación del petróleo, pasemos a las alternativas que existen para remediar los ecosistemas dañados. Pero ¿qué es la remediación?; de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LPGIR), es el conjunto de tecnologías a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos. Sin embargo, antes de considerar la aplicación de cualquier tecnología de remediación, es fundamental conocer ciertas características, tanto del suelo (ambientales), como del contaminante y de los organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) presentes en el sitio (Fig.9), con potencial metabólico para degradar los contaminantes. De esta manera, los procesos de remediación dependen de estos tres factores que deben encontrarse en equilibrio.

Aún es posible remediar o rescatar los suelos, como ejemplo citamos el caso exitoso de remediación de la refinería 18 de marzo (Parque Bicentenario, CDMX Fig.10). Ésta fue creada por la empresa El Águila en 1933. Abarcó un área de 174 hectáreas, la cual soportó una intensa actividad industrial que, como consecuencia de la tecnología con que operó, ocasionó afectaciones por hidrocarburos en el suelo y subsuelo en los terrenos que albergaban sus instalaciones. Después de casi 60 años de operación se ordenó su cierre el 18 de marzo de 1991, con el propósito de reducir la contaminación del aire de la Zona Metropolitana en el Valle de México.

Este fue uno de los proyectos de remediación más grandes en México y el mundo, donde se aplicaron tecnologías de remediación con base en: el tipo de contaminante, su distribución espacial, la caracterización del subsuelo y en la evaluación

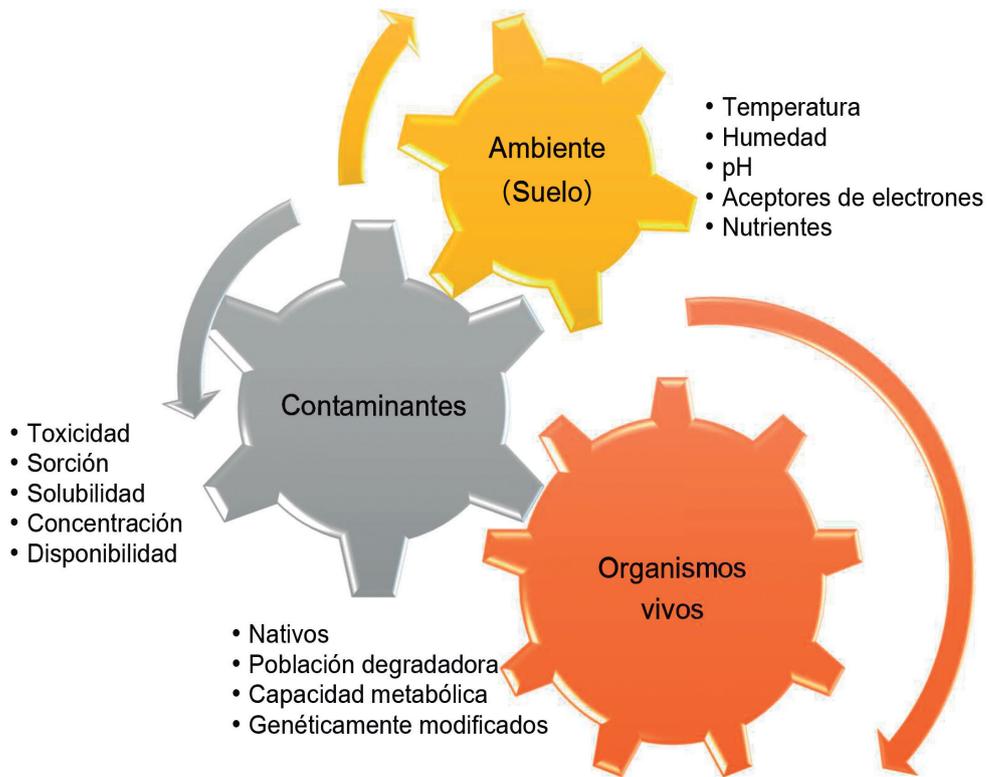


Figura 9. Factores interrelacionados entre sí que inciden en la remediación de un suelo (Modificado de Velasco, J.A. y Volke, T. 2002)

de protección a la salud humana; con la finalidad de alcanzar los niveles de limpieza establecidos en la NOM-138. Algunas de las técnicas aplicadas fueron: Bioremediación, Biopilas, Bioventeo, *Air Sparging* (chorros de aire), los cuales permitieron el saneamiento del terreno alcanzando niveles de limpieza que no representan riesgo a la salud y al medio ambiente.

Clasificación de tecnologías de remediación

Las tecnologías existentes para remediar los suelos contaminados pueden ser de naturaleza fisicoquímica, térmica o biológica y tanto unos como otros pueden aplicarse en el lugar de la contaminación *in situ* o fuera del sitio, *ex situ*.

Las tecnologías fisicoquímicas utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para degradar, separar o contener los contaminantes. Las tecnologías térmicas utilizan calor para incrementar la volatilización (separación),



Figura 10. Parque Bicentenario, Ciudad de México (CDMX)

quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo. En cambio, las tecnologías biológicas, también llamadas de biorremediación, utilizan la capacidad metabólica de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) presentes en ambientes afectados para degradar, transformar o remover los contaminantes tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos.

La estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos y, por consiguiente, de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía. La biorremediación de un suelo implica su descontaminación por vía biológica. En el caso de sitios contaminados con metales, los microorganismos pueden modificar su movilidad en el ambiente a través de cambios en sus características físicas o químicas.

Cada tecnología muestra ventajas y desventajas en su uso o aplicación (cuadro 3).

Pero, aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, la biorremediación es la tecnología más empleada en México y en el mundo pues se ha usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo, solventes, explosivos, clorofenoles, pesticidas, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos, usando organismos propios del sitio contaminado (autóctonos o nativos) o de otros sitios (exógenos o exóticos), ya sea *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno). La técnica de biorremediación más utilizada es la bioaumentación, que consiste en inocular microorganismos (bacterias y/o hongos) seleccionados por su capacidad degradadora de ciertos contaminantes. Los microorganismos inoculados en el suelo se enfrentan a diversos factores ambientales que pueden reducir su sobrevivencia y reproducción. Por lo tanto, para asegurar el éxito de los microorganismos

se encapsulan dentro de un medio nutritivo para que, poco a poco, se vayan aclimatando y asegurando su adaptación al ser liberadas lentamente al ambiente. La fitorremediación se lleva a cabo utilizando plantas del mismo lugar –autóctonas– o traídas de otro lugar –exógenas–, para estabilizar, degradar, volatilizar o acumular el contaminante (Fig.11). Los procesos mismos de la planta pueden afectar la fitoestabilización, fitoextracción, fitodegradación y/o la rizodegradación del contaminante. En la rizodegradación y fitoestabilización interactúan las raíces que excretan exudados, lo cual estimula a los microorganismos, por una parte, a degradar el contaminante, o provocan que éste que se adhiera a las arcillas del suelo. En la fitoextracción o fitodegradación la misma planta tiene la capacidad de absorber el contaminante y de acumularlo, volatilizarlo o degradarlo con su propio metabolismo. La vermiremediación es otra tecnología que utiliza lombrices de tierra para acelerar la degradación de contaminantes. Al igual que las plantas, las lombrices pueden estimular los microorganismos para la remoción de contaminantes como los hidrocarburos. Además de mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo al descomponer la materia orgánica, reciclando nutrientes y mejorando la oxigenación y filtración del agua.

Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla

La región norte de Veracruz, la llamada “Faja de oro”, ha sido de las zonas con mayor extracción de petróleo y, por lo tanto, en donde han quedado varios pasivos ambientales. Son considerados pasivos ambientales aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, petroleras u otras. En la actualidad, son abandonados o se encuentran inactivos, y constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población y el ecosistema

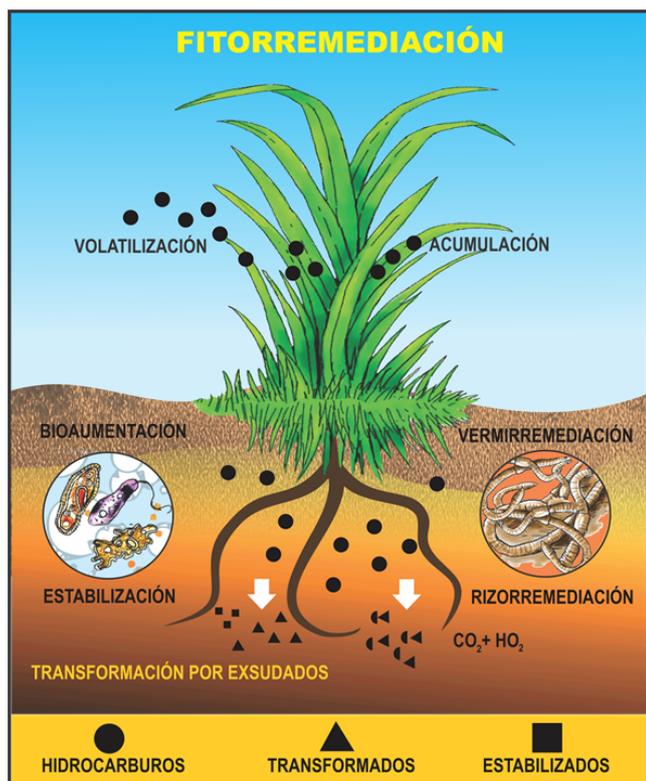


Figura 11. Remoción de hidrocarburos y otros químicos vía fitorremediación, vermiremediación y bioaumentación. Inspirado de: <https://blogs.umass.edu/natsci397a-ross/phytoremediation-the-future-of-environmental-remediation/>.

circundante. Por ello, es conveniente tratar de remediar los sitios con pasivos ambientales.

En el campo Miguel Alemán, ubicado en la región Totonaca (20°27'22.6" N y 97°20'8.5" W), cerca de Papantla, donde la extracción de petróleo se detuvo hace 15 años, se estableció una pila de biorremediación piloto.

Caracterización preliminar del sitio

Previo al establecimiento de la unidad piloto de biorremediación se llevó a cabo la caracterización del área. En ella predomina el clima cálido con una temperatura promedio de 24.4 °C, con abundante lluvia en verano, una precipitación anual promedio de 1010mm y altitud de 50 msnm. Actualmente, la vegetación predominante es un bosque secundario o pastizales y plantaciones de cítricos; el área contaminada estaba parcialmente cubierta de hierba; el pasto dominante es *Panicum maximum*.

Cuadro 3. Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación, clasificadas de acuerdo con el tipo de tecnología. (Tomado de Velasco, J.A. y Volke, T. 2002).

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Fisicoquímicas	Son económicas. Pueden realizarse en periodos cortos. El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía, ni ingeniería.	Los residuos generados por técnicas de separación deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos. Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación
Térmicas	Los tiempos de limpieza son cortos y rápidos.	Es el grupo de tratamientos más costoso. Los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo. Intensivo en mano de obra.
Biológicas	Son económicas. Amigables con el medio ambiente. Los contaminantes generalmente son destruidos. Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior.	Requieren mayores tiempos de tratamiento. Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos. No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.

Se seleccionaron dos sitios: uno contaminado, correspondiente a la presa de recorte por el cual se conducía el petróleo derramado y otro sitio aledaño, más o menos paralelo al canal libre de contaminación (Control).

Caracterización del suelo

Se tomó una muestra de suelo en cada punto de los transectos donde se hicieron los monolitos, para determinar materia orgánica, carbono total, nitrógeno total, fósforo total y textura del suelo. Adicionalmente, se tomaron 200g de suelo del área contaminada en los puntos muestreados, para la identificación y cuantificación de los hidrocarburos totales de petróleo HTP; esto se realizó mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) (*Agilent Technologies* model 6890). Para la identificación se preparó una solución mixta de alcanos (10 a 40 carbonos) y para los 16 HAPs prioritarios de la US-EPA (Agencia de Protección Ambiental-Estados Unidos), con estándares puros de la marca Sigma, UST122 y 69281, respectivamente. De acuerdo con los resultados obtenidos al identificar y cuantificar los HTP se separó el sitio en dos niveles de contaminación: medio y alto.

El contenido de HTP en el área de contaminación nivel medio, estaba por debajo de los límites estándar de la norma mexicana, mientras que en el área altamente contaminada fue tres veces más alto. Para los Países Bajos, un suelo >5000 mg/kg de HTP está calificado como altamente contaminado.

Método de muestreo de la macrofauna

En ambos sitios se estableció un transecto de 100 metros. Cada diez metros se excavó un monolito (25×25×30cm) que se dividió en tres estratos (0-10cm, 10-20cm y 20-30cm) de profundidad siguiendo el método (TSBF, *Moreira et al.*

2012). Cada monolito se revisó manualmente guardando la macrofauna en alcohol al 70% y las lombrices en formaldehído al 4%. Los organismos se identificaron hasta el nivel de orden para los artrópodos y el nivel de especie para lombrices (*Oligochaeta*).

Método de muestreo de la mesofauna

La mesofauna del suelo se muestreó al lado de cada uno de los monolitos de ambos transectos con un cilindro de 5 cm de diámetro y 10 cm de alto (196,35 cm³) a una profundidad de 0-10cm, 10-20cm y 20-30cm. La extracción de la mesofauna se realizó con embudos de Berlese (*Karyanto et al.*, 2012). Después, se contó e identificó la mesofauna. Ácaros a nivel de orden y colémbolos a nivel de familia.

Parámetros del suelo

El contenido de materia orgánica y el carbono total fue significativamente más alto en el suelo altamente contaminado comparado con los otros suelos. La relación C/N fue significativamente más alta en el suelo altamente contaminado, lo que demuestra que la materia orgánica estaba menos mineralizada en el área altamente contaminada. El fósforo (P Olsen) mostró un aumento significativo en el suelo control, en comparación con el suelo altamente contaminado. La textura era franco arcilloso en el suelo control y moderadamente contaminado, pero había significativamente más arcilla en el suelo altamente contaminado; (Cuadro 4) que podría ser el resultado de que la arcilla se hubiera acumulado en la parte baja del canal.

Contaminación hidrocarburos totales de petróleo (HTP)

En la zona de estudio se observaron dos áreas de contaminación a lo largo del derrame de

petróleo, en las que la concentración de HTP se clasificó como media concentración (1800 mg/kg) y alta concentración (8150 mg/kg). Aunque se evaluaron 20 HTP, nos concentraremos en los resultados obtenidos en seis, considerados como los –probablemente– más cancerígenos para los humanos: criseno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k] fluoranteno, benzo[a]pireno, dibenzo[a,h] antraceno, indenol[1.2.-c,d]pireno (Cuadro 4). Los cuatro últimos solamente estuvieron presentes en el suelo altamente contaminado. Esta alta concentración de hidrocarburos está relacionada con la topografía del sitio, que por lixiviación, desde la parte alta del canal hasta la parte más baja, concentró los contaminantes, lo cual se relaciona con el hecho de que los compuestos con más anillos de benceno pueden

concentrarse y unirse a la matriz del suelo debido a la gran cantidad de arcillas y materia orgánica acumulada. Las concentraciones encontradas en este sitio fueron más altas que las concentraciones permitidas por la EPA-US.

Macrofauna

La macrofauna tendió a ser mayor en los sitios contaminados con un promedio de 900 Ind./m² (Fig.12). Esto podría deberse a que algunos organismos utilizan compuestos en una etapa de descomposición como fuente de carbono para alimentarse. Respecto a la distribución vertical, más del 80% de los organismos se encontraron en los primeros 20cm en los tres sitios, pero en el sitio altamente contaminado

Cuadro 4. Características fisicoquímicas del suelo y concentración de hidrocarburos en el área de control, contaminación medio y alto (\pm error estándar. Las filas con letras diferentes son significativamente diferentes).

	Parámetro	Control	Medio	Alto
Suelo	Materia orgánica (%)	5.0 \pm 0.33 b	3.8 \pm 0.43 b	7.6 \pm 0.52 a
	Carbono total (%)	7.0 \pm 0.60 b	6.8 \pm 0.78 b	11.0 \pm 0.96 a
	Nitrógeno total (%)	0.3 \pm 0.01 a	0.2 \pm 0.02 b	0.3 \pm 0.02 a
	C/N	10.0 \pm 0.57 a	12.6 \pm 0.74 a	18.2 \pm 0.91 b
	Fósforo total (mg/kg)	582.4 \pm 42.08 b	649.5 \pm 54.33 ab	754.4 \pm 66.54 a
	Ph	7.7 \pm 0.10 a	7.8 \pm 0.06 a	7.8 \pm 0.07 a
	Arcilla (%)	38.4 \pm 1.57 b	37.3 \pm 2.03 b	51.7 \pm 2.48 a
	Limo (%)	30.1 \pm 1.06 a	31.6 \pm 1.37 a	28.3 \pm 1.68 a
	Arena (%)	31.5 \pm 2.06 a	31.2 \pm 2.66 a	20.0 \pm 3.26 b
Hidrocarburos	Criseno (mg/kg)	0	680.1 \pm 127 a	1663.0 \pm 1177 a
	Benzo[b]fluoranteno (mg/kg)	0	28.7 \pm 7 a	322.1 \pm 142 b
	Benzo[k]fluoranteno (mg/kg)	0	ND a	465.5 \pm 500 b
	Benzo[a]pireno (mg/kg)	0	ND a	502.0 \pm 596 b
	Dibenzo[a,h]antraceno (mg/kg)	0	ND a	872.0 \pm 429 b
	Indenol[1.2.-c,d]pireno (mg/kg)	0	ND a	892.9 \pm 12 b
	Σ Hidrocarburos aromáticos policíclicos	0	704.1 \pm 131.6a	3354.4 \pm 1896.9b
	Σ Hidrocarburos totales de petróleo	0	1800 \pm 192 a	8150 \pm 4045 b

había cuatro veces más organismos (120 Ind./m²) en la capa más profunda (20-30 cm). Esto podría entenderse como un comportamiento para evitar los HTP de la superficie. Los grupos dominantes fueron hormigas, caracoles y lombrices. Los caracoles fueron dominantes en el sitio no contaminado (54%) de la abundancia total, y cuyo número decreció, entre mayor era el nivel de contaminación. En cambio, la proporción de hormigas, lombrices y escarabajos aumentó progresivamente mientras mayores eran los niveles de contaminación. En los sitios moderados y altamente contaminados, las lombrices representaron más del 58% y 71% de la biomasa, respectivamente. En el caso de las lombrices, se identificaron tres especies: *Pontoscolex corethrurus*, *Onychochaeta windlei*, ambas exóticas, y *Protozapotecia australis*, especie nativa. Esta especie se originó en esta área y, curiosamente, su abundancia fue mayor que la de *P. corethrurus* en el sitio altamente contaminado. Hasta donde sabemos, éste es el primer reporte de la presencia de *Protozapotecia australis* en suelos contaminados con hidrocarburos y su tolerancia a altas concentraciones de 8150mg/kg de HTP. Se sabe que las lombrices nativas son muy sensibles a la perturbación del suelo y,

normalmente, *Pontoscolex corethrurus* reemplaza a las especies nativas. Aquí no se vio ese patrón; esto sugiere que la especie *Protozapotecia australis* han evolucionado y se ha adaptado a suelos que siempre han tenido "chapopote" o alquitrán en la superficie del suelo; es decir, con alta concentraciones de HTP.

Mesofauna

La densidad de la mesofauna (ácaros y colémbolos) fue significativamente más alta en el suelo medianamente contaminado que en el suelo control (Fig.13), para el caso de los ácaros, Oribatida fue la orden más representada en los tres sitios, seguido del Mesostigmata y Prostigmata, que sólo estaban presentes en los sitios no contaminado y moderadamente contaminado. Los colémbolos estuvieron presentes tres veces más en el sitio moderadamente contaminado. Las familias de colémbolos se distribuyeron de manera muy diferente en cada uno de los tres sitios. La familia Odontelidae en el sitio no contaminado fue dominante, y apenas estuvo presente en el sitio medianamente contaminado. Por otro lado, la familia Hypogastruridae fue

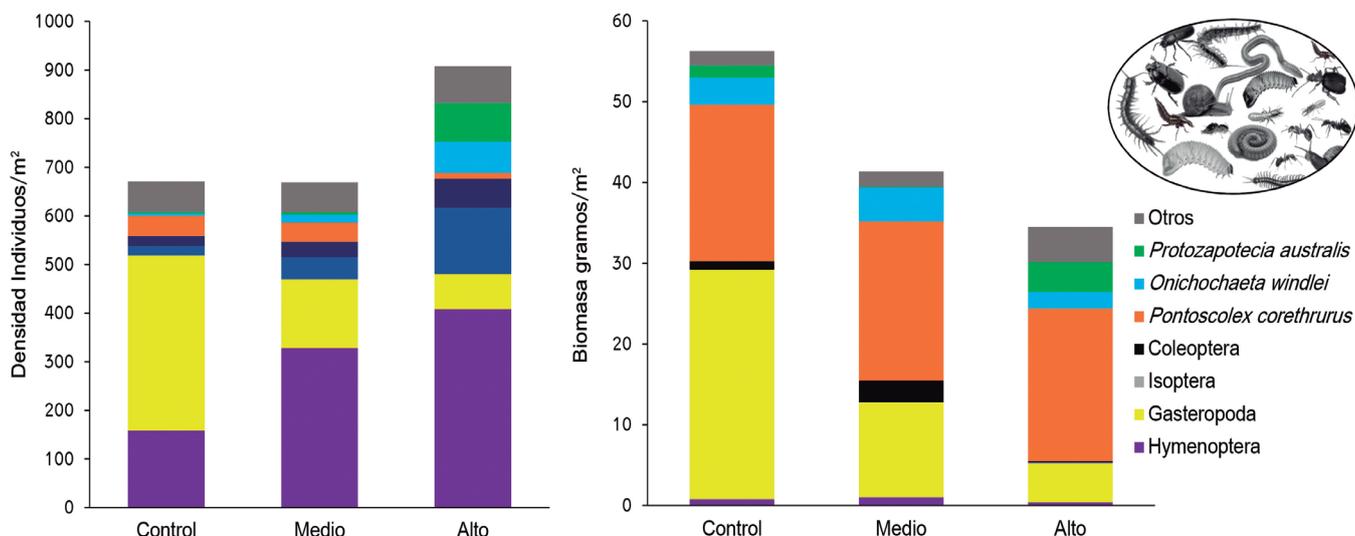


Figura 12. Densidad y biomasa total de macrofauna del suelo con la respectiva proporción de los taxa en los tres niveles de contaminación por HTP.

dominante en dicho sitio, y en el sitio de control hubo muy pocos. Ambos grupos de la mesofauna (ácaros y colémbolos) fueron más sensibles ya que hubo un cambio fuerte de sus proporciones de suelo no contaminado a suelo altamente contaminado.

Aunque a nivel de familia, los colémbolos pueden ser indicadores de contaminación, la familia Odontellidae puede indicar suelo no contaminado y la Hypogastruridae, suelo contaminado.

Estos resultados finalmente indican que el petróleo podría ser una fuente de alimento después de la oxigenación y la intemperie, y que existe una sucesión de fauna del suelo que da forma a las redes, en función de la concentración y composición de los HTP.

Aplicación de las tecnologías de biorremediación (bioaumentación, fitorremediación y vermirremediación)

Una vez caracterizado el sitio, se propuso la aplicación de biotecnologías *in situ* innovadoras en un pozo de petróleo del campo Miguel Alemán en Papantla, México. Se estableció una parcela piloto de 100 m² donde se probó la efectividad de la combinación de tres biotecnologías: bioaumentación (consorcio bacteriano encapsulado seleccionado por su capacidad degradadora de HTP), fitorremediación (*Panicum máximum* especie dominante en la zona) y vermirremediación (*Pontoscolex corethrurus* especie muy adaptable) para la biorremediación del suelo altamente contaminado con hidrocarburos. Estableciendo seis pilas (6x2mx40cm) (Fig.14) con el suelo del sitio altamente contaminado, el cual se homogenizó y distribuyó en dos tratamientos con tres réplicas cada uno, para evaluar la efectividad

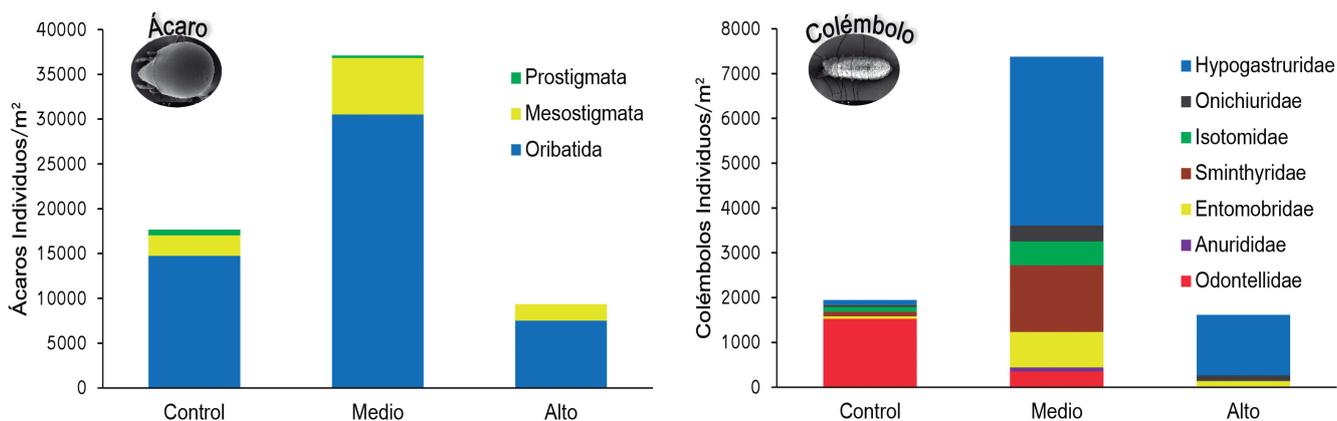


Figura 13. Densidad total de ácaros y colémbolos del suelo, proporción de orden o familia, respectivamente, en los tres niveles de contaminación por HTP

de la combinación de las tres biotecnologías (BIO) contra el suelo sin tratamiento alguno Atenuación Natural (AN), en la remoción de hidrocarburos totales de petróleo después de 112 días.

Una vez establecido el sistema piloto, se realizaron dos monolitos por cada pila con la metodología TSBF (descrita arriba) para conocer el estatus de la población de lombrices y las características fisicoquímicas del suelo inicial; posterior al tratamiento BIO se realizó lo siguiente:

- 1) Se sembraron cinco pastos por metro cuadrado, de la especie *Panicum máximum* de 135.55 ± 9.0 cm de altura con un solo tallo.
- 2) Se aplicaron cinco dosis por metro cuadrado cada, una con 2 mil cápsulas de consorcio bacteriano (CIATEJ-MX2), con un peso de 16g. Se inocularon cerca de la raíz de los pastos recién sembrados.
- 3) Se inoculó una densidad de 55 lombrices de tierra por metro cuadrado de la especie *Pontoscolex corethrurus*, las cuales fueron colectadas en el área de estudio y en otros pastizales de sitios contaminados con hidrocarburos.

Las seis pilas experimentales se mantuvieron hidratadas durante 112 días con una humedad $\pm 70-80\%$, aplicando riego en la época de calor excepto en los días de precipitación. Estos porcentajes de humedad permiten que las lombrices, los pastos y las bacterias actúen de manera óptima. En el tratamiento AN se dejó que crecieran las arvenses de manera natural, sin más manejo.

Dinámica de *Pontoscolex corethrurus* durante la biorremediación

Transcurridos los 112 días, se realizaron nuevamente dos monolitos en cada una de las pilas para comparar la densidad y biomasa entre el tratamiento Biorremediación (BIO) contra la Atenuación Natural (AN), tres especies fueron identificadas desde el muestreo inicial: *Protozapotecia australis*, *Onychochaeta windlei* y *Pontoscolex corethrurus*. Transcurridos los 112 días, observamos cómo la inoculación de las lombrices fue efectiva pues fueron capaces de adaptarse al suelo altamente contaminado. Observamos que la densidad de lombrices (Fig.15) por metro cuadrado en BIO fue significativamente más alta (45 ind/m^2) comparada con el tratamiento AN donde la población inicial de lombrices

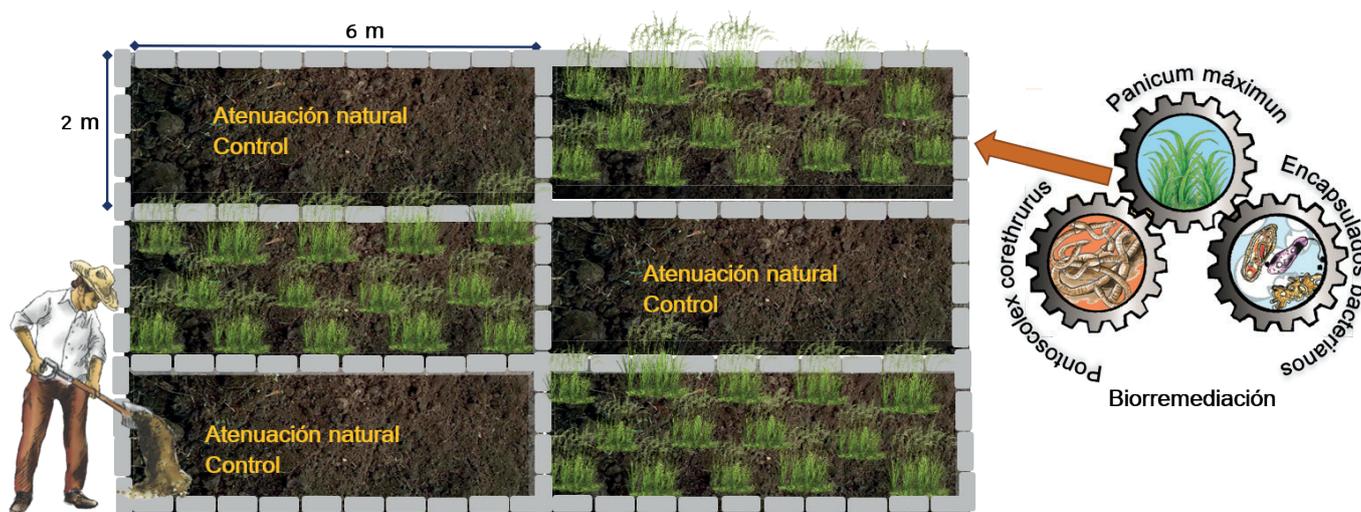


Figura 14. Diseño de parcela experimental; combinación de tres biotecnologías contra atenuación natural.

no logró aumentar transcurrido los 112 días; más bien hubo una disminución del 70% en la densidad de individuos respecto al inicio, por lo que la inoculación con la lombriz *Pontoscolex corethrurus* fue efectiva.

Las lombrices lograron desarrollarse en el suelo, lo que, a su vez, estimuló el desarrollo del pasto y, probablemente, el consorcio de bacterias para acelerar el proceso de remoción de los hidrocarburos en el suelo. Respecto a la biomasa de las lombrices, observamos un aumento del 75% en la biorremediación comparado con la atenuación natural, donde solamente se duplicó la biomasa del muestreo inicial al final del experimento; las otras dos especies de lombrices que estaban presentes en el suelo desde el establecimiento de la planta piloto no lograron ser representativas ni en densidad ni en biomasa, aunque *Protozapotecia australis*, la especie nativa no se desarrolló más. Sin embargo, habría que estudiar su forma de propagación

para hacer más efectiva su actividad biológica en la remoción de hidrocarburos. *Pontoscolex corethrurus*, por su alta adaptabilidad logró tolerar la alta concentración de hidrocarburos y desarrollarse adecuadamente.

Crecimiento de *Panicum máximum* durante la biorremediación

Después de 112 días, los pastos alcanzaron en promedio una altura de 97.2 ± 10.4 cm, con 18.8 ± 1.9 brotes, desarrollaron 1.8 ± 0.3 inflorescencias y produjeron semillas en las tres pilas de experimentación. Al comparar el aporte de la biomasa acumulada entre *Panicum máximum* y las arvenses (malezas) (Fig.16). Se observó un aumento del 78% en la biomasa final acumulada en el tratamiento BIO con 545 g/m^2 comparado con el control (AN); de estos, el 60% de la biomasa fue aportada por *Panicum máximum*. Aunque no es una especie nativa, es un

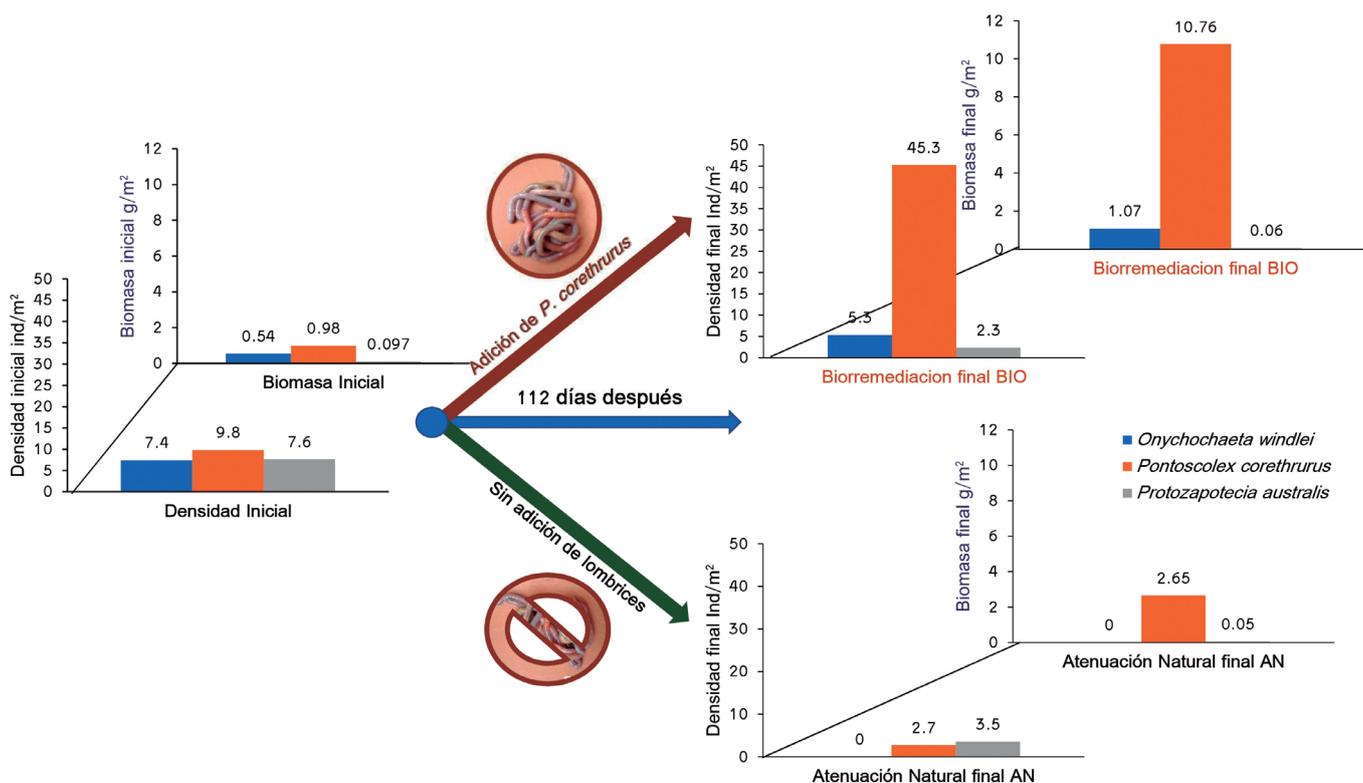


Figura 15. Densidad y biomasa de las especies de lombrices de tierra en el muestreo inicial y final después de 112 días de biorremediación.

pasto con distribución natural en la zona lo que garantizó su éxito de establecimiento. Incluso permitió un aumento del 46% en la biomasa de las arvenses comparado con el control.

Remoción de los hidrocarburos en las pilas

En el suelo de las pilas de experimentación se identificaron y cuantificaron 15 alcanos de cadena corta y larga (C10-C48). La concentración inicial de alcanos en el tratamiento de biorremediación (BIO) fue de 1410 ± 147 mg/kg, mientras que en el tratamiento control (AN) fue de 1278 ± 86 mg/kg (Fig.17). Del mismo modo, se identificaron y cuantificaron 16 HAPs de 2 a 6 anillos de benceno. La concentración inicial en el tratamiento BIO fue de 123 ± 15 mg/kg y AN de 124 ± 30 mg/kg. De los cuales los más importantes por su toxicidad y persistencia en el ambiente encontrados son: pireno (4.33 ± 0.34 mg/kg), criseno (3.51 ± 0.99 mg/kg), benzo[a]antraceno (7.46 ± 5.98 mg/kg), benzo[b]fluoranteno (3.13 ± 0.78 mg/kg), benzo[k]fluoranteno (14.77 ± 2.42 mg/kg), benzo[a]pireno (8.28 ± 1.28 mg/kg), dibenzo (a,h) antraceno (16.46 ± 8.31 mg/kg), indeno[1,2,3-c,d] pireno, benzo[g,h,i]perileno (13.31 ± 2.89 mg/kg). Para obtener la concentración de HTP, se sumaron las concentraciones de alcanos y HAPs, cuya concentración inicial en el tratamiento BIO y AN de 1533 ± 162 y 1402 ± 116 mg/kg respectivamente (Fig. 17). La remoción después de 112 días en el tratamiento AN fue de 23%; esta remoción no fue estadísticamente significativa respecto de la concentración inicial. La remoción en el tratamiento BIO a los 75 días fue del 45%, después de 112 días la remoción aumentó 31%, lo cual dio un total de 76% de remoción.

Este aumento en la remoción en el tratamiento de biorremediación podría deberse principalmente a la eficiencia de las biotecnologías y a la sinergia entre ellas. La inoculación de *Pontoscolex corethrurus* cumple una función muy importante, al fraccionar el suelo, mejorando sus condiciones,

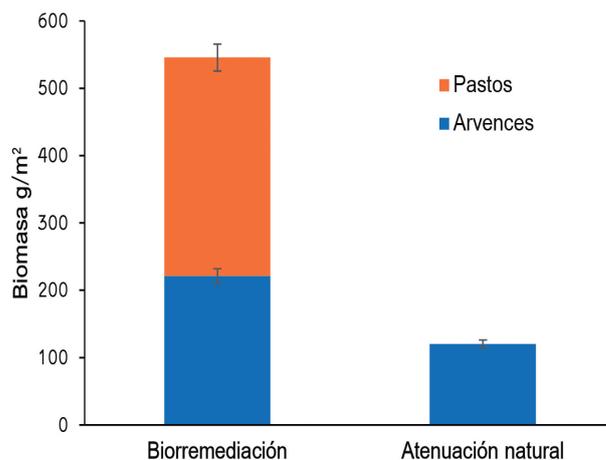


Figura 16. Biomasa de *Panicum maximum* crecido en las pilas de biorremediación y de arvenses crecidas en las pilas de atenuación natural.

proporcionando una mayor aireación, liberando nutrientes y, a su vez, estimulando la actividad microbiana a través de la digestión, aumentando la degradación del contaminante en el suelo. Además, las bacterias al interactuar con las raíces de las plantas y con las lombrices, ayudaron a que la remoción de los contaminantes se llevara a cabo de una manera más eficiente.

Conclusiones

Con la combinación de estas tres tecnologías de bajo costo, que son parte de la misma naturaleza, se logró la remoción de contaminantes del petróleo que han permanecido por mucho tiempo en el sitio de estudio, y han representado un riesgo para la salud del hombre, del ecosistema y, sobre todo, del suelo. El uso de pastos y lombrices de tierra del mismo sitio contaminado que ya están adaptadas a las condiciones, propició que las interacciones biológicas se realicen naturalmente. El aporte de microorganismos encapsulados seleccionados para la descomposición de los hidrocarburos, junto con los pastos y las lombrices promueven la descomposición acelerada de los contaminantes que, de lo contrario, tardarían décadas o siglos. Si

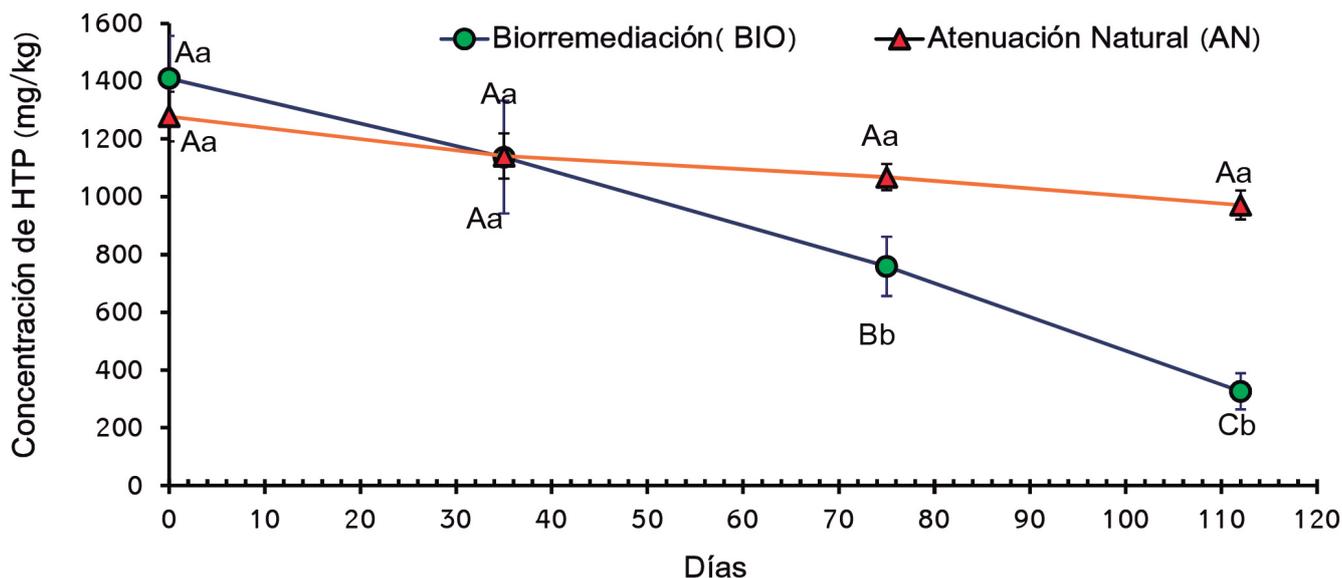


Figura 17. Concentración de HTP (mg/kg) detectada en el suelo de los dos tratamientos, biorremediación (BIO) y control (AN), a los días (0, 35, 75 y 112). Las letras mayúsculas significan diferencias significativas entre el tiempo del mismo tratamiento, las letras minúsculas significan diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos del mismo tiempo.

se emplean otras técnicas, éstas pueden ser más rápidas, pero mucho más costosas económica y energéticamente; mientras que, a veces, el problema de contaminación se transfiere al llevar a confinamiento parte del material.

Este documento demuestra la importancia del suelo y del petróleo. Ambos tienen en común el estar compuestos por materia orgánica y son recursos no renovables. El suelo tarda más de 100 años para formarse y el petróleo, millones de años. El suelo es fundamental dentro de los ecosistemas (Fig.1); no es sólo tierra y piso sobre el que caminamos, sino que participa en la mayoría de los servicios ambientales que ofrece un ecosistema: en términos de la biodiversidad y de la generosidad de los organismos que viven en él, que son benéficos tanto para la producción de alimentos como para limpiar y purificar tanto el mismo suelo, como el agua. El petróleo también nos ofrece grandes beneficios ya que es una fuente de energía muy efectiva y que es materia prima de muchos artículos necesarios para nuestra vida moderna (Fig.7). Sin embargo, su extracción y su uso han provocado grandes

problemas ambientales de contaminación y de aumento de gases de invernadero que están provocando el cambio climático.

Cada día se le demanda más al suelo para producir alimentos; así como al subsuelo porque se requiere más petróleo para solventar las demandas crecientes de la población humana. Por lo que debemos tomar consciencia del cuidado que requieren nuestros suelos para que se mantenga su fertilidad y nos puedan dar alimentos sanos y remediar los suelos contaminados. Asimismo, se deben extremar las medidas de extracción y manejo de petróleo para evitar pérdidas y contaminación por él y por las sustancias utilizadas para extraerlo (*fracking*). Estas medidas deben de tomarse tanto en mar como tierra. Además, se sabe que el petróleo es un material finito cuya extracción es cada vez más compleja, por lo que se deben buscar fuentes alternativas de energía para disminuir su consumo y reservarlo sólo para los materiales de los cuales no tenemos otra posibilidad de materia prima.

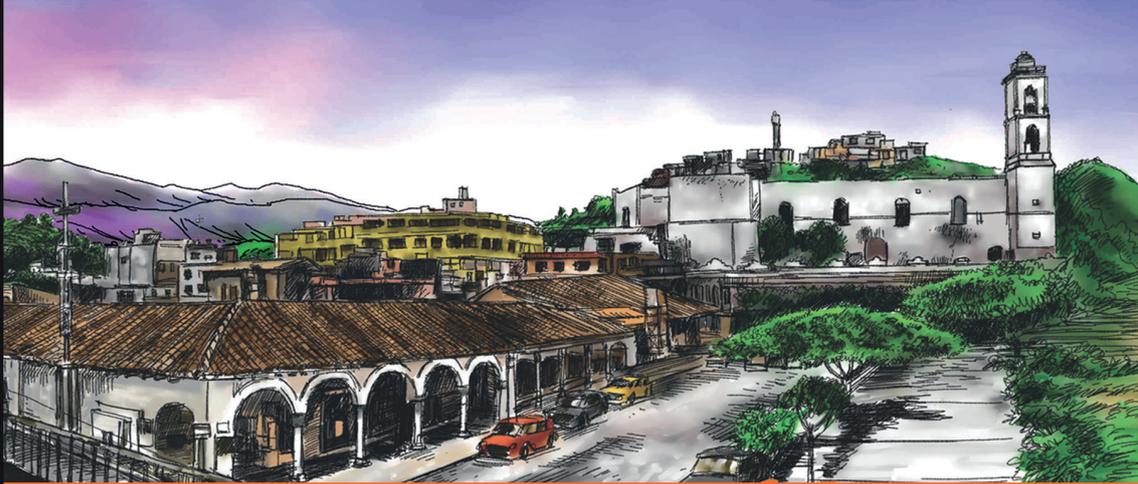
Literatura consultada

- Alarcón A. y Ferrera-Cerrato R. 2013. Biorremediación de suelos y aguas contaminadas con compuestos orgánicos e inorgánicos. 333p.
- Álvarez de la Borda, J. 2005. Los Orígenes de la industria Petrolera en México 1900-1925. Petróleos de México. 308p.
- Álvarez de la Borda, J. 2006. Crónica del petróleo en México de 1863 a nuestros días. Petróleos Mexicanos. 171p
- Carreón Blaine, E. A. 2016. Del hule al chapopote en la plástica mexicana. Una revisión historiográfica. *Travaux et Recherches dans les Amériques du Centre*. 70:9-44.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos. 2018. Reservas por campo. Disponible en: <http://portal.cnih.cnh.gob.mx/estadisticas.php>
- Capistran, F., E. Aranda y J.C. Romero. 2001. Manual de reciclaje, compostaje y lombricompostaje.
- Duchaufour Ph.1984. Abrégé de pédologie. 220p.
- García-Segura, D., Castillo-Murrieta, I.M., Martínez-Rabelo, F., Gómez-Anaya, A., Rodríguez-Campos, J., Hernández-Castellanos, B., Contreras-Ramos, S.M., e I. Barois. 2018. Macrofauna and mesofauna from soil contaminated by oil extraction. *Geoderma* 332: 180-189.
- Gobierno de México. 2018. Refinación. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/6977/Refinacion_Web.pdf.
- Hernández-Castellanos, B., Ortiz-Ceballos, A., Martínez-Hernández, S., Noa-Carrazana, J.C., Luna-Guido, M., Dendooven, L., Contreras-Ramos, S.M., 2013. Removal of benzo(a)pyrene from soil using an endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* (Müller, 1857). *Appl. Soil Ecol.* 70, 62–69.
- https://www.mapama.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto_ambiental.aspx
- Haygarth, P. & Ritz, K. (2009). The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*, 26: S187-S197
- International Agency for Research on Cancer (IARC). 2015. Agents Classified by the IARC Monographs, 1–122. <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>
- Karyanto, A., C. Rahmadi, E. Franklin, F. Susilo y J. Wellington de Moraes. 2012. Capítulo 4: Collembola, acari y otra mesofauna del suelo: el método Berlese. pp. 149-162. En: Fátima M. S. Moreira, E. J. Huisin y D. E. Bignell (eds.). *Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad bajo el suelo*. Instituto Nacional de Ecología, México. 350 p.
- Moreira F. M. S., Jeroen Huisin E. y D. E. Bignell (2012) *Manual de biología de suelos tropicales. Muestreo y caracterización de la biodiversidad*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales -Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT) 350pp. Esta también en línea http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/?id_pub=667.
- Ortiz R, Siebe C, Díaz G y S. Cram. 2007. Fuentes de hidrocarburos en suelos orgánicos. *Terra latinoamericana* 25(2): 105-113.

- Ortiz, R, S. Cram y I. Sommer. 2012. Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en suelos de la llanura aluvial baja del estado de Tabasco, México. *Universidad y ciencia trópico húmedo*. 28(2):131-144.
- Parque Bicentenario. 2018. Disponible en: <http://www.parquebicentenario.gob.mx/acerca/refineria.html>.
- Petróleos de México. 2018. Anuario estadístico 2017. Disponible en: http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Anuario%20Estadistico%20Archivos/anuario-estadistico_2017_es.pdf.
- Petróleos de México. 2018. Disponible en: <http://www.pemex.com/nuestro-negocio/infraestructura/Paginas/default.aspx>.
- Pinedo, J., Ibáñez, R., Lijzen, J.P.A., Irabien, A. 2014. Human risk assessment of contaminated soils by oil products: total TPH content versus fraction approach. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 20, 1231–1248.
- Secretaría de Energía. 2018. Reforma energética, resumen ejecutivo. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/10239/Resumen_de_la_explicacion_de_la_Reforma_Energetica11.pdf.
- SEMARNAT/SSA, 2012. NORMA Oficial Mexicana NOM-138- Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. SEMARNAT, Diario Oficial de la Federación (DOF) 16 pp.
- Sistema de información energética. 2018. Secretaría de energía, México. Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx>.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA).2015 <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf>.
- Velasco, J.A. y Volke, T. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología 62 p.
- Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J.A. y D. A. De La Rosa Pérez. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología. 141p.
- Wendt, C. J. 2007. Los olmecas. Los primeros petroleros. *Arqueología Mexicana*. Vol.15 No. 87 (sept.-oct.), pp. 56-590.

**EL SUELO Y EL PETRÓLEO: ESTUDIO DE
CASO DE BIORREMEDIACIÓN EN PASIVO
AMBIENTAL DE PAPANTLA, MÉXICO.**

Se terminó de imprimir en 2018 en los talleres
del Instituto Literario de Veracruz, S. C.
Cuauhtémoc no. 2, altos, Col. 21 de marzo,
Xalapa, Ver.; tels. (228) 8401434 y 3186283
www.ilv.mx. Esta edición consta de 500
ejemplares.



Esta publicación forma parte de los resultados del proyecto “Combinación de Tecnologías de Biorremediación de Suelos para la Remediación y Protección de Ecosistemas Contaminados con Hidrocarburos” CLAVE 247619. Financiado por CONACyT-Convocatoria Atención de Problemas Nacionales, ejecutado por el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del estado de Jalisco (CIATEJ), Instituto de Ecología A.C. (INECOL) y la Universidad Veracruzana (UV). Si bien ya existen valiosos manuales sobre biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, esta publicación muestra los resultados obtenidos en dicho proyecto como una alternativa de biorremediación para México.

De manera general se explica que es el suelo, sus propiedades y sus funciones; así mismo se enfatiza que alberga una alta diversidad de formas de vida y es sumamente dinámico. También se analiza el origen del petróleo, su composición, sus usos, sus derivados, su explotación en México, y la contaminación que puede generar; finalmente se describe qué es la biorremediación en términos generales y se ilustra con los resultados de la aplicación de un paquete integral llevado a cabo en este proyecto para lograr la biorremediación de un suelo altamente contaminado con hidrocarburos.

El sitio biorremediado se localiza en la zona norte del estado de Veracruz (Papantla), en el que se combinaron tres tecnologías de este tipo: Bioaumentación (consorcios bacterianos encapsulados seleccionados por su capacidad degradadora de los hidrocarburos), Fitorremediación (pasto *Panicum máximum*) y Vermirremediación (lombriz de tierra *Pontoscolex corethrurus*).

El suelo y el petróleo son recursos naturales finitos que nos ofrecen múltiples materiales y/o servicios, por lo que su cuidado es esencial para que las próximas generaciones puedan vivir en un mundo sano y sustentable. De continuar con el ritmo actual de consumo de petróleo, las reservas se acabarán en menos de 150 años.

Esta publicación está dirigida a técnicos, profesionistas y público en general interesados en la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, con la intención de que la información y la metodología que aquí se exponen, se difundan e implementen.